

# GFZ



Helmholtz-Zentrum  
**POTS DAM**

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM

**DEUTSCHES  
GEOFORSCHUNGSZENTRUM**

Knut Kaiser, Judy Libra, Bruno Merz,  
Oliver Bens, Reinhard F. Hüttl (Hrsg.)

## **Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland**

Trends, Ursachen, Lösungen

Scientific Technical Report STR10/10



## Impressum

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM

**DEUTSCHES  
GEOFORSCHUNGSZENTRUM**

Telegrafenberg  
D-14473 Potsdam

Gedruckt in Potsdam  
Dezember 2010

ISSN 1610-0956

Die vorliegende Arbeit  
in der Schriftenreihe  
Scientific Technical Report (STR) des GFZ  
ist in elektronischer Form erhältlich unter  
[www.gfz-potsdam.de](http://www.gfz-potsdam.de) - Neuestes - Neue  
Publikationen des GFZ

Knut Kaiser, Judy Libra, Bruno Merz,  
Oliver Bens, Reinhard F. Hüttl (Hrsg.)

# **Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland**

Trends, Ursachen, Lösungen

Scientific Technical Report STR10/10



## Vorwort

Der Landschaftswasserhaushalt in Nordostdeutschland unterliegt einem umfassenden Wandel. Großräumig sinkende Grundwasser- und Seespiegel, verringerte Abflussmengen in den Fließgewässern und austrocknende Moore werden zunehmend in Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit als Ausdruck eines regionalen „Wasserdefizit-Syndroms“ thematisiert. Die durch einen vergleichbaren Naturraum gekennzeichnete (pleistozänes Tiefland, subkontinentales bis submaritimes Klima) und von ähnlichen hydrologischen Problemen betroffene Region reicht dabei über Nordostdeutschland im engeren Sinne hinaus. Sie umfasst neben den Bundesländern Brandenburg und Berlin sowie Mecklenburg-Vorpommern auch Teile von Sachsen, Sachsen-Anhalt und Niedersachsen. Dieses Gebiet repräsentiert insgesamt eine Fläche von ca. 70.000 km<sup>2</sup> bzw. ein Fünftel der Landesfläche von Deutschland.

Die von Experten und der interessierten Öffentlichkeit diskutierten Ursachen für die abnehmenden Wassermengen – eine regionalklimatisch ohnehin vorhandene „Stresssituation“ verstärkend – sind vielfältig und reichen von der Veränderung des Klimas über den Landnutzungswandel, das agrar- und forstwirtschaftliche Wassermanagement bis hin zu einer veränderten Wassernutzung in urbanen Gebieten. Lokal lässt sich jedoch in einigen Fällen auch eine Umkehr dieses regionalen Negativtrends beobachten, so beispielsweise in der Niederlausitz nach Verringerung der bergbaubedingten Grundwasserabsenkung oder in Teilen von Berlin nach Abnahme der kommunalen Grundwasserförderung.

Mit verschiedenen Maßnahmen wird versucht, die ökologischen Folgen des Wassermangels bzw. der Entwässerung zu begrenzen. Eine Vielzahl von Projekten in der betroffenen Region zielt darauf ab, nach Jahrzehnten der intensivierten Ableitung des Wasser nun möglichst wieder länger in der Landschaft zu belassen und den Wasserhaushalt zu revitalisieren.

Im Rahmen der von der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (Projekt „Georessource Wasser – Herausforderung globaler Wandel“) und dem Deutschen GeoForschungsZentrum – GFZ vom 22.-23.04.2010 in Potsdam veranstalteten Konferenz „Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen“ wurde eine umfassende Bestandsaufnahme zu diesem Thema erarbeitet. Die Konferenz stellte explizit die aktuelle Wasserhaushaltssituation und die Ursachen für die Entwicklung der letzten Jahrzehnte (und Jahrhunderte) in den Mittelpunkt. Es wurden 130 Teilnehmer aus der Wissenschaft, der Verwaltung und der Wirtschaft sowie von Verbänden begrüßt, die sich im Rahmen von Vorträgen und Posterbeiträgen sowie einer Halbtagesexkursion zu den Aspekten „Beobachtung und Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen“, „Gewässer-, Moor- und Landschaftsökologie“ und „Wassermanagement“ austauschten. Der vorliegende Konferenzband vereinigt 36 Fachbeiträge zu diesem Themenkomplex und beleuchtet neben Ursache-Wirkungsbezügen auch Lösungsansätze für die identifizierten Herausforderungen.

Für die Erarbeitung der Beiträge bedanken wir uns sehr herzlich bei den Autoren. Für die Organisation und Durchführung der Veranstaltung sowie die Finanzierung des Konferenzbandes sei der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften und dem Deutschen GeoForschungsZentrum gedankt.

Die Herausgeber

Potsdam, Dezember 2010

## *Current problems in the water budget of northeast Germany: trends, causes, solutions*

### **Preface**

The water budget in northeast Germany is undergoing a comprehensive change. The many facets of the regional „water deficit syndrome“ – widespread decrease in groundwater and lake levels, reduced discharge of watercourses and drying out of peatlands – are increasingly frequent topics in scientific, political and public forums. The affected region, a Pleistocene lowland with subcontinental to sub-maritime climate, extends over northeast Germany, covering the Federal States Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg and Berlin as well as parts of Sachsen, Sachsen-Anhalt and Niedersachsen. This region represents altogether an area of approx. 70,000 km<sup>2</sup>, almost one fifth of the national area of Germany.

The causes for the decreasing quantities of water in a region already experiencing climatic stress that have been proposed by experts and the interested public are diverse. They range from changes in the climate and in the land use in general to more specific causes such as changes in water management practices or in water use in urban areas. Contrasting trends, however, can also be found on the local level. For example, the groundwater levels are increasing locally in the Niederlausitz region due to decreased mining activity and in parts of Berlin due to reduced groundwater withdrawal for industry and drinking water.

Various measures are being implemented to limit the ecological consequences of the water shortage. After decades of efforts to intensify drainage, manifold projects are being carried out in the concerned region, aimed at retaining water in the landscape as long as possible and revitalising the water budget.

Within the framework of the German Academy of Science and Engineering (project „Geo-resource Water – The Challenge of Global Change“) and the GFZ German Research Centre for Geosciences, a conference on „Current problems in the water budget of northeast Germany: trends, causes, solutions“ was held in Potsdam on 22.-23.04.2010 to develop a comprehensive overview of this topic. The conference focussed explicitly on the current water budget situation and the causes for the development over the last decades (and centuries). 130 participants from research and educational institutions, municipal and state government, regional organisations and industry exchanged ideas through presentations and poster contributions as well as in a half-day excursion on topics ranging from „monitoring and modelling of hydrological parameters“, „surface water, peatland and landscape ecology“ and „water management“. This conference volume combines 36 of the expert contributions on these topics and provides, in addition to illustrating cause-effect relationships, various solutions for the identified challenges.

We would like to thank the authors for their contributions. In addition, we are grateful to the German Academy of Science and Engineering and the German Research Centre for Geosciences for the organisation and realisation of the meeting as well as their financial support for this volume of conference proceedings.

The Editors

Potsdam, December 2010

# Inhalt

|  |     |
|--|-----|
| <i>Appel, U., Dietrich, O., Lischeid, G., Steidl, J.:</i><br>Analyse der Wirkung von wasserwirtschaftlichen Anpassungsoptionen zur Minderung der Folgen des Klimawandels in großen Feuchtgebieten.....   | 9   |
| <i>Armenat, M., Pörtge, K.-H.:</i><br>Renaturierung – mehr als eine Maßnahme zur Regulierung des Landschaftswasserhaushaltes? Das Beispiel Schwarze Elster.....  | 16  |
| <i>Bauwe, A., Criegee, C., Glatzel, S., Scharnweber, T., Schröder, C., Manthey, M., Wilmking, M., Lennartz, B.:</i><br>Modellierung des Bodenwasserhaushaltes von Kiefernstandorten in Mecklenburg-Vorpommern von 1951 bis 2009 unter besonderer Berücksichtigung von Trockenstress..... | 23  |
| <i>Fleischhammel, P., Schoenheinz, D., Grünewald, U.:</i><br>Bergbaufolgeseen in der Lausitz – naturwissenschaftliche und administrative Herausforderungen bei ihrer Integration in die Gewässerlandschaft und die flussgebietsbezogene Bewirtschaftung.....                             | 29  |
| <i>Geiger, B., Stephani-Pessel, H., Steinhardt, U.:</i><br>Zwischen Trockenheit und Überflutung – die Notwendigkeit einer raumbezogenen Gesamtstrategie zum Umgang mit den Folgen des Klimawandels.....  | 34  |
| <i>Germer, S., Kaiser, K., Mauersberger, R., Stüve, P., Timmermann, T., Bens, O., Hüttl, R.F.:</i><br>Sinkende Seespiegel in Nordostdeutschland: Vielzahl hydrologischer Spezialfälle oder Gruppen von ähnlichen Seesystemen? .....  | 40  |
| <i>Hattermann, F.F., Huang, S.C., Koch, H.:</i><br>Simulation der Wirkung von Klimaänderungen und Klimamodellunsicherheit auf den Wasserhaushalt für deutsche Flusseinzugsgebiete.....   | 49  |
| <i>Heidt, L.:</i><br>Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsens .....  | 60  |
| <i>Hoffmann, T.G., Mehl, D.:</i><br>Entwicklung und Bereitstellung einer Bewertungsmethodik zur Beurteilung des Natürlichkeitsgrades des hydrologischen Regimes der Oberflächenwasserkörper (Fließgewässer und Seen) gemäß EU-WRRL im Land Sachsen-Anhalt.....                           | 68  |
| <i>Horsten, T., Krahe, P., Nilson, E., Oppermann, R.:</i><br>Modellgestützte Analyse der Variabilität des Wasserhaushalts im Havel-Spree-Gebiet.....   | 77  |
| <i>Jörns, S., Dammann, A., Hämmerling, R., Kappel, T., Schöfer, J., Zeckel, C.:</i><br>Umsetzung der Richtlinie Landschaftswasserhaushalt in Brandenburg.....  | 82  |
| <i>Juschus, O., Albert, H.:</i><br>Sinkende See- und Grundwasserstände im Naturschutzgebiet „Luchseemoor“ (Spreewald, Brandenburg) – Landschaftsgeschichtliche und hydrologische Befunde.....  | 86  |
| <i>Kasprzak, P., Koschel, R., Parparov, A.:</i><br>Sauerstoffmangel im Tiefenwasser des oligotrophen Stechlinsees: Kann die Klimaerwärmung eine Rolle spielen? .....   | 93  |
| <i>Kehl, C.:</i><br>Trocknet der Spreewald aus? Anpassungen des Wasserhaushaltes an aktuelle und zukünftige Herausforderungen im Rahmen eines Naturschutzgroßprojektes.....  | 98  |
| <i>Kobel, J., Spicher, V.:</i><br>Entwicklung der Wasserstände ausgewählter Seen und Renaturierung des Wasserhaushaltes im Müritznationalpark, Mecklenburg-Vorpommern.....   | 104 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Koch, F., Küchler, A., Mehl, D., Hoffmann, T.G.:</i>  |     |
| Ermittlung von Art und Intensität künstlicher Entwässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen in Mecklenburg-Vorpommern.....   | 110 |
| <i>Küster, M., Kaiser, K.:</i>   |     |
| Historische und aktuelle Gewässerentwicklung im Havel-Quellgebiet (Mecklenburg-Vorpommern).....  | 116 |
| <i>Landgraf, L.:</i>   |     |
| Moorschutz in Brandenburg: Beiträge zur Stützung des Landschaftswasserhaushaltes.....  | 125 |
| <i>Lasak, S., Hahn, J., Jurasinski, G., Köhler, S., Glatzel, S.:</i>   |     |
| Methanfreisetzungen im Rahmen des Auftauens eines überfluteten Küstenmoors.....  | 129 |
| <i>Lorenz, S., Rowinsky, V., Koch, R.:</i>   |     |
| Historische und rezente Wasserstandsentwicklung von Seen und Mooren im Naturpark „Nossentiner/Schwinzer Heide“ (Mecklenburg-Vorpommern) im Spiegel der Landnutzungsgeschichte.....   | 133 |
| <i>Mauersberger, R.:</i>   |     |
| Seespiegelanhebung und Grundwasseranreicherung im Naturschutzgroßprojekt „Uckermärkische Seen“ (Brandenburg).....  | 140 |
| <i>Meier-Uhlherr, R., Schulz, C., Luthardt, V.:</i>  |     |
| Moore unter Wassermangel auch ohne direkte Entwässerung? – Erhaltungszustände ausgewählter Moore im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin (Brandenburg) unter besonderer Berücksichtigung ihrer naturräumlichen Einbettung und klimatischer Entwicklungen..... | 145 |
| <i>Mey, S., Pfützner, B.:</i>  |     |
| Wassermangelsituation in Brandenburg – gekoppelte Grund- und Oberflächenwassermodellierung zur Unterstützung des Wassermanagements.....  | 153 |
| <i>Mietz, O., Vedder, F.:</i>  |     |
| Stabilisierung der hydrologischen Situation im Großen Seddiner See (Brandenburg) durch Überleitung von gereinigtem Nieplitzwasser.....   | 158 |
| <i>Natkhin, M., Steidl, J., Dietrich, O., Dannowski, R., Lischeid, G.:</i>   |     |
| Modellgestützte Analyse der Einflüsse von Veränderungen der Waldwirtschaft und des Klimas auf den Wasserhaushalt von Seen .....  | 167 |
| <i>Oldorff, S., Pätzolt, J.:</i>   |     |
| Nährstoffbelastung des Großen Stechlinsees von 1945 bis 2009 – historische Daten, Bilanzierung und Neubewertung.....   | 173 |
| <i>Quast, J., Messal, H.:</i>  |     |
| Grundwasserentnahme für Bewässerung und alternierende Wiederauffüllung des Absenkungstrichters durch Infiltration winterlicher Abflussüberschüsse oder von Klarwasser aus Kläranlagenabläufen.....   | 180 |
| <i>Ramelow, M., Kaden, S., Merz, C., Dannowski, R., Moss, T., Sondershaus, F.:</i>   |     |
| Maßnahmen und Methoden für ein nachhaltiges Wassermanagement zur Stabilisierung des Wasserhaushaltes kleiner Einzugsgebiete vor dem Hintergrund des Klimawandels am Beispiel des Fredersdorfer Mühlenfließes (Brandenburg).....                                | 185 |
| <i>Schäfer, D., Miles, B., Zühlke, K.:</i>   |     |
| Modellgestützte Analysen des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet Potsdamer Wasserwerke und Ableitung von Bewirtschaftungsempfehlungen unter Berücksichtigung standortbezogener Klimaprojektionen.....  | 191 |
| <i>Strauch, M., Ullrich, A., Lorz, C., Volk, M.:</i>   |     |
| Auswirkungen von Klimaänderungen und Energiepflanzenanbau auf den Wasser- und Stickstoffhaushalt im Parthe-Einzugsgebiet – Modellierung mit SWAT. ....   | 200 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Stüve, P.:</i><br>Die Wasserhaushaltssituation der letzten 40 Jahre im Raum der Neustrelitzer Kleinseenplatte (Süd-Mecklenburg).....  | 206 |
| <i>Thomas, B., Steidl, J., Dietrich, O., Lischeid, G.:</i><br>Quantifizierung der Wirkung wasserwirtschaftlicher Anpassungsoptionen zur Minderung kritischer Niedrigwasserabflüsse in kleinen Einzugsgebieten..... | 212 |
| <i>Timmermann, T.:</i><br>Wasserstandsschwankungen und Vegetationsdynamik in Kesselmooren: interne und externe Faktoren.....   | 218 |
| <i>Wichern, J., Biemelt, D., Grünewald, U.:</i><br>Analyse und Bewertung von Einflüssen auf den Wasserhaushalt von Seen auf eiszeitlichen Hochflächen des Ostbrandenburger Heide- und Seengebietes.....            | 223 |
| <i>Wixwat, T.:</i><br>Klimawandel und Grundwasserneubildung in Niedersachsen.....  | 229 |
| <i>Zachow, B., Miegel, K.:</i><br>Wasserhaushalt landwirtschaftlich genutzter Böden in Mecklenburg-Vorpommern.....   | 235 |

## Contents (Abstracts)

|  |     |
|--|-----|
| <i>Appel, U., Dietrich, O., Lischeid, G., Steidl, J.:</i><br>Analysis of the effect of water management options for mitigating the impacts of climate change in large wetlands.....  | 9   |
| <i>Armenat, M., Pörtge, K.-H.:</i><br>Renaturation – more than just a measure to regulate the regional water balance? The example of the river “Schwarze Elster”.....  | 16  |
| <i>Bauwe, A., Criegee, C., Glatzel, S., Scharnweber, T., Schröder, C., Manthey, M., Wilmking, M., Lennartz, B.:</i><br>Soil water balance modeling of scots pine stands in Mecklenburg-Vorpommern from 1951 to 2009 under special consideration of drought stress..... | 23  |
| <i>Fleischhammel, P., Schoenheinz, D., Grünewald, U.:</i><br>Post-mining lakes in the Lausitz area – natural, scientific and administrative challenges for their integration into the hydrologic system and for water management.....                                  | 29  |
| <i>Geiger, B., Stephani-Pessel, H., Steinhardt, U.:</i><br>Between drought and flooding – the need for a space-oriented overall strategy to adapt to the implications of climate change.....   | 34  |
| <i>Germer, S., Kaiser, K., Mauersberger, R., Stüve, P., Timmermann, T., Bens, O., Hüttl, R.F.:</i><br>Decreasing lake levels in Northeast Germany: a multitude of individual hydrologic cases or rather groups of similar lake systems? .....                          | 40  |
| <i>Hattermann, F.F., Huang, S.C., Koch, H.:</i><br>Simulation of climate change impacts and related uncertainties for water resources in German river catchments.....  | 49  |
| <i>Heidt, L.:</i><br>Effects of climate change on the potential irrigation demand in Northeast-Lower Saxony.....   | 60  |
| <i>Hoffmann, T.G., Mehl, D.:</i><br>Assessment of the naturalness of the hydrological regime of rivers and lakes in the Federal State of Sachsen-Anhalt under the terms of the European Water Framework Directive.....   | 68  |
| <i>Horsten, T., Krahe, P., Nilson, E., Oppermann, R.:</i><br>Model-based analysis of the variability in the water balance in the Havel-Spree basin.....  | 77  |
| <i>Jörns, S., Dammann, A., Hämmerling, R., Kappel, T., Schöfer, J., Zeckel, C.:</i><br>Implementation of a funding guideline to improve the landscape water budget in Brandenburg.....   | 82  |
| <i>Juschus, O., Albert, H.:</i><br>Decreasing lake and groundwater levels in the natural reserve „Luchseemoor“ (Spreewald area, Brandenburg) – landscape historical and hydrological records.....  | 86  |
| <i>Kasprzak, P., Koschel, R., Parparov, A.:</i><br>Oxygen decline in an oligotrophic deep lake (Lake Stechlin, Germany): Can climate warming be the ultimate reason? .....   | 93  |
| <i>Kehl, C.:</i><br>Is the Spreewald wetland drying out? Adaptation of the landscape water budget on future challenges by means of a large nature conservation project.....  | 98  |
| <i>Kobel, J., Spicher, V.:</i><br>Water level trends in some lakes and restoration of the water budget in the Müritz National Park, Mecklenburg-Vorpommern.....  | 104 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Koch, F., Küchler, A., Mehl, D., Hoffmann, T.G.:</i>   |     |
| Determining mode and intensity of artificial drainage of agricultural land in Mecklenburg-Vorpommern .....  | 110 |
| <i>Küster, M., Kaiser, K.:</i>  |     |
| Historical and current development of the headwaters of the Havel River (Mecklenburg-Vorpommern).....   | 116 |
| <i>Landgraf, L.:</i>  |     |
| Peatland conservation in Brandenburg: contributions to the stabilisation of the landscape water budget.....   | 125 |
| <i>Lasak, S., Hahn, J., Jurasinski, G., Köhler, S., Glatzel, S.:</i>  |     |
| Seasonal methane release during the thawing of a flooded coastal Peatland.....  | 129 |
| <i>Lorenz, S., Rowinsky, V., Koch, R.:</i>  |     |
| Historical and recent water-level changes of lakes and peatlands in the Nature Park „Nossentiner/Schwinzer Heide“ (Mecklenburg-Vorpommern) as mirrored by the land use history.....   | 133 |
| <i>Mauersberger, R.:</i>  |     |
| Lake-level rise and increasing groundwater recharge as results of the large-scale nature conservation project „Uckermärkische Seen“ (Brandenburg).....  | 140 |
| <i>Meier-Uhlherr, R., Schulz, C., Luthardt, V.:</i>   |     |
| Mires suffering from water shortage even without direct anthropogenic drainage? – Status of selected mires in the biosphere reserve Schorfheide-Chorin (Brandenburg) under special consideration of landscape properties and climate change ..... | 145 |
| <i>Mey, S., Pfützner, B.:</i>   |     |
| Water scarcity in Brandenburg – supporting water management by coupled modelling of surface and subsurface water.....   | 153 |
| <i>Mietz, O., Vedder, F.:</i>   |     |
| Hydrological stabilisation of lake Großer Seddiner See (Brandenburg) using a transfer of purified water from Nieplitz River.....  | 158 |
| <i>Natkhin, M., Steidl, J., Dietrich, O., Dannowski, R., Lischeid, G.:</i>  |     |
| Model-based analysis of how changes in forest management and climate influence the water budget of lakes.....   | 167 |
| <i>Oldorff, S., Pätzolt, J.:</i>  |     |
| Nutrient loading of Lake Stechlin from 1945 to 2009 – historical data, balances and re-evaluation.....  | 173 |
| <i>Quast, J., Messal, H.:</i>   |     |
| Alternating groundwater withdrawal for irrigation and recharge through infiltration of winter surplus runoff or treated wastewater.....   | 180 |
| <i>Ramelow, M., Kaden, S., Merz, C., Dannowski, R., Moss, T., Sondershaus, F.:</i>  |     |
| Measures and methods for a sustainable water management of small catchments aiming at a stabilisation of the water budget – example stream “Fredersdorfer Mühlenfließ” (Brandenburg).....   | 185 |
| <i>Schäfer, D., Miles, B., Zühlke, K.:</i>  |     |
| Model-based analysis of the water budget in the catchment areas of Potsdam waterworks and recommendations for management options considering climate change .....   | 191 |
| <i>Strauch, M., Ullrich, A., Lorz, C., Volk, M.:</i>  |     |
| Impacts of climate change and energy crop production on the water and nitrogen balance of the River Parthe catchment – modelling with SWAT.....   | 200 |
| <i>Stüve, P.:</i>   |     |
| The water budget situation of the last 40 years in the „Neustrelitzer Kleinseenplatte“, southern Mecklenburg.....   | 206 |
| <i>Thomas, B., Steidl, J., Dietrich, O., Lischeid, G.:</i>  |     |
| Quantifying the effects of water management options for reducing critical low flow in small watersheds.....   | 212 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Timmermann, T.:</i>   |     |
| Water level fluctuations and vegetation changes in kettle hole mires: internal and external factors.....                 | 218 |
| <i>Wichern, J., Biemelt, D., Grünewald, U.:</i>  |     |
| Analysis and evaluation of influences on the water balance of lakes located on glacial plateaus of east Brandenburg..... | 223 |
| <i>Wixwat, T.:</i>   |     |
| Climate change and groundwater recharge in Lower Saxony.....   | 229 |
| <i>Zachow, B., Miegel, K.:</i>   |     |
| Water balance of farmland soils in Mecklenburg-Vorpommern.....   | 235 |

## Analyse der Wirkung von wasserwirtschaftlichen Anpassungsoptionen zur Minderung der Folgen des Klimawandels in großen Feuchtgebieten

Ute Appel, Ottfried Dietrich, Gunnar Lischeid, Jörg Steidl

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Institut für Landschaftswasserhaushalt, Eberswalder Straße 84, 15374 Müncheberg, appel@zalf.de

**Zusammenfassung:** Die Wasserbewirtschaftung in großen Feuchtgebieten muss zukünftig flexibler gestaltet werden, um besser auf zunehmende Witterungsextreme und heterogene Anforderungen der Flächennutzer reagieren zu können. Für Ostdeutschland stellen die geringen und vermutlich zukünftig weiter abnehmenden Sommerniederschläge und die ansteigende potentielle Verdunstung ein gravierendes Problem für den Erhalt ausgedehnter Feuchtgebiete dar. Im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes KLIMZUG - INKA BB sollen wasserwirtschaftliche Anpassungsoptionen an den Klimawandel untersucht werden. Die experimentelle Überprüfung und Optimierung der Wirkung der Steuerung des Grundwasserspiegels in grundwassernahen Niederungen soll mittels moderner wägbarer Grundwasserlysimeter durchgeführt werden, die 2010 auf einer Fläche mit typischen Eigenschaften des Feuchtgebiets Spreewald installiert wurden. In einem ersten Schritt wurden Vorversuche durchgeführt, bei denen unter anderem für jedes Lysimeter eine Speicherkennlinie aufgenommen wurde. Bei der Betrachtung des entwässerbaren Porenvolumens können drei Schichten unterschieden werden, deren Eigenschaften mit denen der vorgefundenen Bodenhorizonte korrespondieren. Dabei kann auch die für den Spreewald typische Klocksicht charakterisiert werden. Zudem ist bei der Speicherkennlinie ein Hystereseeffekt zu erkennen, dass heißt eine Abweichung der Kurven von Be- und Entwässerung. Dieser Hystereseeffekt zeigt sich auch bei der Wasserspannungskurve. Erste Erklärungsansätze sind neben bodenphysikalischen Eigenschaften auch das Vorhandensein einer stauenden Klocksicht und Frosteffekte im Oberboden.

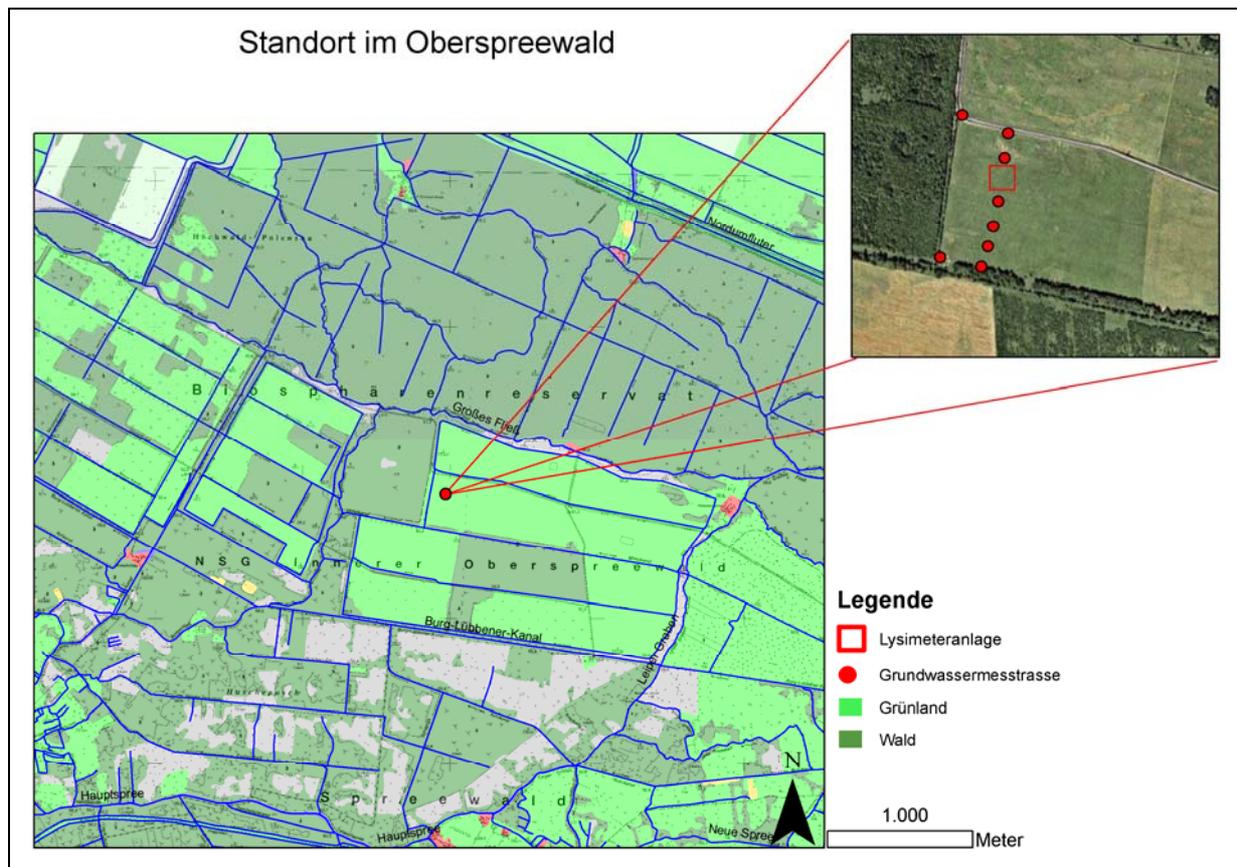
### Analysis of the effect of water management options for mitigating the impacts of climate change in large wetlands

**Abstract:** In the future, water management of large, agricultural used wetlands must be designed in a more flexible way in order to adapt to the increasing number of extreme weather situations and the heterogeneous requirements of stakeholders. Within the framework of the BMBF-funded cooperative research project INKA BB water management options under climate change are developed. The evaluation of the effects of groundwater level management in wetland areas is investigated by modern weighable groundwater lysimeters, which are located in an area typical for the Spreewald wetland. In the beginning of the project, the level-storage relationship was determined. Considering the drainable pore volume, three different soil layers can be distinguished whose characteristics correspond well with those of the identified soil horizons. Thereby a typical soil horizon (flood loam) of the Spreewald wetland can be characterised. There was a distinct hysteresis effect visible in the storage characteristic and the water retention curve. A possible explanation for this effect could be, besides soil physical properties, the presence of an impeding soil layer and frost effects in the top soil.

#### 1. Einführung

Untersuchungen zu den Folgen des Klimawandels zeigen, dass der Wasserhaushalt großer Feuchtgebiete im nordostdeutschen Raum voraussichtlich besonders von zunehmender Trockenheitsgefährdung betroffen sein wird (Zebisch et al, 2005; Holsten et al., 2009). Die Verdunstung wird demnach in den Feuchtgebieten weiter ansteigen, Niederschlag und Zuflüsse aus den Einzugsgebieten zurückgehen. Das verfügbare Wasserdargebot wird bei den gegenwärtigen Praktiken der Landnutzung und Wasserbewirtschaftung nicht ausreichen und große Teile der Gebiete werden ihren Feuchtgebietscharakter verlieren (Renger et al., 2002; Dietrich, 2006; Schwarzel et al., 2006).

Die Wasserbewirtschaftung in den großen Feuchtgebieten muss daher zukünftig flexibler gestaltet werden, um besser auf zunehmende Witterungsextreme und heterogene Anforderungen der Flächennutzer reagieren können (Dietrich et al., 2007). Dieses Ziel soll von dem Teilprojekt 20 des BMBF-Verbundprojektes INKA BB (Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg/Berlin) realisiert werden. In diesem Zusammenhang sollen die Wirkung ausgewählter wasserwirtschaftlicher Handlungsoptionen auf Verdunstung, Wasserentnahme, Wasserabfluss und -speicherung im Gebiet untersucht und Grundlagen für flexible Wasserbewirtschaftungssysteme der Zukunft entwickelt werden.



**Abb. 1:** Untersuchungsstandort im Oberspreewald mit Lysimeteranlage, Wetterstation und Grundwassermesstrasse.

Als Anpassungsoptionen werden unter anderem Modifizierungen der Stauziele, z.B. die Anhebung der Winterstauziele und ihre spätere Absenkung im Frühjahr sowie eine Optimierung der Steuerung wasserwirtschaftlicher Anlagen in Abhängigkeit der jeweils herrschenden meteorologischen und hydrologischen Situation betrachtet. Mit der Entwicklung und Prüfung von wasserwirtschaftlichen Anpassungsoptionen zur Minderung der Folgen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt von Feuchtgebieten werden Voraussetzungen für die Entwicklung von Strategien zur vorausschauenden Bewirtschaftung der Wasserressourcen in Tieflandinzugsgebieten mit hohen Feuchtgebietsanteilen geliefert. Wasserhaushalt, Landnutzung, Umwelt- und Ressourcenschutz stehen hier in enger Wechselbeziehung und bei begrenzter Wasserverfügbarkeit in zunehmendem Nutzungskonflikt untereinander und mit den Ansprüchen anderer Wassernutzer im Einzugsgebiet. Die Anpassungsoptionen werden in Zusammenarbeit mit dem Wasser- und Bodenverband „Oberland Calau“ (WBV) und dem Landesumweltamt Brandenburg (LUA) im Untersuchungsgebiet Spreewald entwickelt und erprobt.

## 2. Standort

Die Versuchsfläche befindet sich im Oberspreewald in der Stauabsenkung Nord (Abb. 1). Das Stauabsenkungsgebiet ist in den 1970er Jahren für eine intensive landwirtschaftliche Nutzung durch die Anlage von Verwalungen, Schöpfwerken und Meliorationsgrabensystemen umgestaltet worden. Dieses System gliedert sich in das System aus Staugürteln des Oberspreewaldes ein, zeich-

net sich jedoch durch die an eine zweischürige Grünlandwirtschaft angepasste Stauhaltung aus. Dieses stark ausgebaute Regulierungssystem ermöglicht auch die differenzierte Steuerung der Stauhöhen des Spreewaldes, welche ein vorausschauendes Wassermanagement in dem Umfang überhaupt erst ermöglicht. Die Versuchsfläche selbst wird als Mähweide genutzt. Die Böden sind in Senken als Anmoor und sonst als Humusgleye anzusprechen. Lokal wurden Lehmänder vorgefunden, die als standorttypische Klocksichten einzuordnen sind. Die Grundwasserflurabstände unterliegen jahreszeitlichen Schwankungen. Sie variieren zwischen 0 cm und 60 cm unter Flur.

## 3. Methode

Die Arbeiten gliedern sich in drei methodische Teile, die eng miteinander verzahnt sind. Der erste Teil umfasst die Durchführung von Lysimeterversuchen zur Erfassung der Wasserhaushaltsgrößen bei unterschiedlichen Wassermanagementoptionen und die Errichtung von Transekten mit Grundwasserbeobachtungsrohren und Grabenwasserstandspegeln zur Ermittlung der Wechselwirkungen zwischen dem Gewässer und der angrenzenden Fläche.

Der zweite Teil enthält die Anwendung der gewonnenen Ergebnisse zur Parametrisierung, Kalibrierung und Verifizierung eines Wasserhaushaltsmodells für grundwasser-nahe Standorte. Im Anschluss werden mit von Projektpartnern bereitgestellten, aktuellen Klimaszenarien Szenarioanalysen durchgeführt und die Wirkungen der

Anpassungsoptionen unter veränderten Klimabedingungen bewertet.

Im letzten Schritt schließt sich der Transfer der Ergebnisse in die Praxis an, indem ein Katalog mit Empfehlungen für eine klimaangepasste Wasserbewirtschaftung in Feuchtgebieten erstellt wird.

### 3.1 Lysimeteranlage, Wetterstation und bodenhydrologischer Referenzmessplatz

Die Lysimeteranlage wurde direkt in der Versuchsfläche in Containerbauweise errichtet. Die Monolithen wurden vor Ort ungestört entnommen und im Anschluss am gleichen Ort in die Anlage eingesetzt. Die Gruben, die durch das Stechen der Lysimeter temporär entstanden sind, wurden für eine Bodenansprache und -analyse genutzt, da die Schichten denen der gestochenen Monolithen entsprechen. Durch die direkte Platzierung am Untersuchungsstandort entfällt das Problem des Oaseneffektes.

Bei der Lysimeteranlage handelt es sich um den Typ des wägbaren Grundwasserlysimeters, der von Meissner (2000) entwickelt und von Bethge-Steffens et al. (2005) erprobt wurde, um Flussauenstandorte zu untersuchen. Die entnommenen Bodensäulen haben eine Oberfläche von 1 m<sup>2</sup> und sind 2 m tief. Zur Erfassung bodenhydrologischer Parameter ist jedes Lysimeter mit TDR-Sonden, Tensiometern sowie Thermometern in den Tiefen 30, 60 und 90 cm ausgestattet. Die Bodenmonolithe stehen jeweils auf drei Präzisions-Scherstab-Wägezellen, die nach Bethge-Steffens et al. (2005) selbst kleine Niederschläge wie Tau oder Reif sowie geringe Verdunstungsraten aufzeichnen können. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, befinden sich direkt neben der Lysimeterstation die Wetterstation und der bodenhydrologische Referenzmessplatz. Zudem ist noch ein Referenzpegel auf der

Fläche eingebaut worden, der die Grundwasserstände der umliegenden Fläche repräsentiert.

### 3.2 Lysimetersteuerung

Aufbauend auf der automatischen Grundwassersteuerung von Meissner (2000) wird im Rahmen dieses Projektes eine erweiterte Steuerung zur Simulation von Wassermanagementoptionen entwickelt und erprobt. Bei Meissner (2000) wird die automatische Grundwassersteuerung zur Nachbildung der natürlichen Grundwasserstandsdynamik von Flussauen verwendet. Dies ist möglich, da der Grundwasserflurabstand im Lysimeter bei gleichzeitiger Erfassung der dazu benötigten Wasservolumina zu regulieren ist.

Für die Erprobung der Wassermanagementoptionen wurde die Steuerung dahingehend erweitert, dass die Pegelstände durch Zeitreihen vorgegeben werden, von einem anderen Pegel eines anderen Lysimeters übernommen oder dem Referenzmessplatz angepasst werden können, was der Steuerung von Meissner (2000) entspräche. Zudem soll eine Steuerung nach einem bestimmten Durchfluss, d.h. Zu- oder Abfluss realisiert werden, welcher bei Bedarf ebenfalls von einem anderen Lysimeter übernommen oder als Zeitreihe vorgegeben werden kann. Auch soll es möglich sein, eine konstante oder dynamische Wasserspiegeldifferenz zur Referenz (Offset) vorzugeben, wobei auch hier zwischen Pegel- und Durchflussoffset differenziert werden kann. Da auch Grenzwerte sowohl als Zeitreihen als auch als feste Werte vorgegeben oder von anderen Lysimetern übernommen werden können, ergibt sich daraus ein großes Spektrum kombinatorischer Möglichkeiten für die Steuerung der Lysimeter.

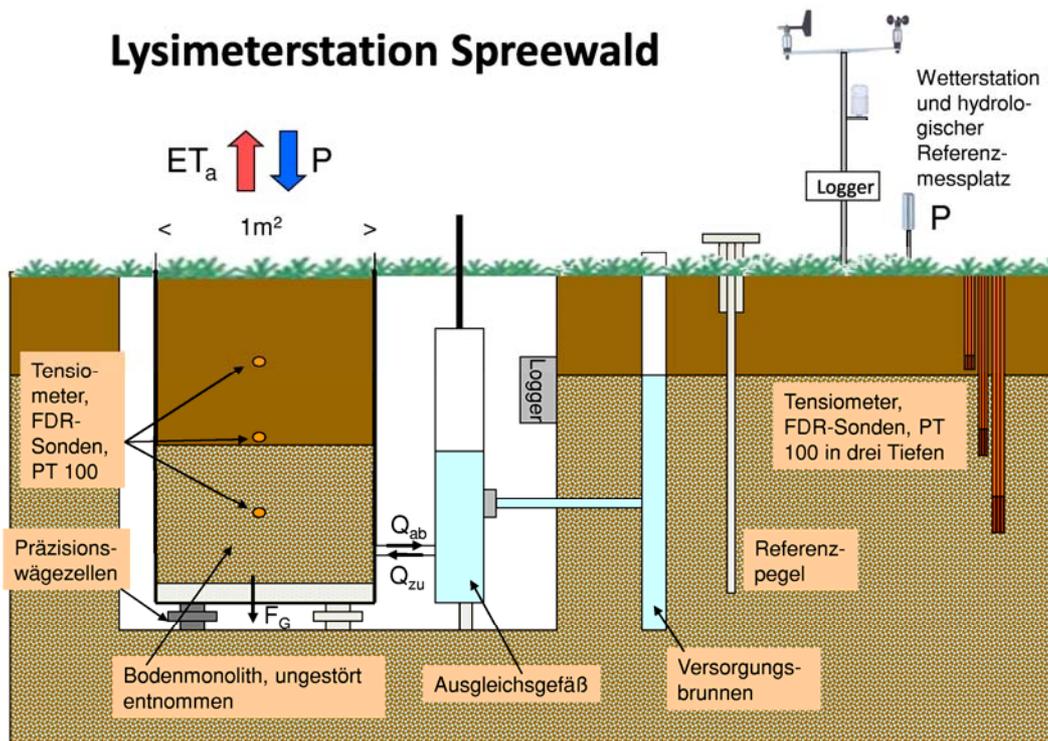


Abb. 2: Prinzipskizze der Installation eines wägbaren Grundwasserlysimeters am grundwassernahen Untersuchungsstandort.

### 3.3 Vorversuche und simulierte Managementoptionen der ersten Vegetationsperiode

Mit den geschaffenen experimentellen Voraussetzungen ist es möglich, den Nachweis der Wirkung von Wassermanagementoptionen auf die verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen zu führen. Im ersten Schritt wurden vor Beginn der eigentlichen Untersuchungen Speicherkennlinien für die einzelnen Monolithen aufgenommen. Dabei wurde zu jeder Änderung des Pegelstandes das zugehörige Wasservolumen über die Gewichtsunterschiede erfasst. Die Lysimeter wurden mit Deckeln verschlossen und die Wasserstände in Stufen von jeweils 10 cm in Zeitschritten von 18 Stunden zunächst bis zur Bodenoberfläche angehoben und danach wieder ebenso abgesenkt. Durch den Verschluss der Lysimeter wurden Effekte von Niederschlag und Evapotranspiration ausgeschlossen, so dass in diesem Versuch nur das bewässerbare bzw. entwässerbare Porenvolumen betrachtet wurde. Im Anschluss wurden die Steueroptionen getestet, bevor mit der Vegetationsperiode 2010 die Simulation der Wassermanagementoptionen mit den Lysimetern begonnen wurde. Dabei spiegelt ein Referenzlysimeter den Wasserhaushalt der Untersuchungsfläche wider, während weitere Lysimeter verschiedene Anpassungsoptionen simulieren. So können unterschiedliche Anpassungsoptionen ohne Eingriff in die gegenwärtige Nutzung der Flächen und der Wasserbewirtschaftung im Gebiet untersucht werden.

### 3.4 Modellierung und Transfer

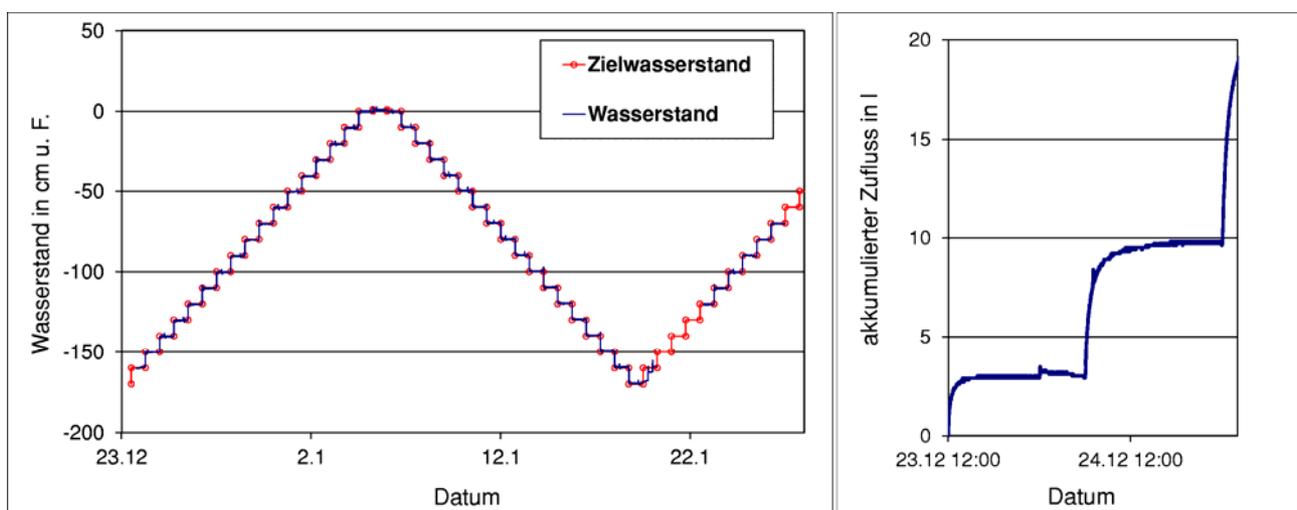
Mit den Ergebnissen des experimentellen Teils, also den durch die Lysimeterversuche gewonnenen Daten und Erkenntnissen und den erhobenen hydrologischen und meteorologischen Daten der Wetterstation sowie der Grund- und Grabenwasserstandsmessungen wird ein Wasserhaushaltsmodell für grundwassernahe Standorte parametrisiert, kalibriert und verifiziert. Dabei können die innerhalb von INKA-BB bereitgestellten Klimaszenarien genutzt werden, um Szenarioanalysen durchzuführen und die Wirkung von Anpassungsoptionen unter veränderten Klimabedingungen zu bewerten.

Ein geeignetes Modell muss verschiedene Kriterien erfüllen. Da der kapillare Aufstieg für grundwassernahe Standorte eine wichtige Größe ist, muss er in dem Modell auch hinreichend abgebildet sein. Zudem sollte eine Kopplung mit einem Gewässersystem möglich sein. Nach ersten Analysen könnte sich das Modell SWAP eignen (van Dam, 2000). Das Modell arbeitet mit der Richardsgleichung und kann die Wasseraufnahme über Pflanzenwurzeln simulieren. Auch die Wassernachlieferung aus Stand- und Fließgewässern wird mit einbezogen, je nach vorgegebener Stauhaltung (Bierkens et al., 1999). Nach Auswertung der Lysimeterversuche der ersten Vegetationsperiode kann das Wasserhaushaltsmodell mit den Ergebnissen dieser Versuche aufgebaut werden. Mit Hilfe dieser Modellierung können dann später die simulierten Managementoptionen auf die Fläche extrapoliert und bewertet werden.

### 4. Erste Ergebnisse aus den Vorversuchen

Die Ergebnisse der Aufnahme der Speicherkennlinie werden im folgenden Abschnitt an einem Lysimeter exemplarisch gezeigt. Das linke Bild in Abbildung 3 zeigt, wie der Wasserstand im Zeitverlauf stufenweise zunächst bis zur Geländeoberkante angehoben und wieder abgesenkt wird. Die blaue Linie zeigt dabei den gemessenen Wasserstand, während die mit Punkten durchsetzte rote Linie die Vorgaben über das Steuerprogramm darstellt.

Dieser Vergleich der Ziel- und der Ist-Grundwasserstände zeigt, dass die Steuerung nach Zeitreihen gut funktioniert. Im rechten Bild ist der akkumulierte Zufluss für den Zeitraum von zwei Zeitschritten zu Beginn des Kennlinienversuchs zu sehen. Wichtig ist hier, dass nach weit weniger als 18 Stunden die Zuflüsse stagnieren, so dass von einem stationären Zustand des Systems zu diesem Zeitpunkt ausgegangen werden kann.

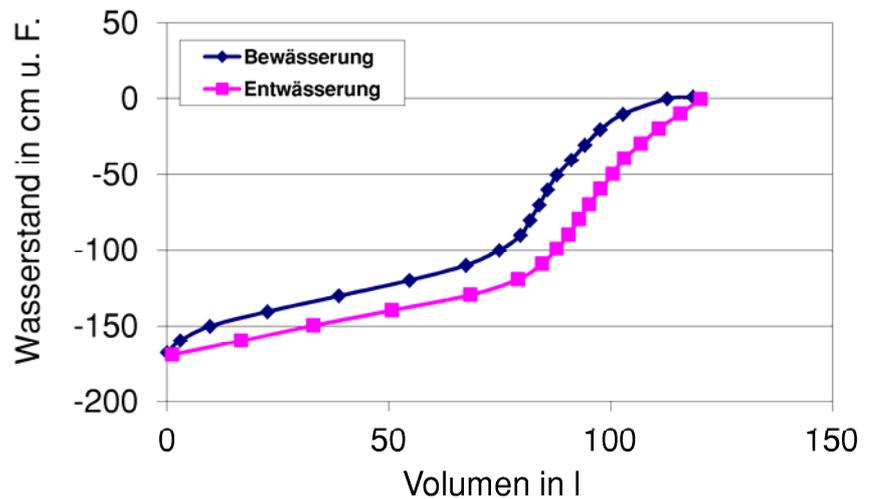


**Abb. 3:** Zielwasserstand im Vergleich zum gemessenen Wasserstand im Monolithen während der Speicherkennlinienaufnahme (links) und kumulierte Zuflussraten einer Teilperiode (rechts).

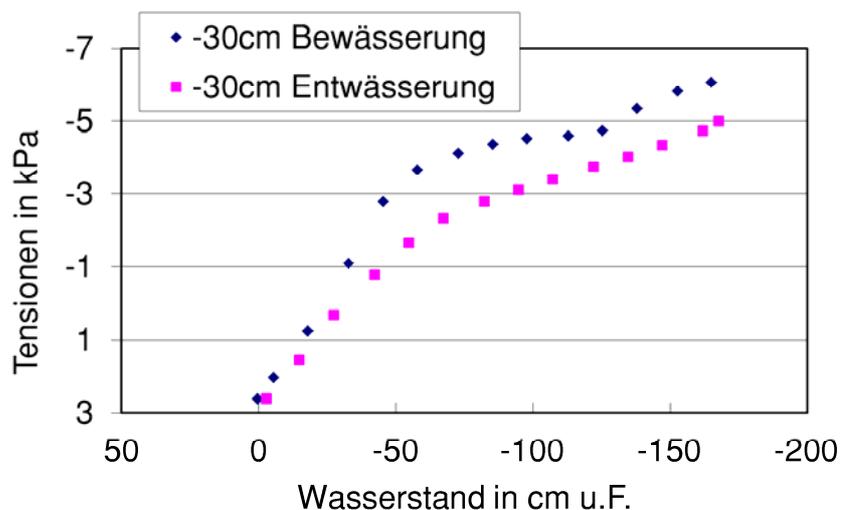
Die gleichzeitige Wägung der Monolithe ermöglicht die Aufnahme einer Speicherkennlinie für jeden Monolithen. In Abbildung 4 ist die Kennlinie für eines der Lysimeter dargestellt. Dabei wird der Änderung des zu- oder abgepumpten Wasservolumens die Änderung der jeweiligen Wasserstände gegenübergestellt.

Die Betrachtung des entwässerbaren Porenvolumens zeigt, dass drei Bereiche unterschieden werden können, deren Anteile an der gesamten entwässerbaren Wassermenge sehr unterschiedlich sind. So entfallen 66% der aufgefüllten Wassermenge auf den Bereich der Wasserstandsanhhebung von 1,80 m bis 1 m unter Flur. Bei einer weiteren Anhebung des Wasserstandes in die darüberliegende Schicht von 1 m unter Flur bis 30 cm unter Flur ist der Anteil des einströmenden Wassers mit 18% deutlich kleiner. Die oberen 30 cm beinhalten bis zur Geländeoberkante mit 16% fast den gleichen Anteil an entwässerbarem Wasser obwohl diese Schicht nur halb so mächtig ist wie der mittlere Bereich. Diese Ergebnisse korrespondieren mit den vorgefundenen Bodenhorizon-

ten. Die endgültigen Ergebnisse der Bodenanalyse stehen noch aus. Nach ersten Abschätzungen ist der Oberboden als humoser Oberbodenhorizont (Aa) aus Flusssand (f<sub>ss</sub>(Sf)) anzusprechen (E. Fiebert, mdl. Mitt.). Schon ab 30 cm unter Flur wird das Material zunehmend toniger, so dass hier von einer für den Spreewald typischen Klocksicht gesprochen werden kann. Dieser zweite Horizont wird als grundwasserbeeinflusster Horizont mit im Jahresverlauf überwiegend oxidierenden Verhältnissen (Go) aus Flusslehm (f<sub>ut</sub>(Lf)) mit sandigen Beimengungen aus Flusssand angesprochen. Bei ca. 70 cm unter Flur gibt es einen Horizontwechsel in den grundwasserbeeinflussten Horizont mit im Jahresverlauf überwiegend reduzierenden Verhältnissen (Gr) aus Flusssanden (f<sub>ss</sub>(Sf)). Da Lehm- und Tonböden einen wesentlich größeren Mittel- und Feinporenanteil haben, der nicht zum entwässerbaren Porenvolumen beiträgt, reflektiert der Verlauf der Speicherkennlinie die bodenphysikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen Bodenhorizonte (Schindler, 1983).



**Abb. 4:** Speicherkennlinie eines Lysimetermonolithen für die Phasen der Be- und Entwässerung.



**Abb. 5:** Vergleich der Tensionen in 30 cm unter Flur für die Phasen der Be- und Entwässerung.

Zudem kann aus der Abweichung des Wasservolumens in gleichen Tiefen (Abb. 4) auf einen Hystereseeffekt geschlossen werden, der durch den in der Kältephase im Januar 2010 gefrorenen Oberboden noch verstärkt worden sein kann. Da unter anderem die Saugspannungen während der Speicherkennlinienaufnahme gemessen wurden, konnten die Ergebnisse noch weitergehend analysiert werden. Hysterese charakterisiert ein System, dessen Ausgangsgröße nicht allein von der Art der Eingangsgröße abhängig ist, sondern auch von der Geschichte, welche die Eingangsgröße hatte. So sind die Tensionen während der Entwässerung bei gleichen Wasserständen geringer als bei der Bewässerung (Abb. 5).

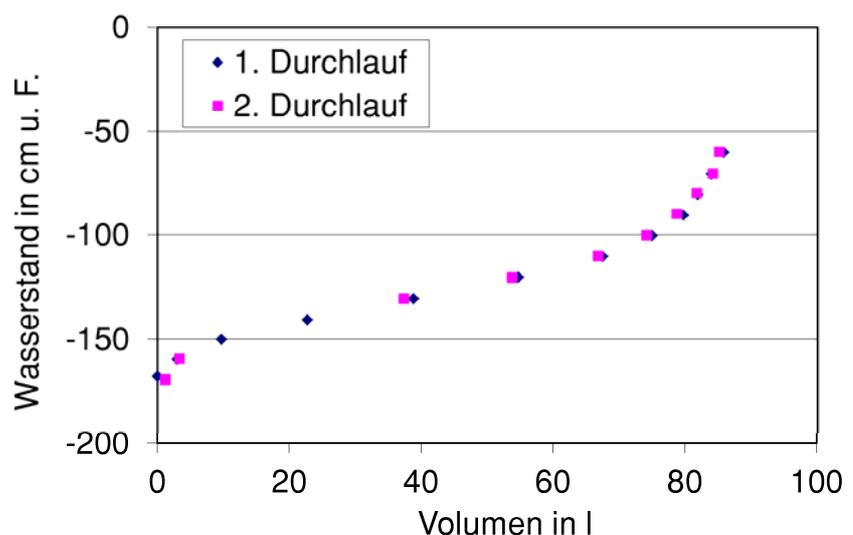
Damit weicht das Ergebnis von dem bodenphysikalischer Verdunstungsexperimente (Plagge et al., 1990; Weeks und Richards, 1967) ab, da bei der Entwässerung für jeweils den gleichen Bodenwassergehalt höhere Saugspannungen zu erwarten wären als bei der Bewässerung. Die Aufnahme der Speicherkennlinie unterscheidet sich jedoch in wichtigen Punkten von den oben genannten Stechzylinderversuchen. Das Lysimeter wird durch Versickerung entwässert, während das Wasser beim Stechzylinderversuch dem Boden durch Verdunstung entzogen wird. Aufgesättigt wird im Stechzylinder anschließend mittels des Prinzips der kommunizierenden Röhren von unten über eine Schlauchkapillare, die mit einem Wasserbehälter verbunden ist. Die Oberfläche wird dabei mit einem Deckel verschlossen. Dieser Vorgang entspricht dem der Bewässerung im Kennlinienversuch. Die Entwässerung findet im Lysimeter ebenfalls mit geschlossenem Deckel, jedoch über das Prinzip der kommunizierenden Röhren statt. Das bedeutet, dass für eine Wasserstandsabsenkung von 10 cm im Lysimeter der Pegelstand im Ausgleichsbehälter bei geschlossenen Ventilen um 10 cm gesenkt werden muss. Im Anschluss wird das Ventil zum Lysimeterbehälter geöffnet und es findet ein hydro-

lischer Ausgleich statt. Vor dem Entwässerungsvorgang ist der Boden im Lysimeter also gesättigt und der Wasserpegel sinkt schrittweise, so dass andere Voraussetzungen vorhanden sind als bei der Bewässerung, bei der das Wasser in einen zuvor entwässerten Boden steigt. Dabei muss auch die zeitliche Komponente in Betracht gezogen werden. Jede Stufe der Absenkung von 10 cm dauert 18 Stunden. Das in Abbildung 3 gezeigte Tensiometer in 30 cm Tiefe war bei einer Absenkung des Wasserstandes beim Entwässerungsvorgang auf einen Meter Tiefe also noch vor 5,25 Tagen überstaut. Beim Bewässerungsvorgang hingegen liegt dieser Überstau zu dem Zeitpunkt, an dem die Bewässerungsfront 1 m Tiefe erreicht, schon 20,25 Tage zurück. Die größten Abweichungen befinden sich unterhalb von 40 cm Tiefe, wo sich die Klocksicht befindet, die durch den hohen Tonanteil auch die geringste Wasserleitfähigkeit aufweist und damit eine stauende Wirkung für aufsteigendes bzw. versickerndes Wasser haben müsste. So wird bei der Entwässerung das Absinken des Wassers verlangsamt, während es bei der Bewässerung erst verzögert durch die Klocksicht aufsteigt.

Die geringsten Abweichungen zeigen sich in dem Bereich oberhalb von 30 cm unter Flur, wo das Absinken der Tensionen unter Null zeigt, dass das Tensiometer ab diesem Zeitpunkt überstaut ist, da der Grundwasserspiegel hier die Einbautiefe des Tensiometers erreicht.

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde mittels Wiederholung von Teilen der Kennlinienermittlung geprüft (Abb. 3).

Dabei zeigte die Wiederholung des Bewässerungsvorgangs (Abb. 6) gegenüber dem abweichenden Verhalten bei Be- und Entwässerung (Abb. 5) nur sehr geringe Abweichungen der Speicherkennlinie von -180 cm bis -60 cm unter Flur.



**Abb. 6:** Vergleich der Wiederholung des Bewässerungsvorgangs der Speicherkennlinie von -180 cm bis -60 cm unter Flur.

## 5. Ausblick

Begleitend zur Vegetationsperiode 2010 wird das Wasserhaushaltsmodell aufgebaut, in das dann die ausgewerteten Daten der Lysimeterversuche eingespeist werden können. Parallel werden die simulierten Managementoptionen analysiert und bewertet, um dann darauf basierend die Versuchsplanung für die Vegetationsperiode 2011 im Stakeholderdialog anzuschließen.

## Danksagung

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung dieses Projektes im Rahmen der Fördermaßnahme KLIMZUG. Ebenso sei ausdrücklich der Firma UGT Müncheberg gedankt für die gute Zusammenarbeit und die Kooperation und Kompetenz bei der Entwicklung der Steuertechnik. Dank auch dem Wasser- und Bodenverband "Oberland Calau" und dem Landesumweltamt Brandenburg für die gute und produktive Zusammenarbeit.

## 6. Literatur

Bethge-Steffens, D., Meissner, R., Rupp, H., 2005. Quantifizierung des Bodenwasserhaushaltes mit Hilfe eines neu entwickelten wägbaren Grundwasserlysimeters. *Wasserwirtschaft* 12, 45-48.

Bierkens, M. F. P., Van Bakel, P. J. T., Wesseling, J. G., 1999. Comparison of two modes of surface water control using a soil water model and surface elevation data. *Geoderma* 89, 149-175.

Dietrich, O., 2006. Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt des Spreewaldes. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz*. UBA-Texte 06/06, S. 55-68. Dessau-Roßlau.

Dietrich, O., Koch, H., Schweigert, S., 2007. Water resources management – a possibility for drought mitigation in wetlands? In: Brebbia, C. A., Kungolos, A. (Hrsg.): *Water Resources Management IV*. WIT Transactions on Ecology and the Environment, S. 53-62. Wessex Institute, Southampton.

Holsten, A., Vetter, T., Vohland, K., Krysanova, V., 2009. Impact of climate change on soil moisture dynamics in Brandenburg with a focus on nature conservation areas. *Ecological Modelling* 220, 2076-2087.

Meissner, R., 2000. Grundwasserlysimeter Patent 19902462. Deutsches Patent- und Markenamt, München-Berlin.

Plagge, R., Renger, M., Roth, C. H., 1990. A new laboratory method to quickly determine the unsaturated hydraulic conductivity of undisturbed soil cores within a wide-range of textures. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 153, 39-45.

Renger, M., Wessolek, G., Schwarzel, K., Sauerbrey, R., Sievert, C., 2002. Aspects of peat conservation and water management. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 487-493.

Schindler, U., 1983. Studies on the drainable pore volume and usable water capacity of bottomland soils influenced by groundwater levels and suggestions for water-balance control in spring. *Archiv für Acker und Pflanzenbau und Bodenkunde* 27, 351-360.

Schwarzel, K., Simunek, J., van Genuchten, M. T., Wessolek, G., 2006. Measurement and modeling of soil-water dynamics and evapotranspiration of drained peatland soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 762-774.

Van Dam, J., 2000. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. PhD-Thesis, Wageningen University.

Weeks, L. V., Richards, S. J., 1967. Soil-water properties computed from transient flow data. *Soil Science Society of America Proceedings* 31, 721- 725.

Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U., Cramer, W., 2005. Klimawandel in Deutschland. Forschungsbericht UFOPLAN 20141253. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

## Renaturierung – mehr als eine Maßnahme zur Regulierung des Landschaftswasserhaushaltes? Das Beispiel Schwarze Elster

Manuela Armentat<sup>1</sup>, Karl-Heinz Pörtge<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Georg-August-Universität Göttingen, DFG-Graduiertenkolleg 1024 „Interdisziplinäre Umweltgeschichte“, marmenal@gwdg.de;

<sup>2</sup>Georg-August-Universität Göttingen, Geographisches Institut

**Zusammenfassung:** Für derzeitige „Lösungs“- oder besser gesagt Entscheidungsfindungen bezüglich Ökosystemmanagement und Wasserhaushalt von Kulturlandschaften sind die Aspekte „Ursachen und Trends“ bedeutend. Dabei spielen nicht nur Daten über Grundwasserspiegel, Niederschlagsmengen oder Evapotranspirationsraten eine wichtige Rolle, sondern auch die Genese der Kulturlandschaft auf Basis der ökologischen, ökonomischen und sozialen Trends in der Gesellschaft sowie deren Wahrnehmung und dem daraus abgeleiteten Handeln. Am Beispiel der Schwarzen Elster, einem Nebenfluss der Elbe, wurden exemplarisch mit einer historischen Perspektive die wesentlichen Hauptlinien und „Leitmotive“, hier besonders das Konzept der „Renaturierung“, für Veränderungen in der Landnutzung und, mit diesen verknüpft, der Wasserhaushalt der Kulturlandschaft nachgezeichnet.

### Renaturation – more than just a measure to regulate the regional water balance? The example of the river “Schwarze Elster”

**Abstract:** In current processes of finding solutions or making decisions in respect to ecosystem management and the water balance of cultural landscapes, consideration of the aspects „causes and trends” is essential. Not only data about groundwater level, amount of precipitation or rates of evapotranspiration play an important role, but also the genesis of the cultural landscape on the basis of the ecological, economic and social trends in the society as well as their perception and the action derived from it. By using a historical perspective and the example of the Schwarze Elster River, a tributary of the Elbe River, it could be shown how “leitmotivs”, in this case particularly the concept of “renaturation”, are crucial for landscape change and linked with it for the water balance in a cultural landscape.

#### 1. Einführung

Heute stehen die Wasserwirtschaftsverwaltung, die lokalen Eigentümer und andere Akteure vor den schwierigen Aufgaben den Landschaftswasserhaushalt der Schwarzen Elster-Niederung so zu regeln, dass die prognostizierten klimatischen Veränderungen – warme, trockene Sommer und verstärkte Niederschläge im hydrologischen Winterhalbjahr (UBA, 2005) – sowie der strukturelle Wandel nach 1990 die Ökosysteme und die Landwirtschaft in der Region möglichst nicht negativ beeinflussen. So müssen im Oberlauf lokal die Grundwasserstände abgesenkt werden, da Schäden an der Infrastruktur und den Gebäuden mit dem Wiederanstieg des Grundwassers nach dem Ende des Braunkohletagebaus einhergehen. Während im Mittel- und Unterlauf besonders in den komplex meliorierten Niederungen, wie dem Schraden, mit dem Wasserangebot so umgegangen werden muss, dass weder zuviel noch zu wenig Wasser zur Verfügung steht. Um den Wasserhaushalt in der Kulturlandschaft den jeweiligen Nutzungsansprüchen anzupassen, führten die Akteure in den vergangenen 200 Jahren eine Vielzahl von wasserbaulichen Maßnahmen durch. Auf die Ursachen sowie treibenden Faktoren für die aktuellen Probleme an der Schwarzen Elster wird im Folgenden eingegangen. Dabei richtet sich der Blick besonders auf die historische

Entwicklung des Fließgewässers und seiner Niederung sowie dem heutigen Leitbild der „Renaturierung“.

#### 2. Untersuchungsgebiet

Die Schwarze Elster (Abb. 1) fließt bei einer heutigen Gesamtlänge von etwa 179 km (IKSE, 2005) durch die Bundesländer Sachsen, Brandenburg und Sachsen-Anhalt. Sie entspringt bei Kamenz im Lausitzer Bergland, durchfließt zu 91 % (IKSE, 2005), vor allem im Mittel- und Unterlauf, das sandige und flache Lausitzer Urstromtal. Schließlich mündet sie bei Elster, mit einem mittleren Abfluss von 27,6 bis 28,9 m<sup>3</sup>/s (BfG, 2003) auf 69 m ü.NN in die Elbe bei Flusskilometer 198,5. Das heutige Einzugsgebiet umfasst 5.674 km<sup>2</sup> (mdl. Mitt. F. Trosien, LUA Brandenburg). Das Einzugsgebiet der Schwarzen Elster liegt im Übergangsbereich vom maritimen zum kontinentalen Klima mit mittleren Niederschlägen zwischen 500 bis 800 mm/a (LUA, 1997).

Zahlreiche wasserbauliche Maßnahmen veränderten mehrfach die Gestalt der Schwarzen Elster. Heute weist sie im Oberlauf über weite Strecken eine Strukturgröße von 5-7, im Mittellauf fast durchgehend von 6-7 und im Unterlauf, da am wenigsten verändert, von 3-4 auf (LUA, 1999, 2002; LAWA, 2002). Aber nicht nur die Gewässerstruktur, Stau und Wehre beeinflussten die Flora und

Fauna, sondern auch die Gewässergüte, die 1990 noch mit IV bewertet wurde. Die Einleitung von eisensulfathaltigen Sumpfungswässern sowie Abwässern aus Industrie und Kommunen verunreinigten das Fließgewässer derart, dass wiederholt Fischsterben eintraten bis hin zur zeitweiligen „biologischen Verödung“. Heute tummeln sich bereits wieder Menschen auf dem und Fische im Wasser.

### 3. Daten und Methoden

Eine Möglichkeit zur Rekonstruktion historischer Landnutzung sowie der Entwicklung von integrierten Leitbildern bieten neben Bohrkernen und Pegeldata auch Karten (Deutsch und Pörtge, 2002; Pörtge und Deutsch, 2003; Hickisch, 2004). Für das Untersuchungsgebiet wurden Karten verschiedener Zeitschnitte in ein Geographisches Informationssystem (GIS) eingepflegt, für ausgewählte Teilgebiete digitalisiert und über Verschneidung die Veränderung im Flächennutzungsanteil über die Zeitschnitte berechnet (Abb. 2).

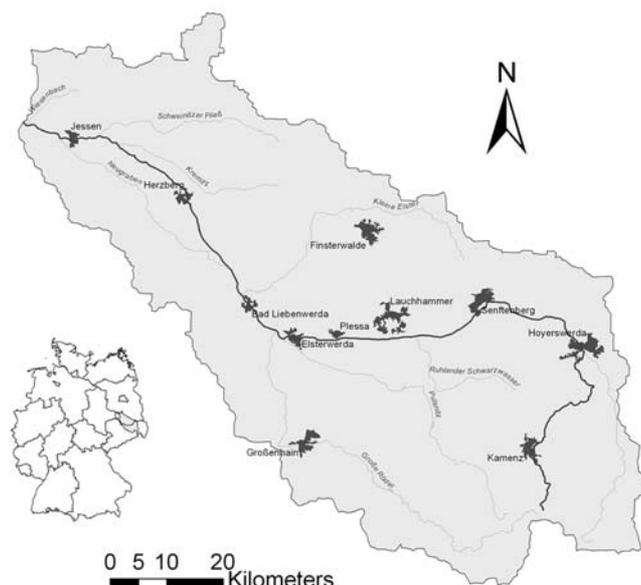


Abb. 1: Einzugsgebiet der Schwarzen Elster.

## Historische Karten und das GIS

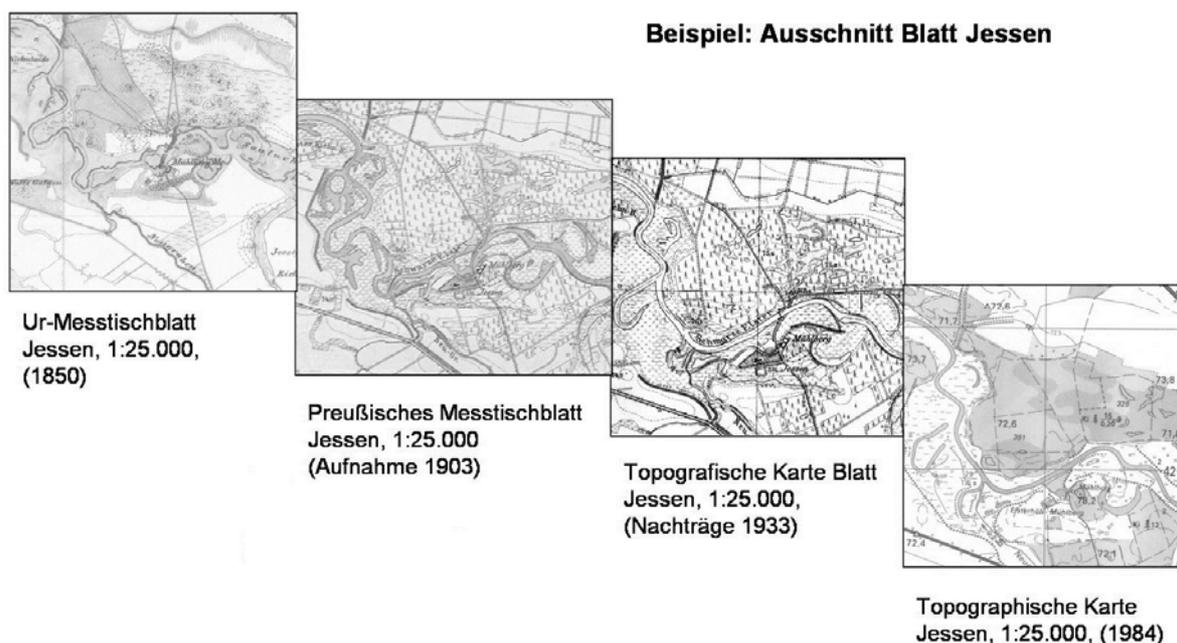


Abb. 2: Landnutzungswandel analysiert anhand von Kartenmaterial.

Diese Daten müssen zusätzlich mit handschriftlichen oder gedruckten Quellen verifiziert werden. Kommunale Akten, Akten der Provinzialverwaltung und der Ministerien wurden systematisch nach ihren Informationen bezüglich Hochwasserereignissen, wasserbaulicher Maßnahmen, Binnenentwässerung und Meliorationsmaßnahmen hin untersucht. Sowohl die Karten, als auch die niedergelegten Informationen in Akten und wissenschaftlichen sowie politischen Publikationen zeigen das jeweilige Verhältnis Mensch-Natur auf und lassen sich in den

Kontext gesellschaftlicher Diskurse zur Landeskultur, Wasserhygiene oder heute Renaturierung einbetten.

### 4. Ergebnisse und Diskussion:

#### 4.1 Die Niederung Schraden – Eine Umweltgeschichte

Um die verschiedenen „Kulturen“ der Landschaft über die Zeit genauer zu betrachten, „zoomen“ wir in ein Teilgebiet an der Schwarzen Elster – der Schraden-Niederung im Mittellauf mit etwa 13.000 ha Flächenan-

teil. Dessen ursprüngliche Vegetation entsprach in etwa dem heutigen Spreewald, wurde aber vollständig verdrängt. Ungefähr 330 kleine Fließgewässer bilden derzeit ein weit verzweigtes Netz von Entwässerungsgräben. Als Vorfluter dienen die Schwarze Elster und die Neue Pulsnitz, ein im 16. Jahrhundert angelegtes Fließgewässer zur besseren Hochwasserabführung. Wie hat sich nun diese Kulturlandschaft entwickelt?

#### 4.1.1 Die Niederung der Mühlen und Fischerei

Spätestens seit dem ausgehenden Mittelalter erlebten die Gewässerlandschaften in Mitteleuropa einen einschneidenden Wandel durch die Einführung der Wassermühlen (Abb. 3). Der Mühlenrückstau im Schraden stellte einen bedeutenden Eingriff in die Abflussverhältnisse dar. Neben dem Verlust von Ernte und der Ausbreitung von Sumpffieber, veränderten die erhöhten Grundwasserstände auch die Vegetation der Niederung an der Schwarzen Elster (Armenat, 2009). Damit wandelte sich auch die Form der Nutzung. Die vernässten Wiesen und Weiden zwischen den Elsterarmen wurden oft vollständig aufgegeben (Hanspach, 1987). An Bedeutung gewannen hingegen die Fischerei und der Krebsfang.



Abb. 3: Elstermühle Plessa (Foto: M. Armenat).

#### 4.1.2 Landnahme als legitimes Recht – „Macht auch die Erde untertan“

Im 18. Jahrhundert zeichnete sich ein neuer Umgang mit der ökonomisch nutzbaren Kulturlandschaft ab. Die Zeit der Trockenlegungen und Meliorationen, flankiert von Agrarreformen und Separationen zu Beginn des 19. Jahrhunderts, führte auch an der Schwarzen Elster Mitte des 19. Jahrhunderts (1852-1864), auf der Basis eines Sondergesetzes, zu den ersten großen wasserbaulichen Maßnahmen und zur „Verdrängung“ von Sumpffieber und Wasser aus der Niederung. Unterstützt wurde dieser Prozess durch die Etablierung der Naturwissenschaften, die seit der Mitte des 19. Jahrhunderts eine rasante Differenzierung und Technisierung erfuhr, verknüpft mit einem traditionellen, christlich geprägten Denk- und Deutungsmuster in dem „Natur zum Objekt technischer Ver-

fügbareit und Ausbeutung“ wurde (Groh & Groh, 1991).

#### 4.1.3 Intendierte und nicht intendierte Folgen sowie das Thema „Reinhaltung“

Die Regulierung zeigte insofern einen Erfolg, als die extremen Hochwasser im Mittellauf schneller abgeführt wurden und durch die Anlage von Deichen den Schraden vor Überflutung schützten. Allerdings wurden Binnenentwässerung sowie die Anlage von Schöpfwerken in den Folgejahren in der Niederung notwendig. Lag der Anteil an Ackerland um 1847 im Schraden noch bei etwa 12 %, so vervierfachte er sich bis 1900 nahezu auf 43 %. Der Auenwaldbestand wurde fast vollständig zurückgedrängt und die Feuchtwiesen zum größten Teil in Trockenwiesen verwandelt.

Bereits zu Beginn der wasserbaulichen Maßnahmen am Mittellauf meldeten die Gemeinden am Unterlauf Bedenken bezüglich der Abführung der Hochwasser an. Durch den Verlust von 99,5 % (Freude, 2007) der Retentionsfläche im Mittellauf, erreichte das Hochwasser den Mündungsbereich schneller. In den Jahren 1911-1930 musste der Unterlauf nachreguliert werden, da es oberhalb der Mündung zu einer gesteigerten Vernässung der angrenzenden Flächen und Erhöhung der Grundwasserstände gekommen war. Mit von entscheidender Bedeutung für die zweite große Maßnahme zeigte sich die rasante Zunahme des Sumpfungswassers aus den Braunkohletagebauen in der Niederlausitz, aber auch die starke Verunreinigung des Gewässers, deren man sich durch eine schnelle Abführung zu entledigen erhoffte. Auf der Basis eines Sondergesetzes zur Reinhaltung und Gründung einer Elstergenossenschaft (1928), stellte man in den 1930ern am Mittellauf das Regelprofil von 1852 wieder her. Die Elstergenossenschaft manifestierte die Rolle der Schwarzen Elster als einen der „Opferflüsse“ im Deutschen Reich. Damit wurde den industriellen und bergbaulichen Einleitungen eine „Legitimation“ erteilt, zu ungunsten der Landwirtschaft (Gilhaus, 1995; Büschenfeld, 1997, 2008).

#### 4.1.4 Hydrokomplexmeliorationen – Beseitigung von „Störgrößen“

Nach 1945 stand das Thema Nahrungsproduktion, gekoppelt an eine weitreichende Bodenreform, mit im Zentrum der Demokratisierung Deutschlands (Pniower, 1948). In der sowjetischen Besatzungszone wurde der Großgrundbesitz im Sinne einer sozialistischen Bodenreform beseitigt. Die Hydro-Komplexmeliorationen in den 1960er Jahren stellten den Höhepunkt der meliorativen Tätigkeit im Untersuchungsgebiet dar, die neben der Anlage von Gräben und Schöpfanlagen auch die Verfüllung von Senken, also Reliefmeliorationen beinhalteten (Dannenberg et al., 2005). Sie war an das Leitbild einer hoch produktiven „industriemäßigen“ Landwirtschaft geknüpft (AVP, 1998; zitiert in Dannenberg et al., 2005). In den 1980er Jahren wurde die Schraden-Niederung (Abb. 4) „nahezu überall von weiträumigen Ackerflächen bestimmt“ (Hanspach, 1987). In den 1980ern betrug der Anteil an Ackerfläche im Schraden etwa 70%, Auenwald und Feuchtwiesen waren nun vollständig verdrängt. Die angelegten Gräben dienten sowohl zur Entwässerung als auch zur Bewässerung (Dannenberg et al., 2005).



Abb. 4: Schraden-Niederung (Foto: www.wikipedia.org).

#### 4.1.5 Umbrüche

Nach 1989/90 veränderte sich die Situation in der Region schlagartig (Wechsung, 2005). Mit dem gesellschaftlichen Umbruch fand nicht nur eine tiefgreifende De-Industrialisierung in der Region Niederlausitz „mit neuen Dimensionen von Arbeitslosigkeit und Bevölkerungsabwanderung, Austausch und Neubildung bzw. Konditionierung von Eliten und Verwaltung, Beseitigung und Bekämpfung von desaströsen Umweltschäden etc.“ statt, vielmehr stellte sich die Aufgabe nach einer Planung einer zukunftsfähigen Landschaft (Bayerl, 2003; Koch et al., 2005).

Die Auflösung bekannter Institutionen, wie z.B. Meliorationsverbände, verunsicherten nicht nur die neuen Flächeneigentümer, sondern bargen auch viel Konfliktpotential in sich. Die Regelung des Landschaftswasserhaushaltes wurde seitens der lokalen Akteure als essentiell eingestuft.

Die wesentlichen Bewirtschaftungspläne sollten jedoch noch über 15 Jahre auf sich warten lassen. Im Schraden verhinderte dies über längere Zeit eine geregelte Stauhaltung. Die Defizite in der Wasserregulierung führten, bei weit abgesenkten Grundwasserständen, zu zeitweise extrem trockenen Böden. Des Weiteren wirkte der verminderte Zusammenhalt der Bodenpartikel auf den großen Ackerflächen erosionsbegünstigend und verstärkte die Abnahme der Bodenfruchtbarkeit (Schleyer, 2009). Neben finanziellen, personellen sowie strukturellen Problemlagen in der Wasserverwaltung, sieht Schleyer (2009) den Grund für die fehlenden Fachplanungen auch darin, dass innerhalb der oberen Wasserbehörde „der wasserwirtschaftliche Bereich im Allgemeinen und der Landschaftswasserhaushalt im besonderen“ zumindest in den 1990ern nur eine geringe Priorität besaß. Erst zu Beginn des 21. Jahrhunderts gewannen die planerischen Aufgaben im Bereich Wasserhaushalt mehr Aufmerksamkeit. Dies hing nicht zuletzt auch damit zusammen, dass der „Landschaftswasserhaushalt in den Mittelpunkt der öffentlichen Diskussion“ (Schleyer, 2004, 2009) rückte.

#### 4.1.6 Renaturierung der Schwarzen Elster. Was bedeutet das für die Niederung Schraden?

Essentiell für eine Fokussierung auf den Landschaftswasserhaushalt war die Einführung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL, 2000), mit ihren ökologischen Zielen auf partizipativer Basis. Sie sieht konkrete Fristen für die Erstellung einzugsgebietsbezogener Bewirtschaftungspläne vor. Damit wurde aus einem Leitbild der Renaturierung mehr als nur praktisch umzusetzende Maßnahmen, sondern vielmehr ein politisch gewolltes (Zerbe und Wiegleb, 2009), tiefgreifendes und flächendeckendes Konzept zur Verbesserung des Wasserhaushaltes in der Kulturlandschaft.

Für das Brandenburger Modellprojekt „Renaturierung“ der Schwarzen Elster sollen neben finanziellen Mittel, die ebenso für eine Instandsetzung der Deiche erforderlich wären, landwirtschaftliche Förderinstrumente bereitgestellt werden. Dies gibt die Möglichkeit, das bereits in dem Agrar-Umwelt-Forum von den Akteuren gemeinsam dargelegte Umweltqualitätsziel „Erhöhung des Wasserrückhalts in der Landschaft“ (BMBF-Forschungsprojekt 1998-2002; GRANO-Projektskizze, ohne Jahr) im Rahmen der geplanten Renaturierung zu stärken und weitere Maßnahmen umzusetzen. Speziell für den Schraden, der irreversibel verändert wurde, bedeutet dies wohl auch eine langfristige aktive Wasserregelung durch Stau und ggf. Schöpfwerke in Kombination mit lokalen Revitalisierungsmaßnahmen.

#### 5. Renaturierung – mehr ein Konzept als eine Maßnahme

Die ersten Ansätze für einen naturnahen Wasserbau datiert Bebermeier (2008) in die 1930er Jahre. Doch erst mit der „Ökologisierung des Wasserbaus“ in den 1970ern entstand das Leitbild der „Renaturierung“. Es ist selbst eine Kreation des Menschen, der mit einem erwachten „ökologischen Bewusstsein“ die Welt, Regionen und Lokalitäten mit ihren vermeintlich oft „natürlichen“ sowie anthropogenen Charakteristika schützen will (Cronon, 1995). Doch erst nach etwa 20 Jahren, in den 1990ern wurden größere Maßnahmen in Deutschland durchgeführt. Ein Grund hierfür lag in der langwierigen Generierung einer breiten Datenbasis sowie der Entwick-

lung und Anwendung diverser Verfahren, um die Naturnähe bzw. die ökologischen Konsequenzen wasserbaulicher Maßnahmen zu bewerten. Zeitgleich wurde im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) von 1996 und in dessen Novellierung auf Basis der EU-WRRL (2002), die Lebensraumfunktion von Gewässern mit aufgenommen sowie deren ökologische Funktion verstärkt in den Blickpunkt gerückt (Bebermeier, 2008).

Heute lassen sich unter dem Oberbegriff Renaturierung, nach naturwissenschaftlichem Verständnis, eine Vielzahl von verschiedenen Maßnahmen und Konzepten fassen, die von einer Extensivierung über eine Restauration bis hin zu Sanierungsmaßnahmen reichen kann (Zerbe et al., 2009). Dabei wird im engeren Sinne unter Renaturierung, das „Erreichen eines naturnäheren Zustandes, d.h. eines Zustandes geringerer Nutzungs- und Eingriffsintensität“ (Zerbe et al., 2009) verstanden. Kulturelle und ästhetische Qualitäten der verschiedenen Konzepte und Begrifflichkeiten, seien sie Ökosystem, Natur oder Umwelt genannt, bleiben jedoch meist ausgeschlossen (Voigt und Weil, 2006).

Da bei der Wiederherstellung eines „naturnahen“ Zustandes vorrangig die Ökosystemfunktion betrachtet wird, kann die Begrifflichkeit Revitalisierung, also „die Wiederherstellung von gewünschten abiotischen Umweltbedingungen als Voraussetzung für die Ansiedlung von standorttypischen Lebensgemeinschaften“ (Zerbe et al., 2009) hier wohl als treffender gelten (siehe dazu auch Lüttig, 1993).

Eine starke ökologische Perspektive reduziert das Ökosystem vor allem auf seine Funktionen. Es wird dabei als eine Art Maschine oder auch als Ganzheit eines Organismus gesehen, in welchem den einzelnen Gruppen wiederum Funktionen zugeschrieben werden (Voigt und Weil, 2006). Das Ziel von Ökosystemmanagement und Ökosystemrenaturierung ist demnach „Ökosysteme so zu erhalten oder zu verändern, dass ihre Funktionen optimal erfüllt werden“ oder im Sinne des Ökosystems als Organismus, diesen zu heilen (Voigt und Weil, 2006). Hier greift nach Cowell (1993; zitiert in Ott, 2009) die wissenschaftlich durch die Renaturierungsökologie gestützte Ökosystemrenaturierung als „Verlustkompensationsstrategie“ oder „Fehlerkorrekturprogramm“. Damit ist es implizit möglich, aus Fehlern zu lernen und eine Fehlerwiederholung zu vermeiden. Dabei resultiert der Wunsch einer „Wiederherstellung“ eines Ökosystems auch aus einer romantischen Vorstellung einer „heilen“ Welt (Cronon, 1995) sowie aus dem Blick auf die ökonomischen Grenzen, wie einer „reduzierten Kapazität für eine zukünftige Landnutzung“ durch eine „nicht nachhaltige Landbewirtschaftung“ (Daily, 1995; zitiert in Zerbe et al., 2009).

Daraus wird deutlich, dass die Landschaft mehr ist als nur die Summe messbarer physikalischer und biologischer Größen, sondern vielmehr auch kulturelle, ästhetische, politische, ökonomische, soziale und ethische Aspekte beinhaltet (Voigt und Weil, 2006). Somit bedarf es neben ökologischen Entwicklungskonzepten gleichfalls sozialer und ökonomischer Konzepte, um der heutigen Forderung nach einer nachhaltigen Landbewirtschaftung gerecht zu werden. Gerade eine breite Akzeptanz eines

„Renaturierungs“-Projektes ist wesentlich für eine erfolgreiche „Wiederherstellung von bestimmten Ökosystemleistungen“ (Zerbe und Wiegleb, 2009; Zerbe et al., 2009).

Die Renaturierung als Konzept kann hierbei als der programmatische Überbau für die Vielzahl von Maßnahmen und Konzepten zur „Sicherung“ der Funktionalität von Ökosystemen gesehen werden, welches durch das „ökologische Bewusstsein“, einen breiten gesellschaftlichen Diskurs sowie politischen Willen Umsetzung findet. Erst mit diesem gesellschaftlichen Konsens zum Umweltschutz, dem Schutz auch des Nutzens von Natur (Blackbourn, 2010), in dem Gelder bereit gestellt werden, fassen der naturnahe Wasserbau und damit einhergehend „Renaturierungs“-Maßnahmen Fuß (Bebermeier, 2008).

Eine idiosynkratische Vielfalt lokaler Landschaften prägt heute gemeinsam mit ökologischen Argumenten das Natur-Leitbild gegenüber einer geometrischen Uniformität der Kulturlandschaft (Blackbourn, 2010). Nach Küster (2009; vgl. auch Lüttig, 1993) kann Mensch eine Natur jedoch nicht erschaffen, und demnach auch nicht „renaturieren“. Durch die anthropogene Gestaltung kann aber unter Mitwirkung der Natur eine neue Landschaft, eine mentale Topografie, geschaffen werden (ebd.). Eine renaturierte Landschaft ist damit das Abbild eines Kulturkonstruktes, welches aus politischen Aushandlungen hervorging. Umso wichtiger ist es sich mit diesen kulturellen Aspekten, Codizes und Wahrnehmung von Natur-Mensch-Interaktion auseinanderzusetzen und diese zu reflektieren und kritisch zu beleuchten.

## 6. Schlussfolgerung

Die Schwarze Elster und ihre Niederung sind gezeichnet von einer Jahrhunderte langen Nutzung, die sich je nach gesellschaftlichen Bedürfnissen transformierte. Dabei gingen die tiefgreifendsten Veränderungen konform mit der Etablierung neuer Konzepte in einer Gesellschaft, der Makroebene der drei Wirkungsebenen von Werten (Opaschowski, 1983). Dies zeigt sich aktuell in dem Diskurs zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes, der spätestens in den 1990ern begonnen wurde, seine volle Durchsetzung, auch in politischer Hinsicht, aber erst zu Beginn des 21. Jahrhunderts erfährt, nachdem eines der heutigen Leitbilder, der „Wasserrückhalt in der Landschaft“, ein wichtiger Teilaspekt des durchaus zu kritisierenden Begriffes „Renaturierung“, als neuer Wert anerkannt wurde und damit das gesellschaftliche Zusammenleben neu zu ordnen beginnt. Die „Renaturierung“ ist ein übergeordnetes Kulturkonstrukt verschiedenster Maßnahmen, deren Ziel, wie an der Schwarzen Elster, meist nur eine „Revitalisierung“ sein kann. Da sowohl Landschaften als auch Gesellschaften zu jeder Zeit einem dynamischen Wandel unterliegen, ist es notwendig, sich über vergangene und gegenwärtige Landschaftszustände und Wertevorstellungen sowie deren Stellenwert bewusst zu sein (Ipsen et al., 2005), so wie dies bereits Heraklit mit den Worten „Man kann nicht zweimal in denselben Fluss steigen.“ (Diels und Kranz, 1912; Frg. 91) andeutete. Zukünftige wasserwirtschaftliche Lösungen sollten das Ergebnis partizipativer Prozesse auf der Basis eines gemeinsamen ästhetischen, sozialen, ökologischen, öko-

nomischen und nachhaltigen Leitbildes vor dem Hintergrund des globalen Wandels sein.

## Danksagung

Die Untersuchungen zur wasserbaulichen Geschichte an der Schwarzen Elster im Kontext gesellschaftlicher Diskurse wurden durch ein Stipendium im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs 1024 „Interdisziplinäre Umweltgeschichte“ ermöglicht. Herrn Schleyer gilt Dank für die zur Verfügung gestellte Dissertation.

## 7. Literaturverzeichnis

- Armenat, M., 2009. Von der Wasserkraft zum Wasserdampf. Energiegeschichte an einem Ort – die Elstermühle und das Kraftwerk in Plessa. In: Hermann, B., Stobbe, U. (Hrsg.): Schauplätze und Themen der Umweltgeschichte. Umwelthistorische Miscellen aus dem Graduiertenkolleg. Werkstattbericht, S. 17-33. Universitätsverlag, Göttingen.
- AVP, 1998. Agrarstrukturelle Vorplanung Wasserwirtschaftskonzept Schraden. Unveröffentlichte Planungsunterlagen. Planungsbüro für Natur und Siedlung Lindenau und PL3 Planungsbüro für ländliche Regionalentwicklung Berlin. Amt für Flurneuordnung und ländliche Entwicklung, Luckau.
- Bayerl, G., 2003. Die Niederlausitz. Industrialisierung und De-Industrialisierung einer Kulturlandschaft. Blätter für Technikgeschichte 65, 89-163.
- Bebermeier, W., 2008. Wasserbauliche Maßnahmen in Norddeutschland und ihre Folgen. Von den ungünstigen Wasser- verhältnissen an der Hunte (1766-2007). Göttinger Geographische Abhandlungen 118. Göttingen.
- BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2003. Endbericht BMBF Projekt „Bedeutung der Nebenflüsse für den Feststoffhaushalt der Elbe“. Koblenz.
- Blackbourn, D., 2010. Die Eroberung der Natur/The Conquest of Nature. In: Valentien, D. (Hrsg.): Wiederkehr der Landschaft/Return of Landscape. S. 30-41. Jovis, Berlin.
- Büschendorf, J., 1997. Flüsse und Kloaken. Klett-Cotta, Stuttgart.
- Büschendorf, J., 2008. Das Abwasserproblem im Widerstreit der Interessen. Akteure, Konflikte und Lösungsmuster in der Phase der Hochindustrialisierung. In: Bebermeier, W., Henning, A.-S., Mutz, M. (Hrsg.): Vom Wasser. Schriftenreihe der DWhG, Sonderband 4. S. 17-47. Norderstedt.
- Cowell, M., 1993. Ecological restoration and environmental ethics. Environmental Ethics 15, 19-32.
- Cronon, W., 1995. The trouble with wilderness; or, getting back to the wrong nature. In: Cronon, W. (Hrsg.): Uncommon ground: rethinking the human place in nature. S. 69-90. W.W. Norton & Co., New York.
- Daily, G., 1995. Restoring value to the world's degraded lands. Science 269, 350-355.
- Dannenberg, P., Schleyer C., Wüstemann, H., 2005. Regionale Vernetzung in der Landwirtschaft. Beiträge eines teilprojektübergreifenden regionalen Workshops am 13.01.2005 in Bad Liebenwerda (Landkreis Elbe-Elster). DFG-Forschergruppe 497: Strukturwandel und Transformation im Agrarbereich (SUTRA). SUTRA – Working Paper. Berlin.
- Deutsch, M., Pörtge, K.-H., 2002. Wasserwirtschaftliche Akten- und Kartenbestände (ca. 1700-1945) in den Archiven Mitteldeutschlands. Aussage- und Nutzungsmöglichkeiten für die Renaturierung von Fließgewässern. In: Geller, W., Punčochář, P., Guhr, H., von Tümpling jun., W., Medek, J., Smrtak, K., Feldmann, H., Uhlmann, O. (Hrsg.): Die Elbe – neue Horizonte des Flussgebietsmanagements. 10. Magdeburger Gewässerschutzseminar. S. 395-398. Teubner, Stuttgart-Leipzig-Wiesbaden.
- Diels, H., Kranz, W. (Hrsg. / Übers.), 1912. Die Fragmente der Vorsokratiker Griechisch/Deutsch. 3 Bände. Berlin (Reprint: Weidmann, Zürich 1996).
- EU-WRRL, 2000. Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 327. Brüssel.
- Freude, B., 2007. Klimaveränderungen und demografischer Wandel in ihren Auswirkungen auf den Landschaftswasserhaushalt in Brandenburg und Berlin. In: Barsig, M., Becker, F., Endler, W., Prystav, G., Rubelt, J. (Hrsg.): Probleme einer nachhaltigen Wasserwirtschaft in Berlin und Brandenburg. Verschwendung, Versteppung und Verschmutzung? S. 10-29. Verlag für Wissenschaft und Forschung, Berlin.
- Gilhaus, U., 1995. Schmerzenskinder der Industrie. Schöningh, Paderborn.
- GRANO Projektskizze, ohne Jahr. Partizipative Entwicklung und Umsetzung ökologischer, technischer und institutioneller Maßnahmen zur Verbesserung des Wasserrückhalts im Schraden. Unveröffentlichtes Papier.
- Groh, R., Groh, D., 1991. Weltbild und Naturaneignung. Zur Kulturgeschichte der Natur. Suhrkamp, Frankfurt a. Main.
- Hanspach, D., 1987. Untersuchungen zur Vegetations- und Landschaftsgeschichte sowie zur aktuellen Vegetation des Schraden (Bezirk Cottbus). Dissertation, Universität Halle/Saale-Wittenberg.
- Hickisch, A., 2004. Ableitung flussmorphologischer Parameter aus historischen Karten und stratigraphischen Untersuchungen. Ein Beitrag zur Leitbildentwicklung für die Nuthe/Brandenburg. Fachbeiträge des Landesumweltamtes 89. Potsdam.
- IKSE – Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (Hrsg.), 2005. Die Elbe und ihr Einzugsgebiet. Ein geographisch-hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick. Magdeburg.
- Ipsen, D., Reichhardt, U., Weichler, H., 2005. Zukunft Landschaft – Bürgerszenarien zur Landschaftsentwicklung. In: Wechung, F., Becker, A., Gräfe, P. (Hrsg.): Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft 6. S. 129-136. Weißensee Verlag, Berlin.
- Koch, H., Kaltofen, M., Grünwald, U., Messner, F., Karschke, M., Zwirner, O., Schramm, M., 2005. Scenarios of water resources management in the Lower Lusatian mining district, Germany. Ecological Engineering 24, 49-57.
- Küster, H., 2009. Schöne Aussichten. Kleine Geschichte der Landschaft. Beck, München.
- LAWA – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 2002. Gewässergüteatlas der Bundesrepublik Deutschland – Gewässerstruktur in der Bundesrepublik Deutschland 2001. Kulturbuchverlag, Berlin.
- LUA – Landesumweltamt Brandenburg, 1997. Schwarze Elster. Ökologischer Zustand und Entwicklungsziele. Fachbeiträge des Landesumweltamtes Brandenburg 24. Potsdam.
- LUA – Landesumweltamt Brandenburg, 1999. Geogen bedingte Grundbelastung der Fließgewässer Spree und Schwarze Elster und ihrer Einzugsgebiete. Studien und Tagungsberichte, Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg 23. Potsdam.
- LUA – Landesumweltamt Brandenburg, 2002. Strukturgüte von Fließgewässern Brandenburgs. Studien und Tagungsberichte. Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg 37. Potsdam.
- Lüttig, G., 1993. „Revitalisierung“ statt „Renaturierung“. Telma 23, 323-326.
- Opaschowski, H.W., 1983. Arbeit und Freizeit im Wertewandel – Antworten der Pädagogik. Zeitschrift für Pädagogik, Beiheft 18, 237-248.

- Ott, K., 2009. Zur ethischen Dimension von Renaturierungsökologie und Ökosystemrenaturierung. In: Zerbe, S., Wiegleb, G. (Hrsg.): Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa. S. 423-439. Springer, Berlin.
- Pniower, G., 1948. Bodenreform und Gartenbau. Siebenreicher Verlag, Berlin.
- Pörtge, K.-H., Deutsch, M., 2003. Zur Bedeutung historischer wasserwirtschaftlicher Unterlagen sowie historischer Informationen zur Landnutzung (ca. 1700 bis um 1945) für ein nachhaltiges Flussgebietsmanagement. In: Kleeberg, H.-B. (Hrsg.): Klima, Wasser, Flussgebietsmanagement – im Lichte der Flut. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 4, 161-170.
- Schleyer, C., 2004. Economic and Ecological Transformation Processes in East German Water Management Regimes: The Role of Property Rights and Governance Structures. Environmental Management 34, 281-290.
- Schleyer, C., 2009. Institutioneller Wandel von Meliorationssystemen. Eine vergleichende Studie in Ostdeutschland und Polen. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- UBA – Umweltbundesamt, 2005. Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Umweltforschungsplan – Kurzfassung. Dessau-Roßlau.
- Voigt, A., Weil, A., 2006. Landschaft als Ökosystem. Die Ambivalenz des Ökosystembegriffs am Beispiel von Eugene P. Odums „Land-use Planning“. In: Kazal, I., Voigt, A., Weil, A., Zutz, A. (Hrsg.): Kulturen der Landschaft. Ideen von Kulturlandschaft zwischen Tradition und Modernisierung. Landschaftsentwicklung und Umweltforschung, 127. S. 143-167. Berlin.
- Wechsung, F., 2005. Herausforderungen des globalen Wandels für die Elbe-Region. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P. (Hrsg.): Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft 6. S. 3-57. Weißensee Verlag, Berlin.
- Zerbe, S., Wiegleb, G., 2009. Renaturierungsökologie und Ökosystemrenaturierung – Synthese und Herausforderungen für die Zukunft. In: Zerbe, S., Wiegleb, G. (Hrsg.): Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa. S. 469-475. Springer, Berlin.
- Zerbe, S., Wiegleb, G., Rosenthal, G., 2009. Einführung in die Renaturierungsökologie. In: Zerbe, S., Wiegleb, G. (Hrsg.): Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa. S. 1-21. Springer, Berlin.

## Modellierung des Bodenwasserhaushaltes von Kiefernstandorten in Mecklenburg-Vorpommern von 1951 bis 2009 unter besonderer Berücksichtigung von Trockenstress

Andreas Bauwe<sup>1</sup>, Christian Criegee<sup>1</sup>, Stefan Glatzel<sup>1</sup>, Tobias Scharnweber<sup>2</sup>, Christian Schröder<sup>2</sup>, Michael Manthey<sup>2</sup>, Martin Wilmking<sup>2</sup>, Bernd Lennartz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock, andreas.bauwe@uni-rostock.de; <sup>2</sup>Universität Greifswald, Institut für Botanik und Landschaftsökologie, Grimmer Straße 88, 17487 Greifswald

**Zusammenfassung:** Um Entwicklungen des Trockenstressrisikos in der jüngeren Vergangenheit und entlang des klimatischen Gradienten von Nordwest nach Südost abschätzen zu können, wurden für 23 über das gesamte Land Mecklenburg-Vorpommern verteilte Kiefernstandorte Bodenwasserhaushaltssimulationen durchgeführt. Zur Anwendung kam das bereits für viele Waldstandorte erfolgreich parametrisierte physikalisch basierte Modell LWF-BROOK90. Als Schwellenwert für Trockenstress wurde in einem ersten Ansatz ein Bodenwasserpotenzial von pF3 bzw. -1000 hPa in 30 cm Tiefe festgelegt und die jährlichen Überschreitungshäufigkeiten ermittelt. Es ergaben sich jährliche Schwellenwertüberschreitungen von 0 bis 191 Tagen mit einer mittleren Überschreitungshäufigkeit von 25 Tagen pro Jahr. Es zeigt sich eine leichte Tendenz zum vermehrten Auftreten von Trockenstresstagen in den letzten zwei Jahrzehnten, wobei allerdings kein signifikanter Trend zu erkennen ist. Der Gradient der jährlichen Niederschlagsmengen von Nordwest nach Südost spiegelt sich hingegen nicht in dem Auftreten von Bodenwasserknappheit wider. Vielmehr scheinen die spezifischen Standortsbedingungen und Bestandsparameter die klimatischen Unterschiede zu überlagern.

### Soil water balance modeling of scots pine stands in Mecklenburg-Vorpommern from 1951 to 2009 under special consideration of drought stress

**Abstract:** Soil water balance simulations were carried out for 23 scots pine stands in Mecklenburg-Vorpommern. We applied the physically based model LWF-BROOK90, which has already been successfully parameterised for several forest stands. The study aims to estimate the drought risk both in the recent past and along the climatic gradient from the northwest to the southeast. As a first estimate for drought risk, we defined a matric potential of -1.000 hPa in 30 cm soil depth. This threshold was exceeded between 0 and 191 days with a mean value of 25 days per year. A weak tendency of an increased occurrence of drought days during the last two decades was observed. However, the trend was not significant. The gradient of yearly rainfall from the northwest to the southeast did not correspond to the occurrence of drought stress. Rather, the specific site conditions seem to overlay the climatic differences.

#### 1. Einführung

Die Entwicklung von Einzelbäumen und Waldbeständen wird zu einem Großteil durch die klimatischen Bedingungen des Standortes bestimmt. Der Niederschlag in seiner Menge und Verteilung und die Temperatur sind die zentralen Steuergrößen des Bodenwasserhaushalts. Das heutige Klima Mecklenburg-Vorpommerns kann mit einem leichten Gradienten von einem ozeanisch geprägten Nordwesten (NW) hin zu einem kontinentaleren Südosten (SO) als gemäßigt bezeichnet werden. Die mittleren Jahresniederschläge reichen von 500 mm (SO) bis 700 mm (NW), die Jahresmitteltemperatur von 8 °C bis 9 °C.

Gemäß der regionalen Klimaszenarien WETTREG und REMO (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Max-Planck-Institut für Meteorologie) wird Nordostdeutschland stark durch den Klimawandel betroffen: Die Höhe des Jahresniederschlages verändert sich kaum,

jedoch findet eine Verschiebung hin zu feuchteren Wintern und trockeneren Sommern statt. Kombiniert mit insgesamt steigenden Temperaturen kann dies eine ernsthafte Gefahr für die Wälder des Landes darstellen.

Mit etwa 40 % Flächenanteil ist die Kiefer derzeit die dominierende Baumart in Mecklenburg-Vorpommern (BMELV, 2002). Es wurde der Bodenwasserhaushalt für 23 über das gesamte Land verteilte Kiefernstandorte für die vergangenen 60 Jahre mit dem physikalisch basierten Modell LWF-BROOK90 (Hammel und Kennel, 2001) zur Beantwortung folgender Fragen modelliert: (1) Nimmt der Trockenstress von Westen nach Osten aufgrund klimatischer Unterschiede zu? (2) Hat das Trockenheitsrisiko für Kiefernstandorte von 1951 bis 2009 zugenommen?

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Aus dem Netz der Dauerbeobachtungsflächen der Landesforstanstalt Mecklenburg-Vorpommern (sogenannte Level-1-Flächen) wurden 23 repräsentative Kiefernstandorte ausgewählt. Dem aktuellen Waldanteil folgend, konzentrieren sie sich auf die Region südlich von Schwerin (West), den Bereich der mecklenburgischen Seenplatte (Mitte) und die Ueckermünder Heide nahe der polnischen Grenze (Ost). Aus dem waldarmen nördlichen Bereich des Bundeslandes wurden nur wenige Standorte in die Untersuchungen aufgenommen (Abb. 1).

### 2.2 Modell

Zur Anwendung kam das physikalisch basierte Modell BROOK90 (Federer, 2002) in seiner Weiterentwicklung LWF-BROOK90 (Hammel und Kennel, 2001). Es ist für die Modellierung kleiner homogener Standorte auf täglicher Basis entwickelt worden. Der vertikale Wasserfluss wird auf Grundlage der Richards-Gleichung und des Ansatzes nach Mualem-Van Genuchten horizontbezogen numerisch modelliert. Interzeption, Transpiration und Evaporation werden im Modell mit der Shuttleworth-Wallace-Gleichung (Shuttleworth und Wallace, 1985) berechnet, welche eine Weiterentwicklung der Penman-Monteith-Gleichung darstellt.

### 2.3 Klima

Als Klimavariablen wurden Wetterdaten in täglicher Auflösung von den nächstgelegenen Klima- und Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes herangezogen. Im Einzelnen wurden die Parameter Niederschlag, Minimal- und Maximaltemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer und Dampfdruck aufbereitet. Die Simulationsläufe starten mit dem Jahr 1951, von dem an flächendeckend Klimaparameter zur Verfügung stehen.

Die mittlere jährliche Niederschlagshöhe beträgt für den westlichsten Standort 663 mm gegenüber 543 mm am im äußersten Osten (Abb. 1). Somit ergibt sich eine mittlere Niederschlagsdifferenz von West nach Ost von 120 mm. Die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur beträgt für alle Standorte 8,6°C.

### 2.4 Vegetation

Bestandsparameter wurden durch die Landesforst Mecklenburg-Vorpommern, Anstalt des öffentlichen Rechts, zur Verfügung gestellt und ausgewertet. Die Kiefernstandorte sind zwischen 35 und 147 Jahre alt. Die Bestockungsdichten liegen zwischen 177 und 3000 Bäumen/ha, wobei höhere Bestockungsdichten bei jüngeren und geringeren Bestockungsdichten bei vornehmlich älteren Beständen anzutreffen sind. Die Bestandshöhen variieren zwischen 15 m und 34 m.

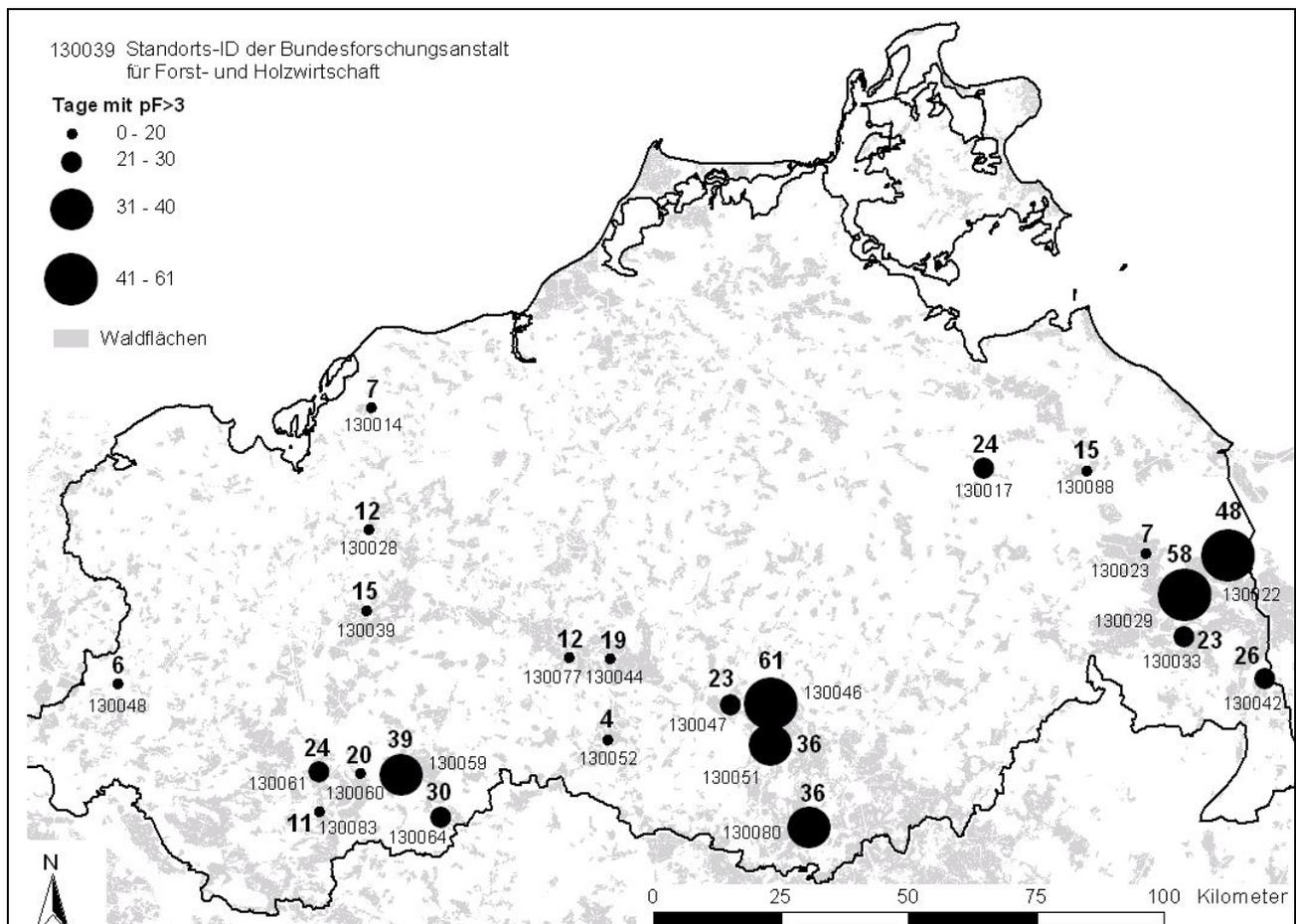


Abb. 1: Durchschnittliche jährliche Anzahl von Tagen im Zeitraum 1951 bis 2009, an denen  $pF_3$  in 30 cm Tiefe auf den 23 untersuchten Kiefernstandorten überschritten wurde.

Ein entscheidender Vegetationsparameter mit großem Einfluss auf das Modellergebnis ist der Blattflächenindex. Aus den Bestandsparametern Baumart, Brusthöhendurchmesser und Bestockungsdichte wurden die Blattflächenindizes abgeleitet. Diese nehmen Werte zwischen 2,0 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> und 4,4 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> an, wobei ein mittlerer Blattflächenindex von 2,8 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> ermittelt wurde. Diese berechneten Blattflächenindizes decken sich sehr gut mit Literaturangaben (Hammel und Kennel, 2001).

Es wurde eine asymptotische Wurzelverteilung angenommen (Jackson et al., 1996), bei der sich über 90 % der wasseraufnehmenden Wurzeln in einer Tiefe bis 90 cm befinden.

Für weitere Vegetationsparameter wurde auf das Standardparameterset von BROOK90 für Nadelbäume (Federer, 2002) zurückgegriffen. Um eine Vergleichbarkeit des Trockenstressrisikos über die Jahre hinweg zu gewährleisten, wurde von statischen Beständen ausgegangen, d.h. es wurde kein Waldwachstum modelliert.

### 2.5 Boden

Die Wasserbewegung im Boden wird im Modell LWF-BROOK90 (Hammel und Kennel, 2001) mit der Richards-Gleichung iterativ berechnet. Als bodenhydraulisches Modell kam der Ansatz nach Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980) zur Anwendung. Die Parameter der Materialfunktionen wurden mittels Pedotransferfunktionen der HYPRES-Datenbank (Wösten et al, 1999) aus Textur, Trockenrohddichte und dem Anteil organischer Substanz bestimmt.

Zur Ableitung der Modellparameter wurden profilbezogene Daten der Landesforst Mecklenburg-Vorpommern bis 90 cm Tiefe für jeden Standort verwendet. Die Standorte sind mit einem Sandanteil von > 80 % überwiegend sehr sandig. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde im Mittel auf 0,52 m/d bestimmt. Der Anteil der organischen Substanz beträgt in den obersten 10 cm im Mittel etwa 11 % und nimmt mit zunehmender Bodentiefe stark ab. Neben den mineralischen Horizonten wurden auch organische Auflagen nach einem Ansatz von Ham-

mel und Kennel (2001) berücksichtigt. Die nutzbare Feldkapazität der oberen 90 cm liegt für die 23 Standorte in einem Bereich zwischen 126 mm und 213 mm (Tab. 1).

### 2.6 Trockenstressindex

In der Literatur werden verschiedene Trockenstressindizes angegeben. Der pflanzenphysiologische Transpirationsindex (z.B. Zierl, 2001) ergibt sich aus dem Verhältnis von aktueller zu potenzieller Transpiration. Bleibt der Transpirationsindex über einen längeren Zeitraum deutlich unter eins, kann der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre nicht mehr befriedigt werden. In der Folge kann es in der Vegetation zu Trockenstress kommen.

Der Index des relativ nutzbaren Bodenwassers (Bréda et al., 2006) bezieht sich auf den Bodenwasservorrat in der durchwurzelten Zone. Dieser wird aus dem Verhältnis von aktuell verfügbarem Wasser (aktueller Wassergehalt minus Wassergehalt bei permanentem Welkepunkt) zur nutzbaren Feldkapazität ermittelt. Ein Wert < 0,4 zeigt nach dieser Definition Trockenstress an.

Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich in einem ersten Ansatz auf einen einfach zu ermittelnden Schwellenwert mit einem Bodenwasserpotenzial von pF3 bzw. -1000 hPa in 30 cm Tiefe. Trockenstress tritt demnach dann auf, wenn dieser Schwellenwert überschritten wird.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

Mit einer Spanne von 4 Tagen am Standort 130052 und 61 Tagen am Standort 130046 sind die Unterschiede auftretender Trockenperioden von pF>3 erheblich (Abb. 1). Anzumerken ist, dass in der Mehrzahl die Tage von pF>3 als geschlossene Periode auftreten. Nur selten konnten zwei oder mehr Trockenperioden innerhalb eines Jahres nachgewiesen werden. Bei visueller Interpretation lässt sich kein Trend im Auftreten von Trockenstresstagen von West nach Ost erkennen. Klimatische Unterschiede innerhalb des Landes spiegeln sich bezüglich auftretender Bodenwasserknappheit offenbar nicht in relevanter Weise wider.

**Tab. 1:** Ausgewählte Klima-, Boden- und Vegetationsparameter der 23 Untersuchungsstandorte.

|   | Min  | Max  | Mittelwert |
|---|------|------|------------|
| Klima (1951-2009)                                   |      |      |            |
| Temperatur [°C]                                     | 6,7  | 10,6 | 8,6        |
| Niederschlag [mm]                                   | 413  | 1127 | 684        |
| Windgeschwindigkeit [m/s]                           | 1,3  | 5,5  | 3,6        |
| Boden   |      |      |            |
| Sand [%]  | 81   | 98   | 92         |
| Schluff [%]   | 1    | 15   | 6          |
| Ton [%]   | 1    | 4    | 3          |
| Trockenrohddichte [g/cm <sup>3</sup> ]              | 1,25 | 1,56 | 1,42       |
| Nutzbare Feldkapazität bis 90 cm Tiefe [mm]         | 126  | 213  | 165        |
| Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/d]         | 0,12 | 1,92 | 0,52       |
| Vegetation  |      |      |            |
| Blattflächenindex [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ] | 2,0  | 4,4  | 2,8        |
| Stammzahl pro ha                                    | 177  | 3000 | 965        |
| Brusthöhendurchmesser [cm]                          | 14   | 53   | 25         |
| Alter [a]   | 35   | 147  | 66         |
| Höhe [m]  | 15   | 34   | 22         |

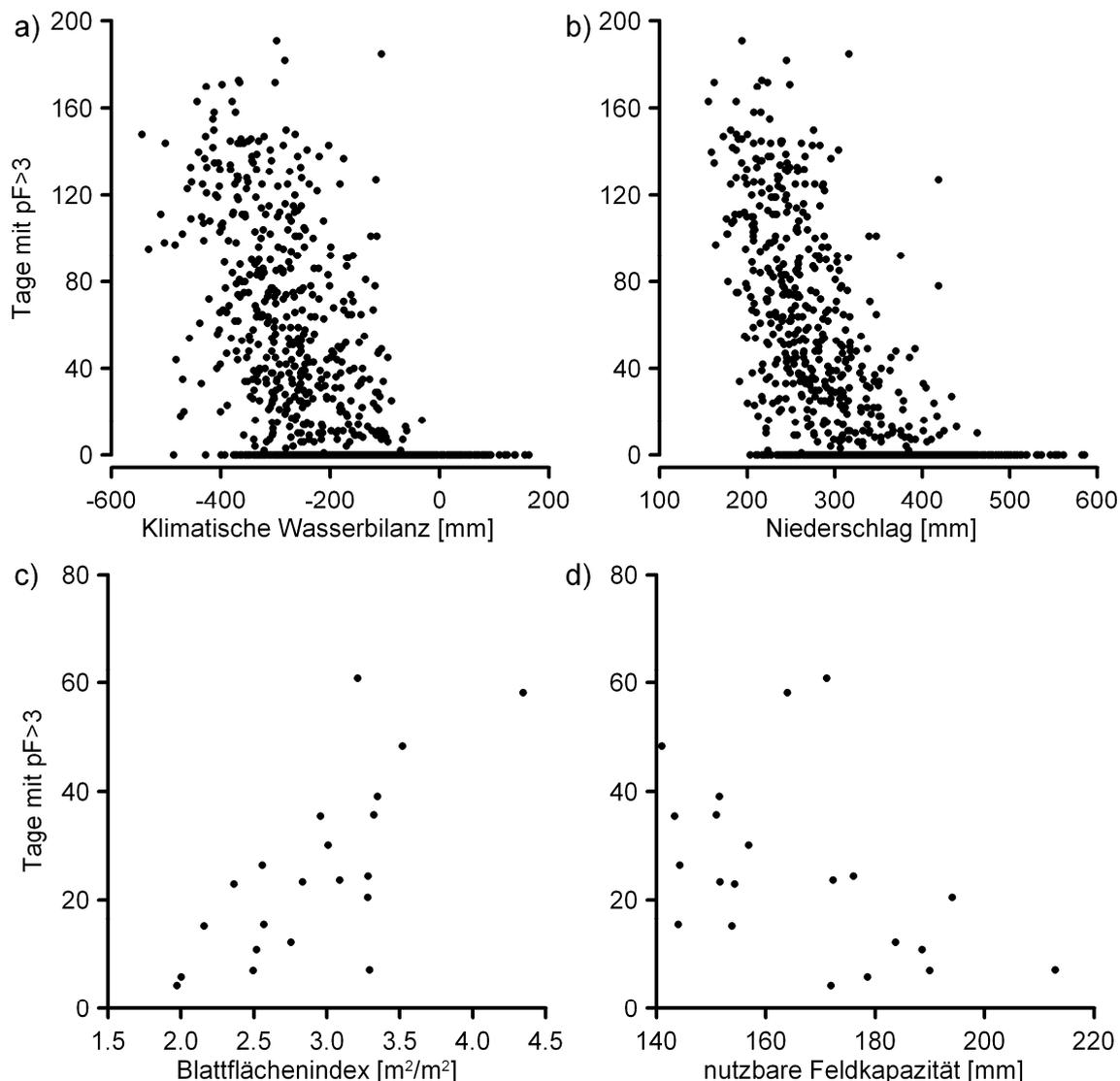
Die Anzahl der Tage mit Schwellenwertüberschreitung kann selbst bei benachbarten Standorten deutlich variieren. So scheint beispielsweise der Standort 130023 mit sieben Tagen kaum unter Bodentrockenheit resp. Trockenstress zu leiden, wohingegen der nur etwa 10 km entfernt liegende Standort 130029 mit 58 Tagen erheblich von Bodenwasserknappheit betroffen ist. Es müssen neben den klimatischen Bedingungen demnach weitere Faktoren wie Standorts- oder Bodeneigenschaften für das Auftreten von Trockenstressperioden bestimmend sein.

In einem weiteren Schritt haben wir die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Umweltfaktoren mit der Anzahl der Trockenstresstage betrachtet (Abb. 2). Für die Parameter klimatische Wasserbilanz, Niederschlag, Blattflächenindex und nutzbare Feldkapazität sind die Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von Tagen mit  $pF > 3$  und dem jeweiligen Umweltfaktor mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $< 5\%$  signifikant (Tab. 2). Die höchste (positive) Korrelation konnte für den Blattflächenindex mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,739 nachgewiesen werden. Die Bestandsdichte hat

offensichtlich deutlichen Einfluss auf die Anfälligkeit gegenüber Bodentrockenheit. So sind die Standorte mit einem Blattflächenindex von etwa  $2 \text{ m}^2/\text{m}^2$  mit durchschnittlich weniger als 10 Tagen kaum von Trockenstress betroffen, wohingegen Standorte mit einem Blattflächenindex  $> 3,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$  im Mittel über 40 Tage im Jahr unter Bodentrockenheit leiden.

**Tab. 2:** Korrelationskoeffizienten zwischen Tagen mit  $pF > 3$  und maßgeblichen Einflussparametern (\* = während der Vegetationsperiode).

| Parameter                              | Korrelationskoeffizient |
|--|-------------------------|
| Blattflächenindex                      | 0,739                   |
| Niederschlag*                          | -0,587                  |
| Klimatische Wasserbilanz*              | -0,576                  |
| Nutzbare Feldkapazität bis 90 cm Tiefe | -0,475                  |



**Abb. 2:** Tage mit  $pF > 3$  pro Jahr als Funktion a) der klimatischen Wasserbilanz (Vegetationsperiode), b) des Niederschlags (Vegetationsperiode), c) des Blattflächenindex (Trockentage pro Standort von 1951-2009 gemittelt) und d) der nutzbaren Feldkapazität (Trockentage pro Standort von 1951-2009 gemittelt) für alle untersuchten Standorte.

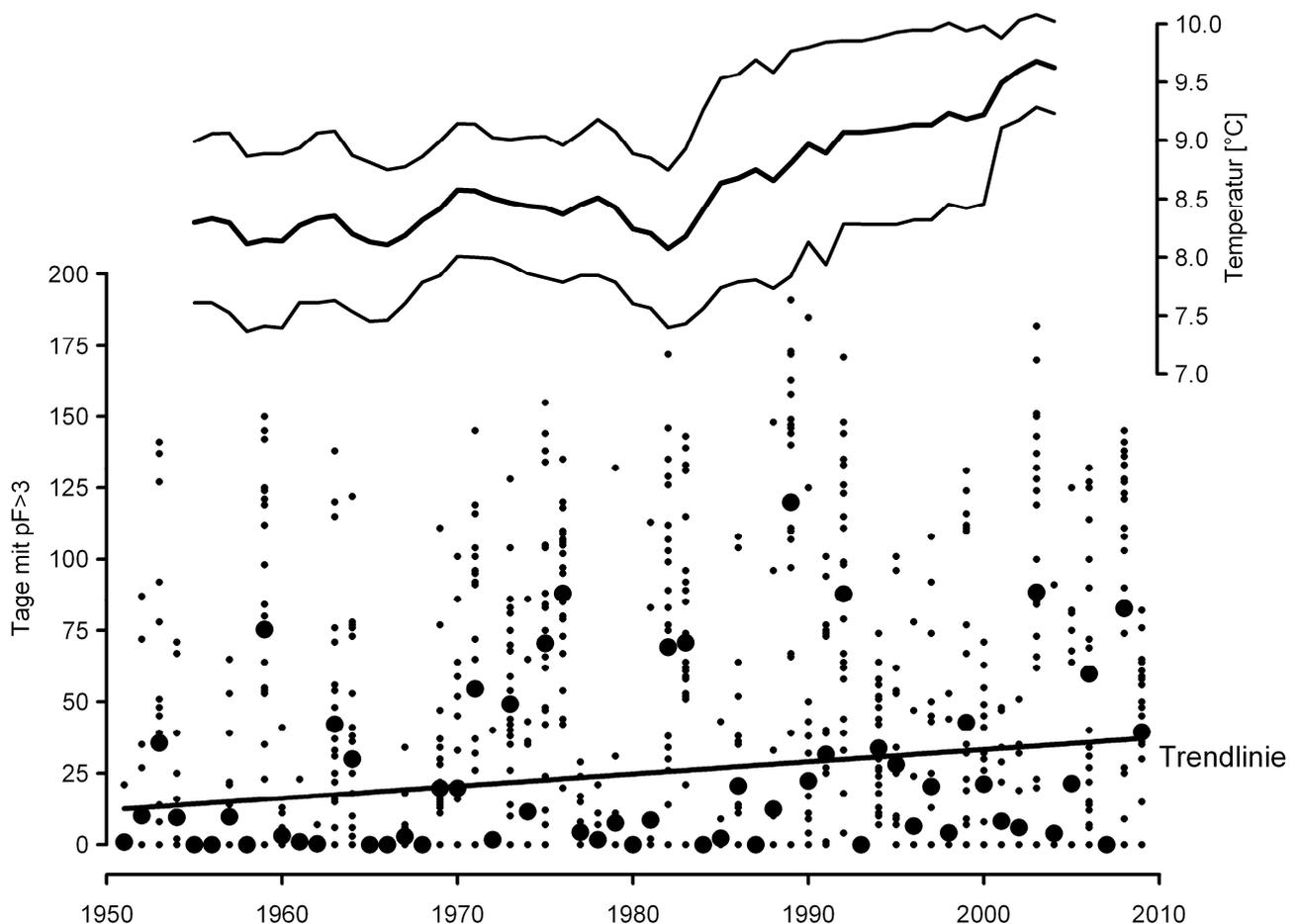
Die klimatische Wasserbilanz und die Niederschlagsmenge während der Vegetationsperiode (Mai-September) korrelieren deutlich schwächer (negativ) mit dem untersuchten Schwellenwert. Die klimatische Wasserbilanz nimmt für den Beobachtungszeitraum Werte von 163 mm bis -544 mm an. Erst bei einer negativen Wasserbilanz kommt es im Betrachtungszeitraum zu Schwellenwertüberschreitungen. Am geringsten fällt der Zusammenhang zur nutzbaren Feldkapazität aus. Überraschend ist jedoch, dass trotz der Ähnlichkeit der Bodeneigenschaften der Standorte überhaupt ein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden konnte.

Abbildung 3 zeigt die Anzahl der Tage, an denen pF3 für jeden einzelnen Standort pro Jahr überschritten wird. Es ergeben sich also pro Jahr 23 Werte. Die dicken Punkte geben Durchschnittswerte aller Standorte innerhalb eines Jahres an.

Es werden deutliche Unterschiede sowohl zwischen den einzelnen Jahren als auch zwischen den verschiedenen Standorten sichtbar. Das Spektrum der Tage, an denen der Schwellenwert von pF3 überschritten wird, schwankt

zwischen 0 und 191 Tagen. Eine lineare Regression der Mittelwerte eines Jahres von 1951 bis 2009 verdeutlicht trotz des sehr schwachen Zusammenhangs eine leichte Tendenz zum vermehrten Auftreten von Bodentrockenheit in den vergangenen Jahren. So traten vier der fünf längsten Trockenstressperioden seit 1989 auf. Mit 191 Tagen war der östlich gelegene Standort 130029 im Jahr 1989 am stärksten von Trockenstress betroffen. Die Temperatur der Klimastation Schwerin verzeichnet seit Anfang der 1980er Jahre einen deutlichen Anstieg (Abb. 3). So stieg die 10-Jahresmitteltemperatur von 8,2 °C im Jahr 1980 auf 9,6 °C im Jahr 2004 an. Offenbar wirken sich diese klimatischen Veränderungen in den vergangenen Jahren auf den Bodenwasserhaushalt von Kiefernwäldern in Mecklenburg-Vorpommern aus.

In der Zukunft könnte dies dazu führen, dass klimatische Variablen wie Niederschlag und Temperatur ihren Einfluss auf die Vitalität von Bäumen im Vergleich zu Standorts- und Bestandseigenschaften erhöhen.



**Abb. 3:** Oben: Jahresmitteltemperatur der Klimastation Schwerin (10-jähriges gleitendes Mittel, Standardabweichung). Unten: Anzahl an Tagen mit  $pF > 3$  für alle untersuchten Kiefernstandorte; dicke Kreise: mittlere Anzahl von Tagen mit  $pF > 3$  von 1951 bis 2009.

#### 4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass das Auftreten von Trockenstress im hier definierten Sinne von vielfältigen Faktoren abhängt. So kann die Anfälligkeit gegenüber Trockenstress innerhalb eines Jahres von Standort zu Standort erheblich variieren. Ein signifikanter Zusammenhang von klimatischen Unterschieden in Mecklenburg-Vorpommern von West nach Ost und dem Auftreten von Trockenstress konnte nicht nachgewiesen werden. Der Standort und die Bestandseigenschaften bestimmen in viel stärkerem Maße die Anfälligkeit gegenüber Trockenstress als klimatische Unterschiede innerhalb des Landes.

Die Untersuchungen zeigen, dass in der jüngeren Vergangenheit Perioden längerer Bodenwasserknappheit zugenommen haben. Bei Eintreten der regionalen Klimaszenarien wird der Einfluss des Klimas auf Phasen der Trockenheit in Zukunft an Relevanz gewinnen. Es muss mit einer Verschärfung der Situation gerechnet werden.

Durch Anwendung weiterer Trockenstressindizes sollen in der Folge die erzielten Ergebnisse abgesichert und verifiziert werden. Weiterhin ist geplant, ermittelte Perioden der Bodenwasserknappheit mit stressanzeigenden Informationen wie Nadelverlust und verringerten Jahringbreiten in Zusammenhang zu bringen. Regionalisierte Klimaszenarien sollen das Auftreten künftiger Trockenstressereignisse abschätzen.

#### Danksagung

Wir bedanken uns beim Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern, welches des Verbundprojekt FARSeeING im Rahmen des Exzellenzförderprogramms Mecklenburg-Vorpommern finanziell unterstützt. Dank gebührt für die kompetente

und unkomplizierte Zusammenarbeit ebenso der Landesforst Mecklenburg-Vorpommern, Anstalt öffentlichen Rechts.

#### 5. Literatur

- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., Dreyer, E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63, 625-644.
- BMELV – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2002. Bundeswaldinventur 2. <http://www.bundeswaldinventur.de/enid/830569a40e0083bb1d052f072909812a,0/53.html>. Zugriff: 07.06.2010
- Federer, C. A., 2002. BROOK90 – A simulation model for evaporation, soil water, and streamflow. Documentation for versions 4 and 3.2/3/4. <http://users.rcn.com/compassbrook/b90doc.html>.
- Hammel, K., Kennel, M., 2001. Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte München* 185. LMU, München.
- Jackson, R.B., Canadell, J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E., Schulze, E.D., 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108, 389-411.
- Shuttleworth, W.J., Wallace, J.S., 1985. Evaporation from sparse crops – an energy combination theory. *Quarterly Journal – Royal Meteorological Society* 111, 839-855.
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892-898.
- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 169-185.
- Zierl, B., 2001. A water balance model to simulate drought in forested ecosystems and its application to the entire forested area in Switzerland. *Journal of Hydrology* 242, 115-136.

## **Bergbaufolgeseen in der Lausitz – naturwissenschaftliche und administrative Herausforderungen bei ihrer Integration in die Gewässerlandschaft und die flussgebietsbezogene Bewirtschaftung**

Petra Fleischhammel, Dagmar Schoenheinz, Uwe Grünewald

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03046 Cottbus, petra.fleischhammel@tu-cottbus.de

**Zusammenfassung:** Die nachhaltige Entwicklung der Bergbaufolgeseen im Lausitzer Revier und ihre Integration in die flussgebietsbezogene Bewirtschaftung von Spree und Schwarzer Elster ist eine komplexe Aufgabe und fachübergreifende Herausforderung. Oberstes Ziel des „Sanierungsbergbaus“ ist ein ausgeglichener und sich weitgehend selbst regulierender Wasserhaushalt nach Menge und Beschaffenheit. Dafür sind Ausleitkriterien von Seewasser in die unterstromigen Fließgewässer zu erreichen und dauerhaft zu gewährleisten sowie die geplanten Nutzungen der entstehenden Bergbaufolgeseen sicherzustellen. Die effektive Nutzung der Flutungswasserressourcen ist dabei ein entscheidender Faktor. Das einzugsgebietsbezogene Bewirtschaftungskonzept von Spree und Schwarzer Elster berücksichtigt die Flutung und Nachsorge der Bergbaufolgeseen jedoch an letzter Stelle der Nutzerrangfolge. Für den Bedarfsfall sind daher zusätzliche technologische Wasserbehandlungsmaßnahmen unumgänglich. Um auch die zukünftige Wasserverteilung für alle Nutzer sicherzustellen, sind in die detaillierte wasserwirtschaftliche Bilanzierung auch veränderte Klimaszenarien einzubeziehen sowie die wasserwirtschaftliche Nachsorge im Sanierungsbergbau und die wasserwirtschaftliche Vorsorge des aktiven Bergbaus miteinander zu verknüpfen.

### **Post-mining lakes in the Lausitz area – natural, scientific and administrative challenges for their integration into the hydrologic system and for water management**

**Abstract:** The Lower Lusatian lignite mining district is situated in the river basins of the Spree and Schwarze Elster. After the cessation of mining activities and thereby of the artificially created groundwater drawdown in numerous mining pits, a large number of post-mining lakes are evolving as a consequence of the natural groundwater table recovery. Since the groundwater flow through soil and dump sites is affected by the former mining activities, the groundwater experiences various changes in its hydrochemical properties as e.g. mineralisation and acidification. To counteract the resulting poor water quality of the mining lakes, flooding by surface water from neighbouring river basins shall support a quicker and thereby hydrochemically less damaging lake filling. In the current list of priorities for the quantitative distribution of the regionally available water, the flooding of open-pits is in the last position. To guarantee a reliable flooding and a continuous water supply for the post-mining lakes, additional water resources have to be exploited.

#### **1. Einführung**

Seit mehr als 100 Jahren wird im Lausitzer Revier Braunkohle gefördert. Der Tagebaubetrieb erfordert insbesondere im Lockergestein des Lausitzer Reviers für die geotechnisch sichere Braunkohleförderung eine weitreichende Absenkung des Grundwasserspiegels. Der entstehende Grundwasserabsenkungstrichter erstreckt sich dabei deutlich über den eigentlichen Tagebaubereich hinaus. Im Jahr 1989 erreichte die Grundwasserabsenkung im Lausitzer Revier mit etwa 2.100 km<sup>2</sup> ihre größte Ausdehnung. Dabei reichte der „Kopf“ des Absenkungstrichters in Form des sogenannten „LAUBAG-Löwen“ fast bis an die südwestliche Grenze des Biosphärenreservates Spreewald heran (Abb. 1). Das Grundwasserdefizit in der Lausitz betrug damals etwa 13 Mrd. m<sup>3</sup>.

Nach Abschluss der Braunkohlenförderung entstehen in den verbleibenden Hohlformen Bergbaufolgeseen, überwiegend durch den Grundwasserwiederanstieg. Diese Umgestaltungen in der Bergbaufolgelandschaft spiegeln sich vor allem in einem reduzierten Flächenanteil der Landwirtschaft und einem etwa achtmal höheren Anteil von Wasserflächen wider (Abb. 2).

Im Lausitzer Revier entstehen 33 neue Standgewässer mit jeweils einer Fläche von mehr als 0,5 km<sup>2</sup>. Diese, bei der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL, 2000) zu berücksichtigenden Bergbaufolgeseen, werden eine Gesamtwasserfläche von etwa 14.500 ha und ein Wasservolumen von etwa 2,3 Mrd. m<sup>3</sup> aufweisen.

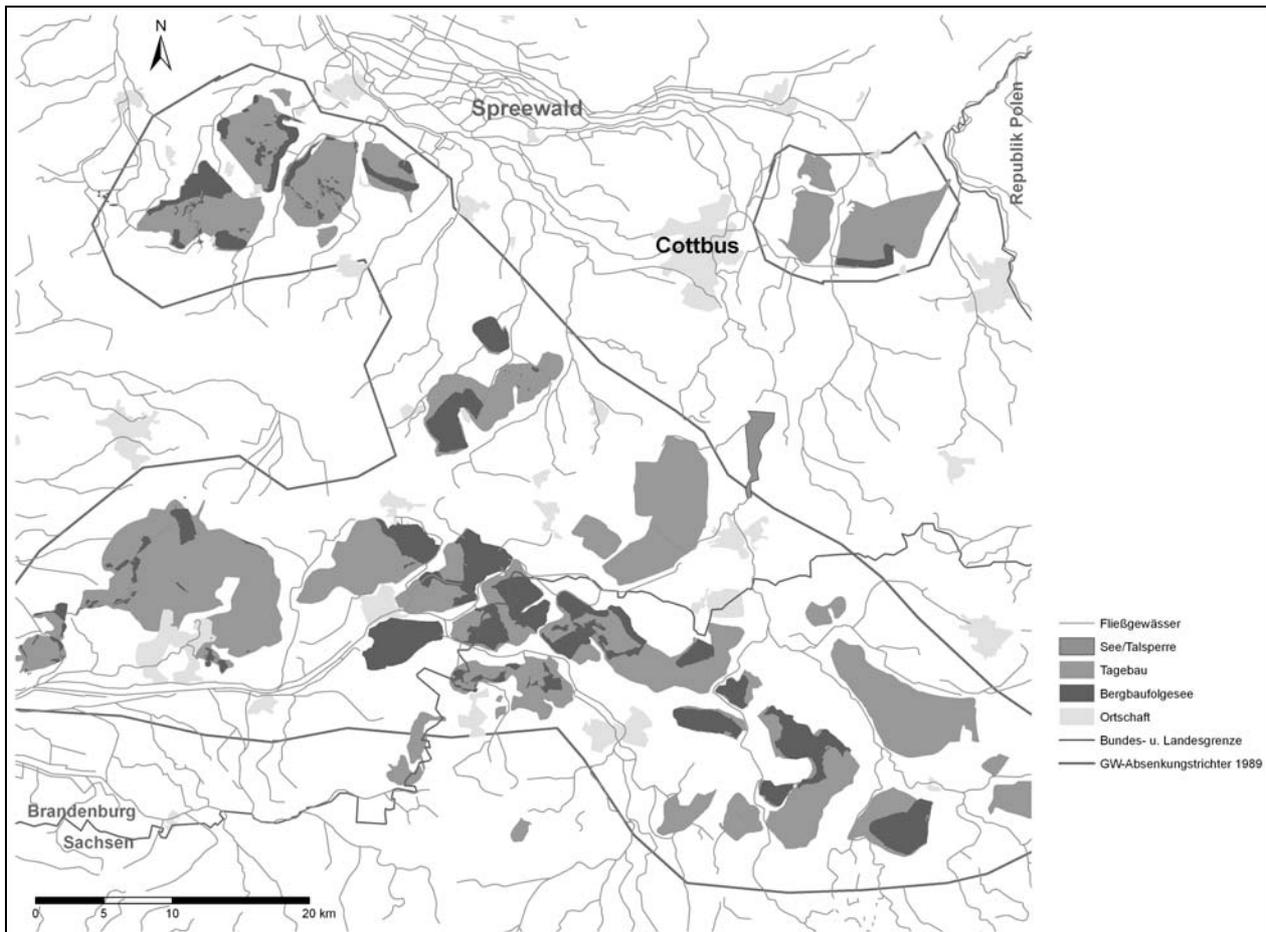


Abb. 1: Übersichtskarte Lausitzer Revier mit den Standorten der aktiven und Sanierungstagebaue, dem Grundwasserabsenkungstrichter (Stand 1989) und den gegenwärtig entstehenden Bergbaufolgeseeen.

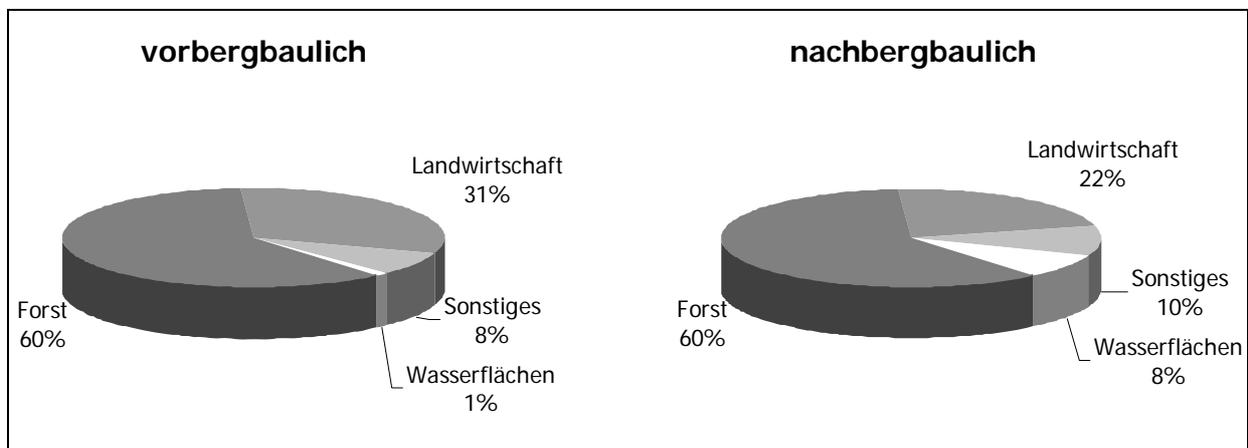
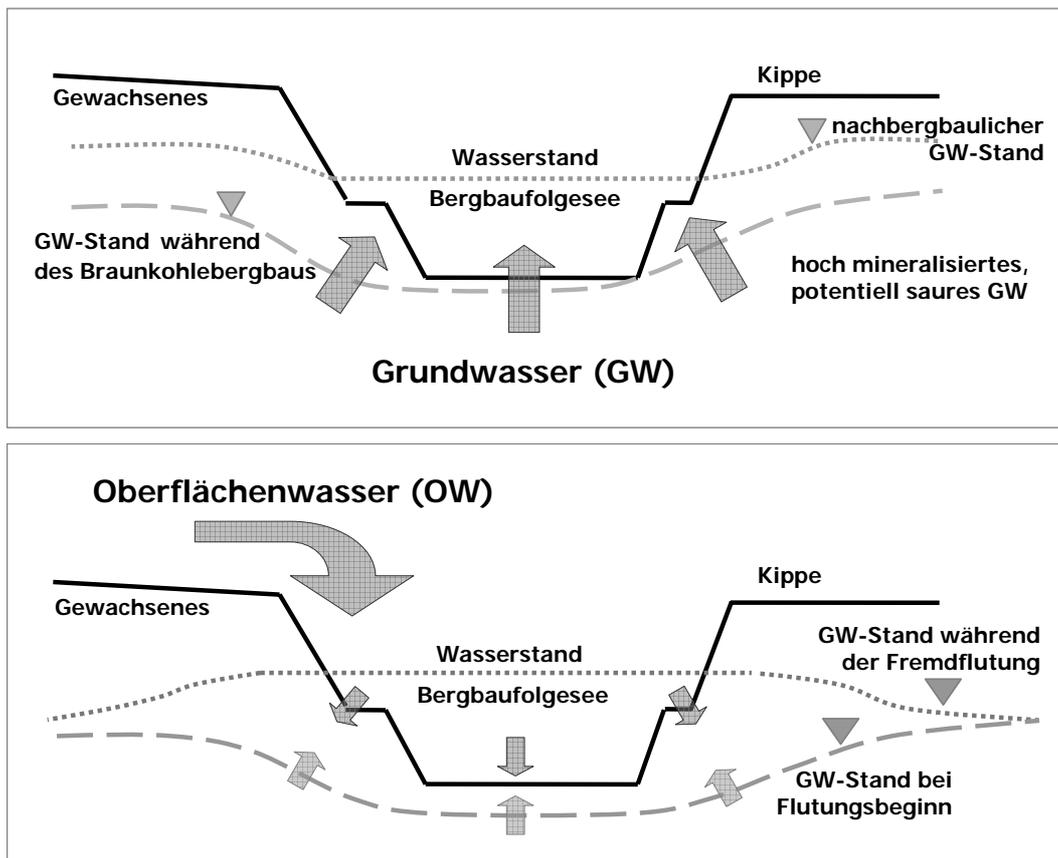


Abb. 2: Gegenüberstellung der vorbergbaulichen und nachbergbaulichen Landnutzung im Lausitzer Revier (nach Pflug, 1998).

## 2. Entwicklung der Wasserbeschaffenheit

Der Grundwasserwiederanstieg ist Basis für die Wiederherstellung eines ausgeglichenen und sich weitgehend selbstregulierenden Wasserhaushalts in den Bergbaufolgelandschaften. Damit sind jedoch bergbaubürtige Erscheinungen in (wieder) grundwassergespeisten Fließ- und Standgewässern der Teileinzugsgebiete verbunden. Das Grundwasser wird bei seinem Wiederanstieg insbesondere während der Passage durch die großflächigen Kippen deutlich hydrochemisch geprägt und transportiert die Reaktionsprodukte der Eisendisulfidverwitterung (Eisen, Sulfat und  $H^+$ -Ionen) in die Oberflächengewässer.

Mit der schrittweisen Einstellung der Sumpfungsmaßnahmen und dem nachfolgenden wiederansteigenden Grundwasserspiegel begannen sich die Restlöcher langsam zu füllen (Abb. 3, oben). Das grundwasserdominierte Seewasser ist daher überwiegend stark sauer und hoch mineralisiert. Aufgrund relativ geringer Nährstoffeinträge und seeinterner Mechanismen sind nur geringe Nährstoffkonzentrationen für die Primärproduktion verfügbar. Sowohl die Acidität als auch die trophischen Bedingungen führen zu einer Gewässerflora und -fauna, die auf wenige angepasste Arten beschränkt ist.



**Abb. 3:** Schematische Darstellung der Beeinflussung entstehender Bergbaufolgeseen durch Grundwassereigenaufgang (oben) und Fremdwasserflutung (unten).

Ein frühzeitiger Flutungsbeginn sowie eine zügige, möglichst kontinuierliche Flutung mit Wasser aus nahegelegenen Fließgewässern ist die beste Möglichkeit zur positiven Beeinflussung der Beschaffenheitsentwicklung in den Bergbaufolgeseen. Dabei liegen die Vorteile neben der Verdrängung des versauernden Grundwassers und der Verdünnung des Seewassers in der chemischen Kompensation bzw. Neutralisation (Abb. 3, unten).

Die bergbauliche Beeinflussung der Fließgewässer resultierte bisher überwiegend aus punktuellen Stoffeinträgen, z. B. hohen Sulfatfrachten an Einleitstellen von Grubenwasserreinigungsanlagen. Inzwischen erreicht das wiederansteigende Grundwasser an vielen Stellen wieder vorbergbauliche Wasserstände und damit einen Wiederanschluss an die Fließgewässer. Dabei werden zunehmend diffuse Stoffeinträge beobachtet, die vor allem durch Braunfärbung des Wassers und Eisenhydroxidablagerungen an Ufern und Gewässersohlen der Vorfluter sichtbar werden.

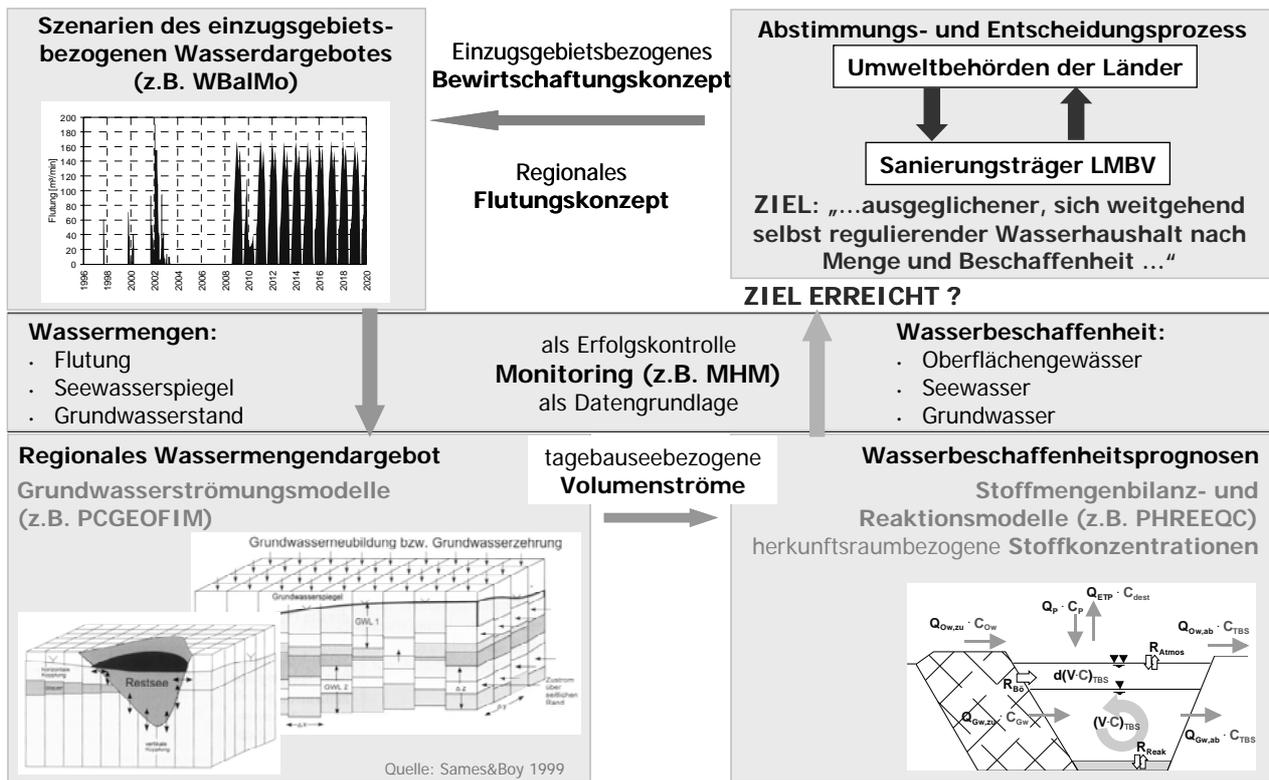
Diese Wassermengen- und Gewässergüteprobleme erfordern Vorhersagen der Beschaffenheitsentwicklung in den entstehenden Bergbaufolgeseen, um eine zielgerichtete Steuerung und Bewirtschaftung des gesamten (Oberflächen) Gewässernetzes umzusetzen.

### 3. Entwicklung komplexer Steuerungs- und Bewirtschaftungskonzepte

Die Flussgebietsbewirtschaftung in den Einzugsgebieten der Spree und der Schwarzen Elster wird durch gemein-

same Arbeitsgruppen der Bundesländer Brandenburg, Berlin, Sachsen-Anhalt und Sachsen sowie des Wasser- und Schifffahrtsamtes des Bundes in enger Abstimmung mit der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (LMBV), als Sanierungsträger des Bundes, durchgeführt. Länderübergreifend wird so das einzugsgebietsbezogene Bewirtschaftungskonzept an die sich ändernden Rahmen- und Randbedingungen angepasst und das regionale Flutungs- und Wasserbehandlungskonzept der LMBV iterativ entwickelt und integriert. Daraus resultieren Szenarien des einzugsgebietsbezogenen Wasserangebotes. Die hydrogeologischen Modelle der LMBV und der aktiv bergbautreibenden Vattenfall Europe Mining AG liefern die notwendigen Informationen zum Grundwasserhaushalt. In Kombination mit den Ergebnissen aus dem umfangreichen montanhydrologischen Monitoring der LMBV werden herkunftsraumbezogene Stoffmengenbilanzen aufgestellt. Diese liefern dann auch die Eingangswerte für hydrogeochemische Reaktionsmodelle. Dieser Integrations- und Iterationsprozess ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

Für die Prognose der Beschaffenheitsentwicklung in den Bergbaufolgeseen wurden in den vergangenen Jahren in einem iterativen Prozess hydrochemische Seemodelle zu Prognoseinstrumentarien entwickelt, die eine komplexe Betrachtung von einzelnen oder auch miteinander verbundenen Bergbaufolgeseen und ihre Einbindung z. B. in das Fließgewässernetz ermöglichen.

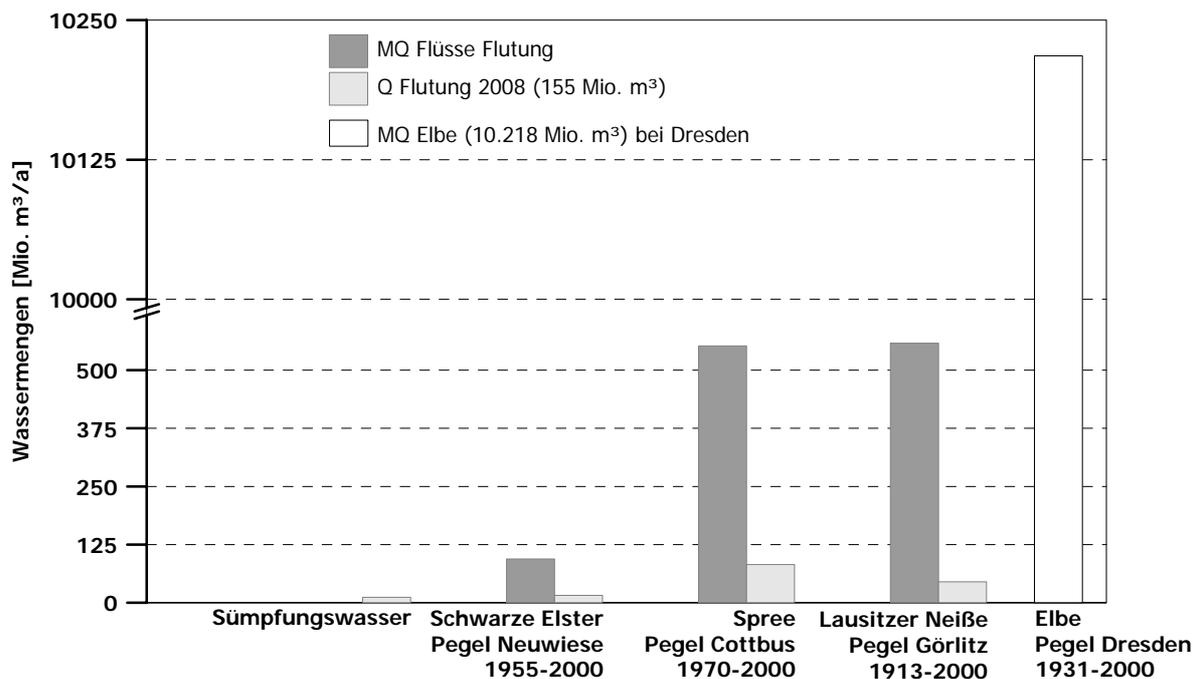


**Abb. 4:** Integrations- und Iterationsprozess der Erarbeitung komplexer Steuerungs- und Bewirtschaftungskonzepte für die zielgerichtete Wiederherstellung eines sich weitgehend selbst regulierenden Wasserhaushalts nach Menge und Beschaffenheit im Lausitzer Revier (nach Uhlmann, 2008).

#### 4. Maßnahmen zur Beeinflussung der Wasserbeschaffenheitsentwicklung

Die Flutung mit Fremdwasser birgt ein großes positives Potential für die hydrochemische Entwicklung und Stabilisierung der Bergbaufolgeseen in sich. Dennoch steht die Flutung der zahlreichen Tagebaurestlöcher des Lausitzer Braunkohlenreviers bei der mengenmäßigen Ver-

teilung des Wasserdargebotes nach der Sicherung der Wasserentnahmeanforderungen und Mindestabflüsse, Betriebsbereitschaft der Speicher und Speisung des Oder-Spree-Kanals an letzter Stelle in der Rangliste potenzieller Wassernutzer.



**Abb. 5:** Dargebot der gegenwärtig zur Flutung der Lausitzer Bergbaufolgeseen genutzten Fließgewässer (DGJ, 2000b) und die aus ihnen im Jahr 2008 entnommenen Flutungswassermengen (LMBV, 2009) im Vergleich zum mittleren Dargebot der Elbe am Pegel Dresden (DGJ, 2000a).

Gegenwärtig wird Wasser aus der Spree, der Schwarzen Elster und der Lausitzer Neiße für die Fremdflutung und Nachsorge der Bergbaufolgeseen genutzt (Abb. 5). Teilweise wird auch noch Sumpfungswasser eingeleitet. Die Entnahme und Überleitung des Flusswassers erfolgt möglichst nah am Bestimmungsort. Im Jahr 2008 betrug die eingeleitete Fremdwassermenge z. B. 155 Mio. m<sup>3</sup> (LMBV, 2009).

Für die sichere Flutung und die effektive Nachsorge der entstehenden Bergbaufolgeseen in einzugsgebietsverträglicher Qualität wären, unter Berücksichtigung u. a. der möglichen (unsicheren) Folgen des Klimawandels und der (unwägbar) Entwicklung des zukünftigen Braunkohleabbaus im Lausitzer Revier, zusätzliche Wasserressourcen zu erschließen. Eine dafür mögliche nutzbare Ressource wäre die Elbe. Mit einem mittleren Jahresdargebot von etwa 10 Mrd. m<sup>3</sup> am Pegel Dresden (siehe Abb. 5) entspräche eine Entnahme und Überleitung von 3 m<sup>3</sup>/s einem Anteil von weniger als einem Prozent. Für das Überwinden topographischer Hindernisse stehen technologische Verfahren zur Verfügung. Eine Elbewasserüberleitung erfordert aber darüber hinaus vor allem einen gemeinsamen länderübergreifenden Willen, um den notwendigen Planungs- und Genehmigungsabläufen eine sichere Basis zu geben.

## 5. Europäische Wasserrahmenrichtlinie und Bergbaufolgeseen

Das Ziel der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie ist das Erreichen guter ökologischer und physikalisch-chemischer Zustände in allen Gewässerkörpern (EG-WRRL, 2000). Dabei ist der Betrachtungsraum das gesamte Flusseinzugsgebiet. Seit Dezember 2009 sind für den ersten Bewirtschaftungszeitraum bis 2015 die entsprechenden flussgebietsbezogenen Bewirtschaftungspläne verbindlich und werden die Maßnahmenprogramme umgesetzt.

Das Lausitzer Revier liegt überwiegend im internationalen Einzugsgebiet der Elbe. Nur ein kleiner Teil liegt im internationalen Einzugsgebiet der Oder. Die Lausitzer Bergbaufolgeseen befinden sich größtenteils in den Elbe-Teileinzugsgebieten Spree und Schwarze Elster. Im Oder-Teileinzugsgebiet Lausitzer Neiße gibt es nur zwei WRRL-relevante Bergbaufolgeseen. Jedoch wird Wasser für die Flutung von Bergbaufolgeseen aus der Lausitzer Neiße entnommen und in die Einzugsgebiete der Spree und der Schwarzen Elster übergeleitet. Die dabei zu berücksichtigenden Entnahmebedingungen wurden durch die deutsch-polnische Grenzgewässerkommission erarbeitet und festgelegt.

Im Bewirtschaftungsplan der Elbe wurden „die Bergbaufolgen ... weitestgehend einheitlich als wichtige Wasserbewirtschaftungsfrage anerkannt“ (Elbe, 2009a). Allerdings erfolgt „die vollständige Berücksichtigung der

Bergbaufolgeseen im Maßnahmenprogramm und im Bewirtschaftungsplan erst nach der Fertigstellung der Gewässer ...“ (Elbe, 2009b).

Bei der bisherigen Umsetzung der EG-WRRL wurde die wechselseitige Beeinflussung von Oberflächenwasser und Grundwasser noch zu wenig in die Betrachtungen einbezogen. Denn gemäß EG-WRRL und der Tochterrichtlinie Grundwasser darf keine negative Beeinträchtigung von Wasserkörpern auf andere Wasserkörper ausgehen. Hierzu fehlen jedoch noch belastbare Oberflächenwasser- und Grundwasser-übergreifende Aussagen. Im Rahmen des investigativen Monitorings werden aber derzeit die notwendigen Daten erfasst und für die Fortschreibung der Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme aufbereitet und ausgewertet.

## Danksagung

Dieser Beitrag basiert im Wesentlichen auf gegenwärtig laufenden Projekten zum Problembereich „Bergbaufolgeseen – Beschaffenheitsentwicklung und Integration in die Flussgebietsbewirtschaftung“. Finanziert werden diese Forschungsprojekte durch das Land Brandenburg und den Freistaat Sachsen sowie die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft und die Vattenfall Europe Mining AG. Die Autoren bedanken sich bei allen fachlich und fördernd Beteiligten.

## 6. Literatur

- DGJ, 2000a. Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Elbegebiet. Teil I von der Grenze zur CR bis zur Havelmündung.
- DGJ, 2000b. Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Elbegebiet. Teil II Havel mit deutschem Odergebiet.
- EG-WRRL, 2000. Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 22.12.2000. Brüssel.
- Elbe, 2009a. Bewirtschaftungsplan nach Artikel 13 der Richtlinie 2000/60/EG für den deutschen Teil der Flussgebietseinheit Elbe. Herausgeber Flussgebietsgemeinschaft Elbe.
- Elbe, 2009b. Maßnahmenprogramm nach Artikel 11 der Richtlinie 2000/60/EG bzw. §36 WHG der Flussgebietseinheit Elbe. Herausgeber Flussgebietsgemeinschaft Elbe.
- LMBV, 2009. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH. Daten und Fakten 2008. Senftenberg.
- LMBV, 2010. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH. Daten und Fakten 2009. Senftenberg.
- Pflug, W. (Hrsg.), 1998. Braunkohlentagebau und Rekultivierung: Landschaftsökologie – Folgenutzung – Naturschutz. Springer. Berlin.
- Uhlmann, W., 2008. Unterlagen zum LMBV-Weiterbildungseminar 2008: Bewertung und Prognose der Wasserbeschaffenheitsentwicklung in Bergbauregionen. Unveröffentlicht.

## Zwischen Trockenheit und Überflutung – die Notwendigkeit einer raumbezogenen Gesamtstrategie zum Umgang mit den Folgen des Klimawandels

Bettina Geiger, Heide Stephani-Pessel, Uta Steinhardt

Hochschule für nachhaltige Entwicklung (FH) Eberswalde, Fachbereich Landschaftsnutzung und Naturschutz, Friedrich-Ebert-Straße 28, 16225 Eberswalde, Uta.Steinhardt@hnee.de

**Zusammenfassung:** In Anbetracht fallender Grundwasserstände in Neubildungsgebieten verschärft sich die bereits angespannte Situation im Wasserhaushalt des Landes Brandenburg zusätzlich aufgrund der Folgen des Klimawandels. Gleichzeitig wird von regionalen Klimamodellen eine Häufung von Extremwetterereignissen für die Zukunft projiziert. Dies impliziert die Notwendigkeit der Anpassung von Regionen und Kommunen an die Folgen des Klimawandels. Ein Aspekt sinnvoller Anpassung ist die Reduzierung des Flächenverbrauches in Kombination mit einer klimaverträglichen Flächennutzung. Eine geeignete Flächenbewirtschaftung ist zugleich auch eine der Voraussetzungen für eine integrierte Wasserwirtschaft auf regionaler und kommunaler Ebene. Die hier präsentierten konzeptionellen Ansätze zweier Teilprojekte des Verbundes INKA BB verdeutlichen die Umsetzung von Strategien und Konzepte zur Integration von Kompensationsmaßnahmen in ein adaptives Wassermanagement. Sowohl die Erarbeitung von Flächenpoolkonzepten mit adaptivem Charakter für ein integratives Wassermanagement als auch die Definition von Anforderungen an geeignete Kompensationsmaßnahmen erfolgt auf der Grundlage zu entwickelnder Indikatorensets; für das integrierte „Climate Proofing“ wird der DPSIR-Ansatz angewendet.

### Between drought and flooding – the need for a space-oriented overall strategy to adapt to the implications of climate change

**Abstract:** In light of the falling groundwater levels in groundwater recharge areas the effects of climate change further aggravate the already precarious situation concerning the water supply in the Federal State of Brandenburg. At the same time, regional climate models predict an increased occurrence of extreme weather conditions making it necessary for regions and local communities to adapt to the implications of climate change. Reducing land consumption together with a climate-sensitive land use represent aspects of this adaptation process. Suitable forms of land use also are a prerequisite for an integrated water management on both the local and regional levels. The conceptual approaches of the two INKA BB projects presented below illustrate the implementation of strategies to integrate compensation measures into an adaptive water management. Both the designation of areas to be used preferably for pool compensation measures with an adaptive character for an integrated water management, and the definition of demands on suitable compensation measures are implemented on the basis of a set of criteria still to be developed. The DPSIR approach is used for the integrated climate proofing.

### 1. Einführung und Problemstellung

Der Klimawandel ist mittlerweile als eine wesentliche Folge des weltweiten anthropogenen Wirtschaftens anerkannt und zu einer zentralen Herausforderung heutiger Umweltpolitik geworden. Als Folge der zunehmenden Treibhausgasemissionen ist die globale Erwärmung bereits deutlich spürbar – ihre Auswirkungen jedoch regional unterschiedlicher Ausprägung. Wegen der physikalischen Prozesszusammenhänge in der Atmosphäre wird sich der Klimawandel, zunächst als Veränderung des Temperaturregimes mit Anstieg des Mittelwertes und der Zunahme von Extremereignissen betrachtet, auch auf regionaler Ebene auf das Niederschlagsgeschehen und die Verdunstungssituation auswirken.

Als mögliche negative Auswirkungen, die einer Anpassung bedürfen, werden im Wassersektor vor allem der erhöhten Hochwassergefahr und der Verringerung des

Wasserdargebots im Sommer Bedeutung beigemessen (BMU, 2008). Solche Auswirkungen sind in Brandenburg bereits zu beobachten. In Zukunft ist eine verstärkte Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter sowie eine erhöhte Verdunstung als Folge steigender Temperaturen zu erwarten (Gerstengarbe et al., 2003). Hinzu kommt eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Extremereignissen (z.B. Starkregenereignisse, Trockenperioden), die jedoch noch ungenügend untersucht und mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Diese Unsicherheiten, die auf unterschiedlichen Annahmen bezüglich der relevanten Einflussfaktoren basieren, überlagern sich zudem mit den Ungenauigkeiten der eingesetzten Klimamodelle. Unumstritten sind jedoch die grundlegenden Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und damit das Wasserdargebot (z. B. durch veränderte Grundwasserneubildung). Bisherige Untersuchungen bestätigen die negative Tendenz des Wasserdar-

gebots in Brandenburg, insbesondere der nordöstlichen Region, die aufgrund der geringen Jahresniederschlags-summen zu den trockensten Arealen Deutschlands gehört (Köstner et al., 2007). Die Auswertung des Landesmess-netzes Grundwasserstand weist im Zeitraum 1976-2005 überwiegend fallende Grundwasserstände in Neubildungsgebieten aus (MUGV, 2010), die regional in Bran-denburg bis zu -6 und -10 cm/a ausmachen.

Die Klimaprojektionen gehen von einer Zunahme von Starkregen – sowohl an Intensität als auch an Häufigkeit – aus. Bei Extremereignissen können die Regenwassermengen von den innerstädtischen Kanal- und Gewässer-netzen nicht ausreichend aufgenommen werden. Die Fol-gen sind eine Verschlechterung der Entwässerung urba-ner Flächen, eine Zunahme der Überflutung von bebau-ten Grundstücken und der städtischen Überflutung durch Kanalüberlastung. Diese Phänomene, die nicht zuletzt auch einer zunehmenden Versiegelung geschuldet sind, machen die Notwendigkeit der Anpassung der Kommun-en sowie der Regionen an die Folgen des Klimawandels deutlich. Für eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung in der Region ist zukünftig zu klären, (in)wie(weit) Klima-trends und Extremereignisse den Wasserhaushalt beein-flussen und welcher Art und in welchem Ausmaß Anpas-sungsstrategien für die unvermeidlichen Folgen des Kli-mawandels durch ein nachhaltiges Land- und Wasserman-agement zu entwickeln sind. Neben der Identifizierung des Handlungsbedarfs und der Handlungsmöglichkeiten sind geeignete Instrumente der Anpassung zu entwickeln. Ein Aspekt sinnvoller Anpassung ist die Reduzierung des Flächenverbrauches bzw. der Flächenschutz und eine der Klimaveränderung angepasste Flächennutzung. Der Flächenverbrauch in Brandenburg war analog zur Bundes-republik in den letzten Jahren stetig sehr hoch – trotz des in der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie festgesetzten Ziels, den Flächenverbrauch bundesweit von derzeit 130 auf 30 ha pro Jahr bis zum Jahr 2020 zu reduzieren. Vor-aussetzung für eine integrierte Wasserwirtschaft auf re-gionaler und kommunaler Ebene ist u. a. eine geeignete Flächenbewirtschaftung.

Hier setzt die Arbeit der beiden Teilprojekte aus INKA BB an: einerseits bei der Entwicklung einer *raumbezogenen Gesamtstrategie* zum Umgang mit den Folgen des Klimawandels und der Entwicklung von klimaadaptiven Musterkategorien für die Regionalplanung; andererseits mit *integralen Siedlungswasserbewirtschaftungskonzepten* mit Fokus auf eine dezentrale und naturnahe Regen-wasserbewirtschaftung durch eine geeignete Kombinati-on von technischen und nichttechnischen Lösungen. Während Teilprojekt 04 auf Ebene der Regionalplanung in den Planungsregionen Lausitz-Spreewald und Ucker-mark-Barnim agiert, bewegt sich Teilprojekt 24 auf kommunaler Ebene. Untersuchungsgebiet ist hier die Gemeinde Panketal im Kreis Barnim.

Gemeinsames Ziel ist es, im Sinne des raumplanerischen Gegenstromprinzips möglichst viele Synergien bei der Erarbeitung von Lösungen für ein adaptives Wasserman-agement zwischen der regionalen und kommunalen Ebene zu erzeugen. In der *Fläche* eignet sich hierfür u. a. die Nutzung bestehender rechtlicher Instrumente wie z. B. dem der Eingriffsregelung (als Instrument des Natur-

schutzrechtes); hier insbesondere Flächenpools und Öko-konten. Voraussetzung für deren Umsetzung ist die räumliche und zeitliche Entkopplung von Kompensati-onsmaßnahmen.

Seit Inkrafttreten des neuen Bundesnaturschutzgesetzes am 01.03.2010 sind Ausgleich und Ersatz einander gleichgestellt, d. h., die Maßnahmen können auch räum-lich entkoppelt stattfinden, wobei Naturalkompensation der Ersatzzahlung vorangestellt bleibt. Der funktionale Zusammenhang der Kompensationsmaßnahmen bleibt ebenfalls weiterhin zentrale Anforderung an die durchzu-führenden Maßnahmen. In der Bauleitplanung hingegen ermöglicht § 1a Abs. 3 in Verbindung mit § 200a BauGB die zeitliche, räumliche und funktionale Entkopplung der Maßnahmen. Voraussetzung ist, dass sie nicht einer ge-ordneten städtebaulichen Entwicklung sowie den Zielen der Raumordnung, des Naturschutzes und der Land-schaftspflege widersprechen.

## 2. Was sind Flächenpools und Ökokonten?

„*Flächenpools* sind das Ergebnis einer sachgerechten und zweckmäßigen Gemeindepolitik, in deren Folge geeignete Flächen als potentielle Ausgleichsflächen bevor-ratet werden“ (BDLA, 1999, S. 5). Bei Flächenpools handelt es sich um Flächen, auf denen Gemeinden zu-künftige Eingriffe frühzeitig kompensieren. Diese Flä-chen werden von der Gemeinde aktiv erworben, bewirt-schaftet und dauerhaft gesichert. Auf diesen Flächen werden vorgezogene Maßnahmen im Sinne des Natur-schutzes und der Landespflege umgesetzt. Diese Maß-nahmen werden *Ökokonto* genannt, da die vorgezogenen Maßnahmen „gebucht“ werden und im Falle eines Ein-griffs entsprechend funktional zugeordnet und von Vor-habensträgern refinanziert werden können. Der Vorteil dieser Kompensationsmethode liegt in der Frühzeitigkeit und Freiwilligkeit. Es können auch interkommunale Zu-sammenschlüsse und regionale Flächen bevorratet wer-den, die ganz im Sinne einer räumlichen Gesamtstrategie in übergeordnete Naturschutzkonzepte wie z. B. bei Bio-topvernetzungen, Pufferflächen um Schutzgebiete, schutzwürdige Flächen (Jessel, 2008) oder der Umset-zung der Wasserrahmenrichtlinie eingebunden werden können.

## 3. Schnittstellen zwischen Eingriffsregelung und adaptivem Wassermanagement

Vielfach entsteht mit den z. Z. in Planung befindlichen Gewässerentwicklungskonzepten zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie ein zusätzlicher Flächenan-spruch, etwa durch die Mäandrierung von Gewässerläu-fen und Schaffung von Ersatzauen oder Reaktivierung von Altarmen. Primär auf die Verbesserung des ökologi-schen Zustandes der Gewässer ausgerichtet, lassen sich in diesen Vorhaben vielfältige Schnittstellen zu Konzep-ten für eine integrative Siedlungswasserwirtschaft, insbe-sondere der Niederschlagswasserbewirtschaftung identi-fizieren, wie sie von den Autoren im Sinne einer Anpas-sung an den Klimawandel gedacht werden. Dies betrifft z. B. integrative Niederschlagswasserkonzepte, die so-wohl dem Prinzip der Entsorgungssicherheit folgen, gleichzeitig aber auch den Wasserrückhalt in der Land-schaft unterstützen. Diese Flächenansprüche lassen sich

synergetisch verknüpfen. Einerseits können Retentionsflächen z. B. dem Regenrückhalt dienen – in Regenrückhaltebecken gespeichertes Niederschlagswasser dient der Vermeidung negativer Folgen von Überschwemmungen (z.B. Abdrift von Fauna), wenn das überschüssige Wasser verzögert dem Vorfluter zugeführt wird. Andererseits kann es zur Aufhöhung bei Niedrigwasserführung des Gewässers genutzt werden und einer Verschlechterung der Gewässergüte entgegenwirken. Voraussetzung ist auch hier, dass dies den gesetzlichen Vorgaben für die Einleitung von Niederschlagswasser entspricht. Siedlungswasserwirtschaftliche Fragestellungen müssen unter den oben genannten Aspekten frühzeitig berücksichtigt und in die Raumplanung/Bauleitplanung und Flächen-nutzung(splanung) integriert werden. Dies findet in der Praxis bisher noch zu wenig Beachtung. Die Zusammenarbeit zwischen Siedlungswasserwirtschaft und räumlicher Planung sollte daher intensiviert werden, um integrative Konzepte mit zusätzlichem Flächenanspruch, die mit der konzeptionellen und optimalen Verknüpfung der Komponenten Versickerung, Speicherung und Ableitung als Anpassungsstrategie an den Klimawandel einhergehen, zu ermöglichen.

#### 4. Vorgehensweise

Ähnlich wie in der Handlungsempfehlung zur Bewertung und Bilanzierung von Eingriffen im Freistaat Sachsen (Bruns und Köppel, 2003) für die jeweiligen Schutzgüter (Wasser, Boden, Landschaftsbild etc.) Eingriff und Ausgleich bewertet werden, kann dies bei der Flächenbewertung und somit -auswahl im Sinne eines adaptiven Wassermanagements über einen Flächenpool bzw. über Öko-konten erfolgen. In schematischer Vorgehensweise und anhand vorliegender Fachinformationen und Kartenwerke sowie in begründeten Einzelfällen (z. B. bei unzureichenden Datengrundlagen) durch spezifische Fachgutachten und Sonderuntersuchungen wird zunächst die Zuweisung der Funktion bzw. eine *Definition der Funk-*

*tion* (Abb. 1) bei der Flächeneignung vorgenommen wie z.B. bei der Retentionsfunktion. Dem schließt sich die *Bewertung der Funktion* mit der Fragestellung an, ob sie eine allgemeine Bedeutung (z. B. Gewässerretention lokal) oder besondere Bedeutung hat, sich entsprechend z. B. als Retentionsfläche im Rahmen (über)regionaler Hochwasserschutzmaßnahmen eignet. Über einen Untersuchungsrahmen, der den Untersuchungsbedarf, die Erfassungskriterien (wie ökomorphologischer Zustand, Gewässerstrukturgüte, Abflussverhältnisse, Gewässerqualität, Verlandungszonen, Gewässerbiozönose, Nutzungen im oder am Gewässer, anthropogene Einflüsse) sowie Hinweise zu auswertbaren Informationsgrundlagen und Bewertungsmethoden aber auch gesetzlichen Vorgaben beinhaltet, lässt sich die Eignung im Hinblick auf das Entwicklungspotenzial bzw. das mögliche Entwicklungsziel bestimmen. Über die Ausweisung geeigneter Kriterien/Indikatoren zur Bewertung der örtlichen Ausprägung (z. B. Abflussbeiwert, Retentionswirkung von Biotoptypen, Infiltrationsrate etc.) können Ausgangsgrößen bzw. Vergleichsgrößen und Zielgrößen herangezogen werden, um den Funktionsverlust bzw. die Funktionsaufwertung zu kennzeichnen. Eine kartografische Aufarbeitung, die Fehlnutzungen, Aufwertungspotenziale und Vorranggebiete visualisiert, ist für eine Flächenbewirtschaftung bzw. Umnutzungserfordernisse im Hinblick auf ein adaptives Wassermanagement ähnlich wie bei der Nutzung der Flächenpools in der Eingriffsregelung und die Einbindung der Akteure (Stakeholder; Jessel et al., 2006) unverzichtbar.

Diese Vorgehensweise wird erweitert, indem die für Flächenpools geeigneten Flächen in einem abschließenden Schritt einem „Climate Proofing“ unterzogen werden. Diese Untersuchung soll sicherstellen, dass die für Flächenpools vorgehaltenen Flächen auch im Sinne der notwendigen Anpassung an den Klimawandel ausgewiesen wurden.

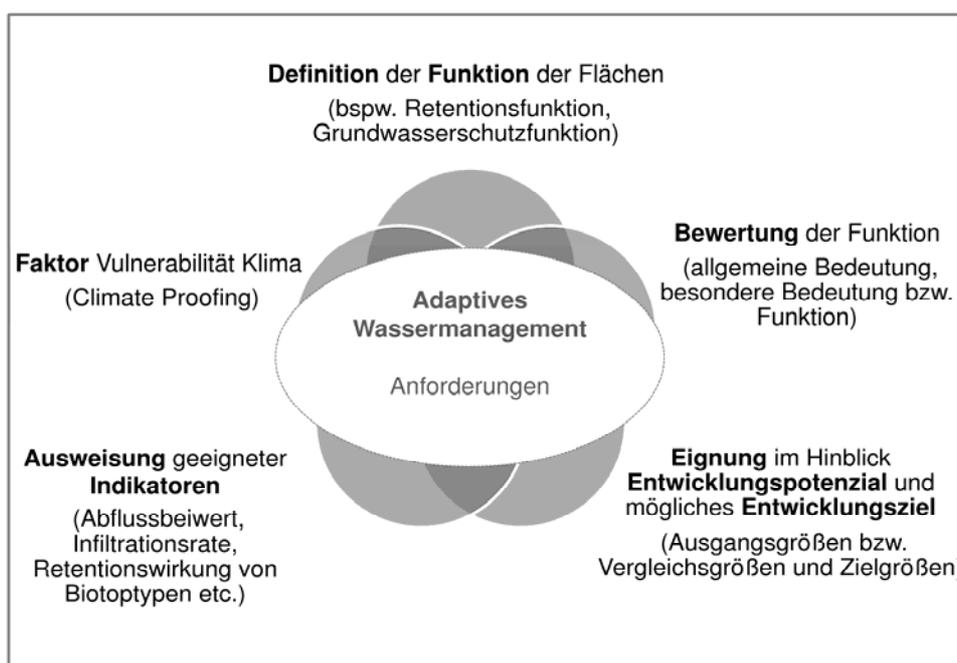


Abb. 1: Vorgehensweise zur Auswahl adaptiver Flächenpools (eigene Darstellung in Anlehnung an Bruns und Köppel, 2003).

## 5. „Climate Proofing“ für Flächenpools

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte „Climate Proofing“ für Flächenpools und Ökokonten wird im Anschluss an das oben beschriebene Auswahlverfahren durchgeführt. Diese Vorgehensweise soll sicherstellen, dass ausschließlich Flächen ausgewählt werden, die im Sinne der Eingriffsregelung entsprechendes Entwicklungspotenzial besitzen. Erst im Anschluss wird geprüft, ob sie sich zusätzlich für ein adaptives Wassermanagement eignen. Auf diese Weise werden größtmögliche Synergien zwischen der Anwendung der Eingriffsregelung und der Anpassung an den Klimawandel erzielt.

Das „Climate Proofing“ erfolgt mithilfe des DPSIR-Modells (Abb. 2). Dabei handelt es sich um ein Modell, das Ursache-Wirkungszusammenhänge in der Umwelt abbildet. Es wurde von der Europäischen Umweltagentur (weiter-)entwickelt und setzt sich zusammen aus:

- **Driving Force** (treibende Kräfte; z. B. ökonomische Aktivitäten, Lebensstile);
- **Pressure** (Belastungen; z. B. Klimaerwärmung);
- **State** (Ist-Zustand; z. B. ökomorphologischer Zustand, Gewässerstrukturgüte, Abflussverhältnisse, Gewässerqualität, Verlandungszonen, Gewässerbiozönose, Nutzungen im oder am Gewässer, anthropogene Einflüsse; nach Bruns und Köppel, 2003);
- **Impact** (Wirkungen; z. B. Entwicklung des Gewässerzustandes, insbesondere in Bezug auf die Gewässergüte und die Gewässerstrukturgüte; ebd.);
- **Response** (Reaktionen; z. B. umweltpolitische Maßnahmen und Instrumente).

Eingangsgröße und treibende Kraft für diese Prüfung stellt in dieser Arbeit das SRES-Szenario A1B (mittlerer

Pfad A1) dar. Es geht von einer starken Marktorientierung, anhaltendem Wirtschaftswachstum (ca. 3 % jährlich), ähnlich schnellen Fortschritten für alle Energieträger bzw. Technologien, einem hohen Anteil nicht fossiler Energieträger, sehr hohem Energieverbrauch aber mäßigen Landnutzungsveränderungen aus. Für dieses Szenario wurden regionalisierte Klimamodelle wie z. B. REMO ausgearbeitet, die die zu erwartenden Klimaveränderungen projizieren („Pressure“).

Da jedoch sowohl mit steigender räumlicher als auch zeitlicher und sachlicher Konkretisierung (vgl. Abb. 3) Unsicherheiten zunehmen, die die Vorhersage von Folgewirkungen des Klimawandels auf die Umweltmedien, auf Arten und Lebensräume sowie auf die Landnutzung und den Menschen erschweren, wird auf Projektionen und Bewertungsmethoden quantitativer Natur verzichtet.

Für die Bewertung der Einwirkungen auf den Zustand („Pressure“) der untersuchten Flächen werden daher Klimaprojektionen herangezogen; für die Bewertung von Zustand („State“) und Impact qualitative Bewertungsmethoden verwendet.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, ergibt sich aus der Evaluations-Matrix (Bewertung der Auswirkungen der Klimaveränderungen) eine Entscheidungshilfe für z. B. die Auswahl von Flächen mit adaptivem Wassermanagement („Response“). Die erzielten Ergebnisse lassen sich sehr gut auf den Raum beziehen und können in einem GeoInformationssystem (GIS) dargestellt werden, was von besonderer Bedeutung für raumplanerische Fragestellungen ist.

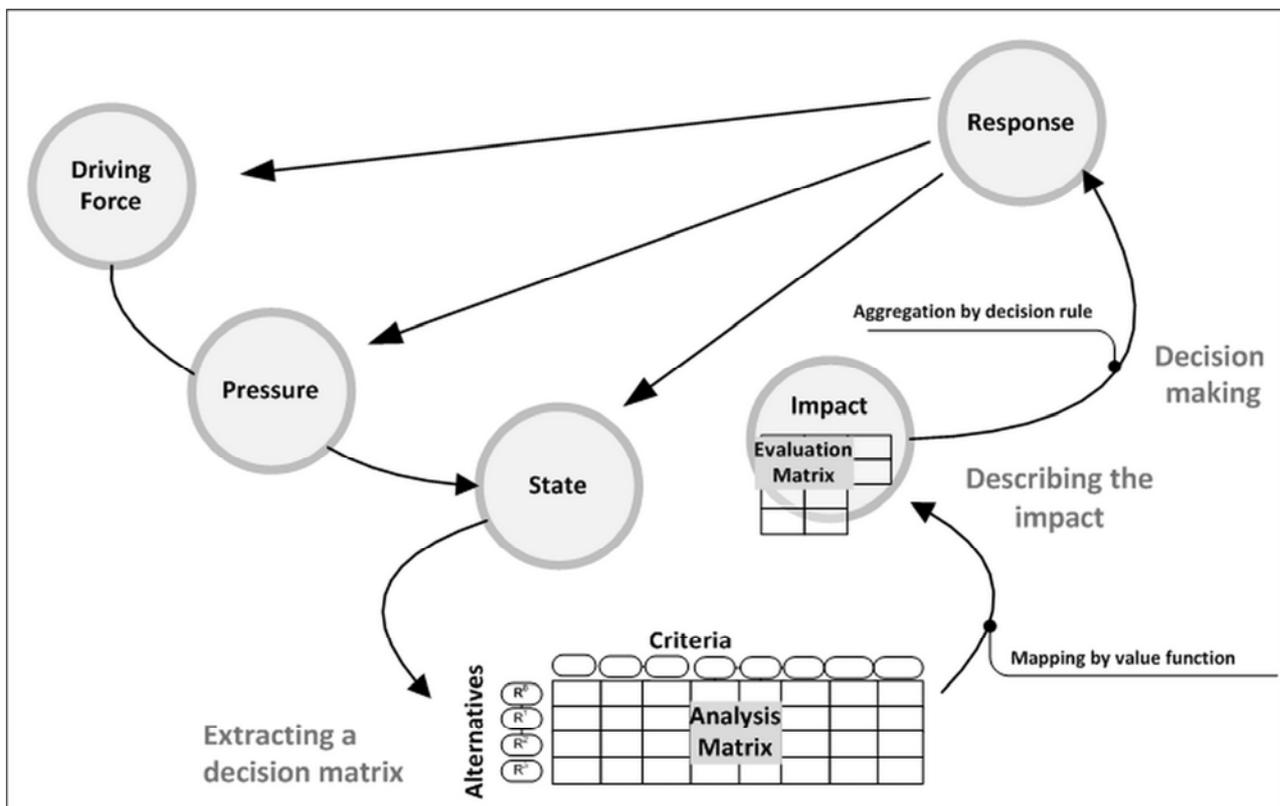
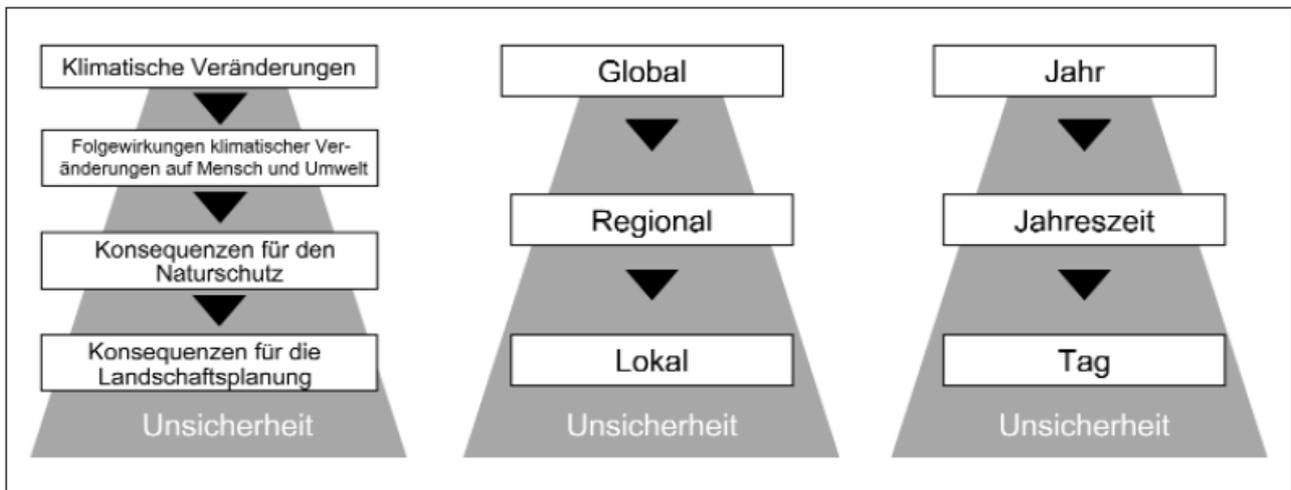


Abb. 2: Veranschaulichung des DPSIR-Modells (Guipponi, 2002; verändert).



**Abb 3:** Zunahme von Unsicherheiten mit zunehmender sachlicher, räumlicher und zeitlicher Differenzierung von Prognosen des Klimawandels und seiner Folgen am Beispiel der Landschaftsplanung (Heiland et al., 2008).

In der Zusammenschau setzt sich das “Climate Proofing“ der Flächenpools zusammen aus:

- Auswahl des Klimaszenarios (“Driving Force“);
- Einbindung regionalisierter Klimamodelle (z. B. REMO; “Pressure“);
- Bewertung des Zustandes der Umweltmedien (hier besonders des Schutzgutes Wasser; “State“);
- Bewertung der Wirkung der Klimaveränderung auf entsprechende Umweltmedien in der Fläche (“Impact“);
- Erarbeitung einer Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Flächen mit Entwicklungspotenzial für adaptives Wassermanagement (“Response“);
- Auswahl der Flächen, die größtmögliche Synergien zwischen den „herkömmlichen“ Kriterien der Eingriffsregelung und denen eines adaptiven Wassermanagements aufweisen.

## 6. Schlussfolgerung

In der Konsequenz der o. g. Vorgehensweise werden für die Regionalplanung Vorschläge für Flächenpoolkonzepte erarbeitet. Diese Flächen sollten auf kommunaler Ebene innerhalb der Flächennutzungsplanung/Bauleitplanung konkretisiert werden.

Gerade aufgrund der genannten Unsicherheiten wäre es darüber hinaus sinnvoll, wenn „die Regionalplanung auf der Grundlage ihrer guten und detaillierten Regionskenntnis einschließlich der Kenntnis von Entwicklungsabsichten ein Kompensationskonzept in Text und Karte erstellte, in dem sie (...) konkrete Räume als besonders geeignet für Kompensationsmaßnahmen kennzeichnet (...)“. (Janssen und Albrecht, 2008, S. 97). Dies gilt jedoch nicht nur für Räume, die im Sinne der Eingriffsregelung für Kompensationsmaßnahmen Entwicklungspotenzial besitzen. Sinnvoll wäre eine frühzeitige Berücksichtigung der bereits bestehenden Strategien und Instrumente, zu denen u. a. auch die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS) zählt. Janssen und Albrecht (2008) schlagen vor, das Raumordnungsgesetz dahingehend weiter zu entwickeln, dass die Regionalplanung die Möglichkeit hat „Kompensation regional, konzeptionell vor-

zudenken und zu -zeichnen und damit den Suchfokus der nachgeordneten Ebenen auf bestimmte Räume zu lenken. Bei besonders großflächigen Beeinträchtigungen könnten Eingriff und Ausgleich im jeweiligen Regionalplan bereits konkret zugeordnet werden“ (ebd.). Auch wenn dies mit Blick auf Biodiversitätsverlust empfohlen wird, kann es ebenso für die Anpassung an den Klimawandel gedacht werden, insbesondere, da beide Problematiken stark ineinandergreifen.

Für die untergeordneten Ebenen (kommunale Ebene/Bauleitplanung) bestünde somit eine planerische Vorgabe, die, wie oben bereits erwähnt, den Suchfokus auf bestimmte Räume lenkt und im Sinne des Gegenstromprinzips, z. B. die Integration siedlungswasserwirtschaftliche Fragestellungen in die Regionalplanung ermöglicht, die von dieser somit frühzeitig zu berücksichtigen wäre.

Damit wäre ein erster Schritt auf dem Weg zu einer gemeinsam entwickelten und damit konsensorientierten räumlichen Gesamtstrategie im Klimawandel vollzogen, bei der einerseits die Tatsache Berücksichtigung finden muss, dass die Missachtung großräumiger Kontexte ggf. Konsequenzen in ebendiesem Maßstab nach sich zieht. Vernachlässigte Wechselwirkungen zwischen Mikro- und Makrobedingungen kehren andernfalls als verzögerte Einsicht auf kostspielige und teilweise dramatische Weise zurück in unser Bewusstsein: Erst verändern wir die Landschaft; dann verändert sie uns.

Demnach müssen wir uns einem Landschaftskonzept verpflichten, das in Anlehnung an Siewecke (2010) nicht nur auf Flusslandschaften beschränkt sein muss und durch folgende Attribute gekennzeichnet ist: *hybrid* statt monofunktional, *zyklisch* statt linear, *schaffend* statt geschaffen. Gesucht wird in diesem Kontext beispielsweise eine zukünftige Infrastruktur, die durch örtliche Anpassung an die zeit-räumlichen Bedingungen natürlicher Systeme ausgelegt wird und mit anstatt gegen die zyklische Dynamik der Natur getaktet ist.

## 7. Literatur

- BDLA – Bund Deutscher Landschaftsarchitekten (Hrsg.), 1999. Flächenpool und Ökokonto. Chancen für umwelt- und kostenbewusste Kommunen. [http://www.bdla.de/pdf/bdla\\_oekokonto\\_broschuere\\_1999.pdf](http://www.bdla.de/pdf/bdla_oekokonto_broschuere_1999.pdf). Zugriff: 07.06.2010.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2008. Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Berlin. [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf). Zugriff: 08.06.2010.
- Bruns, E., Köppel, J., 2003. Handlungsempfehlung zur Bewertung und Bilanzierung von Eingriffen im Freistaat Sachsen. Im Auftrag des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden. <http://www.smul.sachsen.de/umwelt/natur/8516.htm>. Zugriff: 14.06.2010.
- Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P.C., 2003. Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK-Report No. 83. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.
- Giupponi, C., 2002. From the DPSIR reporting framework to a system for a dynamic and integrated decision making process. MULINO conference on “European policy and tools for sustainable water management” 21-23 November 2002, Venice (Italy). <http://siti.feem.it/mulino/dissem/intcon/giuppon.pdf>. Zugriff: 12.06.2010.
- Heiland, S., Geiger, B., Rittel, K., Steinl, C., Wieland, S., 2008. Der Klimawandel als Herausforderung für die Landschaftsplanung. Probleme, Fragen und Lösungsansätze. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 40(2), 37-41.
- Janssen, G., Albrecht, J., 2008. Umweltschutz im Planungsrecht – Die Verankerung des Klimaschutzes und des Schutzes der biologischen Vielfalt im raumbezogenen Planungsrecht. UBA-Texte 10/08. Dessau-Roßlau.
- Jessel, B., 2008. Erfahrungen und Perspektiven der Eingriffs-/Ausgleichsregelung unter besonderer Berücksichtigung des Flächenmanagements. Vortrag auf dem BLG-Fachgespräch, 02.12.2008, Berlin. [http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/2008\\_12\\_02\\_Jessel\\_BGL.pdf](http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/2008_12_02_Jessel_BGL.pdf). Zugriff: 07.06.2010.
- Jessel, B., Schöps, A., Gall, B., Szaramowicz, M., 2006. Flächenpools in der Eingriffsregelung und regionales Landschaftswassermanagement. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 33. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.
- Köstner, B., Surke, M., Bernhofer, C., 2007. Klimadiagnose der Region Berlin/Barnim, Uckermark/Ucker-Randow für den Zeitraum 1951-2006. Materialien Nr. 18 der IAG LandInnovation der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, Berlin. <http://edoc.bbaw.de/volltexte/2008/793/pdf/21zdHy5mOp5M.pdf>. Zugriff: 08.06.2010.
- MUGV – Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, 2010. Wasserversorgungsplan 2009 für das Land Brandenburg. Potsdam. <http://www.mugv.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.177576.de>. Zugriff: 01.06.2010.
- Siewecke, J., 2010. Vater Rhein. Über Flüsse und Anlieger. In: Valentien, D. (Hrsg.): *Wiederkehr der Landschaft*. S. 80-91. Jovis, Berlin.

## Sinkende Seespiegel in Nordostdeutschland: Vielzahl hydrologischer Spezialfälle oder Gruppen von ähnlichen Seesystemen?

Sonja Germer<sup>1</sup>, Knut Kaiser<sup>2</sup>, Rüdiger Mauersberger<sup>3</sup>, Peter Stüve<sup>4</sup>, Tiemo Timmermann<sup>5</sup>, Oliver Bens<sup>2</sup>, Reinhard F. Hüttl<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (BBAW), Jägerstraße 22/23, 10117 Berlin, germer@bbaw.de; <sup>2</sup>Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), Telegrafenberg, 14473 Potsdam; <sup>3</sup>Förderverein Feldberg-Uckermärkische Seenlandschaft e.V., Am Markt 13, 17268 Templin; <sup>4</sup>Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt (StALU) Mecklenburgische Seenplatte, Helmut-Just-Straße 2-3, 17036 Neubrandenburg; <sup>5</sup>Universität Greifswald, Institut für Botanik und Landschaftsökologie, Grimmer Straße 88, 17487 Greifswald

**Kurzfassung:** Die teilweise seit 20-30 Jahren sinkenden Grundwasser- und Seespiegel in Nordostdeutschland werden zunehmend in Wissenschaft, Umwelt- und Naturschutz sowie durch regionale politische Akteure thematisiert. Die Ursachen reichen vom Klimawandel, über den Landnutzungswandel bis zum direkten anthropogenen Eingriff in den Wasserhaushalt. Der Frage nachgehend, inwieweit es sich um regional ähnliche Ursachen-Wirkungs-Komplexe handelt oder jeweils Einzelfälle vorliegen, wurden 19 Seepegel-Zeitreihen der Jahre 1999-2008 aus den Teilregionen Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin, Naturpark Uckermärkische Seen und Müritz-Nationalpark miteinander verglichen. Mittels hierarchischer Clusteranalyse wurden fünf Gruppen gebildet, deren zugehörige Zeitreihen sich jeweils ähneln. Eine Gruppe mit neun Seen mit Vertretern aus allen drei Teilregionen fällt hier besonders auf, da sie sich nicht nur in der kurzfristigen Dynamik der Seepegel stark ähneln, sondern alle während des betreffenden Zeitraumes auch eine negative Tendenz der Seespiegel aufweisen. Dies steht im Gegensatz zu den anderen vier Gruppen. Obwohl eine Klassifizierung der Seen möglich und sinnvoll ist, lässt eine Übersicht von hydrologischen, geologischen und nutzungsbedingten Parametern auf keine eindeutigen Gemeinsamkeiten innerhalb der betreffenden Gruppen schließen, wenn man von der Dominanz von sogenannten „Grundwasserseen“ als hydrologische Seetypen absieht. Um die Ursachen-Wirkungs-Komplexe besser zu verstehen, ist geplant, in den nächsten Schritten weitere Seen aus den genannten Teilregionen zur Analyse einzubeziehen, die Parameteranalyse zu erweitern, ufermorphologisch-geobotanische Transektstudien durchzuführen und paläohydrologische Befunde zu integrieren.

### Decreasing lake levels in Northeast Germany: a multitude of individual hydrologic cases or rather groups of similar lake systems?

**Abstract:** Groundwater and lake levels in Northeast Germany have partly decreased over the last 20-30 years. This has been increasingly addressed by science, environmental and nature conservation and by regional political stakeholders. The causes range from climate and land-use change to direct anthropogenic intervention in the water budget. In order to investigate whether similar regional cause-effect-complexes exist for lakes in this region or if each lake is an individual case, 19 lake level time series for the years 1999-2008 from the subregions Biosphere Reserve Schorfheide-Chorin, Nature Park Uckermärkische Seen and Müritz National Park were compared. By means of hierarchical cluster analysis five groups were formed whose associated time-series were similar. One group with nine lakes and representatives of all three subregions is especially remarkable, since not only the short-time lake-level dynamics resemble each other, but all of them show a negative trend during the respective period. This is in contrast to the four other groups. Although a classification of the lakes is possible and reasonable, an overview of hydrologic, geologic and land-use parameter does not reveal any similarities within the respective groups. This is if one disregards the dominance of so called 'ground water lakes' as hydrologic lake type. In order to get a better understanding of the cause-effect-complexes, for the next steps it is planned to include more lakes from the subregions into the analyses, to extend the parameter analyses, to perform morphologic-geobotanical transect studies at lake shores and to integrate paleohydrologic data.

### 1. Einleitung

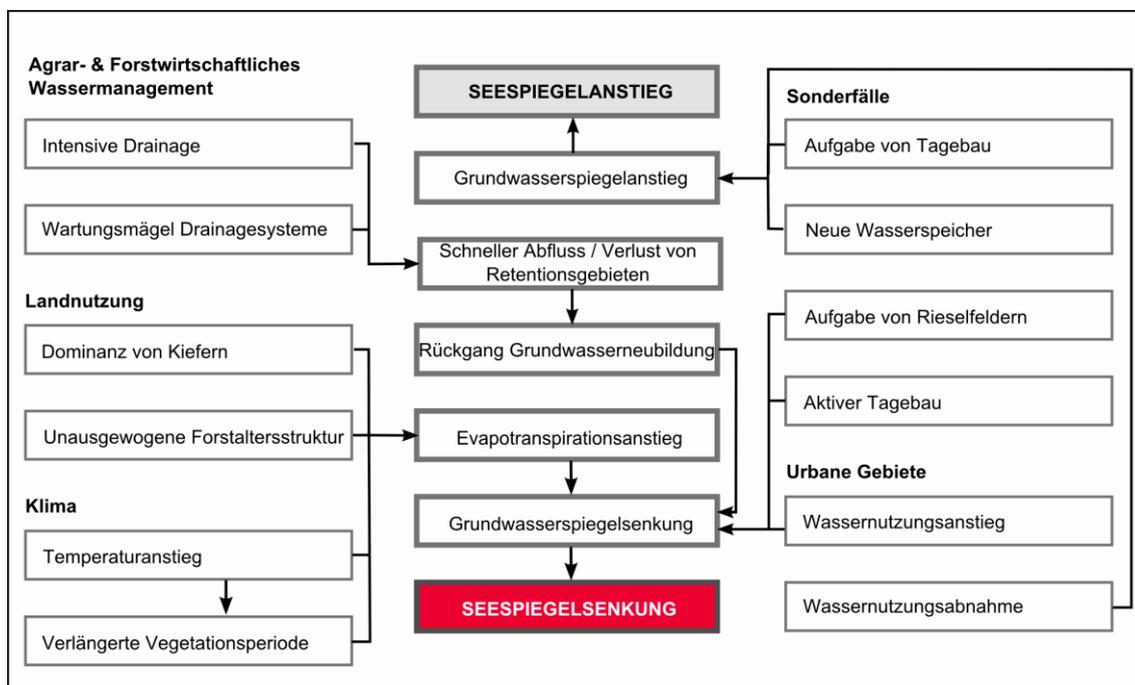
Die globale Erwärmung ist heute eine wissenschaftlich anerkannte Tatsache und es wird prognostiziert, dass die Erwärmung weiter voranschreitet, auch wenn der anthropogene Ausstoß von Treibhausgasen unverzüglich gestoppt werden könnte (IPCC, 2007a, 2007b). Auch ist bekannt, dass die Lufttemperatur den globalen und regio-

nenal Wasserkeislauf reguliert (Huntington, 2006). In Nordostdeutschland wurde über die letzten Dekaden ein statistisch signifikanter Temperaturanstieg nachgewiesen (1961-1998: +1 K; Lahmer und Pfützner, 2003). Gleichzeitig konnte durch zahlreiche regionale und lokale Studien gezeigt werden, dass auch der Landschaftswasserhaushalt im Wandel begriffen ist (Germer et al.,

im Druck). Dies manifestiert sich beispielsweise in großräumig sinkenden Grundwasserspiegeln, der Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses und Mindestabflusses der Havel sowie zahlreicher kleinerer Fließgewässer und der Absenkung von Seespiegeln (Abb. 1) sowie dem Trockenfallen von Mooren (z.B. Landgraf und Notni, 2003; Finke und Krause, 2005; Krone, 2007; Landgraf, 2007; Nützmann und Mey, 2007; Nillert et al., 2008; LUA, 2009; Natkhin et al., 2009). Die von den Autoren benannten Ursachen sind vielfältig und reichen von der Klimaveränderung über den Landnutzungswandel, das agrar- und forstwirtschaftliche Wassermanagement bis hin zu einem veränderten Wasserverbrauch in urbanen Gebieten und Sonderfällen, wie die Aufgabe der Rieselfeldbewirtschaftung um Berlin (Abb. 2).

Die Befund- und Interpretationsvielfalt lässt ein heterogenes Bild von hydrologischen Auswirkungen und dahinter liegenden Ursachen entstehen. Mit dem Ziel, mögliche Muster in diesem heterogenen Bild zu erkennen, wird in dieser Arbeit der Frage nachgegangen, ob es sich bei den beobachteten Seespiegelsenkungen um Gruppen von regional ähnlichen Ursachen-Wirkungs-Komplexen handelt, oder ob jeweils Einzelfälle vorliegen, die nur individuell betrachtet werden können.

**Abb. 1:** Trocken gefallene Seeufer in Nordostdeutschland. Oben: Ostufer des Redernswalder Sees im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin (Foto: K. Kaiser, September 2009); unten: Südostufer des Großen Fürstenseer Sees im Müritz-Nationalpark (Foto: U. Meßner, Mai 2009).



**Abb. 2:** Mögliche Ursachen für Seespiegelsenkungen und -anstiege (nach Germer et al., im Druck).

## 2. Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

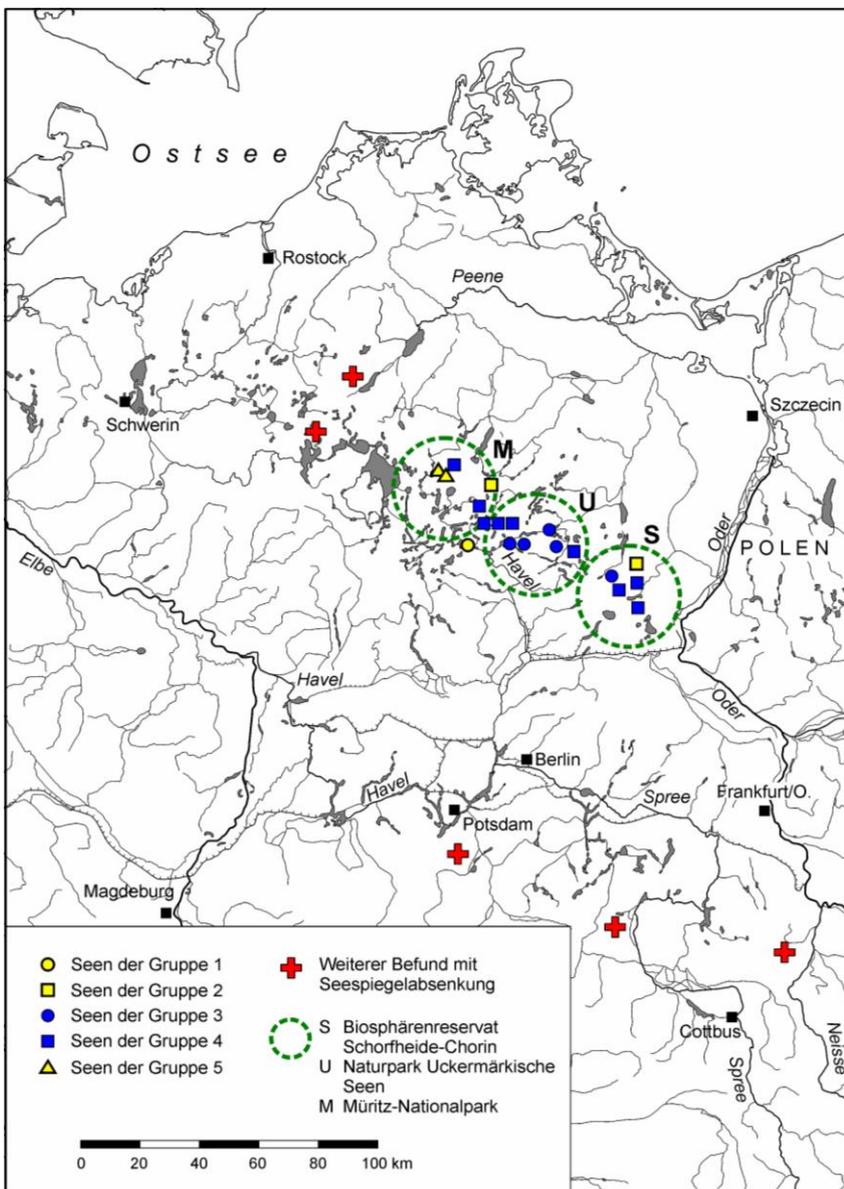
Entlang eines Südost-Nordwest orientierten Transektes im Bereich der Mecklenburgisch-Brandenburgischen

Seenplatte wurden langjährig erhobene Seespiegeldaten aus drei Großschutzgebieten ausgewertet (Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin (S), Naturpark Uckermärkische Seen (U), Müritz-Nationalpark (M); Abb. 3). Alle Gebiete liegen im unmittelbaren Vor- oder Rückland der weichselglazialen Pommerschen Haupteisrandlage und

die jeweiligen Seen damit in unterschiedlichen Teilen der glazialen Serie (Grundmoräne, Endmoräne, Sander; Tab. 1). Hydrographisch befinden sich die Seen entweder in Binneneinzugsgebieten – deren Vorhandensein ein Charakteristikum der regionalen Jungmoränenlandschaft darstellt – oder gehören den Flusseinzugsgebieten von Ucker/UEcker (Ostsee) und Havel (Nordsee) an. Den subkontinentalen Charakter des Untersuchungsgebietes verdeutlichen die den jeweiligen Großschutzgebieten nächstgelegenen Klimastationen Angermünde, Neustrelitz und Waren mit mittleren Jahresniederschlägen von 532 bis 584 mm (1951-2000) und einer geringen positiven (lokal sogar negativen) klimatischen Wasserbilanz. Die Jahresdurchschnittstemperaturen liegen um 8 °C (BMUNR, 2003). In den letzten etwa 100 Jahren stieg die Jahresdurchschnittstemperatur im Untersuchungsgebiet um 0,8-1,2 K an. Die Niederschlagsentwicklung zeigt kein einheitliches Bild (Trends bis  $\pm 40$  mm), doch wird eine häufigere Sommertrockenheit deutlich (Werner et al., 2005; Stüve, 2010). Die Seen und ihre Einzugsgebiete haben in den vergangenen etwa 800 Jahren eine

Reihe von teils gravierenden anthropogenen Eingriffen erfahren (z.B. Seespiegelveränderungen, Anschluss an die Vorflut, Wandel der Gebietsnutzung vor allem durch Ent- und Wiederbewaldung; Kaiser, 1996). Einige See-einzugsgebiete waren zudem von sogenannten „Komplexmeliorationen“ in den 1960er und 70er Jahren betroffen. Die Mehrzahl der Einzugsgebiete ist gegenwärtig fast vollständig bewaldet, vor allem mit Dominanzbeständen der Kiefer (Tab. 1).

Ein großer Teil der ausgewählten Seen lässt sich hydrologisch als „Grundwassersee“ typisieren (Mauersberger, 2002, 2006), das heißt, ihre Wasserspeisung erfolgt hauptsächlich durch den Grundwasserzustrom aus dem oberen, in der Regel unbedeckten Aquifer und ein oberirdischer Abfluss, der die Lage des Wasserspiegels bestimmen könnte, ist nicht vorhanden. Einige der zwischen 2 und 212 ha großen Seen besitzen Zu- und/oder Abflussgerinne, die jedoch nur noch selten Wasser führen und daher für das hydrologische Geschehen (mittlerweile) weitgehend bedeutungslos sind (Tab. 1).



**Abb. 3:** Seen in Nordostdeutschland deren Pegel-Zeitreihen in dieser Studie miteinander verglichen wurden. Zudem ist eine Auswahl weiterer, peripher gelegener Befunde gesunkener Seespiegel dargestellt (Juschus und Albert, 2010; Lorenz et al., 2010; Mietz und Vedder, 2010; Wichern et al., 2010; W. Wihle/Waren, mdl. Mitt.).

**Tab. 1:** Übersicht von hydrologischen, geologischen und nutzungsbedingten Parametern. Die Einteilung der Gruppen ist das Ergebnis der statistischen Analyse.

| See                   | Zu-/Abfluss  | Hydrologischer Typ <sup>1</sup><br>aktuell | Hydrologischer Typ <sup>1</sup><br>primär | Größe<br>[ha] | Nutzung<br>im EZG | Geologie <sup>2</sup> |
|-----------------------|--|--|---|---------------|-------------------|-----------------------|
| Gruppe 1              |  |  |   |               |                   |                       |
| U Thymensee           | permanent zwei Zuflüsse, ein Abfluss                       | Fließsee mit großem EZG                    | Fließsee                                  | 111           | Wald              | Sander                |
| Gruppe 2              |  |  |   |               |                   |                       |
| S Jakobsdorfer See    | 2 Zuflüsse und 1 Abfluss periodisch (künstlich)            | Fließsee mit kleinem EZG                   | Grundwassersee                            | 23            | Wald              | Endmoräne             |
| M Gr. Serrahnsee      | Abfluss  | Fließsee mit kleinem EZG                   | Grundwassersee                            | >17           | Wald              | Endmoräne-Sander      |
| Gruppe 3              |  |  |   |               |                   |                       |
| U Gr. Griebchensee    | ohne (Abfluss seit langem trocken)                         | Grundwassersee                             | Grundwassersee                            | 6             | Wald              | Sander                |
| U Steißsee            | ohne (Abfluss seit langem trocken)                         | Grundwassersee                             | Grundwassersee                            | 5             | Wald-Acker        | Grundmoräne-Sander    |
| U Stoitzeesee         | ohne   | Grundwassersee<br>(Übergang zu Kesselsee)  | Grundwassersee<br>(Übergang zu Kesselsee) | 24            | Wald              | Grundmoräne-Sander    |
| U Stübnitzsee         | ohne (Abfluss seit langem trocken)                         | Grundwassersee                             | Grundwassersee                            | 5             | Wald              | Sander                |
| S Laagensee           | Zuflüsse, ein Abfluss                                      | Fließsee mit kleinem EZG                   | Fließsee                                  | 39            | Wald              | Endmoräne             |
| Gruppe 4              |  |  |   |               |                   |                       |
| U Clanssee            | ohne   | Grundwassersee<br>(Übergang zu Kesselsee)  | Grundwassersee<br>(Übergang zu Kesselsee) | 44            | Acker-Wald        | Grundmoräne           |
| U Gr. Kronsee         | unbedeutender(?) Drainagezufluss                           | Grundwassersee                             | Grundwassersee                            | 47            | Wald-Acker        | Grundmoräne-Sander    |
| U Gr. Petznicksee     | geringer periodischer Zufluss, künstlicher Abfluss trocken | Grundwassersee                             | Grundwassersee                            | 14            | Wald              | Sander                |
| U Kl. Kronsee         | ohne   | Grundwassersee<br>(Übergang zu Kesselsee)  | Grundwassersee<br>(Übergang zu Kesselsee) | 13            | Wald-Acker        | Grundmoräne           |
| S Gr. Peetzigsee      | ohne   | Grundwassersee                             | Grundwassersee                            | 39            | Wald-Acker        | Sander                |
| S Buckowsee           | ohne   | Kesselsee                                  | Kesselsee                                 | 4             | Wald              | Endmoräne             |
| S Redernswalder See   | 1 periodischer Zufluss (künstlich)                         | Endsee                                     | Grundwassersee                            | 48            | Wald              | Sander                |
| M Gr. Fürstenseer See | künstl. 2 Zu- und 2 Abflüsse (trocken)                     | Grundwassersee                             | Grundwassersee                            | 212           | Wald              | Sander                |
| M Babker See          | ohne   | Grundwassersee                             | Grundwassersee                            | 10            | Wald              | Sander                |
| Gruppe 5              |  |  |   |               |                   |                       |
| M Gr. Bodensee        | Abfluss  | Quellsee                                   | Grundwassersee                            | 32            | Wald              | Sander                |
| M Kl. Bodensee        | Zu- und Abfluss  | Fließsee mit kleinem EZG                   | Grundwassersee                            | 2             | Wald              | Sander                |

<sup>1</sup>nach Mauersberger (2002, 2006); <sup>2</sup>nach (a) Geologische Karte von Mecklenburg-Vorpommern, Karte der quartären Bildungen – Oberfläche bis fünf Meter Tiefe 1:200.000 (verschiedene Blätter); (b) Geologische Übersichtskarte des Landes Brandenburg 1:300.000.

## 2.2 Datengrundlage und -analyse

Aus den drei genannten Großschutzgebieten wurden für die vorliegende Betrachtung Seen ausgewählt, für die

1. lückenlose Pegeldaten für einen möglichst großen Zeitraum vorlagen und
2. eine direkte anthropogene Einflussnahme auf den Wasserspiegel (Staubewirtschaftung, Wasserspiegeländerung durch Maßnahmen innerhalb des Zeitraumes) ausgeschlossen werden konnte.

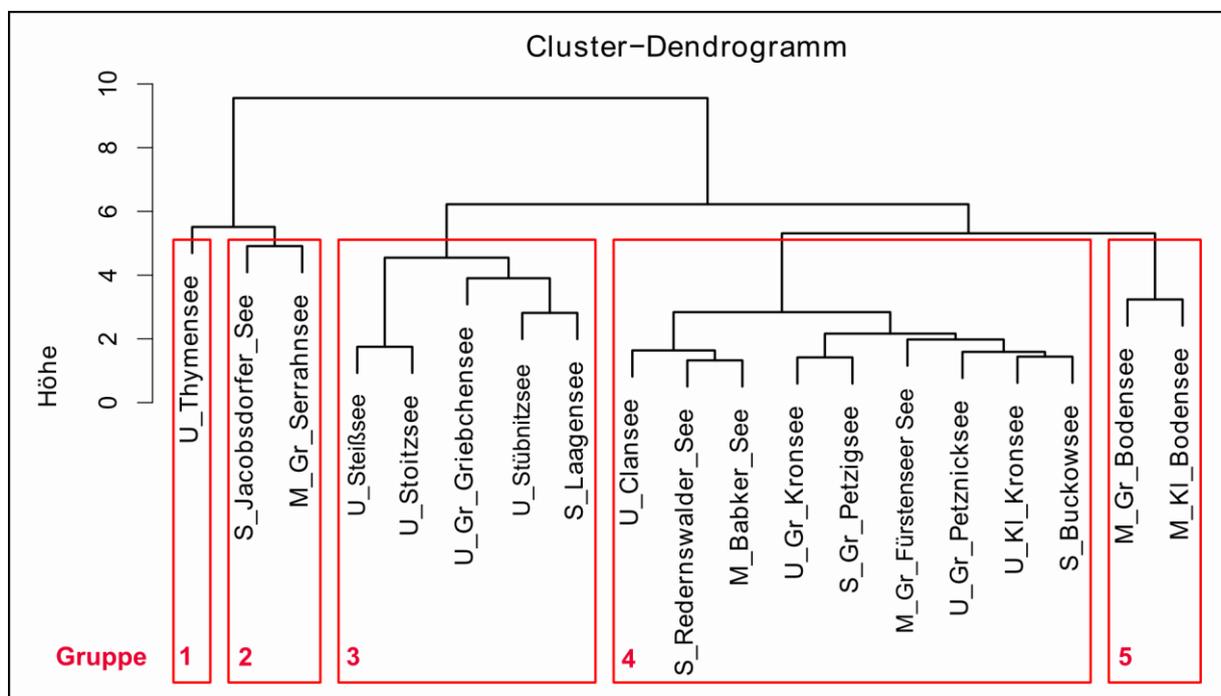
Es handelt sich um 19 Seen, für die Daten mindestens aus der gesamten letzten Dekade bereit standen. Für die Analyse wurden Quartalswerte für den Zeitraum 1999-2008 betrachtet.

Zur Identifizierung von Seen, deren Dynamik der Zeitpunkte von Anstieg und Abfall der Seespiegel sowie deren Verhältnisse zueinander sich ähnelt, wurden die Zeitreihen normalisiert (Mittelwert = Null, Varianz = 1). Mittels hierarchischer Clusteranalyse wurden Gruppen gebildet, deren zugehörige Zeitreihen sich jeweils am meisten ähneln (Crawley, 2007). Das entstehende Cluster-Dendrogramm gruppiert die ähnlichsten Zeitreihen im gleichen Ast des Dendrogramms. Gruppen, die sich deutlich unterscheiden, werden einem anderen Ast zugeordnet. Die „Ähnlichkeit“ wird definiert durch die Euklidische Distanz zwischen zwei Datensätzen (hier Zeitreihen) in einem m-Dimensionalen Raum mit m Variablen (hier Länge der Zeitreihen). Bei dem hier angewandten hierarchisch-agglomerativen Verfahren wird das System durch sukzessives Gruppieren von Datensät-

zen und im weiteren Verlauf durch Fusion von kleineren zu größeren Gruppen konstruiert. Zur Fusion der Gruppen wurde das „complete linkage“-Verfahren genutzt, bei dem der Abstand zweier Gruppen gleich dem maximalen Abstand zweier Objekte aus je einer Gruppe ist. Aus diesem System ist eine der Gruppierungen zwischen den beiden Extremen als Lösung des Clusterungsproblems auszuwählen. Hier wurde eine Aufteilung in fünf Gruppen gewählt, da sich diese Anzahl für die spätere Diskussion der Ergebnisse am besten eignet. Die Einteilung dient nur als Instrument zur Beschreibung der Ergebnisse und für die Diskussion. Sie beeinträchtigt jedoch nicht die Ergebnisse der Clusteranalyse selbst. Das Normalisieren der Zeitreihen führt dazu, dass innerhalb einer Gruppe Seen mit ganz unterschiedlichen absoluten Seespiegeländerungen vereint sein können.

## 3. Ergebnisse

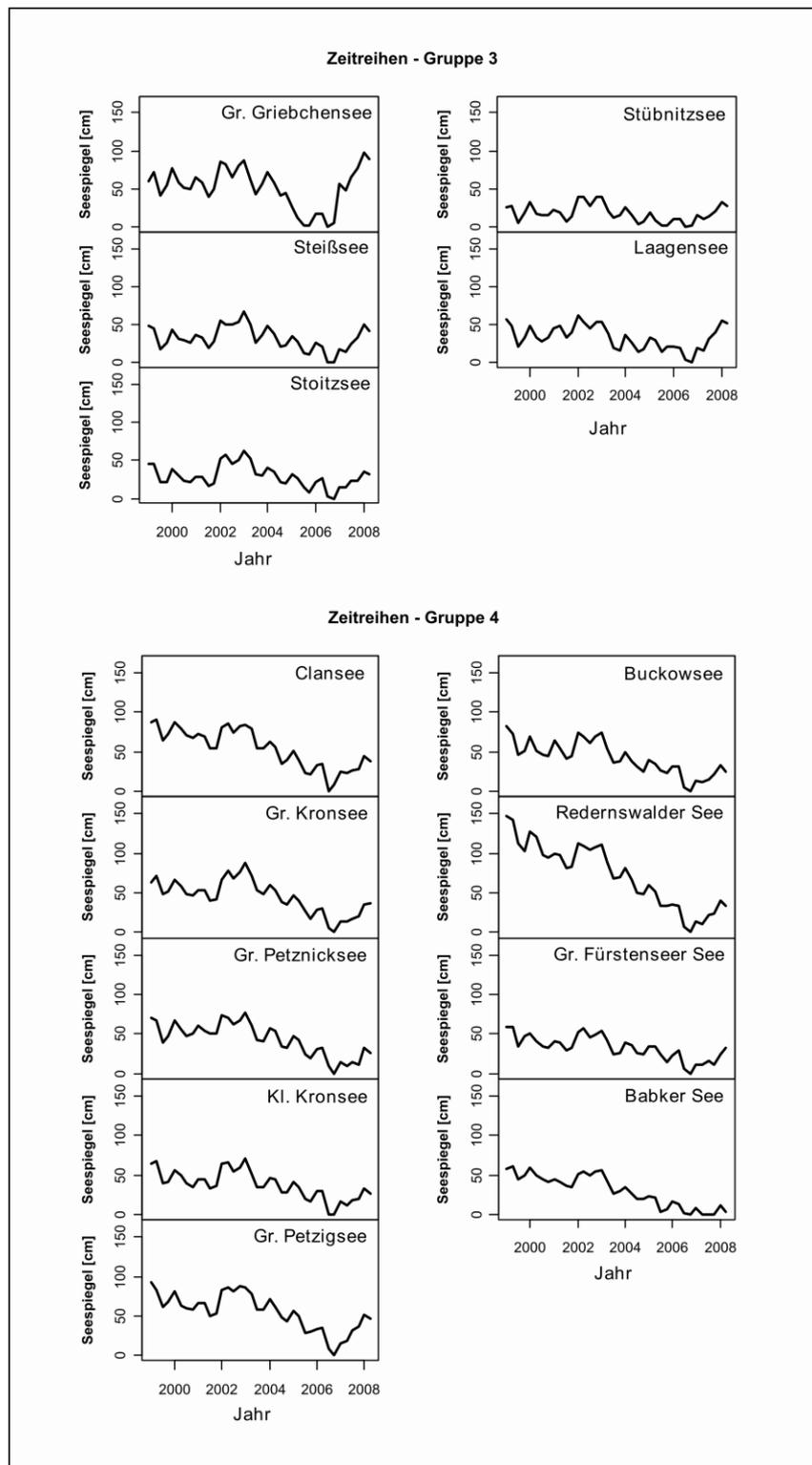
Die Clusteranalyse hat zu einer Einteilung in 5 unterschiedlich große Gruppen geführt (Abb. 4). Die kleinste Gruppe umfasst einen und die größte Gruppe neun Seen. Je höher der Abstand zwischen zwei Ästen des Dendrogramms, desto höher ist die Heterogenität der Gruppe, die beide Äste umfasst. Demzufolge ist bei einer Einteilung in fünf Gruppen die Heterogenität in der Gruppe 4 am geringsten. Bemerkenswert ist, dass diese Gruppe Vertreter aller Teilgebiete einschließt. Im Vergleich dazu weist die Gruppe 3 eine relativ hohe Heterogenität auf. Dennoch ist die Ähnlichkeit zweier Seen innerhalb dieser Gruppe sehr groß (Steißsee und Stoitzsee).



**Abb. 4:** Cluster-Dendrogramm für 19 Seepiegel-Zeitreihen und Einteilung in 5 Gruppen. Die Buchstaben vor den Seennamen geben deren Zugehörigkeit zu den drei Teilgebieten wieder (U: Naturpark Uckermärkische Seen, S: Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin, M: Müritz-Nationalpark). Die Skala am linken Rand gibt die skalierten Abstände zwischen den Clustern wieder. Diese Abstandsrelationen zwischen den Gruppen geben die Reihenfolge der Vereinigung wieder. Je höher der Abstand zwischen den Gruppen ist, desto heterogener werden diese.

Die Gruppen 2 und 5 beinhalten jeweils nur zwei Seen, wobei die zweite Gruppe eine viel höhere Heterogenität aufweist. Die fünfte Gruppe hingegen ist weniger heterogen, da sie die miteinander verbundenen Seen Großer und Kleiner Bodensee beinhaltet. Der Thymensee (Gruppe 1) ähnelt keinem anderen, weil es sich um einen Vertreter eines anderen hydrologischen Typs handelt (permanent durchströmter Fließsee; Tab. 1).

Betrachtet man die Ganglinien der einzelnen Gruppen nebeneinander, so wird deutlich, dass die durch die Clusteranalyse definierten Gruppen sich deutlich in ihrer Seepegeldynamik unterscheiden. Die Gruppe 4 fällt hier besonders auf, da sich die Seepiegel dieser Gruppe nicht nur in der kurzfristigen Dynamik ähneln, sondern alle während des betreffenden Zeitraumes auch eine deutliche negative Tendenz aufweisen (Abb. 5). Dies steht im Gegensatz zu den anderen vier Gruppen.



**Abb. 5:** Seespiegel-Zeitreihen der Jahre 1999-2008 für die Gruppen 3 und 4 des Cluster-Dendrogramms (vgl. Abb. 4).

Die Gruppe 3 zeigt eine ähnliche Dynamik bezüglich des Ansteigens und Abfallens der Seespiegel wie die vierte Gruppe. Hier ist jedoch der Erholungseffekt im Sinne eines Wiederanstiegs nach Phasen erhöhten Niederschlags viel stärker ausgeprägt, so dass über den beobachteten Zeitraum kein eindeutiger Trend sichtbar ist (Abb. 5).

Die Übersicht von hydrologischen, geologischen und nutzungsbedingten Parametern (Tab. 1) lässt auf keine eindeutigen Gemeinsamkeiten innerhalb der betreffenden Gruppen schließen, wenn man von der Dominanz von so genannten „Grundwasserseen“ als hydrologische Seetypen absieht.

#### 4. Diskussion

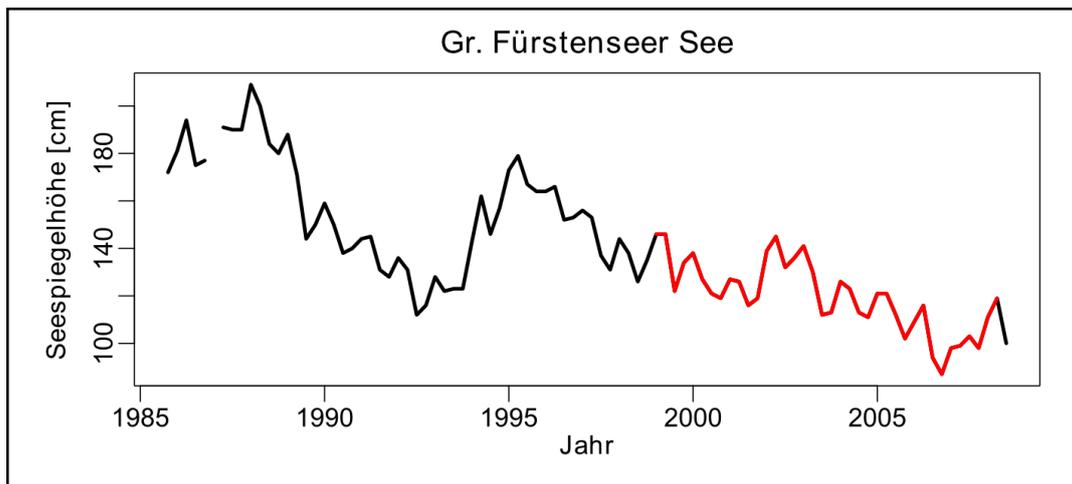
Die Ergebnisse legen nahe, dass eine Klassifizierung der untersuchten Seen möglich und bei Vergleich der Zeitreihen auch sinnvoll ist. Gerade die unter Gruppe 4 zusammengefassten Seen weisen eine hohe Ähnlichkeit auf. Da diese Seen deutlich gesunkene Seespiegel im Laufe des Untersuchungszeitraumes aufweisen, ist das Verständnis der diesen Seen zugrunde liegenden Hydrodynamik von besonderem Interesse. Anhand der aufgelisteten Parameter (Tab. 1) lässt sich derzeit noch nicht klären, ob dieser Gruppe von Seen mit ähnlicher Pegeldynamik auch ähnliche Umweltveränderungen als Triebkräfte zu Grunde liegen. Eine detaillierte Aufnahme z.B. der Geologie oder zusätzlicher Parameter, wie die jeweilige Entfernung zur Wasserscheide, könnten hier hilfreich sein. Da es jedoch keine räumliche Häufung der einer Gruppe zugehörigen Seen gibt, wird gefolgert, dass eher regional wirksame Ursachen die entscheidenden Triebkräfte sind. Eine regional auftretende Ursache kann z.B. die mit dem Klimawandel einhergehende Temperatur-/Verdunstungserhöhung in Nordostdeutschland sein (Werner et al., 2005). Hierbei ist zu bedenken, dass die Zeitreihen aus Großschutzgebieten stammen und in der unmittelbaren Umgebung der betreffenden Seen während des Untersuchungszeitraumes kein entscheidender Landnutzungswandel als potenzielle lokale Triebkraft stattgefunden hat. Ein anderer Grund für die klare Gruppenbildung könnte auch die Lage aller 19 Seen im unmittelbaren Vor- oder Rückland der weichselglazialen Pommerschen Haupteisrandlage und damit in Wasserscheidennähe sein. Gemäß LUA (2009) treten die stärksten natürlichen Grundwasserstandsänderungen auf den Hochflächen in der Nähe der Wasserscheiden auf. Diesem Bericht zufolge ist der Rückgang der Abflussspenden in den Niederungen jedoch so groß, dass er sich nur

teilweise mit verringerten Grundwasserneubildungsraten in den Hochflächen erklären lässt. Vielmehr muss es gleichzeitig eine höhere Grundwasserzehrung in den Niederungen geben. Da viele Seen vom Grundwasser gespeist werden, lässt diese Topographieabhängigkeit darauf schließen, dass eine Klassifizierung, die auch Seen der Niederungen umfasst, in topographieabhängige Gruppen resultieren würde.

Die Gruppe 3 umfasst nur Gewässer ohne Zufluss; Abflüsse fehlen oder sind seit langem trocken. Eine Ausnahme bildet der Laagensee, da er Zu- und Abfluss besitzt und dessen Wasserstand in den letzten Jahren angehoben wurde. Diese Zeitreihe sollten also im Gegensatz zu den anderen Seen der Gruppe 3 keine Klima- oder Landnutzungsabhängigkeit zeigen.

Ein Kritikpunkt an Clusteranalyse-Verfahren besteht darin, dass das Ergebnis maßgeblich davon abhängt, wie groß der Datensatz ist (hier Länge der Zeitreihen) und welchen Zeitabschnitt man wählt. Wie bei jedem statistischen Verfahren zur Zeitreihenanalyse gilt, dass die Qualität der Aussage mit der Länge einer Zeitreihe steigt. Da für die Clusteranalyse möglichst viele Seen berücksichtigt werden sollten, war es notwendig, sich auf den größten gemeinsamen Nenner zu beschränken. Somit ist eine Validierung mit längeren Zeitreihen nicht möglich. Um die Güte der Aussage zu prüfen, wurde die Clusteranalyse mit den Jahren 1999-2006 wiederholt, da die Jahre 2007 und 2008 bei visuellem Vergleich der Zeitreihen maßgeblich für die Trennung der Gruppen 3 und 4 verantwortlich scheinen. In diesen beiden Jahren zeigt die Gruppe 3 einen wesentlich stärkeren Wiederanstieg der Seespiegel als dies in Gruppe 4 der Fall ist. Hierfür spielen spezifische Ereignisse an einzelnen Gewässern eine Rolle. So wurde der Abfluss des Laagensees höher gelegt und im direkten Einzugsgebiet des Griebchensees eine Durchforstung der Kiefernbestände durchgeführt. Die Analyse mit der verkürzten Zeitreihe liefert ein anderes Ergebnis, allerdings vor allem in den heterogeneren Gruppen. Die Gruppe von besonderem Interesse (Gruppe 4) bleibt bestehen und wird lediglich durch einen See (Großer Griebchensee) ergänzt.

Die Zeitreihen für die Clusteranalyse gingen nur bis zum Jahre 1999 zurück. Die Jahre zuvor haben im Schnitt jedoch auch eine sinkende Tendenz gezeigt, wie dies Daten vom Großen Fürstenseer See (Stüve, 2010) oder Redernswalder See (Natkhin et al., 2009) verdeutlichen (Abb. 5, 6).



**Abb. 6:** Zeitreihe des Pegels vom Großen Fürstenseer See (Müritz-Nationalpark) für die Jahre 1985-2008. Hervorgehoben in Rot ist der Zeitabschnitt, für den Zeitreihen verschiedener Seen verglichen wurden.

Kritisch angemerkt werden sollte auch, dass es nicht möglich ist, mit Hilfe von Clusteranalyse-Verfahren Übergangstypen zwischen zwei Seegruppen zu identifizieren. Hierzu müssten andere statistische Verfahren durchgeführt werden. Lischeid et al. (im Druck) konnten beispielsweise mit einer Hauptkomponentenanalyse von See- und Grundwasserdaten solche Übergangstypen aufzeigen.

## 5. Schlussfolgerung und Ausblick

Das hier angewandte Clusteranalyseverfahren war sehr hilfreich, um einen schnellen Überblick über eine Vielzahl von Seepiegel-Zeitreihen zu bekommen. Es legt nahe, dass es neben Spezialfällen auch Gruppen von Seen mit regional ähnlichen Ursachen-Wirkungs-Komplexen gibt. Welche Ursache-Wirkungs-Komplexe den größeren Gruppen zugrunde liegen, bleibt offen. Es kann jedoch angenommen werden, dass regional wirksame Ursachen, wie der Klimawandel, eine bedeutende Rolle spielen.

In einem nächsten Schritt soll der Frage nachgegangen werden, aus welchen Gründen sich manche Seen bezüglich ihrer Dynamik und ihres mehrjährigen Trends ähneln und andere dies bei vergleichbarer Konstellation der Rahmenbedingungen nicht tun. Hierzu werden weitere

## 6. Literatur

- BMUNR – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2003. Hydrologischer Atlas von Deutschland. Bonn/Berlin.
- Crawley, M.J., 2007. The R book. John Wiley & Sons, Chichester.
- Finke, W., Krause, S., 2005. Langzeitverhalten von Niedrigwasserkenngößen von Pegeln des Haveleinzugsgebiets und der Elbe. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 49, 248-254.
- Germer, S., Kaiser, K., Bens, O., Hüttl, R.F., im Druck. Water balance changes and responses of ecosystems and society in the Berlin-Brandenburg region, Germany – a review. Die Erde.
- Huntington, T.G., 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. Journal of Hydrology 319, 83-95.

Seen aus den genannten Teilregionen in die Analyse einbezogen und die Parameteranalyse erweitert. Hinsichtlich der Auswirkungen der Seespiegelabsenkungen ist die Durchführung ufermorphologisch-geobotanischer Transektstudien an Beispielseen geplant. Zudem werden paläohydrologische Befunde integriert, um die langfristige, von Klima- und Landnutzungsänderungen abhängige Variabilität der Wasserspiegel dieser Seen einschätzen zu können.

## Danksagung

Diese Untersuchungen konnten im Rahmen zweier kooperierender Akademieprojekte realisiert werden: der Interdisziplinären Arbeitsgruppe „Globaler Wandel – Regionale Entwicklung“ der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und der Projektgruppe „Georesource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel“ der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech). Für die Pegeldata danken wir Achim Kobel und Matthias Schwabe (Müritz-Nationalpark), Hartmut Neumann (Naturwacht Uckermarkische Seen) sowie Rüdiger Michels (Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin). Für ihre kartographische Unterstützung danken wir Petra Wiese (Universität Greifswald).

- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007a. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Hrsg.): Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007b. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. In: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Hrsg.): Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.
- Juschus, O., Albert, H., 2010. Sinkende See- und Grundwasserstände im Naturschutzgebiet "Luchseemoor" (Spreewald, Brandenburg) – Landschaftsgeschichtliche und hydrologische Befunde. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Sci-

- entific Technical Report 10/10, S. 86-92. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Kaiser, K., 1996. Zur hydrologischen Entwicklung mecklenburgischer Seen im jüngeren Quartär. Petermanns Geographische Mitteilungen 140, 323-342.
- Krone, A., 2007. Folgen der Klimaveränderung auf die Fließgewässer in Brandenburg und Lösungsbeispiele. Präsentation auf der "Flusskonferenz am 21. März 2007 in Berlin – Unsere Fließgewässer im Zeichen des Klimawandels". Deutsche Umwelthilfe, Berlin.
- Lahmer, W., Pfützner, B., 2003. Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg auf der Basis flächendeckender Wasserhaushaltsrechnungen. PIK Report 85. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Potsdam.
- Landgraf, L., 2007. Rekonstruktion von Wasserstandsschwankungen in der Hochfläche der östlichen Zauche mit Hilfe dendrohydrologischer Methoden und Analyse der Ursachen. Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung 46, 41-67.
- Landgraf, L., Notni, P., 2003. Das Moosfenn bei Potsdam – Langzeitstudie zu Genese und Wasserhaushalt eines brandenburgischen Kesselmooses. Telma 33, 59-83.
- Lischeid, G., Natkhin, M., Steidl, J., Dietrich, O., Dannowski, R., Merz, C., im Druck. Assessing coupling between lakes and layered aquifers in a complex Pleistocene landscape based on water level dynamics. Advances in Water Resources.
- Lorenz, S., Rowinsky, V., Koch, R., 2010. Historische und rezente Wasserstandsentwicklung von Seen und Mooren im Naturpark "Nossentiner/Schwinzer Heide" im Spiegel der Landnutzungsgeschichte. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10, S. 133-139. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- LUA – Landesumweltamt Brandenburg, 2009. Umweltdaten aus Brandenburg – Bericht 2008/2009. Potsdam.
- Mauersberger, R., 2002. Hydrologische Seentypen und ihre Kennzeichnung am Beispiel der Seenlandschaften Nordostdeutschlands. In: Kaiser, K. (Hrsg.): Die jungquartäre Fluss- und Seegenese in Nordostdeutschland. Greifswalder Geographische Arbeiten 26, 227-231. Greifswald.
- Mauersberger, R., 2006. Klassifikation der Seen für die Naturraumerkundung des nordostdeutschen Tieflandes. Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung 45, 51-89.
- Mietz, O., Vedder, F., 2010. Stabilisierung der hydrologischen Situation im Großen Seddiner See (Brandenburg) durch Überleitung von gereinigtem Nieplitzwasser. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10, S. 158-166. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Natkhin, M., Steidl, J., Dietrich, O., Dannowski, R., Hoffmann, D., 2009. Der Einfluss von Waldumbau auf den Wasserhaushalt eines Sees in einem niederschlagsarmen Tieflandeingebiet. Forum der Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 26, 59-64.
- Nilfert, P., Schäfer, D., Zühlke, K., 2008. Auswirkungen der regionalen Klimaentwicklung auf die Wasserversorgung am Beispiel Wasserwerk Potsdam Leipziger Straße. GWF – Wasser/Abwasser 149, 948-955.
- Nützmann, G., Mey, S., 2007. Model-based estimation of runoff changes in a small lowland watershed of north-eastern Germany. Journal of Hydrology 334, 467-476.
- Stüve, P., 2010. Die Wasserhaushaltssituation der letzten 40 Jahre im Raum der Neustrelitzer Kleinseenplatte (Süd-Mecklenburg). In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10, S. 206-211. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W., Lahmer, W., Lasch, P., Suckow, F., Wechsung, F., 2005. Klima, Klimaveränderungen und deren Auswirkungen im Gebiet der Märkischen Eiszeitstraße zwischen 1951 und 2055. In: Gesellschaft zur Erforschung und Förderung der Märkischen Eiszeitstraße e.V. (Hrsg.): Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße 10. Eberswalde.
- Wichern, J., Biemelt, D., Grünewald, U., 2010. Analyse und Bewertung von Einflüssen auf den Wasserhaushalt von Seen auf eiszeitlichen Hochflächen des Ostbrandenburger Heide- und Seengebietes. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10, S. 223-228. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.

## Simulation der Wirkung von Klimaänderungen und Klimamodellunsicherheit auf den Wasserhaushalt für deutsche Flusseinzugsgebiete

Fred F. Hattermann<sup>1</sup>, Shaochun Huang<sup>1</sup> und Hagen Koch<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Telegrafenberg A62, 14473 Potsdam, hattermann@pik-potsdam.de; <sup>2</sup>Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Postfach 101344, 03013 Cottbus

**Zusammenfassung:** Die Simulation der Auswirkungen des Klimawandels auf den regionalen Wasserhaushalt wird in hohem Maße durch das gewählte Klimaszenario determiniert. Die mögliche Erwärmung in Mitteleuropa weist eine Bandbreite von +1,5 bis +6 °C bis 2100 auf. Diese mit Globalen Zirkulationsmodellen (GCMs) errechneten Szenarien sind aber nur mit starken Einschränkungen für regionale Untersuchungen anwendbar. Durch regionale Klimamodelle werden darum üblicherweise die globalen Szenarien auf die regionale Skala transformiert, wobei entweder genestete numerische Modelle genutzt werden (physikalisch-deterministische regionale Klimamodelle) oder aber beobachtete Beziehungen zwischen bestimmten großskaligen meteorologischen Größen und lokalem Wetter zur Anwendung kommen (statistische regionale Klimamodelle). In dieser Studie soll untersucht werden, wie groß die Unsicherheiten der Klimamodellergebnisse für den regionalen Wasserhaushalt sind. Dazu kommen im Rahmen dieser Studie Ergebnisse aus vier regionalen Klimamodellen zur Anwendung (den in Deutschland bekanntesten physikalischen-deterministischen und statistischen Modellen). Zunächst wird untersucht, wie gut die regionalen Klimamodelle das beobachtete Klima wiedergeben. Dann werden die Klimaszenariodaten jeweils durch ein ökohydrologisches Modell in Änderungen in den hydrologischen Größen transformiert. Anschließend werden die Ergebnisse als relative Änderungen zum Referenzzeitraum 1961-90 dargestellt und diskutiert.

### Simulation of climate change impacts and related uncertainties for water resources in German river catchments

**Abstract:** Climate change impacts on hydrology are largely determined by the climate scenario selected for the study. Possible warming in Central Europe has a bandwidth of approximately 1.5 to 6 °C by 2100. These scenarios simulated by global circulation models (GCMs) are, however, applicable only with strong restrictions on regional studies. Global climate scenarios are therefore normally regionalised applying regional climate models (RCMs), using either nested numerical models (physical-deterministic RCMs) or observed relationships between certain large-scale meteorological variables and local weather (statistical RCMs). This study will investigate the impact of climate projection uncertainty (model uncertainty, inter-scenario uncertainty, intra-scenario uncertainty) on hydrological processes and water resources. In the study climate simulations of four RCMs are used (the most widespread physical-deterministic and statistical RCMs in Germany). Firstly, it is examined how the RCMs reflect the observed climate. Then the climate scenario data are transformed by an eco-hydrological model into changes in the hydrological components. The results are then presented and discussed as relative changes to the reference period 1961-90.

### 1. Einführung

Über die letzten hundert Jahre ist ein globaler Klimawandel zu beobachten, welcher sich durch Änderungen im Niederschlag, der Temperatur und der Strahlungsbilanz auf den regionalen Wasserhaushalt auswirkt (IPCC, 2007a, 2007b). Diese Trends können für die Regionen in Europa aufgrund von Änderungen in den großskaligen Zirkulationsverhältnissen und lokaler orographischer Verhältnisse sehr unterschiedlich sein (Eisenreich, 2005; Hattermann et al., 2007, 2008b). Die regionale Ausprägung des Klimawandels hat zur Folge, dass mögliche Anpassungsmaßnahmen an den lokalen klimatischen, naturräumlichen, wirtschaftlichen und auch sozialen Gegebenheiten ausgerichtet sein müssen (Kabat et al., 2002; Krysanova et al., 2008a; Hattermann et al., 2010, im Druck).

Zur Untersuchung der regionalen Klimafolgen müssen die durch Globale Zirkulationsmodelle (GCMs) simulierten globalen Klimawandelszenarien in regionale Szenarien transformiert werden (IPCC, 2000). Dazu werden normalerweise regionale Klimamodelle angewandt, welche im Wesentlichen in zwei Klassen eingeteilt werden können: physikalisch-deterministische und statistische Verfahren. Tatsächlich bestimmen aber auch z.B. bei den physikalisch-deterministischen Modellen die Modellparametrisierung und die numerische Umsetzung wesentlich das Ergebnis, bei den statistischen die Wahl und Anzahl der großskaligen Randbedingungen und das Verfahren allgemein. Daraus folgt, dass für dasselbe globale Klimaszenario unterschiedliche regionale Ausprägungen auftreten, wenn verschiedene regionale Klimamodelle angewendet werden. Die Sensitivität des Wasserhaushalt-

tes gegen relativ kleine Änderungen im Klima ist aber hoch (Hattermann et al., 2008b).

Häufig kommt in den Modellstudien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt nur ein regionales Klimamodell zum Einsatz, und die Unsicherheit durch das regionale Klimamodell wird vernachlässigt. In dieser Studie soll darum untersucht werden, inwieweit die regionalen Klimamodelle die simulierten Klimafolgen in verschiedenen naturräumlichen Regionen Deutschlands determinieren.

## 2. Daten und Methoden

### 2.1 Die regionalen Klimamodelle

#### *Physikalisch-deterministische regionale Klimamodelle*

In physikalisch-deterministischen Klimamodellen werden die grundlegenden physikalischen Bewegungs- und Transportgleichungen der Atmosphäre und z.B. auch des Bodens als unterer Randbedingung numerisch gelöst. Dazu muss das Modellgebiet in ein Gitter eingeteilt werden. Bei regionalen Klimamodellen müssen an den Modellrändern die Flüsse und Größen der Klimavariablen für jeden Modellschritt bekannt sein. Diese Informationen können für den Referenzzeitraum aus Beobachtungen stammen. Für Szenarienläufe stammen die Randbedingungen normalerweise aus großskaligen Klimamodellläufen. Grundsätzlich sollten physikalisch-deterministische Klimamodelle das regionale Klima insbesondere unter Klimawandel besser wiedergeben können als statistische Klimamodelle. Allerdings ist die Physik der Atmosphäre (Wolken, Niederschlag) und ihre Rückkopplung z.B. zu Bodenprozessen sehr komplex, und die physikalisch-deterministischen Klimamodelle befinden sich immer noch in der Entwicklung. Außerdem muss aus Stabilitätsgründen die Lösung der physikalischen Grundgleichungen in sehr kleinen Zeitschritten erfolgen, so dass die numerische Simulation des regionalen Klimas extrem zeitaufwendig ist. Darum werden durch diese Klasse von regionalen Klimamodellen meist nur wenige Klimarealisationen erzeugt.

In diese Modellklasse fallen das hydrostatische regionale Klimamodell REMO (Tomassini und Jacob, 2009) und das hydrodynamische regionale Klimamodell CCLM (Böhm et al., 2006).

#### *Statistische regionale Klimamodelle*

Statistische regionale Klimamodelle gehen grundsätzlich davon aus, dass sich bestimmte Beziehungen oder Korrelationen zwischen Klimavariablen und lokalem Wetter auch unter Klimawandel nicht wesentlich ändern, aber eventuell in einer anderen Häufigkeit auftreten. Die Idee ist dann, diese Beziehungen zu nutzen, um daraus regionale Klimaszenarien unter Klimawandel erstellen zu können. Als unabhängige oder treibende Klimavariablen werden Größen gewählt, welche relativ gut durch großskalige Klimamodelle wiedergegeben werden können (z.B. Temperatur, Wetterlage-Luftdruck), um daraus auf Größen zu schließen, welche relativ ungenau durch globale Klimamodelle wiedergegeben werden können (z.B. Strahlung und insbesondere auch Niederschlag). Da Beobachtungsdaten normalerweise in täglicher Auflösung vorliegen, ist dies meist auch die zeitliche Auflösung der durch statistische Klimamodelle erzeugten Szenarien-

simulation. Im Gegensatz zu physikalisch-deterministischen Verfahren sind die statistischen deutlich einfacher anzuwenden und auch sehr viel weniger rechenintensiv. Dadurch können mit statistischen Verfahren relativ viele Klimarealisationen erzeugt werden, wodurch auch eine Quantifizierung der jeweiligen Szenarienunsicherheit möglich ist.

In diese Modellklasse fallen die regionalen Klimamodelle WettReg (Enke et al., 2005a, 2005b) und STAR (Gerstengarbe und Werner, 1997; Orłowsky et al., 2008). Während WettReg im wesentlichen Druck (Wetterlage) und Temperatur als treibende Klimavariablen nutzt, verwendet STAR nur die Temperatur.

### 2.2 Das öko-hydrologische Modell SWIM

Zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Deutschland wurde das öko-hydrologische Modell SWIM (Soil and Water Integrated Model; Krysanova et al., 1998; Hattermann et al., 2005) verwendet. In diesem sind Module zur Berechnung der Hydrologie, des Pflanzenwachstums (Landwirtschaft und Forst), des Nährstoffkreislaufes (Stickstoff und Phosphor) und der Erosion integriert.

Das Modellsystem SWIM ist ein zeitlich kontinuierlich arbeitendes, räumlich gegliedertes Einzugsgebietsmodell für die regionale Skala. Die Flächendisaggregation erfolgt in drei Ebenen: der in ihren geographischen Eigenschaften homogenen Hydrotopebene, der aus den Hydrotopen zusammengesetzten Teileinzugsgebiets- und der alles integrierenden Einzugsgebiets- und der untersten Ebene, die Hydrotopebene, entsteht aus der Verschneidung verschiedener räumlicher Informationen: digitales Geländemodell, Teileinzugsgebiete, Bodenkarte, Landnutzung, Grundwasserflurabstand etc. Sie spiegelt die in der Landschaft (oder den Daten) vorhandene Heterogenität flächenscharf wieder. Die auf der Hydrotopebene errechneten vertikalen und lateralen Wasser- und Stoffflüsse werden auf der Teileinzugsgebiets-ebene aggregiert und durch das Flusssystem zum Gebietsauslass des Einzugsgebietes geroutet. Das hydrologische Modul in SWIM umfasst vier Teilsysteme: die Bodenoberfläche, die Wurzelzone (wobei entsprechend den Bodeninformationen bis zu 12 Bodenschichten unterschieden werden), den oberen und den unteren Grundwasserleiter sowie das Wasser im Vorfluter.

Wichtig für die Modellierung der hydrologischen Verhältnisse unter Klimawandel ist eine dynamische Modellierung der Vegetationsentwicklung, da sich unter höheren Temperaturen die Phänologie der Pflanzen ändert und die Pflanzen früher im Jahr anfangen zu wachsen und später im Jahr ihre Blätter verlieren, was über die Pflanzentranspiration starke Rückkopplungen auf den regionalen Wasserhaushalt hat (Hattermann et al., 2008a).

Das Pflanzenwachstum wird auf der Basis eines vereinfachten EPIC-Ansatzes berechnet (Williams et al., 1984). Dabei wird eine spezielle, für die Region parametrisierte Datenbasis benutzt, mit deren Hilfe verschiedene Kulturarten (Weizen, Gerste, Mais, Kartoffeln, Raps usw.) sowie auch natürliche Vegetationsbestände (Wald, Gras-

land) dynamisch – auf Tagesbasis – modelliert werden können.

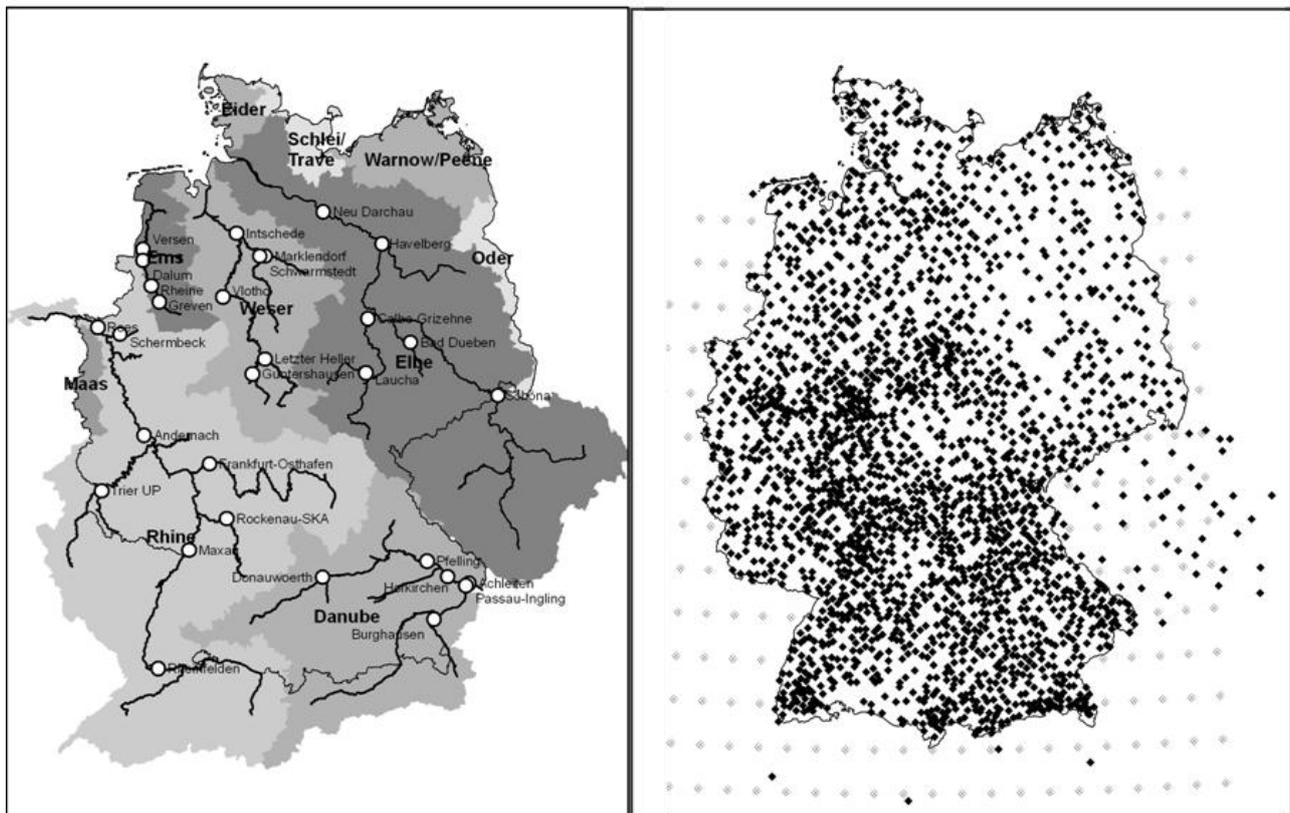
Eine detaillierte Beschreibung der in SWIM abgebildeten Prozesse findet sich in Krysanova et al. (1998).

### 2.3 Die verwendeten Daten

Alle räumlichen Daten (Landnutzungs- und Bodeninformationen, Teileinzugsgebietsgrenzen und digitales Geländemodell) wurden für die Studie in ein einheitliches Rasterformat mit einer Zellengröße von 250 m überführt. Grundlage der Bodenparameter ist die deutsche Bodenübersichtskarte (BÜK 1000), Grundlage der Landnutzungsdaten die CORINE 2000-Klassifikation. Insgesamt werden 109 unterschiedliche Leitbodentypen und 15 Landnutzungstypen unterschieden. Die Teileinzugsgebietsgrenzen stammen für Deutschland vom Umweltbundesamt in Berlin (z.B. 2268 Teileinzugsgebiete für das Elbeinzugsgebiet bis zum Pegel Neu Darchau) oder sie wurden für die außerhalb Deutschlands liegenden Gebiete aus Höhenmodellen errechnet. Für die Modellierung standen meteorologische Daten von 270 Klimastationen und ca. 2000 Niederschlagsstationen des deutschen Wetterdienstes zur Verfügung, welche am PIK weiter aufbereitet wurden. Außerdem wurden für die Teileinzugsgebiete des Rheins, der Elbe und der Donau, welche nicht in Deutschland liegen, weitere Klimastationen aufbereitet (Abb. 1). Vier unterschiedliche Verfahren zur Interpolation der Klimadaten wurden verglichen (Thiessen-Polygone, Inverse Distance, Ordinary Kriging und Ex-

ternal Drift Kriging). Durch eine Kreuzvalidierung wurden die für die jeweiligen Klimavariablen am besten geeigneten Verfahren ermittelt. Es zeigte sich, dass das Verfahren Inverse Distance bei der Dichte der verfügbaren Daten eine ähnlich gute Qualität wie die geostatistischen Verfahren ergab, aber deutlich weniger rechenintensiv und damit „schneller“ ist, was für stochastische Anwendungen (multiple Realisationen pro Klimaszenario) von Bedeutung ist.

Als Klimarandbedingung für die Projektionen in die Zukunft bis zum Jahr 2060 dienten die regionalisierten Szenarien der oben beschriebenen regionalen Klimamodelle REMO, CCLM, STAR und WettReg. Für das Modell CCLM lagen jeweils zwei Realisationen der Emissions-Szenarien A1B und A2 vor, für das Modell REMO jeweils eine Realisation der Emissions-Szenarien A1B, A2 und B1 und für die statistischen Modelle STAR und WettReg lagen ebenfalls verschiedene Emissions-Szenarien vor, es wurde aber in dieser Studie nur das Emissions-Szenario A1B genutzt. Der Grund ist, dass es von WettReg 20 Realisationen pro Szenario und aus STAR 100 Realisationen pro Szenario gibt, was bei mehreren Emissions-Szenarien in der Darstellung zu Problemen führt. Als großskalige Randbedingung für den Referenz- und Szenarienzeitraum wurden Simulationen des General Circulation Model ECHAM5 (Röckner et al., 1999, 2003) verwendet, mit der Ausnahme, dass als Klimasignal für das Modell STAR in der Referenzperiode der lineare beobachtete Temperaturtrend genutzt wurde.



**Abb. 1:** Die Einzugsgebiete der wichtigsten deutschen Flüsse und der Pegelstationen für die Validierung (links) und die Lage der Klima- und Niederschlagsstationen (rechts). Die hellgrauen Punkte geben die Orte an, an denen nicht Beobachtungsstationen, sondern Klimareanalysedaten genutzt wurden.

Die REMO- und die WettReg-Daten entsprechen den durch das Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen „offiziellen“ Szenarien für Deutschland, die CCLM-Daten sind die sogenannten „Konsortialläufe“ (Hollweg et al., 2008) für Europa, und die STAR-Szenarien wurden am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung im Rahmen einer Studie für Deutschland erstellt. Die REMO-Daten haben eine Auflösung von 10 km, die CCLM-Daten eine von 18 km und die Daten der Modelle WettReg und STAR liegen in einem unregelmäßigen Raster vor, welches den Orten der Klima- und Niederschlagsstationen entspricht, an denen den Modellen die Beziehung zwischen großskaligem Klima und regionalem Wetter aufgeprägt wurde.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Validierung der simulierten Gebietsabflüsse

Die simulierten Abflüsse des Modells SWIM wurden durch Huang et al. (im Druck) an insgesamt 29 Pegeln in Deutschland mit den beobachteten verglichen. Die Ergebnisse für die großen Flüsse in Deutschland sind in Abbildung 2 und Tabelle 1 dargestellt (siehe Hattermann et al., 2008b, im Druck; Huang et al., im Druck). Wie man sieht, ist das Modell SWIM in der Lage, die beobachteten Abflüsse in den verschiedenen Flusseinzugsgebieten gut wiederzugeben. Größere Schwierigkeiten treten allerdings auf, wo aufgrund menschlicher Eingriffe, z.B. durch großräumige Bergbauaktivitäten oder aufgrund schlechter Datenlage, wie im französischen Teileinzugsgebiet des Rheins, die Randbedingungen unsicher sind.

Um einen Vergleich der ortsbezogenen Ergebnisse z.B. zur lokalen Abflussbildung treffen zu können, wurden die Resultate für den Referenzzeitraum außerdem mit den Werten des Hydrologischen Atlases Deutschlands (HAD) und der Wasserhaushaltsmodellierung aus Huang et al. (im Druck) verglichen. Für die langjährige mittlere Abflusspende stimmen die Werte auch in der räumlichen Verteilung gut überein (Huang et al., im Druck).

#### 3.2 Validierung der simulierten Klimadaten

Die Validierung der durch die regionalen Klimamodelle erzeugten Klimadaten erfolgt normalerweise durch Vergleich der beobachteten und simulierten Klimadaten für eine Referenzperiode (Hollweg et al., 2008). In einer Studie von Kücken et al. (in Vorbereitung) wurde dieses für die hier genutzten regionalen Klimamodelle durchgeführt, wobei das Ergebnis für die Validierungsperiode (1981-2000) war, dass die statistischen Modelle deutlich besser die räumliche und statistische Verteilung wiedergeben können. Der Grund ist u.a., dass die statistischen Modelle an die beobachteten Klimaverhältnisse für den Zeitraum 1951-1975 angepasst wurden. Allerdings können relativ kleine Unterschiede in den Klimarandbedingungen zu relativ großen Auswirkungen in den hydrologischen Größen führen (Hattermann et al., 2005, 2008b). Darum wurde in dieser Studie außerdem untersucht, inwieweit sich die hydrologischen Abflussgrößen ändern, falls auch für die Referenzperiode errechnete Klimadaten als Randbedingung für die hydrologische Simulation genutzt werden. Die Ergebnisse wurden mit Simulationen verglichen, in die die beobachteten Klimadaten als Randbedingung Eingang fanden. Beispielhaft werden die Ergebnisse in Abbildung 3 am Pegel Calbe (Saale) verglichen. Wie man erkennt, unterscheiden sich die simulierten Abflüsse mit simulierten Klimadaten als Randbedingung in der Referenzperiode, wobei die Abweichungen mit den Klimamodellen REMO, WettReg und STAR relativ gering sind. Hoch fallen die Abweichungen mit den Klimadaten aus dem Modell CCLM als Randbedingung für die hydrologische Simulation aus. Der Grund dafür ist eine deutliche Überschätzung der Niederschläge in den verwendeten Klimäläufen des Modells CCLM. Außerdem sind die verwendeten CCLM-Szenarieläufe auch diejenigen mit der geringsten Auflösung, da sie nicht wie die anderen speziell für Anwendungen in Deutschland erstellt wurden, sondern für eine europäische Studie dienen. Die Bandbreite der Unsicherheit ist relativ breit bei den Ergebnissen mit dem Klimamodell STAR als Randbedingung, von welchem allerdings auch die größte Zahl an Realisationen vorliegt.

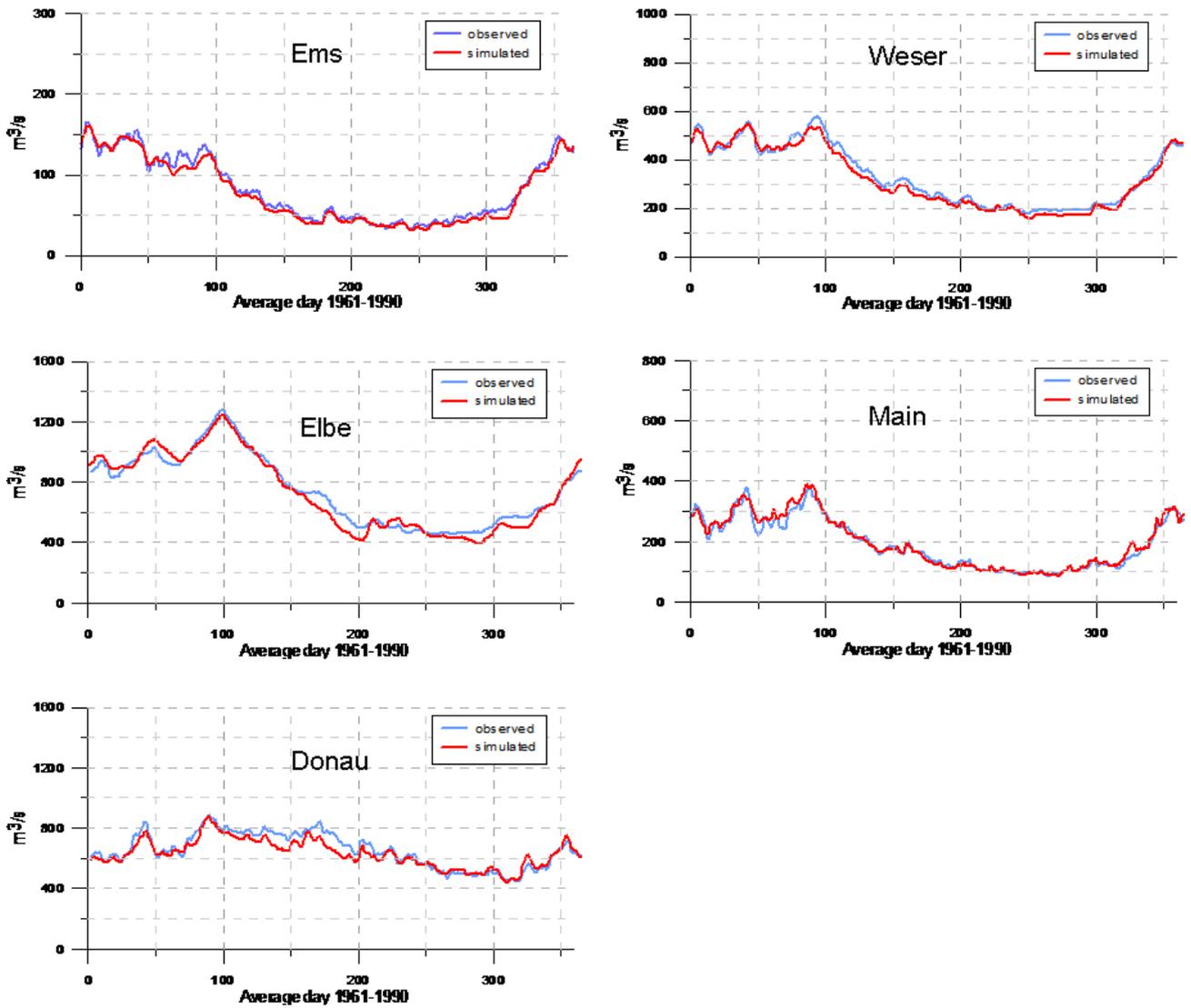


Abb. 2: Simulierte und beobachtete langjährige tägliche Mittel des Abflusses für die Referenzperiode 1961-90 und die Pegel Versen (Ems), Intschede (Weser), Neu Darchau (Elbe), Frankfurt (Main) und Hofkirchen (Donau) (siehe auch Huang et al., im Druck).

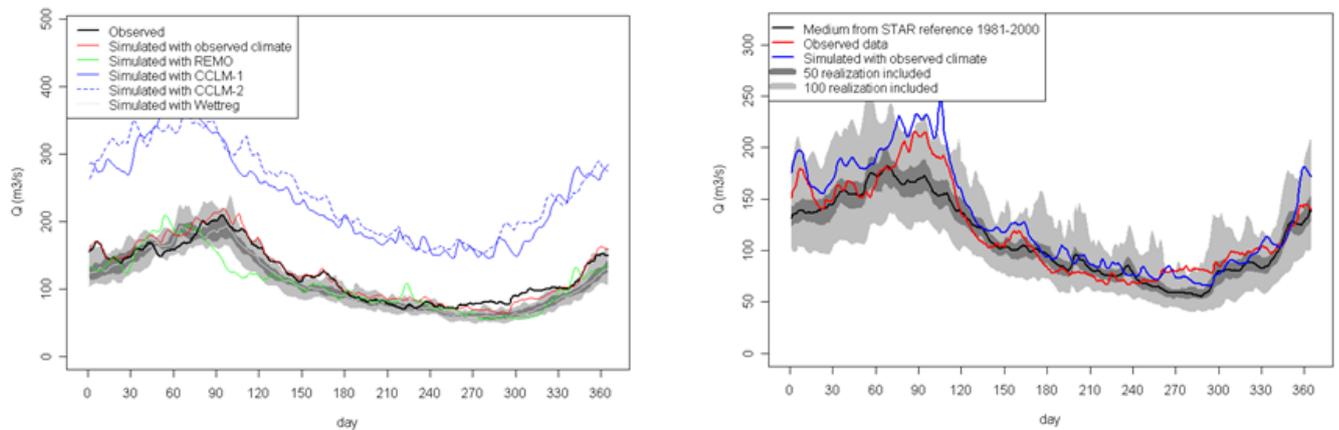


Abb. 3: Vergleich der simulierten und beobachteten Abflüsse für die Saale mit beobachteten und durch die vier regionalen Klimamodelle REMO, CCLM und WettReg (links) und STAR (rechts) berechneten Klimadaten als Randbedingung (langjähriges tägliches Mittel der Jahre 1981-2000). Für die physikalisch-deterministischen regionalen Klimamodelle CCLM und REMO lagen ein bzw. zwei Realisationen für die Referenzperiode vor, für WettReg 20 und für STAR 100.

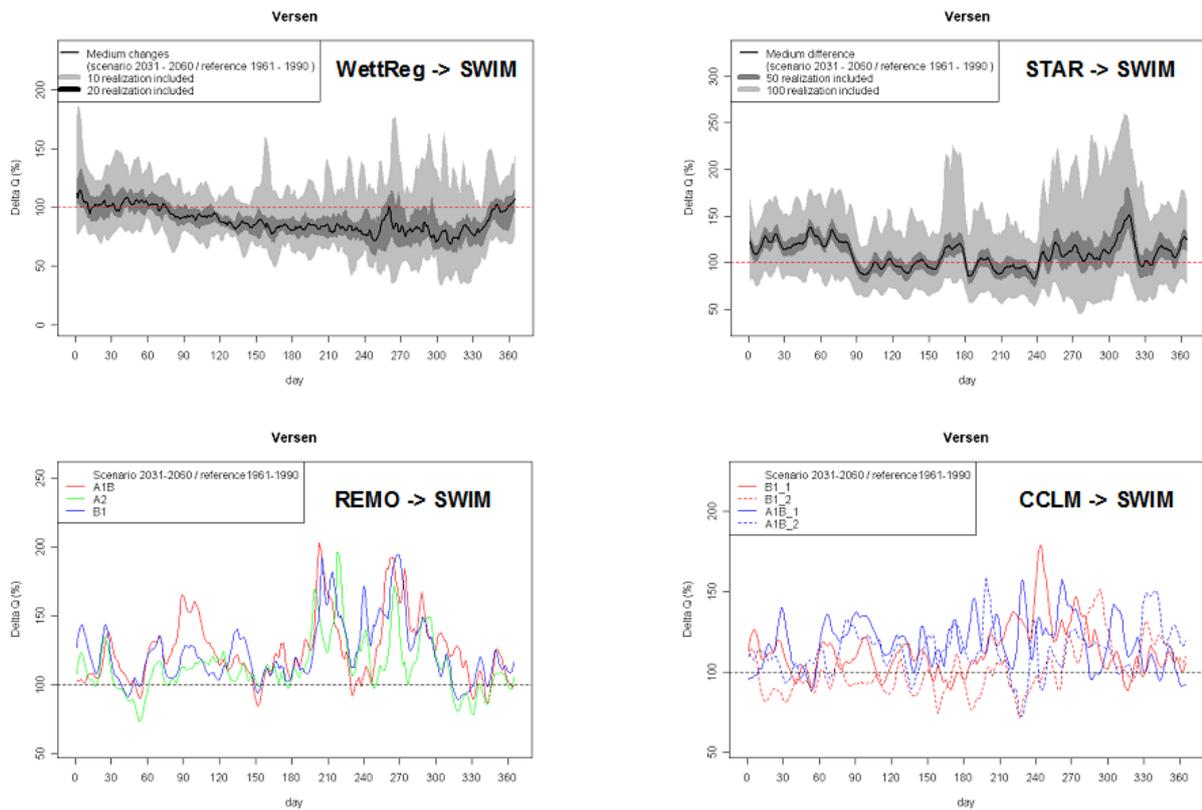
**Tab. 1:** Validerungsergebnisse für die in der Studie genutzten Flusspegel (Kalibrierung nur für die fünf Hauptpegel 1981-90, Validierung 1961-80, zusätzliche Validierung für 24 weitere Pegel 1981-90; aus Huang et al., im Druck).

| River basin | Rivers       | Gauge           | Drainage area<br>(km <sup>2</sup> ) | Percent of drainage area inside Germany (%) | Calibration                 |                            | Validation                  |                                |
|-------------|--------------|-----------------|-------------------------------------|---|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|             |              |                 |                                     |   | Nash & Sutcliffe efficiency | Deviation in water balance | Nash & Sutcliffe efficiency | Deviation in water balance (%) |
| Ems         | Ems          | Versen          | 8,369                               | 100   | 0.87                        | 0                          | 0.85                        | -8                             |
|             | Ems          | Greven          | 2,842                               | 100   | -                           | -                          | 0.87                        | 4                              |
|             | Ems          | Rheine          | 3,740                               | 100   | -                           | -                          | 0.78                        | 1                              |
|             | Ems          | Dalum           | 4,981                               | 100   | -                           | -                          | 0.83                        | 3                              |
| Weser       | Weser        | Intschede       | 37,720                              | 100   | 0.90                        | 0                          | 0.82                        | -2                             |
|             | Werra        | Letzter Heller  | 5,487                               | 100   | -                           | -                          | 0.71                        | 4                              |
|             | Fulda        | Guntershausen   | 6,366                               | 100   | -                           | -                          | 0.57                        | 5                              |
|             | Leine        | Schwarmstedt    | 6,443                               | 100   | -                           | -                          | 0.68                        | -3                             |
|             | Aller        | Marklendorf     | 7,209                               | 100   | -                           | -                          | 0.76                        | 9                              |
|             | Weser        | Vlotho          | 17,618                              | 100   | -                           | -                          | 0.86                        | 0                              |
| Danube      | Danube       | Hofkirchen      | 47,496                              | 94  | 0.83                        | 0                          | 0.82                        | -5                             |
|             | Salzach, Inn | Burghausen      | 6,649                               | 17  | -                           | -                          | 0.56                        | -3                             |
|             | Danube       | Donauwoerth     | 15,037                              | 100   | -                           | -                          | 0.75                        | -2                             |
|             | Inn          | Passau Ingling  | 26,084                              | 26  | -                           | -                          | 0.61                        | 12                             |
|             | Danube       | Pfelling        | 37,687                              | 95  | -                           | -                          | 0.79                        | 1                              |
|             | Danube       | Achleiten       | 76,653                              | 73  | -                           | -                          | 0.74                        | 6                              |
| Rhine       | Main         | Frankfurt-Osth. | 24,764                              | 100   | 0.80                        | 3                          | 0.81                        | 6                              |
|             | Lippe        | Schermbek       | 4,783                               | 100   | -                           | -                          | 0.78                        | -5                             |
|             | Neckar       | Rockenau SKA    | 12,710                              | 100   | -                           | -                          | 0.75                        | -8                             |
|             | Moselle      | Trier UP        | 23,857                              | 22  | -                           | -                          | 0.21                        | 57                             |
|             | Rhine        | Maxau           | 50,196                              | 23  | -                           | -                          | 0.84                        | -4                             |
|             | Rhine        | Andernach       | 139,549                             | 59  | -                           | -                          | 0.81                        | 5                              |
|             | Rhine        | Rees            | 159,300                             | 64  | -                           | -                          | 0.83                        | 6                              |
| Elbe        | Elbe         | Neu-Darchau     | 131,950                             | 61  | 0.86                        | 2                          | 0.84                        | -3                             |
|             | Mulde        | Bad Dueben      | 6,171                               | 91  | -                           | -                          | 0.59                        | -2                             |
|             | Unstrut      | Laucha          | 6,218                               | 100   | -                           | -                          | 0.60                        | -13                            |
|             | Saale        | Calbe-Grizehne  | 23,719                              | 99  | -                           | -                          | 0.74                        | -1                             |
|             | Havel        | Havelberg       | 24,037                              | 100   | -                           | -                          | 0.43                        | -31                            |
|             | Elbe         | Schöna          | 51,391                              | 0   | -                           | -                          | 0.60                        | 30                             |

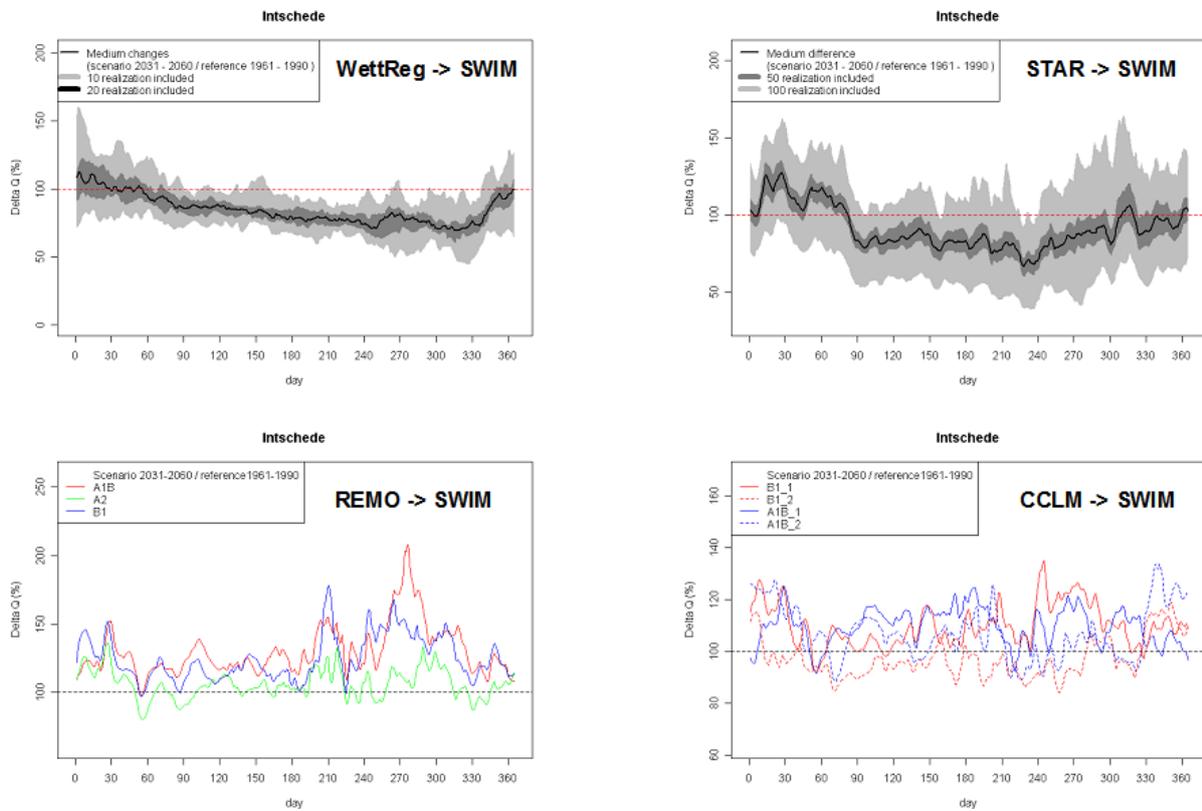
### 3.3 Szenarienergebnisse

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Auswirkungen der Klimamodellszenarien auf den Wasserhaushalt in Deutschland anhand der Abflüsse in den großen Flusseinzugsgebieten dargestellt und diskutiert. Die Abbildungen zeigen jeweils die simulierten mittleren Szenarienabflüsse für die Periode 2031-60 als relativen Unterschied gegen die mittleren simulierten Abflüsse der Referenzperiode 1961-90. Positive Abweichungen bedeuten also, dass unter Szenarienbedingungen insgesamt die Abflüsse und damit auch die Wasserverfügbarkeit stei-

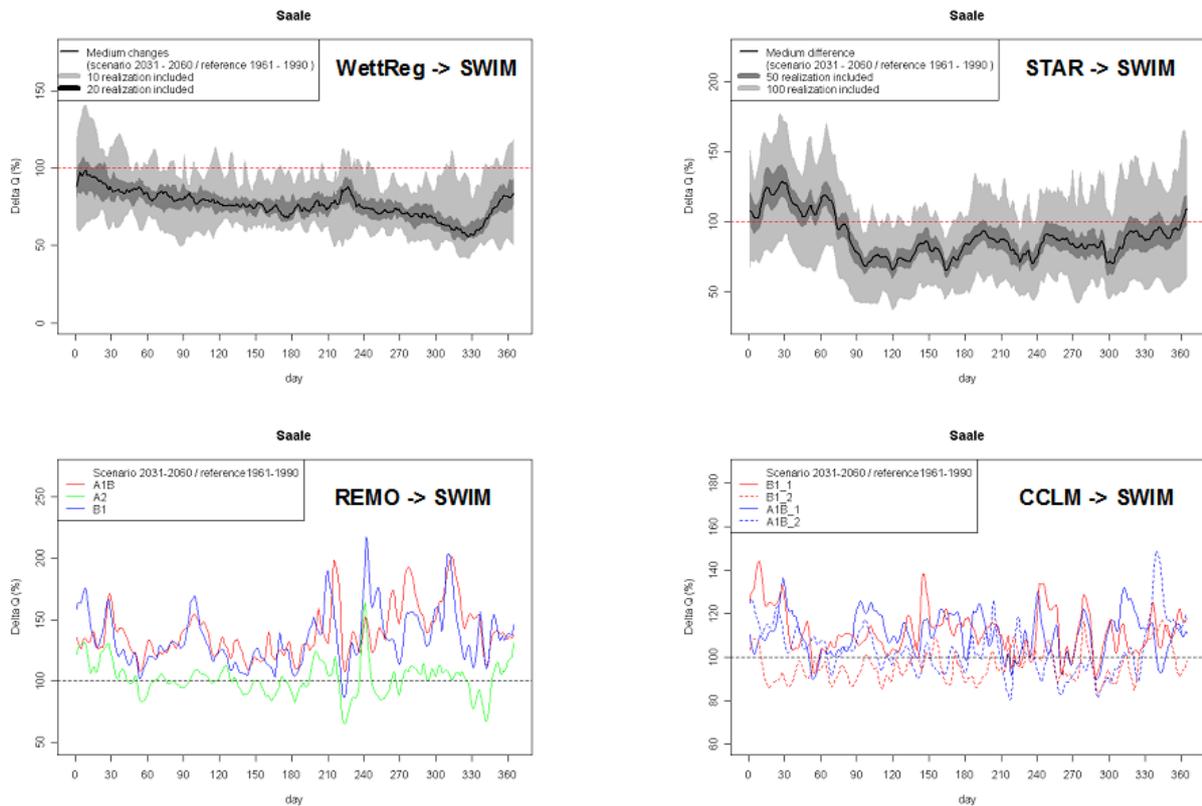
gen, negative Abweichungen sind dagegen ein Zeichen für geringere Wasserverfügbarkeit und bei starken Abweichungen ein Indiz für eventuell größere Dürreperioden, dies insbesondere im Sommerhalbjahr. Dabei muss beachtet werden, dass die hydrologischen Simulationen für diesen Vergleich auch in der Referenzperiode mit simulierten Klimadaten getrieben wurden, also für die REMO-Szenarien mit REMO-Simulationen für die Referenzperiode etc. Um einen möglichst konsistenten Vergleich zu machen, wurde keine Biaskorrektur der Klimadaten durchgeführt (siehe Hattermann et al., im Druck).



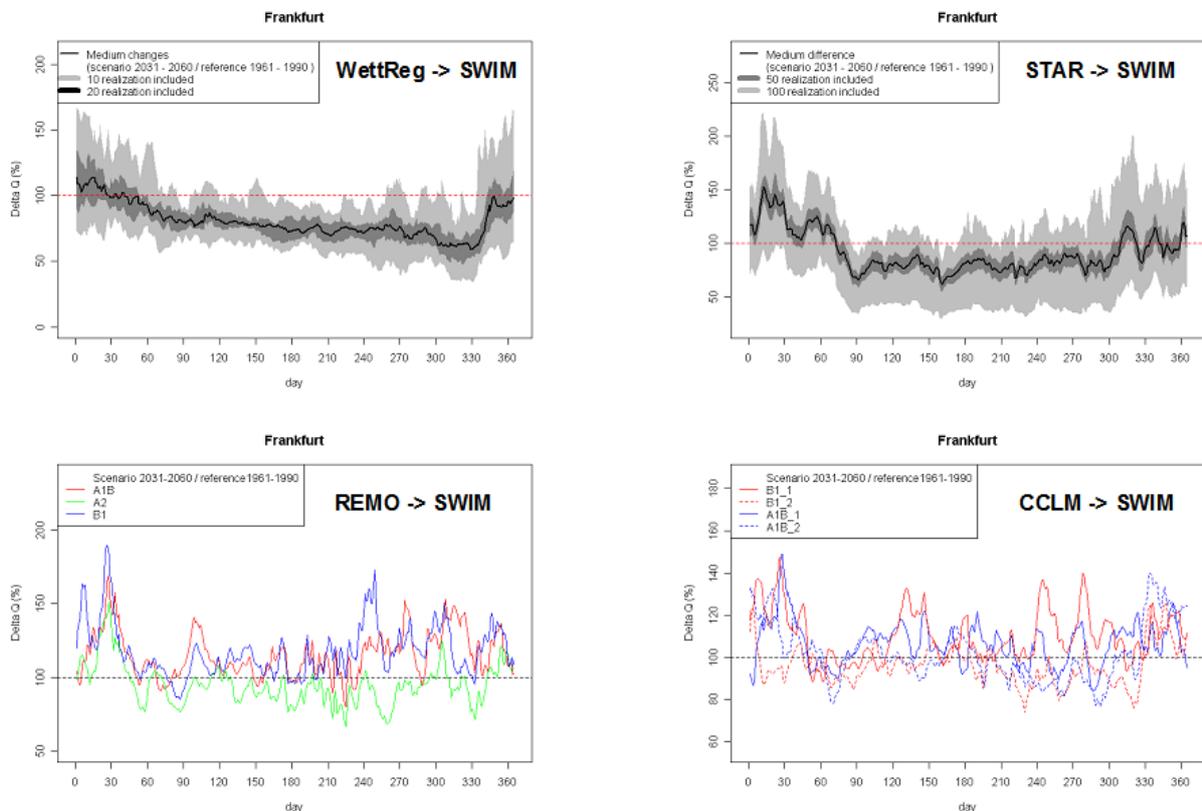
**Abb. 4:** Relative Unterschiede der simulierten Abflüsse im Einzugsgebiet der Ems für die Referenzperiode 1961-1990 und den Szenarienzeitraum 2031-60.



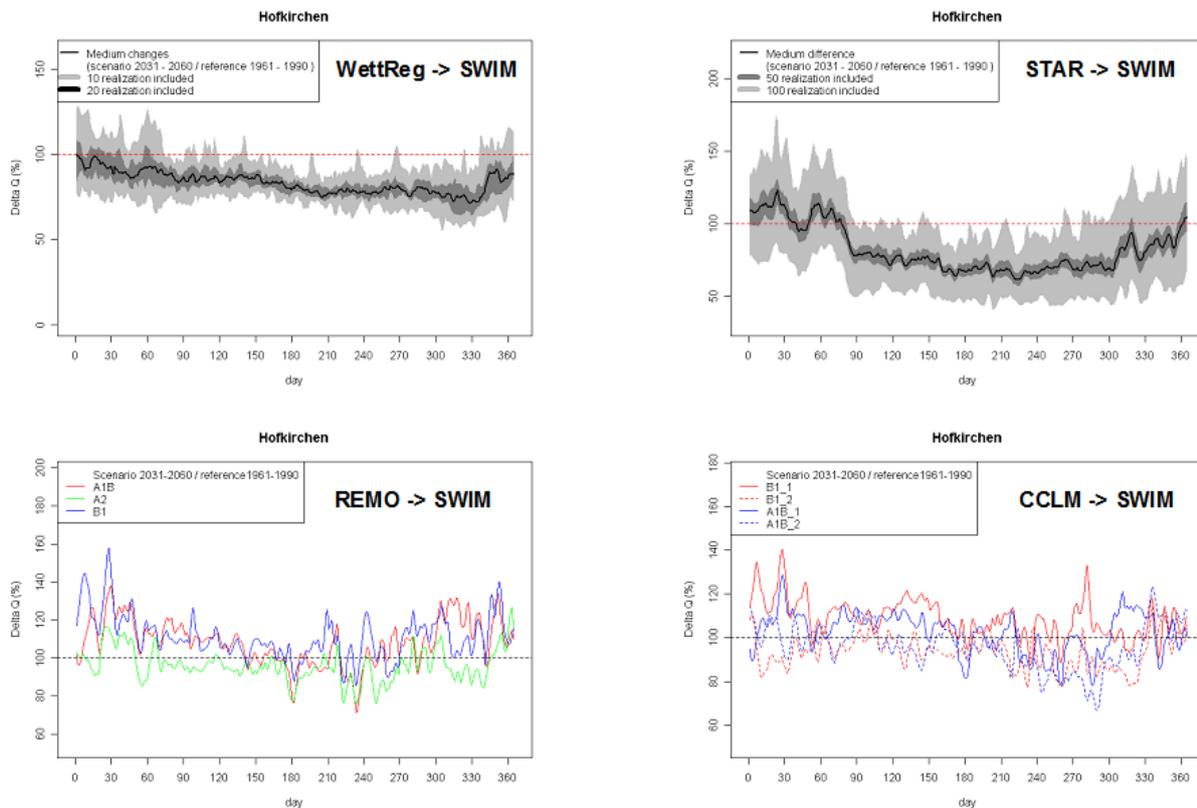
**Abb. 5:** Relative Unterschiede der simulierten Abflüsse im Einzugsgebiet der Weser für die Referenzperiode 1961-1990 und den Szenarienzeitraum 2031-60.



**Abb. 6:** Relative Unterschiede der simulierten Abflüsse im Einzugsgebiet der Saale für die Referenzperiode 1961-1990 und den Szenarienzeitraum 2031-60.



**Abb. 7:** Relative Unterschiede der simulierten Abflüsse im Einzugsgebiet des Mains für die Referenzperiode 1961-1990 und den Szenarienzeitraum 2031-60.



**Abb. 8:** Relative Unterschiede der simulierten Abflüsse im Einzugsgebiet der Donau für die Referenzperiode 1961-1990 und den Szenarienzeitraum 2031-60.

#### 4. Diskussion

In den Ergebnissen sind verschiedene Muster und Trends zu erkennen. Zum einen wird deutlich, dass die Simulationen, welche mit Klimaszenarien aus den statistischen Klimamodellen STAR und WettReg getrieben wurden, insgesamt eher einen Trend zu weniger Abflüssen haben, besonders stark im Sommer und in Ost- bzw. Süddeutschland, während im Winter in Westdeutschland die Abflüsse teilweise steigen. Die Simulationen, welche durch die physikalisch-deterministischen Klimamodelle REMO und CCLM getrieben wurden, zeigen insgesamt feuchtere Verhältnisse und je nach Einzugsgebiet und Szenario auch relativ starke Zunahmen der Abflüsse.

Im Einzelnen zeigen die durch die WettReg-Daten getriebenen hydrologischen Simulationen die stärksten Rückgänge. Besonders im Sommer nehmen auch in Westdeutschland die Abflüsse ab, während im Winter die Abflüsse in Westdeutschland leicht zunehmen. Der sommerliche Trend ist in Ost- und Süddeutschland signifikant, da alle 20 Realisationen einen im langjährigen Mittel geringeren Abfluss als in der Referenzperiode zeigen.

Für die durch STAR-Daten getriebenen hydrologischen Simulationen zeigt sich eine stärkere Saisonalität in den Änderungen. Durch die unter Szenarietemperaturen früher einsetzende Schneeschmelze erscheint das winterliche Abflussmaximum früher im Jahr und steigt besonders in Westdeutschland auch an. Im Sommer allerdings sinken die Abflüsse unter Szenarienbedingungen wie auch in den durch WettReg getriebenen hydrologischen

Simulationen in Ost- und Süddeutschland. Dieser sommerliche Rückgang der Abflüsse lässt sich durch zwei Klimatrends erklären: Zum einen kommt es zu einer Umverteilung der Niederschläge vom Sommer in den Winter, wie sie auch schon für die Referenzperiode beobachtet wurde. Zum anderen verlängern sich durch die steigenden Temperaturen auch die Vegetationsperiode und damit der Wasserbedarf der Pflanzen, so dass insgesamt weniger Wasser zum Abfluss gelangt.

Insgesamt ähneln sich die Klimafolgen für den Wasserhaushalt in den durch STAR- und WettReg-Daten getriebenen hydrologischen Simulationen aber relativ stark.

Dagegen zeigen aber die durch die physikalisch-deterministischen Klimamodelle REMO und CCLM getriebenen hydrologischen Simulationen ein anderes Muster. Insgesamt sind die Ergebnisse viel variabler, und insbesondere bei den durch CCLM-Daten getriebenen hydrologischen Simulationen ist es schwer, ein Muster zu erkennen. Der Einfluss der unterschiedlichen Realisationen pro Szenario scheint höher zu sein als der des Szenarios selbst. Eine saisonale Abhängigkeit der Abweichungen ist kaum zu erkennen, insgesamt steigen die Abflüsse im Westen Deutschlands, während sie sich im Osten je nach Szenario kaum ändern.

Dagegen zeigen die durch REMO-Daten getriebenen hydrologischen Abflüsse verschiedene Trends: Besonders ausgeprägt in Westdeutschland steigen die spätsommerlichen Abflüsse an. Auch sind die Auswirkungen der Szenarien unterschiedlich: das trockenste ist immer

das A2-Szenario, während das B1-Szenario das feuchteste ist.

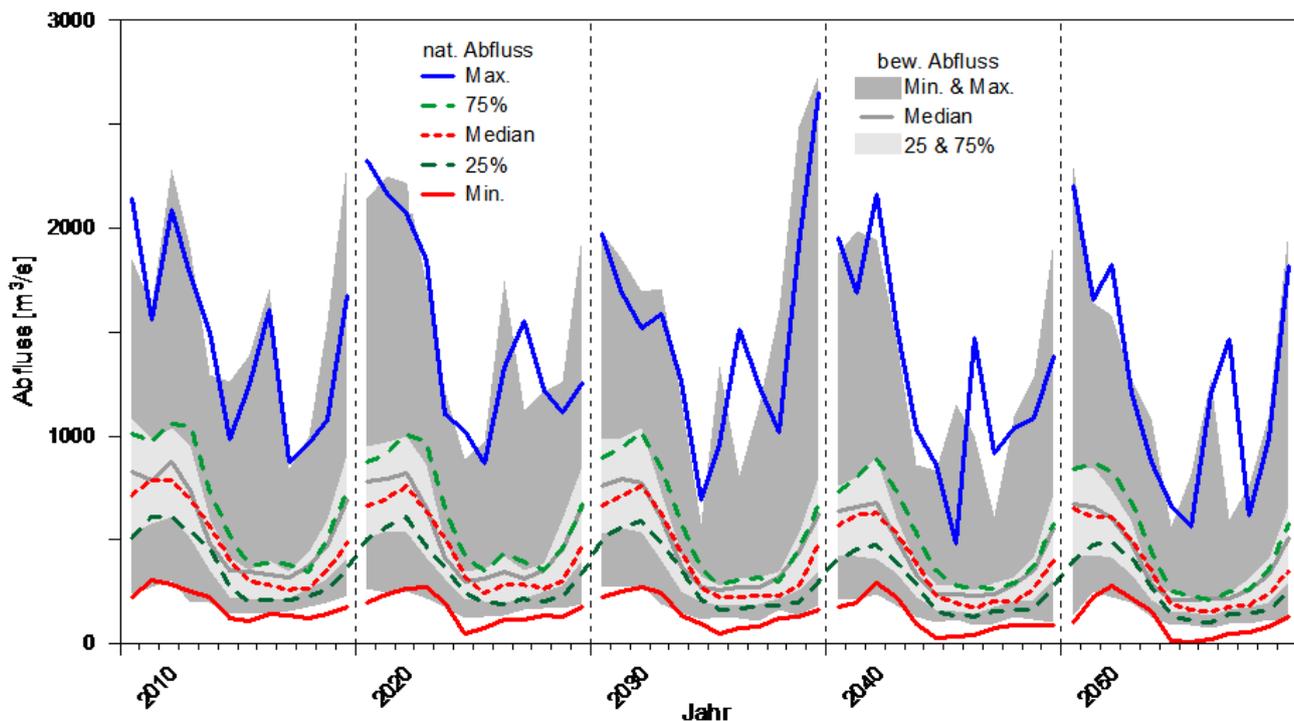
Zusammenfassend erscheint das hier gezeigte Ergebnis für Anwender in der wasserwirtschaftlichen Praxis unbefriedigend, da die Auswirkungen des Klimawandels in einer Region stark vom verwendeten regionalen Klimamodell abzuhängen scheinen.

Dabei wurden im vorangegangenen Unterkapitel mögliche Auswirkungen des Klimawandels nur auf die natürlichen Abflüsse für verschiedene Einzugsgebiete Deutschland vorgestellt. Nicht berücksichtigt wurden dagegen die Wirkungen der Wassernutzungsprozesse bzw. der wasserwirtschaftlichen Steuerung mittels Talsperren, Wasserüberleitungen usw. Diese sind jedoch bei der Einschätzung der zukünftigen Wasserverfügbarkeit für Wassernutzer und -nutzungen von hoher Bedeutung. Um die Unterschiede zwischen natürlichen und bewirtschafteten Abflüssen zu ermitteln, können Modelle zur Simulation der Wasserbewirtschaftung, wie z.B. das WBalMo GLOWA-Elbe (siehe Kaltoven et al., im Druck), genutzt werden. Eingangsdaten sind hierbei die mit dem Modell SWIM für das Elbeeinzugsgebiet simulierten natürlichen Abflüsse unter Nutzung der 100 STAR-Realisierungen für das Emissions-Szenario A1B. Diese werden mittels des Wasserbewirtschaftungsmodells, in welchem alle relevanten Bewirtschaftungsmaßnahmen im Elbegebiet berücksichtigt werden, in bewirtschaftete Abflüsse transformiert. Dabei wird insbesondere deutlich, dass durch Talsperrenabgaben die (spät-)sommerlichen Niedrigwasserabflüsse bis zu einem gewissen Grad abgeschwächt

werden können (Abb. 9). Allerdings erfolgt mittels Talsperrenbewirtschaftung nur eine zeitliche Umverteilung des vorhandenen Wassers, eine Erhöhung der Wasserverfügbarkeit wäre nur mittels Überleitungen aus anderen Einzugsgebieten möglich. Deutlich wird dies beispielhaft an der Entwicklung der mittleren Abflüsse am Pegel Neu Darchau / Elbe für 2010 bis 2050, die in Tabelle 2 aufgeführt sind. Entsprechend dem Rückgang der natürlichen Abflüsse ist auch ein Rückgang der bewirtschafteten Abflüsse festzustellen. Auf Grund von Grubenwassereinleitungen in den Bergbaugebieten bzw. Einleitungen von Klärwerken (hier kann ein erheblicher Anteil der Einleitung grundwasserbürtig sein), können die bewirtschafteten Abflüsse größer als die natürlichen sein.

**Tab. 2:** Mittlere natürliche und bewirtschaftete Abflüsse am Pegel Neu Darchau/Elbe für 2010 bis 2050 unter Szenarienbedingungen.

| Jahr | natürlicher Abfluss (m <sup>3</sup> /s) | bewirtschafteter Abfluss (m <sup>3</sup> /s) |
|------|---|--|
| 2010 | 548                                     | 549  |
| 2020 | 509                                     | 515  |
| 2030 | 475                                     | 478  |
| 2040 | 415                                     | 411  |
| 2050 | 391                                     | 388  |



**Abb. 9:** Natürliche und bewirtschaftete Abflüsse am Pegel Neu Darchau/Elbe für 2010 bis 2050.

## 5. Schlussfolgerung und Ausblick

Die gezeigten Ergebnisse machen deutlich, dass es in der regionalen Forschung eine relativ große Unsicherheit bezüglich der regionalen Klimafolgen gibt. Hier besteht hoher Forschungsbedarf. Es ist z.B. zu untersuchen, warum die statistischen und die dynamischen regionalen Klimamodelle zu unterschiedlichen Aussagen kommen. Tatsächlich gibt es aber auch schon beobachtete Trends in den hydrologischen Größen, z.B. häufigere und länger andauernde Trockenperioden in Ostdeutschland, welche zur Validierung der Klimamodelle herangezogen werden können (Krysanova et al., 2008b). Wichtig ist es aber auch, Rückkopplungen zwischen Hydrologie, Vegetation und Klima zu berücksichtigen, da diese bestimmte Prozesse verstärken oder aber abschwächen können. Die hier skizzierten Fragestellungen sind u.a. am PIK Gegenstand laufender Untersuchungen.

## Danksagung

Die Arbeiten zu dieser Studie wurden unterstützt durch die Projekte GLOWA-Elbe (Gefördert durch das BMBF, FK: 01LW0312) und durch die PIK-interne Deutschlandstudie.

## 6. Literatur

- Böhm, U., Kücken, M., Ahrens, W., Block, A., Hauffe, D., Keuler, K., Rockel, B., Will, A., 2006. CLM – The climate version of LM: Brief description and long-term application. Proceedings from the COSMO General Meeting 2005. COSMO Newsletter 6, 225-235. <http://www.cosmo-model.org>.
- Enke, W., Deutschländer, T., Schneider, F., 2005a. Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. *Meteorologische Zeitschrift* 14, 247-257.
- Enke, W., Schneider, F., Deutschländer, T., 2005b. A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. *Theoretical and Applied Climatology*, 82, 51-63.
- Eisenreich, S.J. (Hrsg.), 2005. *Climate Change and the European Water Dimension. A report to the European Water directors. European Commission – Joint Research Centre, Ispra.*
- Gerstengarbe, F.W., Werner, P.C., 2005. Simulationsergebnisse des regionalen Klimamodells STAR. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P. (Hrsg.): *Integrierte Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. PIK-Report 95*, 110-118. Potsdam.
- Hattermann, F.F., Wattenbach, M., Krysanova, V., Wechsung, F., 2005. Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment – validation and uncertainty analysis. *Hydrological Processes* 19, 693-714.
- Hattermann, F.F., Gömann, H., Conradt, T., Kaltofen, M., Kreins, P., Wechsung, F., 2007. Impacts of global change on water-related sectors and society in a trans-boundary central European river basin – Part 1: project framework and impacts on agriculture. *Advances in Geoscience* 11, 85-92.
- Hattermann, F.F., Krysanova, V., Post, J., Dworak, Th., Leipprand, A., Kadner, S., Kabat, P., 2008a. Understanding consequences of climate change for water resources and water-related sectors in Europe. In: Timmermann, J., Pahl-Wostl, C., Möltgen, J. (Hrsg.): *The adaptiveness of IWRM. Analysing European IWRM research. S. 89-112. IWA Publishing, London.*
- Hattermann, F.F., Post, J., Krysanova, V., Conradt, T., Wechsung, F., 2008b. Assessment of water availability in a central-European river basin (Elbe) under climate change. *Advances in Climate Change Research* 4, 42-50.
- Hattermann, F.F., Kundzewicz, Z.W. (Hrsg.), 2010. *Water Framework Directive: Model Supported Implementation – A Water Managers Guide. IWA Publishing, London.*
- Hattermann, F.F., Weiland, M., Huang, S., Krysanova, V., Kundzewicz, Z.W., im Druck. *Model-supported Impact Assessment for the Water Sector in Central Germany under Climate Change – a Case Study. Water Resources Research.*
- Hollweg, H.D., Böhm, U., Fast, I., Hennemuth, B., Keuler, K., Keup-Thiel, E., Lautenschlager, M., Legutke, S., Radtke, K., Rockel, B., Schubert, M., Will, A., Woldt, M., Wunram, C., 2008. *Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. Technical Report. Hamburg. [http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/documents/reports/MaD\\_TechRep3\\_CLM\\_1.pdf](http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/documents/reports/MaD_TechRep3_CLM_1.pdf).*
- Huang, S., Krysanova, V., Österle, H., Hattermann, F.F., im Druck. *Simulation of spatiotemporal dynamics of water fluxes in Germany under climate change. Hydrological Processes.*
- IPCC, 2000. *IPCC Special Report Emission Scenarios - Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf. <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>.*
- IPCC, 2007a. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat, Genf.*
- IPCC, 2007b. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability – Summary for Policymakers. Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat, Genf.*
- Kabat, P., Schulze, R.E., Hellmuth, M.E., Veraart, J.A. (Hrsg.), 2002. *Coping with impacts of climate variability and climate change in water management: a scooping paper. DWCCReport No. DWCSSO-01(2002). International Secretariat of the Dialogue on Water and Climate, Wageningen.*
- Kaltofen, M., Hentschel, M., Kaden, S., Dietrich, O., Koch, H., im Druck. *Modellierung der Wasserverfügbarkeit im Elbeinzugsgebiet und Auswirkungen des Globalen Wandels im deutschen Teilgebiet. In: Wirkungen des Globalen Wandels auf den Wasserkreislauf im Elbegebiet – Risiken und Optionen. PIK-Report zum BMBF-Vorhaben GLOWA-Elbe II, Kapitel 3.1.*
- Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.-I., Becker, A., 1998. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling* 106, 261-289.
- Krysanova, V., Buiteveld, H., Haase, D., Hattermann, F.F., Van Niekerk, K., Roest, K., Martinez-Santos, P., Schlüter, M., 2008a. *Practices and Lessons Learned in Coping with Climatic Hazards at the River-Basin Scale: Floods and Droughts. Ecology and Society* 13, 32.
- Krysanova, V., Vetter, T., Hattermann, F.F., 2008b. Detection of change in the drought frequency in the Elbe basin: comparison of three methods. *Hydrological Sciences Journal* 53, 519-537.
- Kücken, M. et al., in Vorbereitung. *Modellvergleich der regionalen Klimamodelle REMO, CCLM, WETTREG und STAR.*
- Orlowsky, B., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 2008. A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theoretical and Applied Climatology* 92, 3-4.
- Roeckner, E., Bengtsson, L., Feichter, J., Lelieveld, J., Rodhe, H., 1999. Transient climate change simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM including the tropospheric sulfur cycle. *Journal of Climate* 12, 3004-3032.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Manzini, L.K.E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U., Tompkins, A., 2003. *The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description. Max-Planck-Institut für Meteorologie Report 349. Hamburg.*
- Tomassini, L., Jacob, D., 2009. Spatial analysis of trends in extreme precipitation events in high-resolution climate model results and observations for Germany. *Journal of Geophysical Research* 114, D12113.
- Williams, J.R., Renard, K.G., Dyke, P.T., 1984. EPIC – a new model for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation* 38, 381-383.

## Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsens

Lena Heidt

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Stilleweg 2, 30655 Hannover, lena.heidt@lbeg.niedersachsen.de

**Zusammenfassung:** Die Region Nordost-Niedersachsen wird ackerbaulich intensiv genutzt und ist aus landwirtschaftlicher Sicht eines der wichtigsten Anbaugebiete Niedersachsens. Die natürliche Wasserversorgung in dieser Region ist für den erfolgreichen Anbau landwirtschaftlicher Kulturen jedoch oft nicht ausreichend. Überwiegend sandige Böden mit einer geringen Wasserspeicherfähigkeit führen bereits unter heutigen Klimabedingungen zu einem hohen Beregnungsbedarf auf vielen Ackerflächen, um den Ertrag und die Qualität zu sichern. Die Klimastationen der Region zeigen bereits heute eine zunehmende Verlagerung der Niederschläge ins Winterhalbjahr. Mit dem Klimawandel werden steigende Temperaturen und eine weitere Verlagerung der jährlichen Niederschläge in die Wintermonate prognostiziert. Bis zum Ende des Jahrhunderts ist in Folge dessen mit einer stetig abnehmenden klimatischen Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode zu rechnen. Um die Auswirkungen eines möglichen Klimawandels auf den Wasserhaushalt landwirtschaftlich genutzter Böden abschätzen zu können, ist die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit bis zum Jahr 2100 berechnet worden. Die Ergebnisse zeigen, dass in Nordost-Niedersachsen bis zum Ende des Jahrhunderts mit einer Zunahme der potenziellen Beregnungsbedürftigkeit zu rechnen ist. Die potenzielle Beregnungswassermenge wird im Mittel um etwa 30 % ansteigen. Zudem wird der Anteil der Beregnungsflächen an der gesamten Ackerfläche steigen. Diese Entwicklung hätte eine verstärkte Konkurrenz um Wasser, insbesondere Grundwasser, in der Region zur Folge.

### Effects of climate change on the potential irrigation demand in Northeast-Lower Saxony

**Abstract:** In the northeast of Lower Saxony the natural water supply for agricultural plants is not sufficient for optimal growth. Additional irrigation is needed to ensure or increase the yield and the quality of the crops. Increasing temperatures and varying precipitation are expected effects of the regional climate change. To estimate the possible effects of climate change to the agricultural crop land, the potential irrigation demand was calculated up to the year 2100. Until the end of this century, the climatic water balance of the main growing season steadily decreases. The result is an increasing potential irrigation demand. Additionally the future potential irrigation water amount is calculated to increase by around 30 % until 2100.

#### 1. Einführung

Der Nordosten Niedersachsens gilt als besonders anfällig gegenüber Auswirkungen des Klimawandels (Elbracht et al., 2007; UBA 2007; LWK Niedersachsen, 2008). Aus diesem Grund ist das Gebiet für die Untersuchungen gewählt worden (Abb. 1).

Die Wasserversorgung landwirtschaftlicher Kulturen ist im natürlichen System oft nicht ausreichend, um einen optimalen Ertrag zu erwirtschaften (Renger und Strebel, 1981a, 1981b; Wessolek et al., 1988; Renger und Wessolek, 1993). Um die Qualität und den Ertrag zu sichern und gegebenenfalls zu erhöhen, greift die Landwirtschaft auf die zusätzliche Feldberegnung zurück (Wessolek et al., 1988; Fricke und Heidorn, 2003; Fricke, 2006). Im Untersuchungsgebiet Nordost-Niedersachsen wird die Feldberegnung schon heute vielfach eingesetzt, eine Prognose für die zukünftige Entwicklung der potenziellen Beregnungsbedürftigkeit ist daher von großer Bedeutung (LWK Niedersachsen, 2008).

#### 2. Untersuchungsgebiet

Es wurde ein Untersuchungsgebiet gewählt, welches für einen möglichen Klimawandel und dessen Auswirkungen besonders empfindlich ist (Heidt, 2009). Laut UBA (2007) „[...] errechneten die Forscherinnen und Forscher für das ohnehin schon trockene norddeutsche Tiefland bis zu 50 % weniger Niederschläge“. In Elbracht et al. (2007) wird die Geest, die im Untersuchungsgebiet ungefähr dem Gebiet der Lüneburger Heide entspricht und somit ca. 70 % an der betrachteten Fläche aufweist, als „[...] eine höher gelegene, trockene, teilweise unfruchtbare Altmoränenlandschaft mit vorwiegend sandigen Böden [...]“ beschrieben. Der Begriff Geest bedeutet „unfruchtbares Land“ oder „hoch gelegener, trockener, sandiger Boden“ (Seedorf und Meyer, 1992). Laut DVWK (1984) zählt Nordost-Niedersachsen, bedingt durch „Örtliche Niederschlagsverhältnisse und ausgedehnte leichte Böden“, [...] zu den „Hauptgebieten der Beregnung in der Bundesrepublik Deutschland“. Das gewählte Gebiet ist aus landwirtschaftlicher Sicht sehr wichtig, da viele Flächen intensiv ackerbaulich genutzt

werden, obwohl sich deren Eignung dafür teilweise in Grenzen hält. „Neue Düngungs-, Landbautechniken, Züchtungserfolge beim Getreide und Vieh haben zu erheblichen Ertragssteigerungen geführt, so dass heute die Geest zu den größten Überschussgebieten an landwirtschaftlichen Produkten gehört“ (Seedorf und Meyer, 1992). Für zukünftige Klimaentwicklungen ist dieser Bereich Niedersachsens sehr interessant, da viele der Ackerflächen während der Vegetationsperiode bereits heute zusätzlich beregnet werden müssen. „Die Region Nordost-Niedersachsen bildet das größte zusammenhängende Beregnungsgebiet Deutschlands“ (LWK Niedersachsen, 2008). So werden z.B. in den Landkreisen Uelzen und Gifhorn, die den zentralen und südöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes ausmachen, ca. 85 % der Ackerflächen zusätzlich beregnet (LWK Niedersachsen, 2008).

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Norddeutschen Tiefebene und ist durch maritimes Klima geprägt. Nach Osten beginnt der Übergang zu kontinentaleren Verhältnissen (LWK Niedersachsen, 2008). Der maritime Einfluss aus Nordwesten bringt milde Winter und niederschlagsreiche Sommer mit sich. Im Sommer kann der kontinentale Klimaeinfluss aus dem Osten zu Hitze und Trockenheit führen (Seedorf und Meyer, 1992).

Für den Referenzzeitraum 1961-1990 liegt die mittlere Jahrestemperatur im Untersuchungsgebiet bei ca. 8,6 °C. Die mittlere Temperatur im Sommer beträgt ca. 14 °C, im Winter sind es etwa 3,5 °C. Der mittlere Niederschlag schwankt im Untersuchungsgebiet zwischen 500 und 700

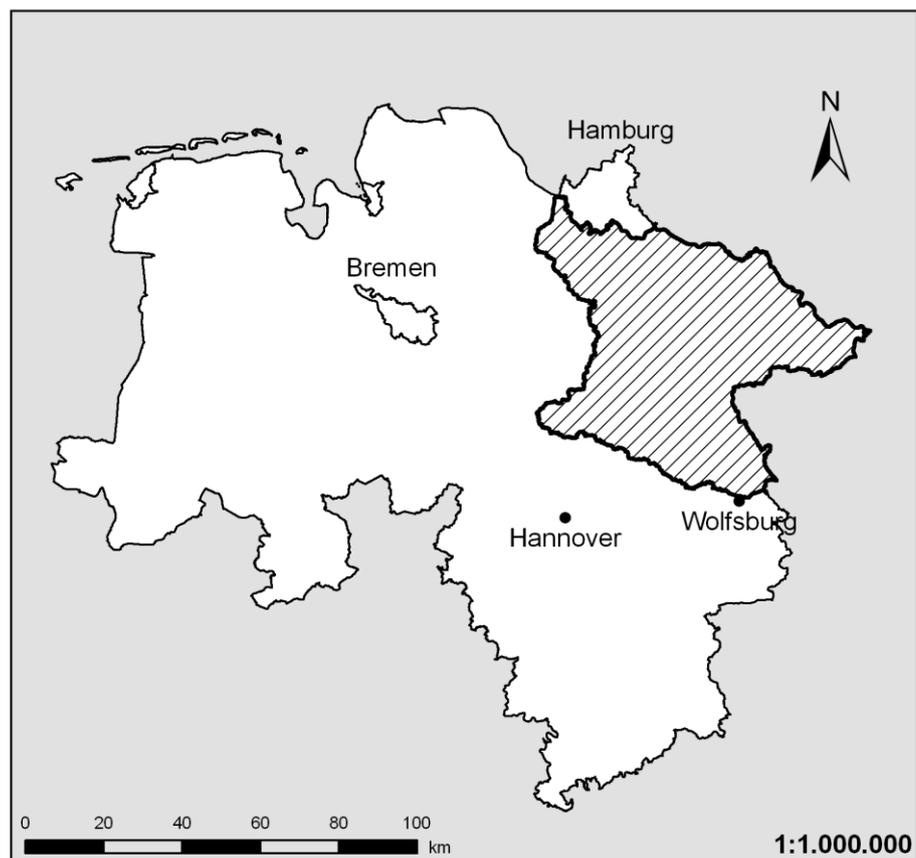
mm/a. Die Monatsmittel variieren zwischen ca. 30 und 70 mm.

Die Monate Juni, Juli und August sind die niederschlagsreichsten Monate des Jahres. Februar und Oktober weisen die niedrigsten Niederschläge auf. Die Monate November, Dezember und Januar liegen auf einem mittleren Niveau. Die Klimastation Uelzen weist die höchsten und die Station Lüchow die niedrigsten Niederschläge auf. Die Niederschlagsmenge nimmt mit zunehmend kontinentalerem Klima von Westen nach Osten ab.

### 3. Methoden

Für die Klimaprognosen ist das globale Klimamodell ECHAM5 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) benutzt worden. Als SRES-Szenario (Special Report on Emissions Scenarios) ist das A1B-Szenario gewählt worden, welches einen mittleren Trend in der Entwicklung von Bevölkerung und Technologien wiedergibt. Um das Untersuchungsgebiet genauer betrachten zu können, sind die Daten des globalen Klimamodells regionalisiert worden. Dazu diente das statistische Regionalisierungsmodell WettReg (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode), dessen räumliche Auflösung so hoch ist, wie Messreihen an den meteorologischen Stationen vorhanden sind (UBA, 2007).

Die Jahresmitteltemperatur steigt im Untersuchungsgebiet von 1961-1990 bis 2071-2100 um ungefähr 2,5 °C an. Es ist mit einem Anstieg von ca. 8,6 °C für den Zeitraum 1961-1990 auf etwa 11,1 °C für die Jahre 2071-2100 zu rechnen.



**Abb. 1:** Lage des Untersuchungsgebietes innerhalb Niedersachsens.

Der mittlere Jahresniederschlag nimmt bis zum Ende des Jahrhunderts nur leicht ab und stellt somit scheinbar zukünftig kein Problem dar. Das Niederschlagsmaximum verschiebt sich jedoch vom Sommer in den Winter. Waren bisher Juni, Juli und August die niederschlagsreichsten Monate, so werden das in Zukunft die Monate Dezember und Januar sein. Der gleiche Trend wird auch in UBA (2007) für ganz Deutschland beschrieben.

Aus der Differenz des Niederschlags und der potenziellen Evapotranspiration der Hauptvegetationsperiode ergibt sich die klimatische Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode (KWBv), wobei eine Vegetationsperiode die Monate Mai bis Oktober umfasst (Müller, 2004). In diesem Zeitraum baut die Landwirtschaft den größten Teil der Feldfrüchte an. Je negativer die Werte werden, desto trockener ist das Gebiet. Angegeben wird die KWBv in Millimeter pro Vegetationsperiode (mm/v) (Müller, 2004). Die potenzielle Evapotranspiration ist mit der Formel für die FAO-Grasreferenzverdunstung (DIN 19685, 1997) berechnet worden.

In Abbildung 2 ist die Entwicklung der klimatischen Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode (KWBv) für die Ackerflächen des gesamten Untersuchungsgebiets dargestellt. Die Werte für 1961-1990 sind die Daten des DWD, ab 2011-2040 beginnen die Szenario-Daten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die KWBv mit der Zeit negativer wird. Während sie im Zeitraum 1961-1990 noch bei ca. -45 mm/v lag, wird sie zum Ende des Jahrhunderts bei etwa -190 mm/v liegend erwartet.

Für die Berechnung der potenziellen Beregnungsbedürftigkeit gehen als wichtigste Steuergrößen die klimatische Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode und die

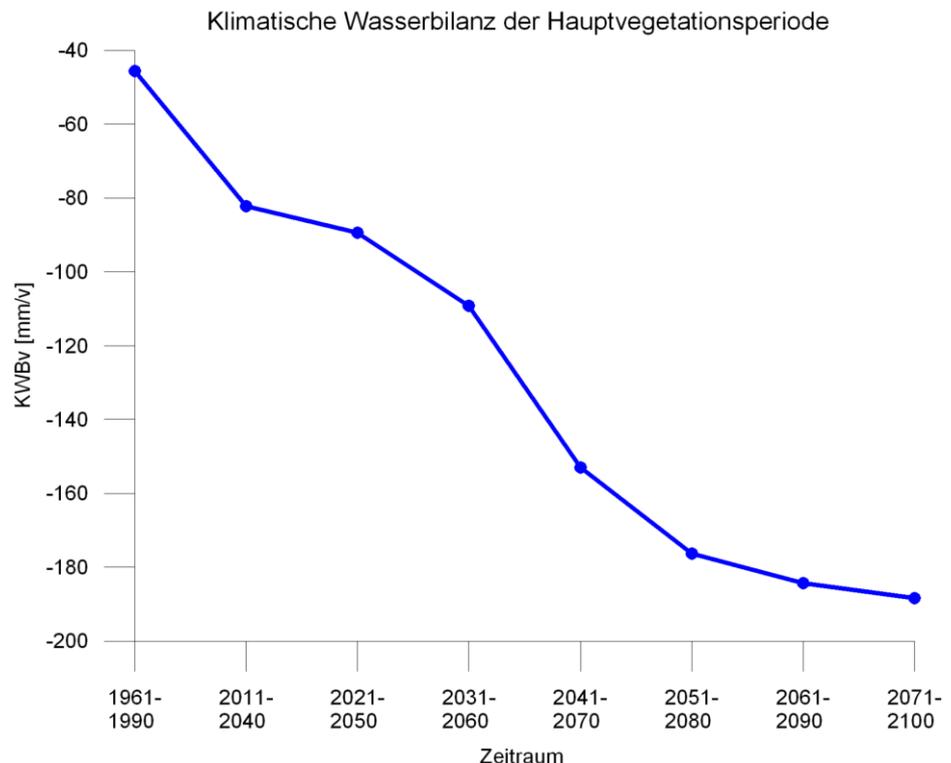
pflanzenverfügbare Bodenwassermenge des effektiven Wurzelraumes ein (Renger und Strebel, 1981b).

Die Parameter die zur Berechnung der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge des effektiven Wurzelraumes herangezogen werden, stammen aus der digitalen nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte 1:50.000 von Niedersachsen (BÜK50n, ohne Jahr).

Die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit wird in dieser Arbeit für einen Mittelwert für Getreide und Hackfrüchte (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Zuckerrüben, Kartoffeln und Mais) im 30jährigen Mittel berechnet und für die Zukunft prognostiziert. Sie wird daher nicht als tatsächliche, sondern als potenzielle Beregnungsbedürftigkeit beschrieben.

Laut DVWK (1984) gilt „Ein Standort [...] als beregnungsbedürftig, wenn seine klimatischen Bedingungen in Verbindung mit den physikalischen Eigenschaften seines Bodens die landwirtschaftlichen Kulturpflanzen während der Vegetationszeit nicht ausreichend mit Wasser versorgen, um ein gesichertes Wachstum ohne Ertrags- und Qualitätsminderungen zu gewährleisten“.

Sobald aus der Zusatzbewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen trotz der Kosten für die Beregnung ein wirtschaftlicher Mehrerlös resultiert, spricht man von Beregnungswürdigkeit (Fricke und Heidorn, 2003): „Eine Frucht ist prinzipiell dann beregnungswürdig, wenn die beregnungsbedingten Mehrkosten durch die Erntemehrerlöse gedeckt sind [...]“ (Fricke und Heidorn, 2003).



**Abb. 2:** Verlauf der klimatischen Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode gemittelt über das gesamte Untersuchungsgebiet.

Renger und Strebel (1982) haben ein digitales Simulationsmodell entwickelt, mit dem der langfristig auftretende jährliche Beregnungsbedarf in Abhängigkeit von Fruchtart, Klima und Boden berechnet werden kann. Das Simulationsmodell ist an Versuchsfeldern geeicht worden. Mit dem Modell soll die Beregnungsbedürftigkeit eines Standorts ermittelt werden. Dazu wird die Beregnungsmenge in mm/a berechnet, die notwendig ist, um einen Mindestwassergehalt von 40 % nutzbarer Feldkapazität im effektiven Wurzelraum aufrecht zu erhalten (Renger und Strebel, 1982).

#### 4. Ergebnisse

Die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit ist ausschließlich für Flächen berechnet worden, deren Nutzung in der digitalen nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK50n, ohne Jahr) als Acker ausgewiesen ist. Flächen anderer Nutzung werden in den folgenden Abbildungen immer weiß dargestellt und nicht weiter beschrieben.

Die Berechnung erfolgte jeweils für 30jährige Mittel im Abstand von zehn Jahren. Der Referenzzeitraum ist die Periode 1961-1990. Der erste prognostizierte Zeitraum

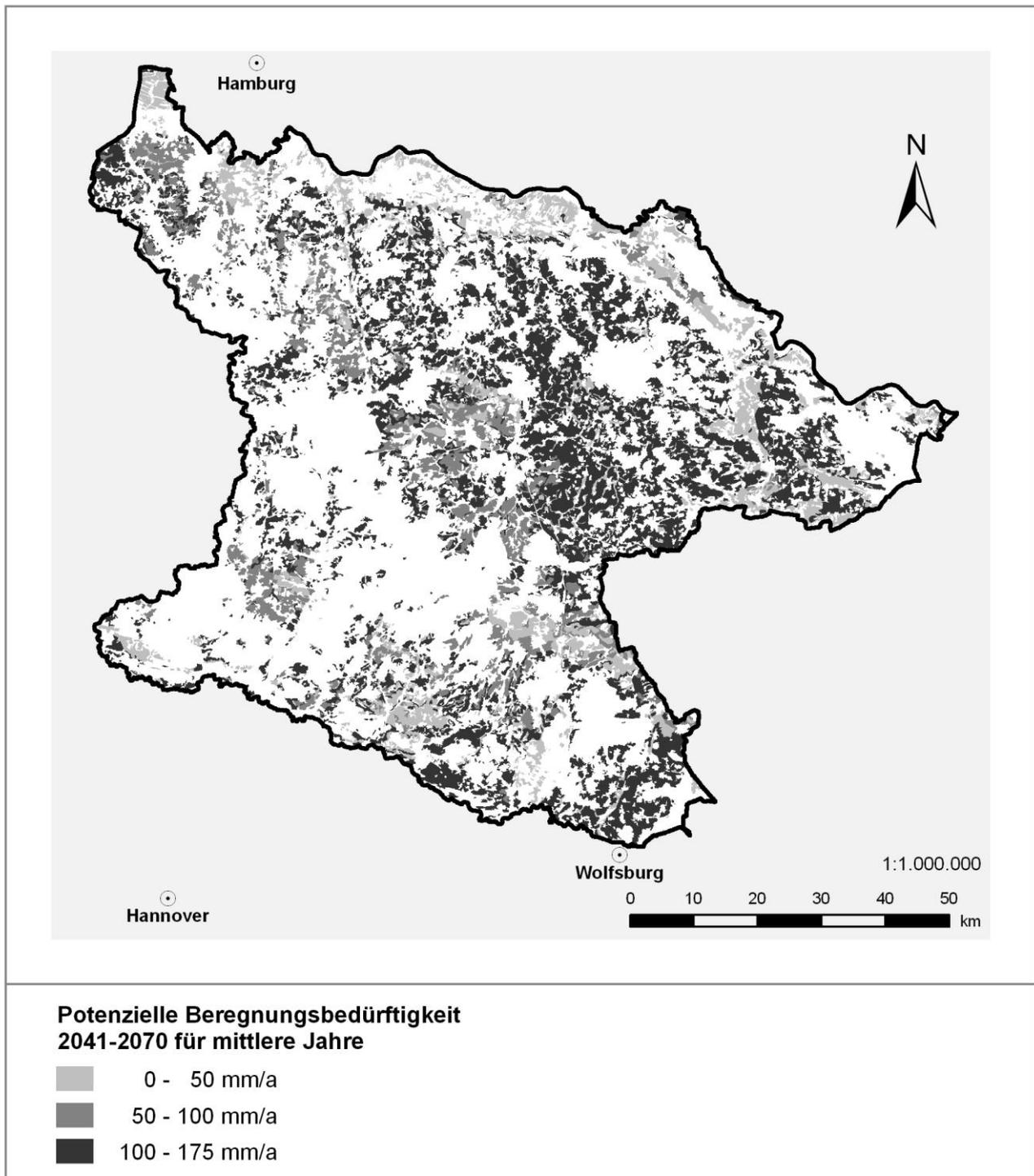
ist die Periode 2011-2040, der letzte ist 2071-2100. In Abbildung 3 ist der Zeitraum zur Mitte des Jahrhunderts 2041-2070 dargestellt. Die höchste potenzielle Beregnungsbedürftigkeit ist in der Region zwischen Lüneburg, Hitzacker, Lüchow und Uelzen und nördlich von Wolfsburg zu erkennen.

Neben den Prognosen für mittlere Jahre ist auch die Möglichkeit berücksichtigt worden, dass alle fünf Jahre ein Trockenjahr auftritt. Daher sind alle Zeiträume auch für trockene Jahre berechnet worden. Die Ergebnisse für den Zeitraum 2041-2070 sind in Abbildung 4 abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit der trockenen Jahre gegenüber der mittleren Jahre stark erhöht ist.

Um abschätzen zu können, wie sich der Wasserbedarf für die Feldberegnung entwickelt, ist die potenzielle Beregnungswassermenge berechnet worden. Auf der Grundlage der Flächensumme der einzelnen Beregnungsklassen ist die minimale und die maximale potenzielle Beregnungswassermenge, sowie ein Mittelwert errechnet worden. Die errechneten Wassermengen sind in Tab.1 dargestellt.

**Tab. 1:** Entwicklung der potenziellen Beregnungswassermenge von 1961-1990 bis 2071-2100 in [Mio. m<sup>3</sup>/a] und [%].

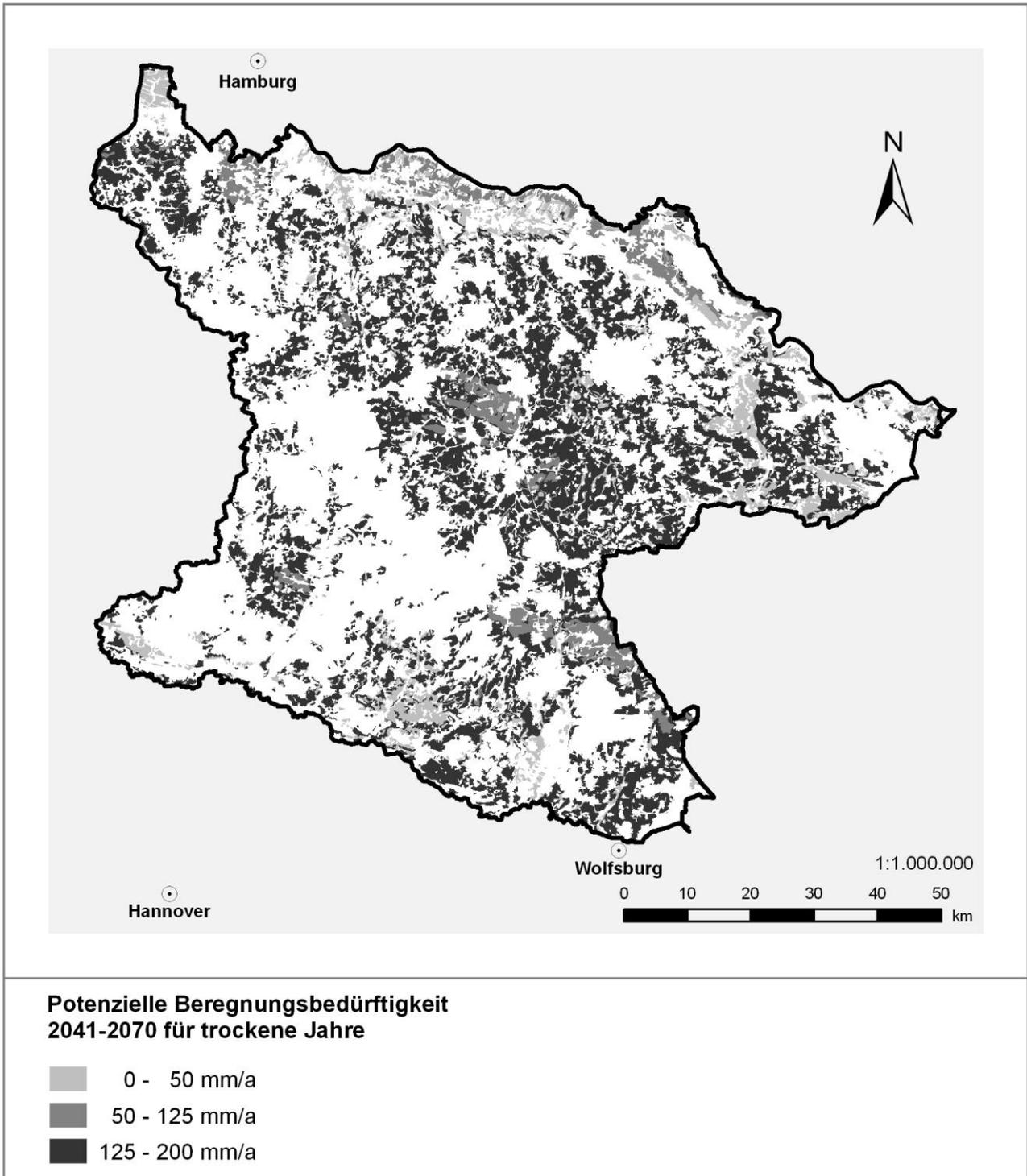
| Zeitraum  | Minimale Wassermenge [Mio. m <sup>3</sup> /a] | Minimale Wassermenge [%] | Maximale Wassermenge [Mio. m <sup>3</sup> /a] | Maximale Wassermenge [%] | Mittelwert [Mio. m <sup>3</sup> /a] | Mittelwert [%] |
|-----------|---|--------------------------|---|--------------------------|-------------------------------------|----------------|
| 1961-1990 | 198   | 100                      | 278   | 100                      | 238                                 | 100            |
| 2010-2040 | 211   | 107                      | 290   | 104                      | 251                                 | 105            |
| 2020-2050 | 215   | 109                      | 295   | 106                      | 255                                 | 107            |
| 2030-2060 | 214   | 108                      | 293   | 105                      | 254                                 | 107            |
| 2040-2070 | 242   | 122                      | 321   | 115                      | 282                                 | 118            |
| 2050-2080 | 268   | 135                      | 348   | 125                      | 308                                 | 129            |
| 2060-2090 | 268   | 135                      | 348   | 125                      | 308                                 | 129            |
| 2070-2100 | 269   | 136                      | 349   | 126                      | 309                                 | 130            |



**Abb. 3:** Karte der potenziellen Beregnungsbedürftigkeit für mittlere Jahre im Zeitraum 2041-2070 in der Region Nordost-Niedersachsen.

Es ist ein deutlicher Anstieg bis zum Jahr 2100 von im Mittel etwa 70 Mio. m<sup>3</sup>/a im Vergleich zum Zeitraum 1961-1990 zu erkennen. In der Tabelle 1 ist neben dem Anstieg der Wassermenge auch der Bezug zum Referenzzeitraum 1961-1990 in Prozent aufgeführt. Demnach steigt die minimale Wassermenge bis zum Ende des Jahrhunderts um 35,9 % im Vergleich zu 1961-1990. Die maximale Wassermenge nimmt nicht so stark zu, sie wächst nur um 25,5 % an. Daraus ergibt sich eine Zu-

nahme beregnungsbedürftiger Flächen. Die Beregnungsbedürftigkeit der Flächen, die heute schon beregnet werden, steigt jedoch nicht so stark an. Die aufgeführten potenziellen Beregnungswassermengen liegen erheblich über den tatsächlichen Wassermengen, die heute zur Feldberegnung genutzt werden. Der Grund dafür ist, dass nicht alle beregnungsbedürftigen Ackerflächen überhaupt beregnet oder ausreichend beregnet werden.



**Abb. 4:** Karte der potenziellen Beregnungsbedürftigkeit für trockene Jahre im Zeitraum 2041-2070 in der Region Nordost-Niedersachsen.

**5. Diskussion und Schlussfolgerungen**

Wasser ist zu einer Ressource geworden, deren Bedeutung stetig zunimmt. Wasserknappheit führt immer häufiger zu Konfliktsituationen zwischen den verschiedenen Nutzern (Müller, 1996; Riesbeck, 2007). So sind die Hauptnutzer der natürlichen Wasservorräte die Trinkwasserversorgung, die Industrie und die Landwirtschaft. In Niedersachsen werden jährlich ca. 10 % der Grundwasserneubildungsmenge für diese Zwecke entnommen,

das entspricht etwa 880 Mio. m<sup>3</sup>/a (Pollack, 1996). Der prognostizierte maximale Wasserbedarf im Untersuchungsgebiet liegt im Zeitraum 2071-2100 allein für die Landwirtschaft bei 29 % der jährlichen Grundwasserneubildung und somit deutlich über diesem Wert. Laut Müller (1991) benötigt die Landwirtschaft 150 bis 200 Mio. m<sup>3</sup>/a Beregnungswasser. Die prognostizierte potenzielle Beregnungswassermenge liegt für den Zeitraum 2071-2100 im Mittel bereits bei 300 Mio. m<sup>3</sup>/a und so-

mit etwa doppelt so hoch. Selbst wenn das Grundwasserangebot für eine optimale Feldberechnung ausreichen würde, kann es zu Grundwasserabsenkungen in einigen Bereichen kommen, da die Wasserentnahme nicht gleichmäßig über den gesamten Grundwasserkörper verteilt werden kann. Eine bedeutend höhere Grundwasserentnahme, als die 10 % der Grundwasserneubildung, birgt zahlreiche Risiken und ist in vielen Gebieten kaum möglich. Gründe dafür sind z.B., dass die Ergiebigkeit vieler Grundwasserleiter nicht ausreichend ist. Außerdem verursacht eine Grundwasserabsenkung oft ökologische Schäden (Müller, 1991).

Auch wenn in Deutschland nicht von Wasserknappheit gesprochen werden kann, kommt es z.B. in Gebieten mit geringer Grundwasserneubildung regional schon heute zu Konflikten unter den Grundwassernutzern (Renger und Strebel, 1981b). Durch den Klimawandel könnten diese Nutzungskonflikte verstärkt werden. Die Landwirtschaft steht vor der Aufgabe sich an die Klimaänderungen anzupassen und die steigende potenzielle Beregnungsbedürftigkeit durch Optimierung der Feldberechnung auszugleichen (Minacapilli et al., 2007).

Beregnungsmenge und Beregnungszeitpunkt sind wichtige Faktoren, die zur Verbesserung der Wasserversorgung von Kulturpflanzen beitragen können, wenn sie optimal auf den Boden und die Fruchtart abgestimmt sind (Wessolek et al., 1988). So lautet die Empfehlung von Wessolek et al. (1988) z.B. für sandige Böden, die meist einen hohen Beregnungsbedarf aufweisen, nur geringe Einzelberegnungsgaben zu wählen, um den beregnungsbedingten Versickerungsanstieg möglichst gering zu halten. Auch der Beregnungszeitpunkt hat Einfluss auf den durch zusätzliche Feldberegnung herbeigeführten Versickerungsanstieg. „Je früher eine Beregnung einsetzt (z.B. bei Pflanzen, die stark auf Wassermangel reagieren oder bei Standorten mit geringem Wasserspeichervermögen), desto geringer sollte die einzelne Beregnungsgabe liegen [...]“ (Wessolek et al., 1988). Um Speicherraum für natürliche Niederschläge zu erhalten, sollte die Einzelberegnungsgabe nicht den gesamten effektiven Wurzelraum bis zur Feldkapazität auffüllen. Trotzdem wird angenommen, dass die Nettobelastung des Grundwassers durch die Feldberegnung nur bei etwa 70 % liegt, ca. 30 % werden durch Versickerung wieder dem Grundwasser zugeführt (Wessolek et al., 1988). Allerdings wird dieser Versickerungsanteil durch die Optimierung der Feldberegnung höchstwahrscheinlich abnehmen. Durch die optimale Anpassung der Beregnungsmengen und des Beregnungszeitpunktes kann auch die Auswaschung von Nährstoffen (z.B. Nitrat) und Pflanzenschutzmitteln ins Grundwasser reduziert werden (MLUV, 2005).

Auch die Wahl der Fruchtfolgen kann auf die zukünftigen Klimabedingungen abgestimmt werden (Breitschuh, 2007). In der Landwirtschaft sollten in Zukunft gezielt Fruchtarten angebaut werden, die mit einem niedrigeren Wasserangebot und steigenden Temperaturen auskommen. Zukünftig anbauwürdig könnten Fruchtarten mit hoher Wassernutzungseffizienz wie Soja, Hirse, Sonnenblumen, Körnermais und Hartweizen sein (MWAT, 2007). Der Klimawandel wird sich auf die meisten land-

wirtschaftlichen Produktionsbedingungen eher negativ auswirken (MU, 2008). In einigen Bereichen könnten aber auch positive Auswirkungen für die Landwirtschaft auftreten. So nimmt z.B. die Frostgefahr durch die ansteigenden Temperaturen ab (Todisco und Vergni, 2007). Dies kann sich nicht nur positiv auf die landwirtschaftlichen Nutzpflanzen auswirken, sondern kann auch die Grundwasserneubildung im Winter erhöhen. Außerdem wird sich die Vegetationsperiode vermutlich verlängern. Die Landwirte könnten in Zukunft eventuell zweimal pro Jahr ernten und somit ihre Erträge erhöhen. Wahrscheinlich würde dies allerdings eine erhöhte Beregnung nach sich ziehen.

Zur Vermeidung verstärkter Konflikte um das Grundwasser könnte untersucht werden, ob die Feldberegnung auch aus anderen Quellen möglich ist. Im „No Regret-Bericht“ (LWK Niedersachsen, 2008) ist bereits der Vorschlag gemacht worden, Wasser aus dem Elbe-Seitenkanal für die Feldberegnung zu nutzen. Die Umsetzung ist allerdings aufwändig und energetisch intensiv, da lange Pipelines verlegt werden müssten, damit das Wasser zum gewünschten Ort gepumpt werden könnte. Ein weiterer Ansatz des „No Regret-Berichts“ (LWK Niedersachsen, 2008) ist die Umkultivierung von Nadelwäldern zu Laubwäldern, da die Grundwasserneubildung unter Laubwäldern höher ist. Breitschuh (2007) schlägt einen Rückbau von bereits bestehenden Speicheranlagen vor, die gegenwärtig anderweitig genutzt werden.

Abschließend sei zusammengefasst, dass diese Arbeit einen Ausblick auf die möglichen Klimaänderungen und deren Auswirkungen auf die Landwirtschaft ermöglicht. Die Zunahme des Wasserbilanzdefizites durch die Veränderungen der Klimaparameter Temperatur und Niederschlag resultiert in einer Zunahme der potenziellen Beregnungsbedürftigkeit und der Beregnungswassermengen. Diese Ergebnisse erfordern die Entwicklung von Anpassungsstrategien.

## 6. Literatur

- Breitschuh, G., 2007. Die Wasserversorgung der Pflanzen als wesentlicher Ertragsfaktor. DLG-Fachtagung Bewässerung 2007, S. 3-5. Jena. <http://www.tl.de/ainfo/pdf/h2ot0707.pdf>. Zugriff: 15.06.2010.
- BÜK50n, ohne Jahr. Digitale nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte von Niedersachsen 1:50.000. Digitaler Datensatz des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, (LBEG). Hannover.
- DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), 1997. DIN 19685 – Klimatologische Standortuntersuchung, Ermittlung der meteorologischen Größen. Beuth, Berlin.
- DVWK – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (Hrsg.), 1984. Beregnungsbedürftigkeit – Beregnungsbedarf: Modelluntersuchungen für die Klima- und Bodenbedingungen der Bundesrepublik Deutschland. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 205. Parey, Bonn.
- Elbracht, J., Meyer, R., Reutter, E., 2007. Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen. GeoBerichte 3, 3-107. Niedersächsisches Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover.
- Fricke, E., 2006. Zusatzwasser für mehr Qualität. <http://www.fachverband-feldberegnung.de/basisinfo.htm>. Zugriff: 27.05.2010.

- Fricke, E., Heidorn, H., 2003. Effizientes landwirtschaftliches Beregnungs-Management. <http://www.fachverband-feldberegnung.de/basisinfo.htm>. Zugriff: 27.05.2010.
- Heidt, L., 2009. Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsens. *GeoBerichte* 13. Niedersächsisches Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover.
- LWK – Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Hrsg.), 2008. No Regret – Genug Wasser für die Landwirtschaft?! Uelzen.
- Minacapilli, M., Iovino, M., D'Urso, G., 2007. A distributed agro-hydrological model for irrigation water demand assessment. *Agricultural Water Management* 95, 123-132.
- MWAT – Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus (Hrsg.), 2007. Klimaschutz und Folgen des Klimawandels in Mecklenburg-Vorpommern. Schwerin.
- MLUV – Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hrsg.), 2005. Leitfaden zur Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen. Potsdam.
- MU – Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz (Hrsg.), 2008. Klimawandel – Herausforderung für Staat und Gesellschaft. Hannover.
- Müller, J., 1991. Wasserversorgung und Grundwasserschutz in Niedersachsen. *Grundwasser in Niedersachsen* 7, 7-12. Stuttgart.
- Müller, J., 1996. Grundwasser – ein schutzbedürftiger Rohstoff. *Wasser und Boden – Nutzung, Belastung und Schutz in Niedersachsen* 11, 5-12. Stuttgart.
- Müller, U., 2004. Auswertungsmethoden im Bodenschutz. Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). Arbeitshefte Boden 2004/2. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.
- Pollack, E., 1996. Grundsätze und Ziele des Boden- und Grundwasserschutzes in der niedersächsischen Raumordnung. *Wasser und Boden – Nutzung, Belastung und Schutz in Niedersachsen* 11, 13-17. Stuttgart.
- Renger, M., Strebel, O., 1981a. Beregnungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher Kulturen in Niedersachsen in Abhängigkeit von Klima und Boden. *Meteorologische Rundschau* 34, 10-16.
- Renger, M., Strebel, O., 1981b. Bestimmung der Beregnungsbedürftigkeit wichtiger Standorte Niedersachsens. Abschlussbericht, Archiv LBEG 0091414. Hannover.
- Renger, M., Strebel, O., 1982. Beregnungsbedürftigkeit der landwirtschaftlichen Nutzflächen in Niedersachsen. *Geologisches Jahrbuch* F13, 3-66.
- Renger, M., Wessolek, G., 1993. Bestimmung des Beregnungsbedarfs. *Wasser und Boden* 9, 731-734.
- Riesbeck, F., 2007. Wasser weltweit – Die Bedeutung der landwirtschaftlichen Bewässerung. DLG-Fachtagung Bewässerung 2007, S. 6-8. Jena. <http://www.tll.de/ainfo/pdf/h2ot0707.pdf>. Zugriff: 14.06.2010.
- Seedorf, H. H., Meyer, H.-H., 1992. *Landeskunde Niedersachsen: Natur- und Kulturgeschichte eines Bundeslandes. Band 1: Historische Grundlagen und naturräumliche Ausstattung.* Wachholtz, Neumünster.
- Todisco, F., Vergni, L., 2007. Climatic changes in Central Italy and their potential effects on corn water consumption. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 1-11.
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.), 2007. Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen – Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. Dessau-Roßlau.
- Wessolek, G., Renger, M., Strebel, O., Duynisveld, W.H.M., Facklam, M., Braun, G., List, B., 1988. Gezielte Beregnungssteuerung zur Ertragsoptimierung und Verringerung des beregnungsbedingten Versickerungsanstieges. Berlin.

## Entwicklung und Bereitstellung einer Bewertungsmethodik zur Beurteilung des Natürlichkeitsgrades des hydrologischen Regimes der Oberflächenwasserkörper (Fließgewässer und Seen) gemäß EU-WRRL im Land Sachsen-Anhalt

Tim G. Hoffmann, Dietmar Mehl

biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH, 18246 Bützow, Nebelring 15, postmaster@institut-biota.de

**Zusammenfassung:** Deutschlandweit bestand bislang kein Verfahren für die Bewertung der „Wasserhaushaltsgrößen“ als hydromorphologische Qualitätskomponenten für die ökologische Zustandsbewertung nach der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Um die Intensität anthropogen verursachter Veränderungen dieser Prozess- und Zustandsgrößen bezüglich ihrer natürlichen Referenzbedingungen zu erfassen, wurde das HYDREG-Verfahren für Fließgewässer und Seen entwickelt. Dieses mesoskalige und induktive Bewertungsverfahren beurteilt flächendeckend Wassernutzung, Landnutzung, Gewässerausbau, Grundwasserverbindung, Grundwasserquantität, Bau künstlicher Seen und Auenveränderungen hinsichtlich ihrer hydrologischen Wirkungen. Für Fließgewässer und Seen wurden dabei unterschiedliche Teilverfahren zur Anwendungsreife gebracht. Untermauert wird das Bewertungssystem durch eine Validierung der Bewertungsergebnisse anhand von Veränderungen in den Abflusszeitreihen geeigneter hydrologischer Pegel. Im Sinne der WRRL-Zielerreichung „guter Zustand“ wurden zudem grundsätzliche Lösungsansätze in Form eines Maßnahmenkatalogs entwickelt.

### Assessment of the naturalness of the hydrological regime of rivers and lakes in the Federal State of Sachsen-Anhalt under the terms of the European Water Framework Directive

**Abstract:** Up to now no common procedure existed across Germany for the evaluation of the parameters of the water balance as hydromorphological components to support the assessment of ecological status defined by the European Water Framework Directive (WFD). The HYDREG procedure was developed for rivers and lakes to register the intensity of anthropogenic caused changes in the hydrological status compared to the natural conditions. This mid-scale and inductive assessment procedure assesses water use, land use, river development, ground water connection, ground water quantity, construction of artificial lakes and floodplain changes all over the Federal State concerning the hydrologic effects. For rivers and lakes different procedures were developed. The assessment system was verified by a validation of the assessment results on the basis of changes in the discharge time series of suitable hydrologic gauges. In addition, a catalogue of measures to support reaching WFD's „good status“ were developed.

#### 1. Einführung

Eine wesentliche Anforderung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000) zur Umsetzung der ambitionierten Gewässerschutzziele für die Fließ- und Standgewässerkörper bildet die ökologische Zustandsbewertung. Als Qualitätskomponenten für die Einstufung des ökologischen Zustands sind im Anhang V WRRL aufgeführt:

- biologische Komponenten;
- hydromorphologische Komponenten in Unterstützung der biologischen Komponenten;
- chemische und physikalisch-chemische Komponenten in Unterstützung der biologischen Komponenten.

Bei den hydromorphologischen Qualitätskomponenten werden für Flüsse und Seen unterschiedliche, als nicht näher definierte „Wasserhaushalts-“ bzw. hydrologische Größen angegeben (Flüsse: Abfluss und Abflussdynamik, Verbindung zum Grundwasser, Seen: Wasser-

standsdynamik/Pegel, Verweildauer/Wassererneuerungszeit, Verbindung zum Grundwasser).

Da deutschlandweit für diesen Teilaspekt der Zustandsbewertung kein anwendungsbereites Verfahren bestand, hat der Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt (LHW) die „Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Beurteilung des Natürlichkeitsgrades des Wasserhaushalts der Oberflächenwasserkörper (Fließgewässer und Seen) gemäß EU-WRRL im Land Sachsen-Anhalt“ beauftragt.

Eine Einbeziehung hydrologischer Zustands- und Prozessgrößen zur komplexen oder spezifischen Bewertung ökologischer Zusammenhänge in Gewässer- und Auen-systemen ist international etabliert (vgl. z.B. Tharme, 2003). In Deutschland sind in dieser Hinsicht vor allem zu benennen:

- Verfahren zur Ermittlung eines Mindestabflusses bzw. einer Mindestwasserführung (LAWA,1995;

Pabstmann et al., 1998; Ebel und Gluch, 1998; LA-WA, 2001);

- Verfahren im Zusammenhang mit der WRRL-Umsetzung (Leibundgut und Eisele, 2005; LUA, 2009; Ostrowski und Froehlich, 2006; vgl. zur Thematik auch Jorde, 1997);
- Ansätze und Verfahren im Rahmen der Zustandsbewertung von Fluss- und Stromauen (Brunotte et al., 2009).

## 2. Untersuchungsgebiet

Ziel war die Entwicklung einer allgemein anwendbaren und vor allem belastbaren Bewertungsmethodik für alle 348 Oberflächenwasserkörper (OWK) entsprechend Anhang II WRRL (dies umfasst Fließgewässer mit einem Eigeneinzugsgebiet von  $\geq 10 \text{ km}^2$  und Seen mit einer Flächengröße von  $\geq 0,5 \text{ km}^2$ ) in Sachsen-Anhalt.

Von den insgesamt 25 Fließgewässer- und 14 Seentypen zur WRRL-Umsetzung in Deutschland (UBA, 2007) kommen in Sachsen-Anhalt aufgrund des hohen landschaftlichen Kontrastes zwischen Mittelgebirge und Tiefland immerhin 2/3 aller Fließgewässertypen (insgesamt 16) vor. Auch wenn die Seen überwiegend als Folge des Bergbaues und damit künstlich entstanden sind, kommen immerhin 8 der 14 deutschen Seentypen vor. Damit ist eine Bewertungsmethodik für dieses Bundesland grundsätzlich räumlich übertragbar.

## 3. Daten und Methoden

### 3.1 Grundlagen

Um begriffliche Überschneidungen zum Abflussregime zu vermeiden, das gemäß DIN 4049 (DIN, 1992) als der charakteristische und von den Eigenschaften des zugehörigen Einzugsgebietes abhängige Gang des Abflusses

eines Gewässers bezeichnet wird, wird für das WRRL-Bewertungsverfahren der Begriff „hydrologisches Regime“ (HYDREG) eingeführt. Das hydrologische Regime eines Oberflächenwasserkörpers beschreibt dabei Prozess- und Zustandsgrößen des Abflusses (Fließgewässer), des Wasserstandes bzw. Volumens (Seen) und der hydrologischen Konnektivität der Oberflächengewässer zu Auen und Grundwasser. Die Natürlichkeit des hydrologischen Regimes wird gemessen an der Intensität anthropogen verursachter Veränderungen der Prozess- und Zustandsgrößen bezüglich ihrer natürlichen Referenzbedingungen.

Entscheidend ist, dass das HYDREG-Verfahren nicht auf einer Auswertung der punktuellen Ausgangssignale basiert (deduktive Analyse), sondern einzugsgebietsbezogene, anthropogene Einflussfaktoren als Systemeingangssignale bewertet (induktive Analyse). Die punktuellen Ausgangssignale in Form von Pegeldata werden stattdessen zur unabhängigen Validierung der Bewertungsergebnisse herangezogen.

Dieser Prozessstruktur folgt die Auswahl der Indikatoren des Bewertungsansatzes (Abb. 1) mit folgenden weiteren Grundsätzen:

- Unabhängigkeit: Jeder Indikator sollte möglichst überschneidungsfrei zu anderen Indikatoren den anthropogenen Einfluss auf das hydrologische Regime beschreiben.
- Systembezug: Der maßgebliche hydrologische Systembezug sollte durch den Indikator abgedeckt werden (z.B. kumuliertes oberliegendes Einzugsgebiet).
- Dimensionstreu: Die verwendeten Indikatoren sollten in räumlicher und zeitlicher Auflösung der gewählten Betrachtungsdimension (hier meso- bis makroskalig) entsprechen.

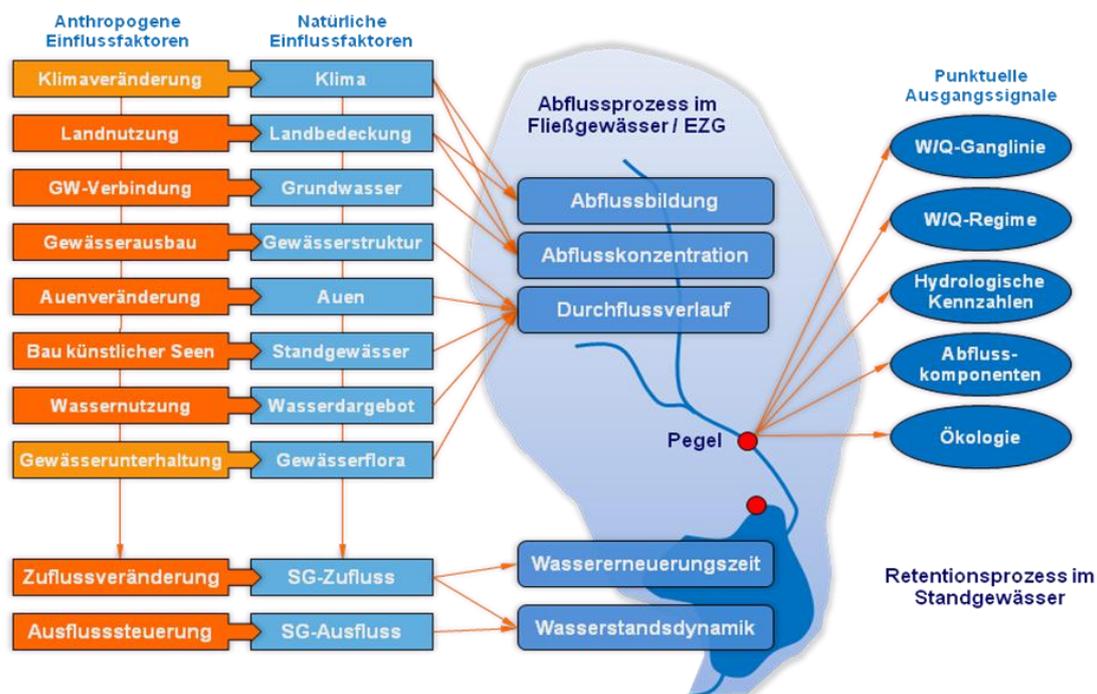


Abb. 1: Einflussfaktoren und Ausgangssignale des hydrologischen Regimes der Fließ- und Standgewässer.

Als anthropogene Einflussfaktoren mit relevanten Auswirkungen werden mit dem HYDREG-Ansatz Landnutzung, Grundwasserverbindung, Gewässerausbau, Auenveränderung, Bau künstlicher Seen und Wassernutzung bei Fließgewässern sowie Zuflussveränderung und Abflusssteuerung bei Seen analysiert und bewertet. Entsprechend des o. g. Prinzips der Dimensionstreuung wurden die anthropogenen Einflussfaktoren „Klimaveränderung“ und „Gewässerunterhaltung“ aufgrund ihrer zu groben, globalen bzw. zu feinen, gewässerabschnittswisen Raum-Zeit-Betrachtungsebene von weiteren Untersuchungen bezüglich der hydrologischen Regime im Land Sachsen-Anhalt ausgeschlossen. Ein zusätzlicher Ausschlussgrund des anthropogenen Einflussfaktors „Gewässerunterhaltung“ besteht in der fehlenden, zentralen Verfügbarkeit landesweiter Daten (Abb.1).

Die Verfahren für natürliche sowie künstliche und stark veränderte Wasserkörper sind grundsätzlich identisch. Unterschiede ergeben sich nur bei der zugrundeliegenden WRRL-konformen Bewertungsskala (fünfstufig = natürliche OWK, vierstufig = künstliche und erheblich veränderte OWK).

### 3.2 Vorarbeiten

Bevor das eigentliche Bewertungsverfahren durchgeführt werden konnte, musste die Struktur des Gewässersystems und damit die Hierarchie der Einzugsgebiete adäquat erfasst werden. So waren landesexterne, oberliegende Einzugsgebiete der zu betrachtenden Gewässer nach der Systematik der LAWA-Gebietsverschlüsselung (LAWA, 1993) zu bestimmen. Teilweise musste dabei auch ein geeigneter Vektor-Raster-Abgrenzungsalgorithmus (Hoffmann, 2005) angewandt werden. Des Weiteren musste eine Hierarchie aller zu untersuchenden Wasserkörper nach WRRL entsprechend der Gewässersystemstruktur im Land erstellt werden, um hieraus landesinterne Einzugsgebietsabgrenzungen und letztlich die notwendige Kumulation der Einflussfaktoren ableiten zu können. Als Grundlage für die Bewertung der hydrologischen Wirkung von Auen wurde eine landesweite Abgrenzung der morphologischen Auen basierend auf einem Fuzzylogik-Ansatz durchgeführt (Mehl et al., 2009). Im Übrigen wird auf den ausführlichen Projektbericht (Biota, 2010) verwiesen.

### 3.3 Struktur des Bewertungsverfahrens

Im HYDREG-Verfahren werden die o. g. anthropogenen Einflussfaktoren der hydrologischen Regime als einzelne

Bewertungskomponenten behandelt. Auf dem Weg von den Ausgangsdaten bis hin zur jeweiligen Bewertungskomponente stehen die Arbeitsschritte:

1. Auswahl und Homogenisierung der Ausgangsgrößen (Geo- und Sachdaten);
2. Berechnung von mengen- und größenunabhängigen Vergleichsindikatoren (Normierung);
3. Festlegung von Bewertungstabellen mit Bewertungszahlen von 1 bis 5 für die normierten Indikatorwerte entsprechend der WRRL-Bewertungsskala anhand von Literaturangaben, Expertenmeinungen und Verteilungsanalysen;
4. Bestimmung der sachlich trennbaren Teilbewertungskomponenten einer Einflussgröße;
5. rechnerische Zusammenfassung zur Bewertungskomponente als Mittelwert oder Maximum der Teilbewertungskomponenten.

Die Bewertungskomponenten der Fließgewässer und Seen werden abschließend jeweils zu einer Gesamtbewertung des hydrologischen Regimes der Oberflächenwasserkörper in der fünfstufigen Bewertungsskala gemäß EU-WRRL herangezogen (Abb. 2).

### 3.4 Einzelbewertungen der Fließgewässerswasserkörper

1) Bewertungskomponente Landnutzung: Die Art der Landnutzung im Einzugsgebiet eines Fließgewässers hat einen direkten Einfluss auf die Prozesse von Abflussbildung und -konzentration. Dabei gilt im Grundsatz: Je naturnäher die Nutzungsform eines Areals, umso ursprünglicher bzw. unbeeinflusster ist sein Wasserhaushalt. Grundlage der Bewertungskomponente ist mithin die Bewertung von Landnutzungs- und Biotopformen hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Landschaftswasserhaushalt und die Aggregation der einzelnen Flächenbewertungen im (kumulativen) Einzugsgebiet des Wasserkörpers.

2) Bewertungskomponente Grundwasserverbindung: Die Konnektivität eines Fließgewässers mit dem Grundwasser kann durch in unterschiedliche Richtungen wirkende anthropogene Prozesse beeinflusst werden. Eine starke Wirkung ruft z.B. eine teilweise oder vollständige Versiegelung der Sohle oder des Ufers hervor.

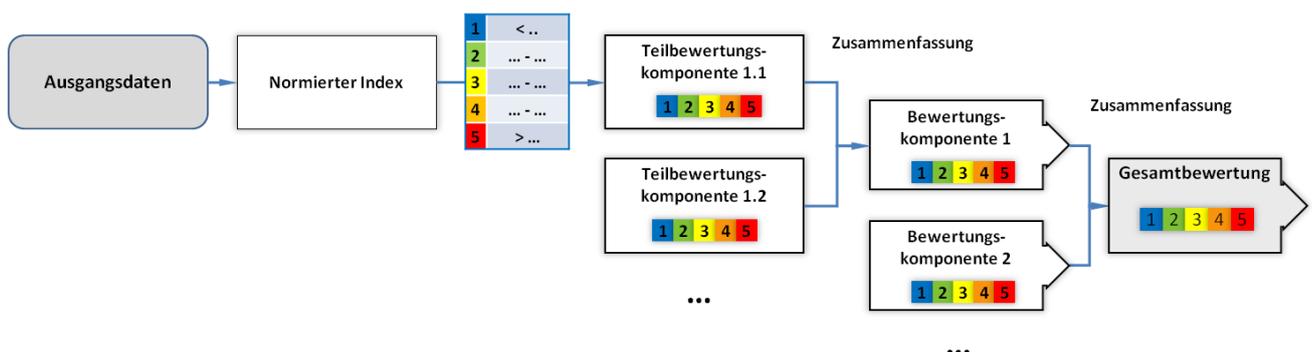


Abb. 2: Struktur des Bewertungsverfahrens.

Eine Veränderung der Konnektivität wird andererseits durch Entwässerungsgräben zur flächenhaften Grundwasserabsenkung verursacht. Deshalb werden hier zwei Teilbewertungskomponenten eingesetzt und über das schlechtere Bewertungsergebnis („worst case“) zusammengefasst.

3) Bewertungskomponente Gewässerausbau: Der Ausbau von Fließgewässern spielt für das hydrologische Regime, insbesondere auch in Form von Eingriffen quer zur Fließrichtung, eine durchaus signifikante Rolle, indem der ursprüngliche Durchflussverlauf modifiziert wird. Laufverkürzungen, Längs- und Querprofilveränderungen oder auch veränderte hydraulische Rauigkeiten werden hier hingegen nicht bewertet. Zum einen sind hierfür teilweise keine regional und gewässertypisch zutreffenden Referenzdaten verfügbar, zum anderen soll eine „Doppelbewertung“ (vgl. Fließgewässerstrukturbewertung) vermieden werden. Mit den Daten über Querbauwerke, Durchlässe und Rückstaubereiche aus der Gewässerstrukturkartierung werden so letztlich bezüglich der Gewässerlänge normierte Vergleichsparameter berechnet, in ihrer Wirkung (pragmatisch) gewichtet und summarisch der fünfstufigen WRRL-Bewertungsskala zugeordnet.

4) Bewertungskomponente Auenveränderung: Um den Wasserhaushalt der Auengebiete bewerten zu können, ist eine Abschätzung von Auenflächen- und Auenfunktionsverlust und somit der Vergleich der aktuellen mit ehemaligen Auenflächen notwendig. Als Grundlage für die Bewertung der Auenveränderung dient eine mit Fuzzy-Logik-Verfahren ermittelte Abgrenzung der wahrscheinlichen, morphologischen Aue (Mehl et al., 2009). Als zusätzliche Teilbewertungskomponente werden die anthropogenen Veränderungen der Gerinneprofile in der Aue anhand von Daten der Fließgewässerstruktur bestimmt, um diesen Einfluss auf die Überflutungshäufigkeit und den Grundwasserflurabstand in der Aue bewerten zu können (Brunotte et al., 2009).

5) Bewertungskomponente Bau künstlicher Seen: Das Abflussverhalten und die Abflussdynamik von Fließgewässern kann auch durch die Schaffung von künstlichen Seen signifikant beeinflusst werden. Dies geschieht insbesondere durch den Bau von Talsperren und von großen Fischteichen sowie durch die Flutung von Tagesbaurestlöchern. Die Auswirkung auf das hydrologische Regime unterliegender Fließgewässer besteht zum einen aus der Verringerung der Abflussmengen wegen erhöhter Verdunstungsverluste und zum anderen aus der Veränderung der Abflussvariabilität und der innerjährlichen Verlagerung von Abflüssen durch anthropogen gesteuerte Wasserabgabe (künstliche Seeretention). Dementsprechend basiert diese Bewertungskomponente auf zwei Teilbewertungskomponenten.

6) Bewertungskomponente Wassernutzung: Die anthropogene Beeinflussung des Gewässerabflusses durch Entnahmen oder durch Einleitungen kann mit Hilfe von Daten des Fachinformationssystem Wasser (FIS Wasser) abgeschätzt werden. FIS Wasser beinhaltet ein landesweites Verzeichnis von aktiven und zeitlich abgelaufenen Wasserrechten (Segment des FIS Wasser). Mit Hilfe der

Mengenangaben in diesen Wasserrechten und der Abschätzungen des mittleren Jahresdargebots kann die Intensität von Entnahme und Einleitung durch zwei Teilkomponenten bewertet werden.

Die grundsätzliche Verfahrensstruktur ist Abbildung 3 zu entnehmen. Weitergehende Information liefert der veröffentlichte Projektbericht (Biota, 2010).

### 3.5 Gesamtbewertung der Fließgewässerkörper

Als Ergebnis des HYDREG-Verfahrens steht eine einzelne Bewertungszahl als Maß für die Natürlichkeit des hydrologischen Regimes eines Fließgewässerkörpers. Gerade die Zusammenführung der Einzelkomponenten ist deshalb eine schwierige Frage, zumal die WRRL das „worst-case“-Prinzip favorisiert. Die vorteilhafteste Methode erscheint nach intensiver Diskussion unter den Projektbeteiligten eine quadratische Mittelwertbildung (Gleichung 1).

Gleichung 1:

$$GB_{\text{hydReg}} = \sqrt{\frac{BK_{LN}^2 + BK_{WN}^2 + BK_{KS}^2 + BK_{GA}^2 + BK_{AV}^2 + BK_{GWV}^2}{6}}$$

|                      |   |
|----------------------|---|
| $GB_{\text{hydReg}}$ | = Gesamtbewertung hydrologisches Regime [-]     |
| $BK_{LN}$            | = Bewertungskomponente Landnutzung [-]          |
| $BK_{WN}$            | = Bewertungskomponente Wassernutzung [-]        |
| $BK_{KS}$            | = Bewertungskomponente Bau künstlicher Seen [-] |
| $BK_{GA}$            | = Bewertungskomponente Gewässerausbau [-]       |
| $BK_{AV}$            | = Bewertungskomponente Auenveränderung [-]      |
| $BK_{GWV}$           | = Bewertungskomponente Grundwasserbindung [-]   |

### 3.6 Einzelbewertungen der Seewasserkörper

1) Wasserstandsdyamik: Die Wasserstandsdyamik der Seen unterliegt potenziell einer zweiseitigen anthropogenen Einflussnahme. Zum einen kann die Schwankungsbreite und -intensität durch Ausflussbauwerke beeinflusst (gesteuert) sein; zum anderen kann das Einzugsgebiet einer anthropogenen Beeinflussung unterliegen. Letzteres wird in überwiegendem Maße durch Landnutzung und Retentionsveränderungen im Einzugsgebiet beeinflusst, so dass auf entsprechende Komponenten des Bewertungsverfahrens für Fließgewässer zurückgegriffen werden kann. Für die Teilbewertungskomponente „Ausflussgesteuerte Wasserstandsdyamik“ werden die Ausflussbauwerke der WRRL-relevanten Seen analysiert.

2) Wasserquantität: Standgewässer werden in ihrem hydrologischen Regime durch Grund- und Oberflächenwasserzu- und -abstrom maßgeblich bestimmt. Um diese Verhältnisse bewerten zu können, wurde eine weitere Bewertungskomponente Wasserquantität gebildet. Diese greift in den Teilbewertungen auf vorhandene WRRL-Daten zurück (Bewertung Grundwasserkörper) bzw. nutzt zudem bereits vorliegende Teilbewertungen aus der Bewertung des hydrologischen Regimes der Fließgewässerkörper.

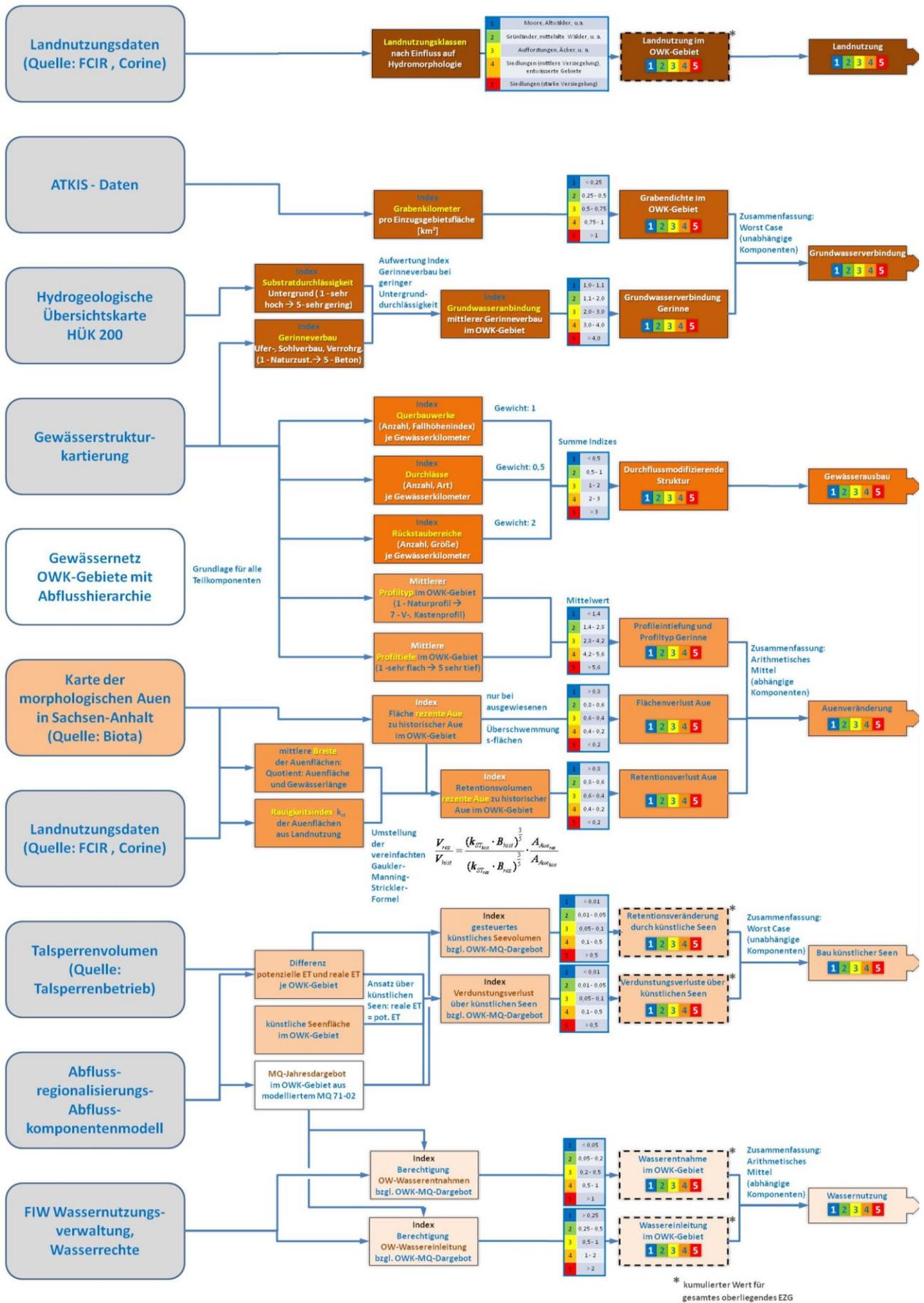


Abb. 3: HYDREG-Bewertungskomponenten zum Fließgewässerverfahren.

### 3.7 Gesamtbewertung der Seenwasserkörper

Die Gesamtbewertung wird adäquat zur Regimebewertung der Fließgewässer als quadratischer Mittelwert der Bewertungskomponenten bestimmt (Gleichung 2).

Gleichung 2:

$$GB_{\text{hydReg}} = \sqrt{\frac{BK_{\text{WD}}^2 + BK_{\text{WQ}}^2}{2}}$$

$GB_{\text{hydReg}}$  = Gesamtbewertung hydrologisches Regime [-]

$BK_{\text{WD}}$  = Bewertungskomponente Wasserstandsdynamik [-]

$BK_{\text{WQ}}$  = Bewertungskomponente Wasserquantität [-]

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Gesamtdarstellung

Die Ergebnisse der Bewertung für die einzelnen Komponenten sind zunächst in Abbildung 4, das Gesamtergebnis der Bewertung des hydrologischen Regimes ist in Abbildung 5 dargestellt. Dabei wird WRRL-konform zwischen Zustands- und Potenzialbewertung unterschieden.

Bewertungsergebnisse für die Fließgewässerwasserkörper gelten streng genommen erst für den Ausflussquerschnitt (also den untersten Bereich in Fließrichtung betrachtet). Bei Wasserkörpern, die Nebengewässer mit umfassen, erfolgt die kartografische Darstellung der Bewertungsergebnisse daher auch nur am Hauptgewässer.

### 4.2 Beispielgewässer

Die Bode weist als typisches Harzquellgewässer fast das gesamte Bewertungsspektrum auf. Die Gesamtbewertung „sehr gut“ und „gut“ wird in den Quellgewässern Warme Bode und Kalte Bode erreicht. Unterhalb der Staukaskade der Bodetalsperren wird dagegen aufgrund sehr hoher Wassernutzung und sehr starker Regimeveränderungen durch die künstlichen Seen nur noch der Wert „mäßig“, bei starkem Gewässerausbau sogar „unbefriedigend“ erreicht.

Das Tieflandgewässer Aland gilt außer im Quellgebiet als erheblich verändert und erreicht über den gesamten unteren Gewässerverlauf eine Einstufung zum mäßigen Potenzial und im Quellgebiet zum mäßigen Zustand des hydrologischen Regimes. Während im Oberlauf vor allem die hohe Wassernutzung und der Gewässerausbau zu diesem Ergebnis führen, beruht dieses im Mittel- und Unterlauf auf starken Auenveränderungen, zum Teil hoher Beeinflussung der Grundwasserbindung und starkem Gewässerausbau.

### 4.3 Validierung

Grundlage des Validierungsansatzes ist die Annahme, dass ein Wasserkörper mit schlechterem Zustand bzw. Potenzial des hydrologischen Regimes tendenziell eine stärkere Veränderung der Abflusszeitreihe an repräsentativen Pegeln des Wasserkörpers bezüglich eines Referenzzustandes aufweisen sollte, als ein Wasserkörper mit

guter oder sehr guter Zustandsbewertung. Als Referenzzustand können in der Regel Abflusswerte aus der Zeit vor 1950 angesehen werden (Leibundgut und Eisele, 2005); bei noch früherem zeitlichem Bezug nimmt die Anzahl langjährig beobachteter Pegel sehr schnell ab. Insgesamt verfügen 23 Abflusspegel in Sachsen-Anhalt über entsprechend lange Zeitreihen.

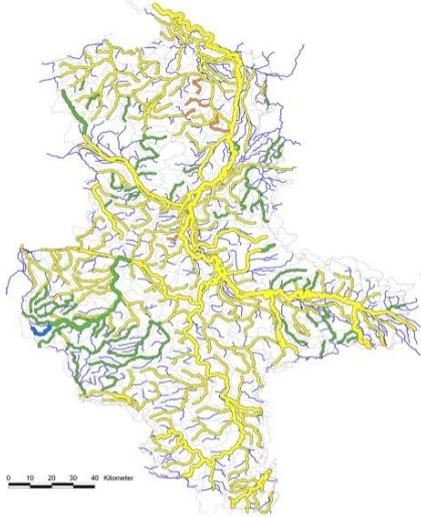
Die Veränderungen von Zeitreihen lassen sich häufig nicht ohne Weiteres direkt an der Abfolge der Werte detektieren. Aus diesem Grund wurde ein festes Set von 33 IHA-Kenngrößen entwickelt (IHA = Indicators of Hydrological Alteration; Richter et al., 1997), die aus der zugrunde liegenden Zeitreihe abgeleitet werden. Mit Hilfe dieser Kenngrößen lassen sich alle relevanten Veränderungen der Zeitreihe ermitteln. Für die 33 IHA-Parameter werden dabei Variabilitäts- und Mittelwertindizes berechnet. Diese geben für den jeweiligen Parameter innerhalb eines Untersuchungszeitraumes den Grad der Veränderung von Jahresdynamik und -zentrum im Vergleich zum Referenzzeitraum wieder. Die Indizes haben für hydrologische Zeitreihen in der Regel einen Wertebereich von -1 über 0 bis 1 und bewerten damit Erhöhung, Konstanz und Verringerung der Variabilität bzw. des Wertezentrums. Maßstab dieser Vergleichsindizes ist der RVA-Index (RVA = Range of Variability Approach) zur Beurteilung von Zeitreihenveränderungen an anthropogen beeinflussten Fließgewässern (Richter et al., 1997).

Insgesamt wurden  $66 \times 6 = 396$  Parameterpaare (33 Mittelwerte, 33 Variabilitätsindizes und 6 HYDREG-Fließgewässerbewertungskomponenten) auf Korrelation überprüft. Für 48 der 396 Vergleiche, also für 12,1 % der Fälle wurde ein signifikanter Zusammenhang mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 5 % festgestellt. Damit ist ein starker Zusammenhang zwischen dem Bewertungsverfahren des hydrologischen Regimes und Veränderungen der Zeitreihen statistisch nachgewiesen.

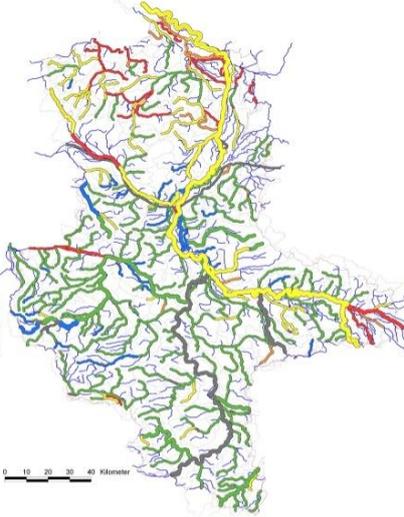
## 5. Schlussfolgerungen

Für das Land Sachsen-Anhalt wurde ein Bewertungsverfahren für das hydrologische Regime der Oberflächenwasserkörper (Fließgewässer und Seen) entwickelt. Damit wurde eine methodische Lücke geschlossen, in dem der Anforderung des Anhang V WRRL für die hydro-morphologischen Qualitätskomponenten Rechnung getragen wurde. Hierbei steht das hydrologische Regime der Oberflächenwasserkörper im Mittelpunkt der Betrachtungen. Es beschreibt die Prozess- und Zustandsgrößen (z.B. Quantität und Schwankungsverhalten) des Abflusses (Fließgewässer), des Wasserstandes bzw. Volumens (Seen) und der hydrologischen Konnektivität der Oberflächengewässer zu Auen und Grundwasser. Das Verfahren wurde parallel angewandt, so dass für Sachsen-Anhalt auch die Bewertungsergebnisse vorliegen. Der Verfahrensansatz ist universell und damit räumlich übertragbar, muss aber ggf. im Hinblick auf vorhandene Grundlagendaten und damit Detailmethoden oder auch Teilkomponenten bezogen angepasst werden.

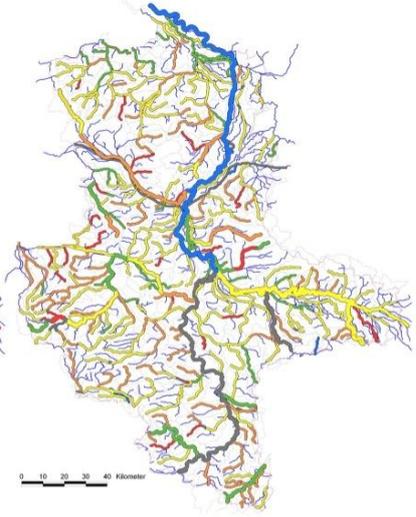
FG - Landnutzung



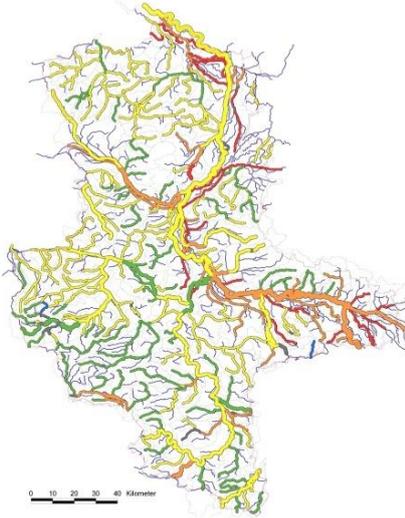
FG - Grundwasserverbindung



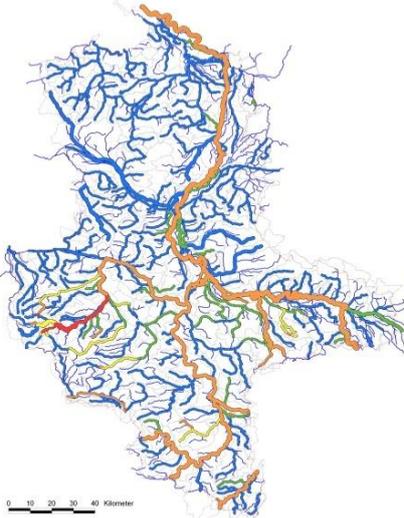
FG - Gewässerausbau



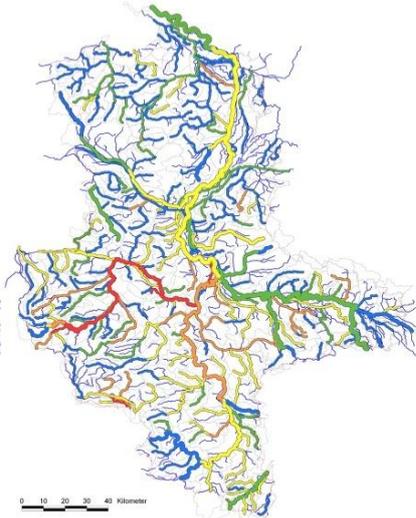
FG - Auenveränderung



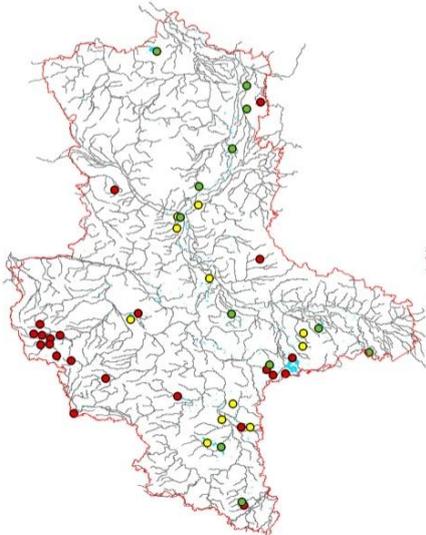
FG - Bau künstlicher Seen



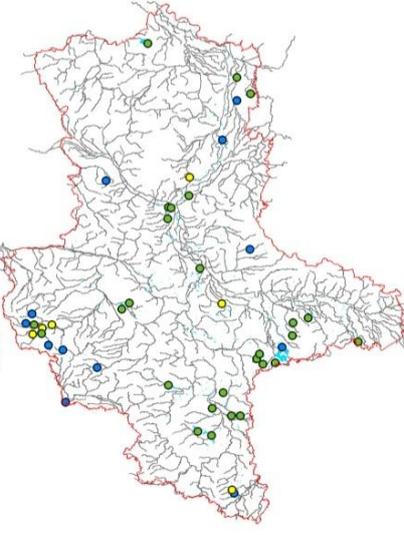
FG - Wassernutzung



Seen - Wasserstandsdynamik



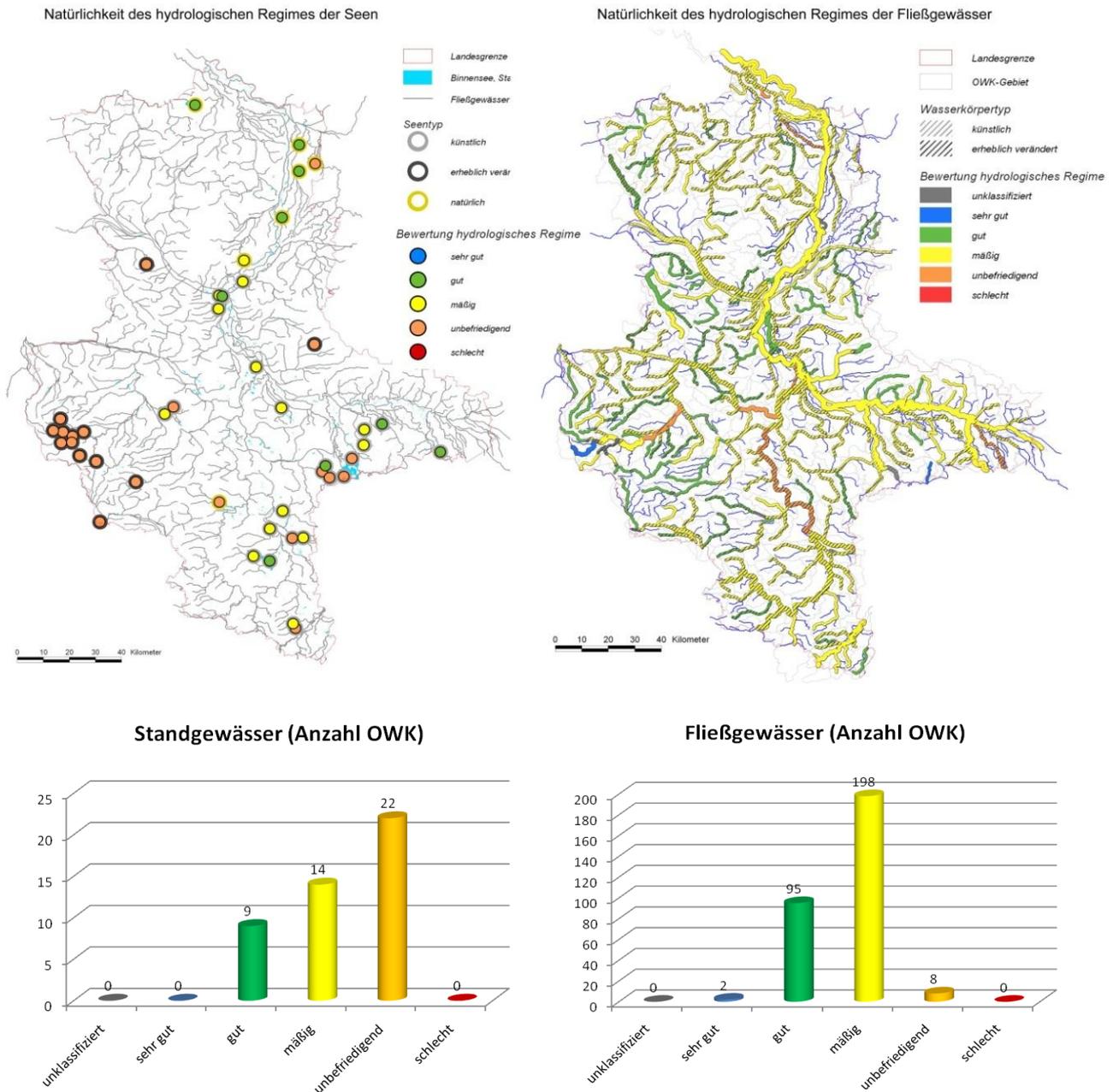
Seen - Wasserquantität



**HYDREG - Bewertungskomponenten**

| Seen | Fließgewässer |                 |
|------|---------------|-----------------|
|      |               | unklassifiziert |
|      |               | sehr gut        |
|      |               | gut             |
|      |               | mäßig           |
|      |               | unbefriedigend  |
|      |               | schlecht        |

**Abb. 4:** Darstellung der Bewertungskomponenten für Seen und Fließgewässer (FG) Sachsen-Anhalts.



**Abb. 5:** Gesamtbewertung des hydrologischen Regimes für die Oberflächenwasserkörper der Fließgewässer und der Seen (OWK); Verteilung der OWK auf die 5 Bewertungsklassen.

Untermauert wird das Bewertungsverfahren durch eine Validierung der Bewertungsergebnisse anhand von Veränderungen in den Abflusszeitreihen geeigneter hydrologischer Pegel. Im Sinne der WRRL-Zielerreichung „guter Zustand“ wurden zudem grundsätzliche Lösungsansätze in Form eines Katalogs zu hydrologisch wirksamen Maßnahmen entwickelt.

#### Anmerkungen

Das der Veröffentlichung zugrunde liegende Vorhaben wurde aus Mitteln des Landes Sachsen-Anhalt finanziert (Auftraggeber: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, LHW). Der vollständige Projektbericht zur Verfahrensentwicklung ein-

schließlich Ergebnisdarstellung ist auf der Internetseite des LHW unter [www.lhw.sachsen-anhalt.de](http://www.lhw.sachsen-anhalt.de) veröffentlicht.

#### 6. Literatur

- Biota, 2010. Entwicklung und Bereitstellung einer Bewertungsmethodik zur Beurteilung des hydrologischen Regimes der Oberflächenwasserkörper (Fließgewässer und Seen) gemäß EU-WRRL im Land Sachsen-Anhalt. Abschlussbericht Institut Biota im Auftrag des LHW Sachsen-Anhalt.
- Brunotte, E., Dister, E., Günther-Diringer, D., Koenzen, U., Mehl, D., 2009. Flusssauen in Deutschland. Erfassung und Bewertung des Auenzustandes. Naturschutz und biologische Vielfalt 87. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.

- DIN, 1992. DIN 4049 Teil 1: Hydrologie – Begriffe, quantitativ. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Ebel, G., Gluch, A., 1998. Eine Methode zur Mindestwasserermittlung für heimische Fischarten. Staatliches Amt für Umweltschutz, Halle (Saale).
- Hoffmann, T.G., 2005. Entwicklung eines Geoinformationssystems zur Abflußzeitreihenanalyse und -modellierung in globalen, hydrologischen Netzwerken. Dissertation, Universität Greifswald.
- Jorde, K., 1997. Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken. Mitteilungen des Institutes für Wasserbau der Universität Stuttgart 90/1997.
- LAWA – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 1993. Richtlinie für die Gebietsbezeichnung und die Verschlüsselung von Fließgewässern. Ausgearbeitet vom LAWA-ad-hoc-Arbeitskreis „Verschlüsselung von Fließgewässern“.
- LAWA – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 1995. Die Ermittlung ökologisch begründeter Mindestabflüsse. Grundlagen. Ausgearbeitet vom LAWA-Arbeitskreis „Mindestwasserführung in Fließgewässern“.
- LAWA – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 2001. Empfehlungen zur Ermittlung von Mindestabflüssen in Ausleitungsstrecken von Wasserkraftanlagen und zur Festsetzung im wasserrechtlichen Vollzug. Kulturbuch-Verlag, Berlin.
- Leibundgut, C., Eisele, M., 2005. Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens „Hydrologische Güte“ als Expertensystem zum operationellen Einsatz im Flussgebietsmanagement. Abschlussbericht zum Projektvorhaben BWC 21013, Forschungszentrum Karlsruhe. <http://www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/hydgue/BW-Plus-Endbericht-2005-BWC-21013.pdf>. Zugriff: 18.02.2009.
- LUA – Landesumweltamt Brandenburg, 2009. Leistungsbeschreibung zur Aufstellung von Gewässerentwicklungskonzepten (GEK) nach WRRL im Land Brandenburg. Anlage 7. Ableitung von Bewirtschaftungs- und Handlungszielen. Stand 02.03.09. Potsdam.
- Mehl, D., Hoffmann T. G., Helbig, H., 2009. Bestimmung der morphologischen Auen in Sachsen-Anhalt mit Hilfe eines Fuzzylogik-Ansatzes. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 2, 659-665.
- Ostrowski, M., Froehlich, F., 2006. Ansätze zur ökologisch orientierten Bewirtschaftung von Hochwasserschutzräumen in Talsperren. Forum für Hydrologie 15, 213-224. München.
- Pabstmann, U., Prüß, M., Büttner, U., 1998. Das Abflußregime als Grundlage für ökologisch begründete Mindestwasserabflüsse für Ausleitungsstrecken von Kleinwasserkraftanlagen. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 42, 195-200.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, R., Braun D. P., 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology* 37, 231-249.
- Tharme, R.E., 2003. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers, *River Research and Applications* 19, 397-441.
- UBA, 2007. Biozönotisch bedeutsame Fließgewässertypen sowie Standgewässertypen nach abiotischen Kriterien in Deutschland (WRRL-Umsetzung). Stand: 24.01.2007. [http://www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/wrrl\\_ftyp.htm](http://www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/wrrl_ftyp.htm) und [http://www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/wrrl\\_styp.htm](http://www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/wrrl_styp.htm). Zugriff: 27.03.2007.
- WRRL, 2000. Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie). Amtsblatt der EG Nr. L 327/1 vom 22.12.2000. Brüssel.

## Modellgestützte Analyse der Variabilität des Wasserhaushalts im Havel-Spree-Gebiet

Theresa Horsten, Peter Krahe, Enno Nilson, Reinhard Oppermann

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referat M2 – Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen, Am Mainzer Tor 1,  
56068 Koblenz, horsten@bafg.de

**Zusammenfassung:** Es wird ein Überblick der Vorgehensweise zur Untersuchung möglicher Veränderungen des Wasserhaushalts im Havel-Spree-Gebiet in Folge des Klimawandels gegeben. Kern ist dabei die Verwendung eines Multi-Modell-Ensembles. Um die Unsicherheiten in der Klimamodellierung zu berücksichtigen, sollten alle verfügbaren Klimaprojektionen verwendet und die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt in Form von Bandbreiten dargestellt werden. Zur Erfassung der hydrologischen Besonderheiten im Havel-Spree-Gebiet wird eine abgestufte Vorgehensweise mit unterschiedlichen hydrologischen Modellen gewählt.

### Model-based analysis of the variability in the water balance in the Havel-Spree basin

**Abstract:** An overview of the approach to modelling the water balance in the Havel-Spree-basin under the conditions of climate change is given. The core of the method is the utilization of a multi-model-ensemble: to take the uncertainties of climate modelling into account it is important to use all available climate projections and to illustrate the consequences for the water balance in the form of ranges. In order to capture the hydrological characteristics of the Havel-Spree-basin a stepwise procedure with different hydrological models is chosen.

### 1. Einführung

Ein voranschreitender Klimawandel kann durch steigende Temperaturen und Veränderungen im Niederschlagsmuster zu Veränderungen im Wasserdargebot sowie zu häufigeren und länger andauernden extremen Abflussverhältnissen, also zu Hoch- oder Niedrigwasserereignissen, führen.

Im Rahmen des Forschungsprogramms (FP) KLIWAS werden die Folgen des Klimawandels für Wasserstraßen sowie für die Schifffahrt untersucht und damit die wissenschaftlichen Grundlagen für die Entwicklung entsprechender Anpassungsstrategien erarbeitet. Ein Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der Erstellung von Szenarien der in Folge des Klimawandels veränderten Abflüsse, Sedimentfrachten und Gerinnemorphologien (Vorhaben 4 des FP). Ziel ist die Darstellung der Bandbreite möglicher zukünftiger (kritischer) hydraulischer / morphologischer Verhältnisse im Vergleich zu heute.

### 2. Untersuchungsgebiet

Das Havelgebiet ( $A_{E0} = 24037 \text{ km}^2$ , Pegel Havelberg) ist aufgrund des engen Zusammenhangs von Grund- und Oberflächenwasser im Tiefland sowie den zahlreich vorhandenen Seen schwierig zu modellieren. Zudem wird der natürliche Wasserhaushalt durch zahlreiche anthropogene Eingriffe wie Wasserüberleitungen, Maßnahmen im Rahmen des Braunkohletagebaus, Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen sowie der Talsperrenbewirtschaftung beeinflusst.

In diesem Gebiet steht ein hoher Wasserbedarf einem geringen natürlichen Wasserdargebot gegenüber. Dadurch können sich Nutzungskonflikte ergeben, die sich möglicherweise durch Veränderungen im Wasserhaushalt verschärfen.

Aus diesen Gründen liegt ein Fokus der Untersuchungen auf dem Havel-Spree-Gebiet. In Abbildung 1 ist das Einzugsgebiet der Havel abgebildet, sowie dessen Aufteilung im Wasserhaushaltsmodell HBV-D.

### 3. Methoden und Datengrundlage

#### 3.1 Multi-Modell-Ansatz

In den letzten Jahren hat die globale und regionale Klimamodellierung deutliche Fortschritte erzielt. Dennoch sind bedingt durch verschiedene Ursachen, z. B. die nach wie vor geringe räumliche Auflösung der Modelle, vereinfachte Abbildung von Prozessen in den Modellen sowie Annahmen zu den Anfangs- und Randbedingungen, immer noch große Unsicherheiten festzustellen. Diese Unsicherheiten können prinzipiell zwei Gruppen zugeordnet werden (für eine ausführlichere Diskussion siehe Krahe et al., 2009):

1. systeminhärente (aleatorische) Fehler, die durch das deterministisch-chaotische Verhalten des Klimas verursacht werden,
2. (epistemische) Fehler im Zusammenhang mit dem unvollkommenen Wissen über das System, z. B.

Messfehler, vereinfachende Modellannahmen oder Szenarioannahmen.

Daher kann es nicht den einen „wahren“ Klimamodelllauf geben, sondern es muss ein Ensemble von Klimaprojektionen ausgewertet werden, die auf der Grundlage mehrerer globaler und regionaler Klimamodelle sowie hydrologischer Modelle entstanden sind. Nur auf diese Weise kann der Kenntnisstand der möglichen Verände-

rungen zusammengefasst und in Form von Bandbreiten abgebildet werden.

### 3.2 Klimamodelle und Biaskorrektur

Im Rahmen der Arbeiten wird entlang der Modellkette ein Multi-Modell-Ansatz verfolgt, der in Abbildung 2 dargestellt ist. Die bisher verwendeten Modellkombinationen vom Emissionsszenario bis zum regionalen Klimamodell sind in Tabelle 1 aufgelistet.

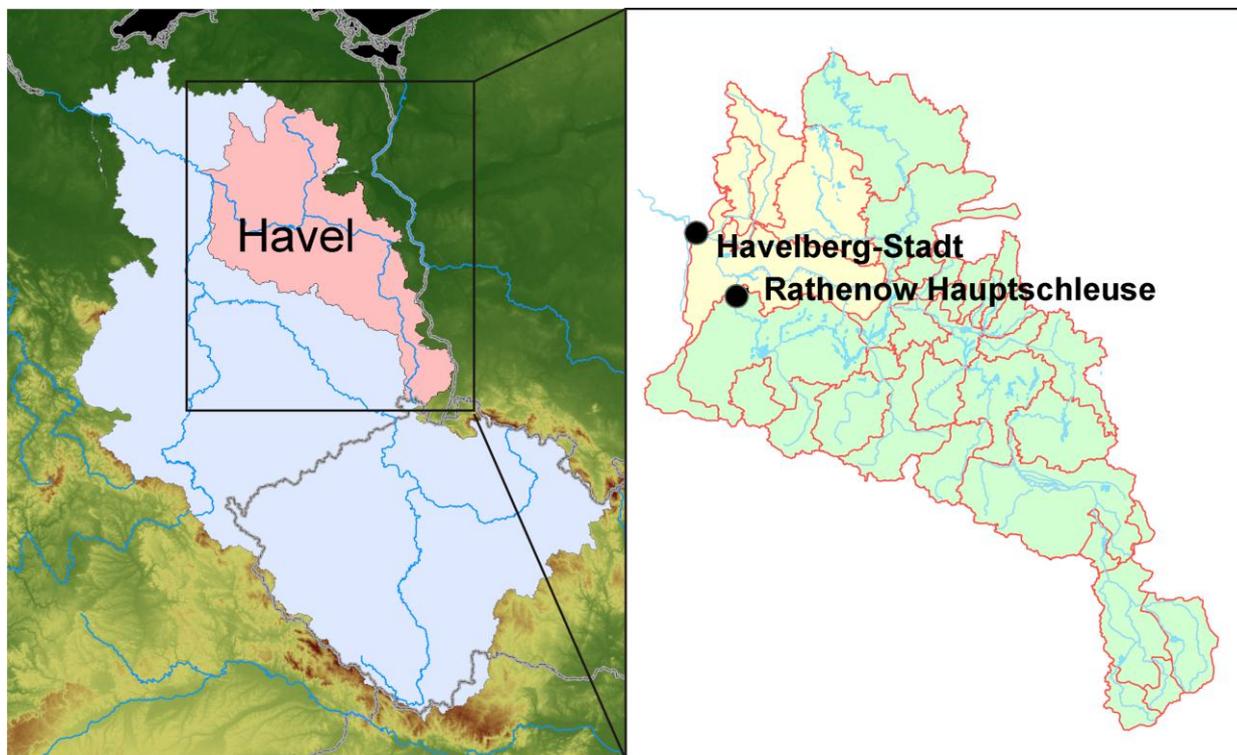


Abb. 1: HBV-D Modellgebiet Havel-Spreet.

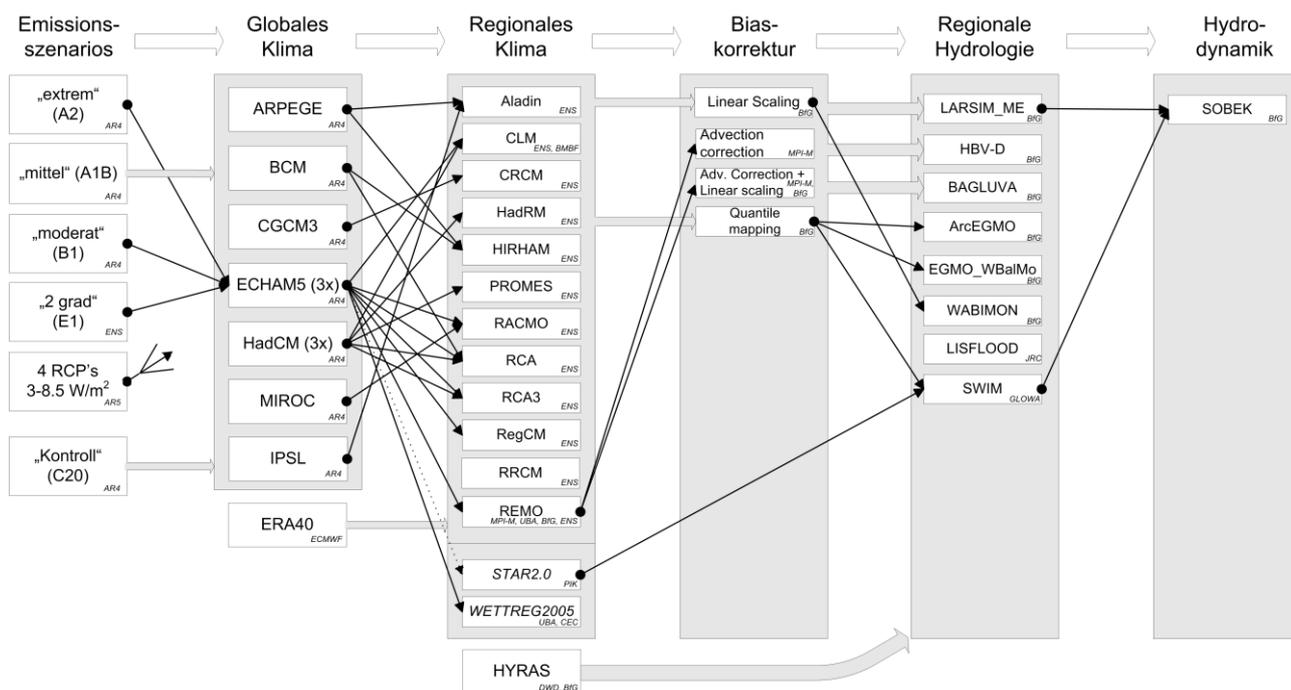


Abb. 2: Modellkette und Multimodell-Ansatz in KLIWAS PJ 4.01.

**Tab. 1:** Übersicht der bisher verarbeiteten Klimamodelle.

| Emissionsszenario (SRES) | Globalmodell (GCM) | Regionalmodell (RCM)              | Zeitraum* |
|--------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------|
| A1B, B1, A2              | ECHAM5 Lauf 1      | REMO_UBA                          | 1950-2100 |
| A1B                      | ECHAM5 Lauf 2      | REMO_BfG                          | 1950-2100 |
| A1B                      | ECHAM5 Lauf 2      | REMO_BfG_ad                       | 1951-2100 |
| A1B, B1                  | ECHAM5 Lauf 1      | CCLM                              | 1950-2100 |
| A1B                      | ECHAM5 Lauf 2      | CCLM                              | 1960-2100 |
| A1B                      | ECHAM5 Lauf 1      | STAR – trocken,<br>mittel, feucht | 1951-2100 |
| A1B, B1, A2              | ECHAM5 Lauf 1      | WETTREG – 50                      | 1961-2100 |
| A1B, B1, A2              | ECHAM5 Lauf 1      | WETTREG – 60                      | 1961-2100 |
| A1B, B1, A2              | ECHAM5 Lauf 1      | WETTREG – 70                      | 1961-2100 |

\* Der Zeitraum bis 2000 wurde als Kontrolllauf (C20) jeweils mit beobachteten Emissionen angetrieben.

An den Modellergebnissen des 20. Jahrhunderts (C20) zeigt sich, dass alle regionalen Klimamodelle noch Schwierigkeiten haben, das gegenwärtige Klima zu reproduzieren (ohne Abbildung). Daher ist eine Bias-Korrektur der Klima-Daten notwendig, bevor sie für die Klimafolgenforschung verwendet werden können. Für die vorliegenden Ergebnisse wurde eine einfache lineare Skalierung anhand von 30jährigen Monatsmittelwerten (1961-1990) des C20-Laufes der Klimamodelle und der Beobachtungsdaten vorgenommen (vgl. dazu auch Krahe et al., 2009; Nilson et al., im Druck).

### 3.3 Hydrologische Modelle

In einer abgestuften Vorgehensweise wird die Veränderung des Wasserhaushalts untersucht. In einem ersten Schritt werden die Modelle BAGLUVA und WABIMON angewandt, die eine Bestimmung der wichtigsten Wasserhaushaltsgrößen mit einer geringen zeitlichen Auflösung bei hoher räumlicher Tiefe ermöglichen (500 m x 500 m rasterbasiert). Über einen Zeitraum von 30 Jahren werden mit BAGLUVA Jahresmittelwerte und mit WABIMON Monatswerte der quasi-natürlichen Abfluss- und der realen Verdunstungshöhe ermittelt. Ihre Ergebnisse ermöglichen eine erste Abschätzung der möglichen Bandbreite der zukünftigen Entwicklung und bieten eine wichtige, räumlich hoch differenzierte Vergleichs- und Bewertungsgrundlage für die im nachfolgenden Schritt anzuwendenden Tageswertmodelle.

Mit dem konzeptionellen Wasserhaushaltsmodell HBV-D, das mit Tagesschrittweite betrieben wird, werden Abflussprojektionen unter Berücksichtigung aller verfügbaren Klimaprojektionen berechnet. Im Modell HBV-D sind ebenso wie in den vorgenannten Modellen keiner-

lei anthropogenen Eingriffe berücksichtigt. Daher kann auch mit diesem Modell nur die Bandbreite der möglichen Entwicklungen des quasi-natürlichen Abflussregimes abgeschätzt werden. In einem weiteren Schritt sollen die Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung im Havel-Spree-Gebiet aufgezeigt werden. Deshalb kommen weitere Modelle mit anderen Konzepten, wie z. B. ArcEGMO oder WBalMo, zum Einsatz. Dabei wird neben dem natürlichen auch das gesteuerte Wasserdargebot berücksichtigt.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

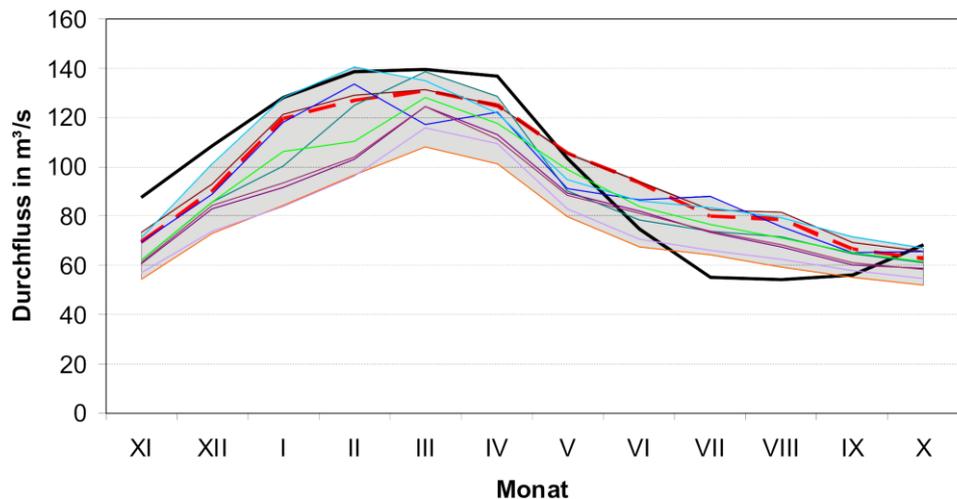
### 4.1 BAGLUVA und WABIMON

In Tabelle 2 sind Ergebnisse zu einer BAGLUVA-Rechnung enthalten, die mit beobachteten Niederschlagsdaten angetrieben wurde. Der Vergleich der Ergebnisse aus BAGLUVA mit den Beobachtungen am Pegel Rathenow zeigt eine erhebliche Differenz in der Abflusshöhe. Die Abflusshöhe am Pegel Rathenow liegt für den Zeitraum 1961-1990 um ca. 65 mm (75 %) über derjenigen, die mit Hilfe von BAGLUVA ermittelt wurde (s. Tab. 2). Diese Abweichung lässt sich zu einem großen Teil durch die erhebliche Veränderung des natürlichen Abflusses durch anthropogene Überprägung erklären. Diese besteht z. B. aus Einleitung von Sumpfungswassern aus dem Braunkohletagebau in Höhe von ca. 40 mm sowie aus Überleitungen, z. B. über den Elbe-Havel-Kanal in Höhe von ca. 10 mm (Finke und Krause, 2007). Mit dem BAGLUVA-Verfahren wird ausschließlich das langjährig gemittelte natürliche jährliche Wasserdargebot ohne Berücksichtigung von anthropogenen Einflüssen ermittelt (Glugla et al., 2003).

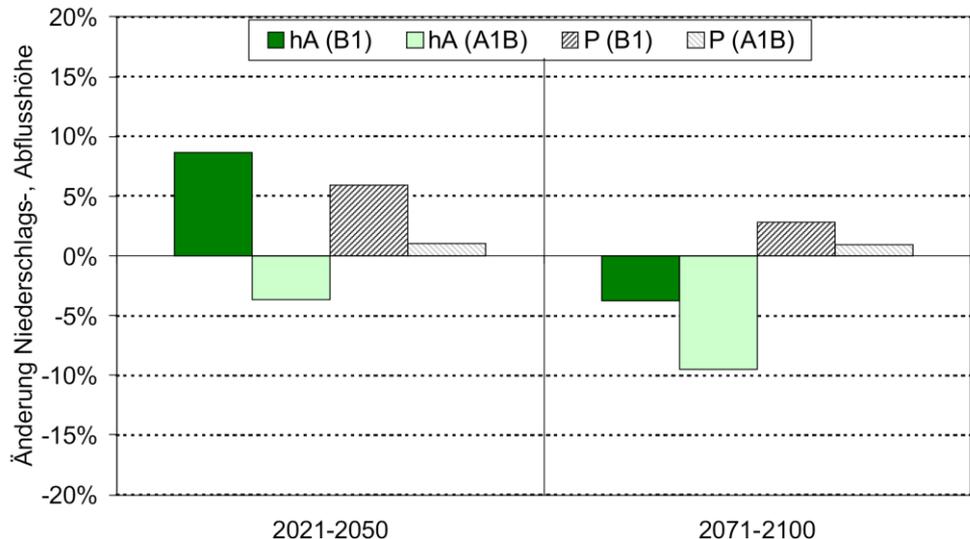
**Tab. 2:** Übersicht der Ergebnisse aus BAGLUVA und HBV-D bezogen auf den Pegel Rathenow im Vergleich zu Beobachtungsdaten.

|                            | Mittlere jährliche Abflusshöhe | Mittlere jährliche Niederschlagshöhe | Mittlere jährliche reale Verdunstungshöhe | Zeitraum               |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---|------------------------|
| Beobachtung Pegel Rathenow | 153 mm/a<br>139 mm/a           |                                      |   | 1961-1990<br>1979-1998 |
| BAGLUVA                    | 87 mm/a                        | 626 mm/a                             | 539 mm/a                                  | 1961-1990              |
| HBV-D                      | 151 mm/a                       | 559 mm/a                             | 407 mm/a                                  | 1979-1998              |

Mittlerer Jahresgang 1980-1990



**Abb. 3:** Mittlerer Jahresgang der beobachteten (fett) und mit HBV-D simulierten Durchflüsse (verwendete Klimamodelle siehe Tabelle 1) am Pegel Rathenow für den Zeitraum 1980-1990. Die gestrichelte fette Linie stellt das Ergebnis des Kalibrierungslaufes für das Modell HBV-D dar.



**Abb. 4:** Abweichungen der vieljährig gemittelten jährlichen Niederschlags- (P) und Abflusshöhe (hA) für zwei Zeithorizonte im Vergleich zum Zeitraum 1961-1990 am Beispiel der HBV-D-Rechnungen mit CCLM.

Mit WABIMON werden ebenfalls langjährig gemittelte Wasserhaushaltsgrößen berechnet, im Gegensatz zu BAGLUVA allerdings auf Monatswertbasis, so dass mit diesem Werkzeug auch jahreszeitlich differenzierte Aussagen getroffen werden können. Zu den Ergebnissen der Berechnungen mit WABIMON sei auf die Ergebnisse einer Diplomarbeit (Neumann, 2010) verwiesen.

#### 4.2 HBV-D

In Tabelle 2 sind neben dem Ergebnis aus einer Berechnung mit BAGLUVA auch die Daten aus der HBV-D-Rechnung für einen Beobachtungszeitraum aufgelistet. Darin wird ersichtlich, dass bei der Berechnung mit dem Wasserhaushaltsmodell HBV-D im langjährigen Mittel keine großen Abweichungen zu den Beobachtungen festzustellen sind. Dennoch müssen die Ergebnisse kritisch beurteilt werden. In Abbildung 3 wird deutlich, dass der mittlere Jahresgang des Abflusses durch das Modell nicht ausreichend nachgebildet werden kann. Mögliche

Erklärungen dafür sind einerseits die Kalibrierungsstrategie sowie andererseits Schwächen im Modell selbst. Da das Modell anhand der Pegelzeitreihen von 1980-1990 kalibriert wurde, allerdings im Modell keine anthropogenen Maßnahmen berücksichtigt werden (Lautenbach, 2005), muss geprüft werden, ob eine Bereinigung der Abflussreihen um starke anthropogene Einflüsse und eine Nachkalibrierung des Modells notwendig und möglich sind. Als Schwäche des Modells wurde erkannt, dass die hydrologischen Prozesse in Feuchtgebieten nicht befriedigend abgebildet werden (Lautenbach, 2005).

Daher können für Szenarienrechnungen Änderungssignale zunächst nur auf Jahreswertbasis betrachtet werden. In Abbildung 4 sind exemplarisch Ergebnisse für ein Regionalmodell (CCLM) mit zwei verschiedenen Emissionsszenarien (A1B und B1) dargestellt. Es wird darin deutlich, dass die Emissionsszenarien zu unterschiedlichen Änderungen im Niederschlagsverhalten und (nicht darge-

stellt) in der Temperatur führen, die in der jeweiligen Kombination verschiedene Wirkungen auf das Abflussverhalten haben. Allerdings kann erst nach Auswertung des vollständigen Modellensembles mit mehreren globalen und regionalen Klimamodellen eine Aussage zur Bandbreite der in Zukunft möglichen Veränderungen im Abflussverhalten getroffen werden.

## 5. Ausblick

Aufbauend auf den bisher erzielten Erkenntnissen, werden in den nächsten Schritten die Möglichkeiten und Grenzen der hydrologischen Modellierung im stark anthropogen beeinflussten Gebiet von Havel und Spree eingehender untersucht. Hierzu soll mit dem variablen Modellierungssystem ArcEGMO das natürliche Dargebot im Untersuchungsgebiet ermittelt werden.

Es ist vorgesehen, die Güte der hydrologischen Modelle an kleinen relativ unbeeinflussten Gebieten aufzuzeigen und gegebenenfalls Modellverbesserungen durch Nachkalibrierung vorzunehmen. Für die Projektionsrechnungen zur Erfassung des Einflusses des Klimawandels auf den natürlichen Wasserhaushalt sollen die in Abbildung 2 aufgeführten Klimaprojektionen in Verbindung mit den verbesserten hydrologischen Modellen eingesetzt werden. Aus dem damit verfügbaren Ensemble an Abflussprojektionen werden schließlich für verkehrswasserwirtschaftliche Fragestellungen erforderliche Szenarien ausgewählt.

## Danksagung

Die Untersuchungen fanden im Rahmen des Forschungsprogramms KLIWAS des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung statt ([www.kliwas.de](http://www.kliwas.de)). Die ENSEMBLES Daten, die in diesem Projekt benutzt werden, sind im Rahmen des EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES (Contract number 505539) erstellt worden. Die REMO-UBA und WETTREG Daten wurden vom MPI-M in Hamburg und der Firma CEC Potsdam GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt. Die CLM Klimaprojektionen wurden im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts „klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ berechnet. Wir bedanken uns bei den Projektförderern und bei den beteiligten Projektnehmern für die Unterstützung bei der Bereitstellung der Klimaprojektionsdaten. Weiterhin danken wir Herrn Prof. Gerstengarbe (PIK) für die Bereitstellung der STAR-Klimaprojektionsdaten. Für die Bereitstellung der meteorologischen Beobachtungsdaten sei dem Deutschen Wetterdienst gedankt.

## 6. Literatur

- Finke, W., Krause, S., 2007. Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Niedrigwasserabflüsse im Havelgebiet. BfG-Bericht Nr. 1561. Koblenz.
- Glugla, G., Jankiewicz, P., Rachimow, C., Lojek, K., Richter, K., Fürtig, G., Krahe, P., 2003. Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. BfG-Bericht Nr. 1342. Koblenz.
- Krahe, P., Nilson, E., Carambia, M., Maurer, T., Tomassini, L., Bülow, K., Jacob, D., Moser, H., 2009. Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles im Rheingebiet. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 53, 316-331.
- Lautenbach, S., 2005. Modellintegration zur Entscheidungsunterstützung für die Gewässergütebewirtschaftung im Einzugsgebiet der Elbe. Dissertation, Universität Osnabrück.
- Neumann, S., 2010. Hydrologischer Wandel im Einzugsgebiet der Havel – Szenarienrechnung bis 2100 unter Verwendung von WABIMON. Diplomarbeit, Freie Universität Berlin.
- Nilson, E., Carambia, M., Krahe, P., Rachimow, C., Beersma, J., im Druck. Bias-Korrekturmodelle im Vergleich: Eine Bewertung im Kontext der hydrologischen Klimafolgenforschung. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*.

## Umsetzung der Richtlinie Landschaftswasserhaushalt in Brandenburg

Susanne Jörns, Annette Dammann, Ronny Hämmerling, Thomas Kappel, Jan Schöfer, Christian Zeckel

Koordinierungsstelle Landschaftswasserhaushalt, Am Neuen Garten 16, 14469 Potsdam, susanne.joerns@ks-lwh-brandenburg.de

**Zusammenfassung:** In der Kulturlandschaft Brandenburgs waren und sind Eingriffe in den Landschaftswasserhaushalt für eine intensive landwirtschaftliche Nutzung und zum Erhalt der Besiedlung notwendig. Aufgrund der negativen Veränderungen, die durch die Nutzung der Landschaft und auch durch das sich verändernde Klima verursacht wurden, sind Maßnahmen notwendig geworden, die der Verbesserung und der Stabilisierung des Landschaftswasserhaushalts dienen. Dazu wurden und werden vom Land Brandenburg Förderrichtlinien aufgestellt, nach denen Maßnahmen beantragt und von den Gewässerunterhaltungsverbänden umgesetzt werden, die die negativen Auswirkungen auf den Landschaftswasserhaushalt verringern und wieder zu einer Verbesserung führen sollen. Neben der negativen Beeinflussung des Landschaftswasserhaushalts erfolgte gleichzeitig eine Verschlechterung der ökologischen Qualität der Gewässer. Durch die Anwendung der Richtlinie Landschaftswasserhaushalt sowie der EU-Wasserrahmenrichtlinie erfolgt die angestrebte Vernetzung eines ausreichenden Wasserdargebots und der Verbesserung der ökologischen Qualität der Gewässer.

### Implementation of a funding guideline to improve the landscape water budget in Brandenburg

**Abstract:** In the cultural landscape of Brandenburg, interventions in the landscape hydrology have always been and still are indispensable to sustain the intensive agricultural use and to preserve settlements. Due to the negative changes in the water budget caused by the land use and also by the changing climate, actions are necessary to improve and stabilise it. Thus, the Federal State of Brandenburg has established programs to fund and support measures – executed by the “Gewässerunterhaltungsverbände” (associations for the maintenance of watercourses) – for reducing negative impacts on the water budget. In addition to the negative impacts on the water budget, the ecological quality of the watercourses has deteriorated. The funding guideline to improve the water budget, therefore, also constitutes an important step in the implementation of the European Water Framework Directive.

#### 1. Anlass der Richtlinie

Der aktuelle Zustand des Landschaftswasserhaushalts (LWH) Brandenburgs ist u.a. durch abnehmende Grundwasserstände, strukturarme und sehr nährstoffreiche Fließ- und Standgewässer sowie ein stark eingeschränktes Wasserrückhaltevermögen großflächig entwässerter Niederungs- und versiegelter Flächen gekennzeichnet.

Infolge der z.T. gravierenden Eingriffe in die Gewässer- und Landschaftsstruktur wurde das natürliche Wasserspeichervermögen der Landschaft eingeschränkt. Der Wasserhaushalt ist heute von der Funktionsfähigkeit und Regulierung zahlreicher wasserwirtschaftlicher Anlagen abhängig. Diese kontinuierliche Steuerung ist in unserer Kulturlandschaft eine Voraussetzung für die heutige Flächennutzung. Bis in die 1990er Jahre stand vor allem die intensive landwirtschaftliche Nutzung im Vordergrund. Unter anderem durch die dann in einigen Gebieten folgende Reduzierung der Bewirtschaftungsintensität erfolgte ebenso nur eine eingeschränkte Unterhaltung und Regulierung der vorhandenen wasserwirtschaftlichen Anlagen und Fließgewässer. Die daraus resultierenden Benachteiligungen der natürlichen Landschaftsfunktionen erforderten Maßnahmen zur Verbesserung des Land-

schaftswasserhaushaltes im Sinne des Wasserrückhalts und einer bedarfsangepassten Landbewirtschaftung.

#### 2. Richtlinie Landschaftswasserhaushalt

Die Richtlinie Landschaftswasserhaushalt trat am 01.01.2002 im Land Brandenburg in Kraft. Grundlage der Richtlinie war in der ersten Förderperiode von 2002-2006 der Europäische Ausrichtungs- und Garantiefonds für Landwirtschaft (EAGFL). Für die zweite Förderperiode von 2007-2013 ist die Richtlinie in den Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) eingebunden.

Generelles Ziel der Richtlinie ist die Förderung von Maßnahmen zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes und der Bewirtschaftung der Wasserressourcen im ländlichen Raum. Zu den Schwerpunkten und detaillierten Zielen gehören beispielsweise:

- die nachhaltige Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens in der Landschaft;
- die Verbesserung der Gewässerstruktur und der ökologischen Durchgängigkeit der Fließgewässer;
- die Erhöhung der Variabilität der Abflussverhältnisse;
- die Erhöhung der Grundwasserneubildung;

- die Förderung der natürlichen Bodenfunktionen;
- nachhaltiges Staumanagement und Speicherbewirtschaftung.

Um eine optimale fachliche Unterstützung und Bewertung der eingereichten Maßnahmenvorschläge gewährleisten zu können, werden das Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg mit den Referaten Wasserbewirtschaftung/Hydrologie, Hochwasserschutz und Naturschutz, die unteren Wasser-, Naturschutz- und Landwirtschaftsbehörden sowie ggf. weitere Institutionen (z.B. Naturparke, Landesanglerverband, Forst) am Antragsverfahren beteiligt. In den jeweiligen regionalen Arbeitsgruppen unter Leitung und Organisation der Koordinierungsstelle Landschaftswasserhaushalt beraten die o.g. Mitglieder über die Maßnahmenvorschläge und stimmen über eine Umsetzung ab. Antragsteller und Projektausführende sind in der Regel die Gewässerunterhaltungsverbände des Landes Brandenburg.

### 3. Die Akteure: Gewässerunterhaltungsverbände

Anfang der 1990er Jahre wurden im Land Brandenburg insgesamt 26 Gewässerunterhaltungsverbände (GUV) als öffentlich-rechtliche Körperschaften gegründet. Ursprünglich vor allem zur Unterhaltung der Gewässer II. Ordnung geschaffen, erfüllen die Verbände heute eine Vielzahl von Pflichtaufgaben und freiwilligen Aufgaben.

Nach Brandenburgischem Wassergesetz und dem Gesetz über die Bildung von Gewässerunterhaltungsverbänden zählen zu den *Pflichtaufgaben*:

- die Unterhaltung der Gewässer II. Ordnung (zum Erhalt bzw. der Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der Gewässer);
- der Ausgleich von nachteiligen Veränderungen der Wasserführung;
- der Betrieb von Stauanlagen in Gewässern II. Ordnung, die für die Aufrechterhaltung eines ausreichenden Landschaftswasserhaushaltes notwendig sind.

Neben diesen Pflichtaufgaben übernehmen die Gewässerunterhaltungsverbände seit ihrer Gründung auch *freiwillige Aufgaben*, insbesondere im Rahmen verschiedener Förderprogramme, wie Maßnahmen zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes und der biologischen Vielfalt oder Moorschutzprojekte. Zu den freiwilligen Aufgaben gehören vor allem:

- Ausbau, Sanierung, Renaturierung und Rückbau von Gewässern;
- Bau, Betrieb, Unterhaltung und Rückbau wasserwirtschaftlicher Anlagen.

Des Weiteren hat das Land Brandenburg im Jahr 2009 folgende, in Zuständigkeit des Landes liegende Aufgaben an die Gewässerunterhaltungsverbände übertragen:

- Unterhaltung und Betrieb von Gewässern I. Ordnung, von Hochwasserschutzdeichen und wasserwirtschaftlichen Anlagen;
- Sanierung, Ersatzneubau, Umbau und Rückbau von dem Land unterstehenden wasserwirtschaftlichen Anlagen;
- Ausbau der Gewässer zur Zielerreichung der EU-Wasserrahmenrichtlinie.

Die jahrelange praktische Arbeit und die dadurch erlangten Ortskenntnisse und Kontakte z.B. zu Behörden, Verbänden, Landnutzern und anderen Interessierten machen die Gewässerunterhaltungsverbände zu wichtigen Partnern bei wasserwirtschaftlichen und gewässerökologischen Themen.

### 4. Umsetzung der Maßnahmen

Im Rahmen der Richtlinie Landschaftswasserhaushalt werden zahlreiche Maßnahmen gefördert, die auf verschiedene Weise den Landschaftswasserhaushalt verbessern. Hauptsächlich werden Rückbau, Instandsetzung, Ersatzbau und Umbau von wasserwirtschaftlichen Anlagen, wie z.B. Kleinstau, Wehre oder Durchlässe beantragt und umgesetzt. Weitere Schwerpunkte der Umsetzung sind der Neu- oder Ersatzbau von Sohlgleiten und -rampen, Sohl- und Stützwällen, Sohlhebungen sowie Maßnahmen zur Verbesserung der aquatischen Durchgängigkeit wie z.B. der Bau von Fischaufstiegsanlagen oder Umgehungsgerinnen. Einen wesentlichen Anteil bilden ebenfalls die Maßnahmen zur Renaturierung der Fließgewässer im Sinne einer Verbesserung der Gewässermorphologie und -struktur oder der Wiederherstellung des ursprünglichen Fließverlaufes. Außerdem werden an den Fließgewässern zahlreiche Pflanzmaßnahmen durchgeführt. Die Anteile der bisher realisierten Maßnahmen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Im bisherigen Förderzeitraum wurden insgesamt etwa 580 Projekte bewilligt und umgesetzt bzw. befinden sich noch in der Umsetzung (Beispiele in Abb. 2). Davon wurden 350 Projekte mit einem Gesamtinvestitionsvolumen von ca. 70 Mio. Euro bereits in der ersten Förderperiode von 2002 bis 2006 durchgeführt. Detaillierte Ergebnisse für diesen Zeitraum sind im Bericht "Förderprogramm Landschaftswasserhaushalt" des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (2008) nachzulesen.

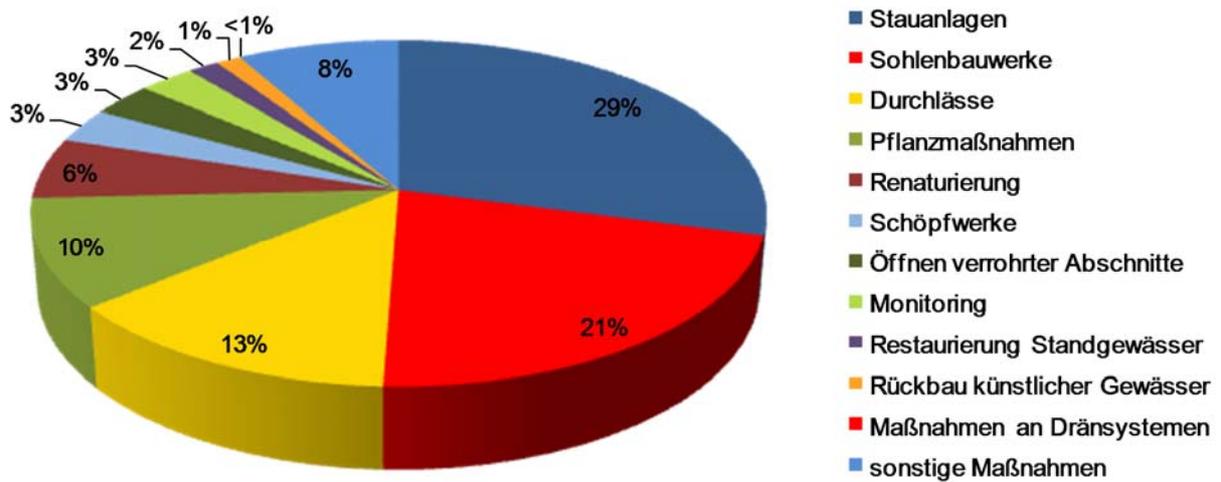


Abb. 1: Realisierte Maßnahmen von 2002 bis 2009.



Abb. 2: Projektbeispiele. Oben links: Wehr im Koselmühlenfließ (Lkr. Spree-Neiße); oben rechts: Sohlgleite im Kindelflöß (Lkr. Oberhavel); unten links: Totholz in der Bäke (Lkr. Oberhavel); unten rechts: Loben, Altes Moor (Lkr. Elbe-Elster).

## 5. Fazit

Die Richtlinie Landschaftswasserhaushalt bietet in Brandenburg eine sehr gute Voraussetzung, die bestehenden Defizite zu verringern, denn nur ein funktionierender Landschaftswasserhaushalt ist eine Existenzgrundlage für die Landwirtschaft und die Natur insgesamt. Die

aktuellen Defizite des Landschaftswasserhaushaltes konnten durch die bisherigen LWH-Maßnahmen der Gewässerunterhaltungsverbände partiell verbessert werden.

Aktuelle und zukünftige Schwerpunkte der Zielsetzung der LWH-Maßnahmen sind:

- die Erhöhung der Grundwasserneubildung;
- die Stabilisierung der Flurwasserstände in Niederungsgebieten und Urstromtälern;
- die Erstellung von Bewirtschaftungskonzepten für Polder- und Niederungsgebiete;
- die stetige Begleitung der Maßnahmen durch Monitoring.

Trotz der bisherigen Leistungen werden in den nächsten Jahrzehnten noch zahlreiche LWH-Maßnahmen notwendig sein, um eine umfassende Stabilisierung und Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes, auch unter Berücksichtigung der Klimaveränderung, erreichen zu können.

Auch im Hinblick auf die Zielerreichung der EU-WRRL stellen die Maßnahmen der Richtlinie Landschaftswasserhaushalt einen wichtigen Baustein dar.

## 6. Literatur

Richtlinien über die Gewährung von Zuwendungen des Ministeriums für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg zur Förderung der Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes vom 18.12.2001 und 17.02.2004. Potsdam.

Richtlinie des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg über die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung der Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes, von kulturbautechnischen Maßnahmen und der biologischen Vielfalt im ländlichen Raum vom 10.11.2004. Potsdam.

Richtlinie des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg über die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung der Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes und der Bewirtschaftung der Wasserressourcen im ländlichen Raum vom 22.11.2007. Potsdam.

Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg, 2008. Bericht über das Förderprogramm des Landes Brandenburg in der EU-Förderperiode 2000 bis 2006: Verbesserung des Landschaftswasserhaushalts. Potsdam.

## Sinkende See- und Grundwasserstände im Naturschutzgebiet „Luchseemoor“ (Spreewald, Brandenburg) – Landschaftsgeschichtliche und hydrologische Befunde

Olaf Juschus<sup>1</sup>, Helge Albert<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Ackerstraße 76, Sek. ACK 1-1, 13355 Berlin, olaf.juschus@tu-berlin.de; <sup>2</sup>Untere Wasserbehörde, Landkreis Dahme-Spreewald, Beethovenweg 14, 15907 Lübben

**Zusammenfassung:** Das Luchseemoor füllt Teile eines Zungenbeckens im Rückland der Brandenburger Eisrandlage auf der Krausnicker Platte, westlich des Unterspreewaldes. Das Moor selbst hat eine Fläche von ca. 50 ha, der darin eingelagerte Luchsee von 8 ha. Trotz des Fehlens oberirdischer Zu- und Abflüsse sinkt der Wasserspiegel des bisher als mesotroph-saures Kesselmoor bezeichneten Gebietes seit ca. 30 Jahren dramatisch. Bodenkundliche und geologische Untersuchungen belegen die Genese des Moores als eine Kombination aus Verlandungs- und Versumpfungsmoor. Das Absinken des Grundwassers beträgt bis zu 3,4 m. Der Seespiegel liegt aktuell oberhalb des lokalen Grundwasserspiegels. Der Luchsee ist durch die Moor- und Seesedimente vom angrenzenden Grundwasser der Krausnicker Platte weitgehend entkoppelt. Ein Sickerverlust vom Moor in das derzeit tieferliegende Grundwasser ist wahrscheinlich; einfache Schätzungen liegen bei etwa 100 - 200 m<sup>3</sup>/Tag.

### Decreasing lake and groundwater levels in the natural reserve „Luchseemoor“ (Spreewald area, Brandenburg) – landscape historical and hydrological records

**Abstract:** The „Luchseemoor“ peatland is located within an ice-tongue-basin in the hinterland of the Brandenburg-Ice-Stage. It is situated on an elevated morainic plateau to the west of the “Spreewald” wetland. The Luchseemoor covers an area of approx. 0.50 km<sup>2</sup> and surrounds a small lake (Luchsee) with a surface area of 0.08 km<sup>2</sup>. Despite the lack of any tributaries and an outlet, the water level of the peatland has decreased dramatically over the past 30 years. Pedological and geological investigations confirm the formation of the peatland as a combination of a lake mire and a swamp mire. The lowering of the water table was estimated to be 3.4 m. The present lake level is higher than the groundwater level. Thus, the lake is decoupled from the local water table of the morainic plateau. Seepage of water from the peatland to the groundwater probably leads to a further deficit in the water balance; first estimations are in a range of 100-200 m<sup>3</sup> per day.

#### 1. Einleitung

Das Luchseemoor war eines der wertvollsten Moore innerhalb des heutigen Biosphärenreservates Spreewald. Die großflächig auf etwa 50 ha vorkommende Vegetation eines mesotroph-sauren Moores mit Restsee stellte im südlichen Brandenburg eine Rarität dar. Nach einer Feuchtphase in den 1970er Jahren setzte noch vor 1990 ein deutliches Absinken des Wasserstandes ein, das sich ab 2000 verstärkte. Das Absinken erfolgte quasinatürlich und nicht als Folge direkter Eingriffe des Menschen. Die niedrigen Wasserstände führten in den letzten Jahren zu einem weitgehenden Trockenfallen des Moores.

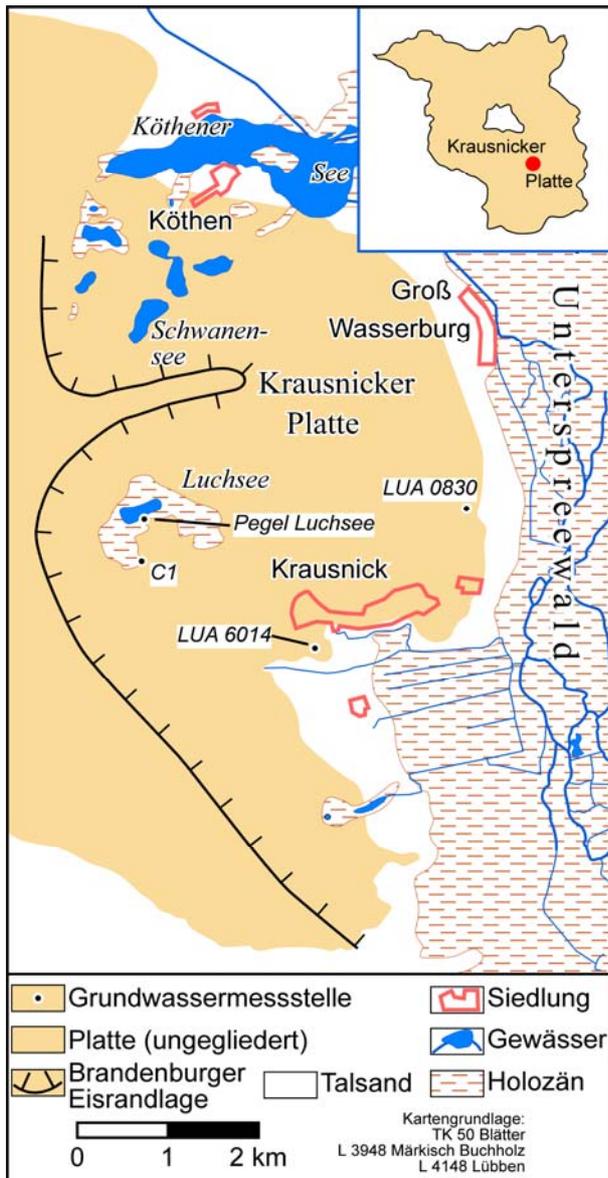
Als Gründe für den sinkenden Wasserstand werden mehrere Ursachen angeführt. Neben der generellen Klimaänderung der letzten Jahrzehnte werden auch lokal wirkende Mechanismen in Betracht gezogen. Dazu gehören vor allem Landnutzungsänderungen; einerseits auf dem benachbarten Brand-Sander, wo sich ein ehemaliger sowjetischer Militärflugplatz befindet, andererseits im unmittelbaren Einzugsgebiet, in dem sich die forstwirtschaftli-

che Nutzung in den letzten Jahrzehnten intensiviert hat. Außerdem werden Einflüsse von Meliorationsmaßnahmen um Krausnick und des Wasserwerks Krausnick diskutiert (Pfützner und Mey, 2007; Mey et al., 2008; LBGR, 2009). Die stark ausgeweiteten Niedrigwasserperioden der Spree können ebenfalls bis an den Luchsee zurückwirken (Vött, 2000), erklären aber kaum die Dimension des Grundwasserverlustes (LUA, 2008).

#### 2. Geologische Gegebenheiten des Luchseemoores und seines Einzugsgebietes

Das Luchseemoor befindet sich im südlichen Teil des Jungmoränenlandes von Nordostdeutschland. Es liegt im unmittelbaren Rückland der Brandenburger Eisrandlage auf der Krausnicker Platte (Juschus, 2003). Die Eisrandlage selbst ist westlich des Moores mit kräftigen Endmoränen ausgebildet (Abb. 1). Sie erreichen 60 m Relativhöhe. Altbohrungen an und auf den weichselzeitlichen Endmoränen belegen, dass sie zum allergrößten Teil aus Sand und Kies bestehen. Eine hydraulische Abschirmung

zum Brand-Sander, der sich westlich der Endmoränen anschließt, ist nicht gegeben, so dass Teile des östlichen Brand-Sanders zum Einzugsgebiet des Luchsees gehören.



**Abb. 1:** Die Lage der Krausnicker Platte in Brandenburg (oben rechts) sowie des Luchsees auf der Krausnicker Platte mit im Text erwähnten Grundwassermessstellen.

Nördlich und nordöstlich des Moores sitzen die weichselzeitlichen Endmoränen dem Komplex der Krausnicker Berge auf (Abb. 1). Über den geologischen Aufbau des Kernes der Krausnicker Berge ist fast nichts bekannt. Lediglich an den Heideseen stehen ältere, saalezeitliche Geschiebemergel und Schluffe in Oberflächennähe an (Juschus, 2003). Westlich der eigentlichen Krausnicker Berge wurden in Altbohrungen fast ausschließlich durchlässige Sande erbohrt. Es kann daher aus den geologischen Daten nicht entschieden werden, ob die Krausnicker Berge eine zuverlässige hydraulische Barriere zwischen dem Luchseemoor und den Heideseen darstellen. Das starke Gefälle des Grundwasserspiegels zwischen den Heideseen und dem Luchseemoor spricht eher für das Vorhandensein einer solchen Barriere. Südlich des

Moores wird das Luchseebecken von einem Os-ähnlichen Rücken begrenzt. Die eigenen Untersuchungen belegen den Aufbau des Rückens aus sandigen Schmelzwasserablagerungen. Der Rücken bildet daher ebenfalls keine Barriere für das Grundwasser, so dass ein Abfluss in südlicher und südöstlicher Richtung problemlos möglich ist. Die unmittelbare Umgebung des Moores wird ebenfalls von sandigen Substraten dominiert. Dabei überwiegen Schmelzwassersande, die meistens als Mittel- und Feinsande vorliegen und vor allem im westlichen Einzugsgebiet noch von mehrere Meter mächtigen Dünenanden überlagert werden. Es konnten zwar sowohl tonige, saalezeitliche als auch sandige, weichselzeitliche Geschiebemergel nachgewiesen werden. Sie stehen jedoch nur räumlich eng begrenzt an und spielen für den generellen geologischen Aufbau des Einzugsgebietes eine geringe Rolle.

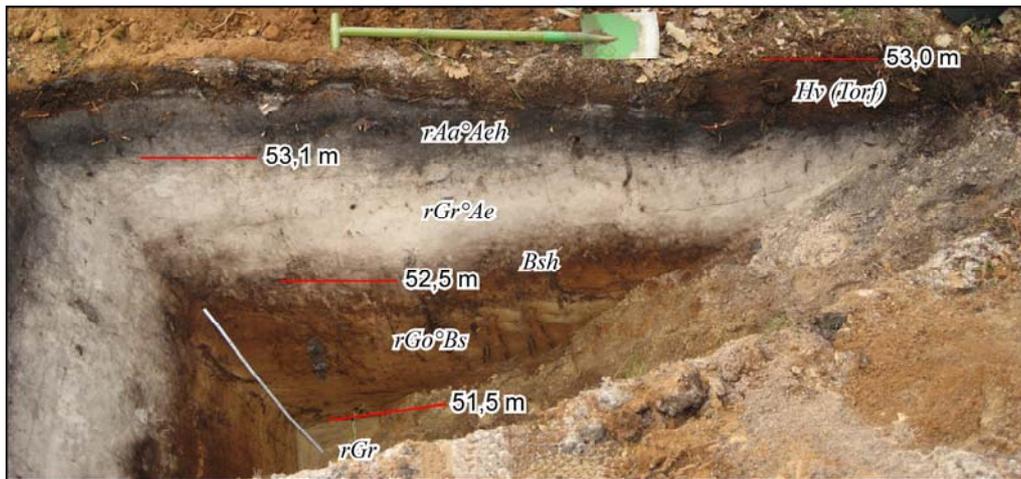
Aufgrund der dargelegten Erkenntnisse wird der bisherige Status des Luchseemoors als Kesselmoor (Timmermann und Succow, 2001) abgelehnt. Das ober- und das unterirdische Einzugsgebiet unterscheiden sich signifikant. Der Kessel ist nur morphologisch geschlossen. Hydraulisch ist er sowohl für den Zustrom aus westlicher als auch für den Abstrom in südöstliche Richtung durchlässig. Das Luchseemoor wird als eine Kombination aus Versumpfungs- und Verlandungsmoor eingestuft.

Der Aufbau des Luchseemoors ist aufgrund mehrerer Untersuchungen weitgehend geklärt (Lange et al., 1978; Timmermann und Succow, 2001; Sobottka und Lehrkamp, 2002; Juschus, 2006; Strahl, 2007). Maximal erreicht die Torf- und Muddeauflage etwas mehr als 6 m Mächtigkeit, kann aber in beckenzentral gelegenen Bereichen auch weniger als 1 m betragen. Auffällig ist die Verteilung der Profile in eine untere Mudde, die vom unteren Torf, der oberen Mudde und dem oberen Torf überlagert wird. Während die untere Mudde spätglazialen Alters ist (Strahl, 2007), sind die anderen Ablagerungen ab dem ausgehenden Boreal entstanden.

### 3. Historische und aktuelle Wasserstände im Becken des Luchseemoors

Der höchste als gesichert geltende Wasserstand am Luchseemoor betrug ca. 53,1 m. Er wurde sowohl als reliktsicher Go-Horizont als auch als reliktsicher Hn-Horizont nachgewiesen (Abb. 2). Die noch vorhandenen vererdeten Torfe sprechen für die Bildung dieses Niveaus in historischer Zeit. Ebenfalls in der Umgebung des Moores weit verbreitet ist ein Niveau, welches zwischen 51,5 und 52,5 m schwankt. Die extrem kräftige Ausbildung der Go-Horizonte, die Ansätze von Raseneisenbildung zeigt, spricht dafür, dass dieses Niveau längere Zeit und eventuell auch mehrmals existierte.

Die Grundwasserstände im Luchseebecken wurden im November und Dezember 2009 aus aktuellen Bohrdaten ermittelt. Vergleiche mit dem Pegel C1 belegen, dass das Grundwasser im Bohrzeitraum nur um 1 cm schwankte. Es zeigt sich ein deutliches Gefälle des Grundwasserspiegels von Westnordwest nach Ost. Während westlich und nordwestlich des Moores noch Grundwasserstände zwischen 50,5 und 50,7 m nachgewiesen wurden, liegt er



**Abb. 2:** Schurf Lu4 vom Südrand des Luchseemoores. Die Horizontgrenzen reliktscher Gley- bzw. Torfhorizonte um 53,1 m und zwischen 51,5 und 52,5 m sind eingetragen. Sie stellen ehemalige Grundwasserstände dar. Der aktuelle Boden ist ein Reliktgley-Podsol. Die Niveaus wirken durch die fotografische Perspektive verzerrt.

östlich mit 49,7 m bereits deutlich unter 50 m. Das heute vorhandene Gefälle des Grundwasserspiegels, welches beim maximalen Wasserstand nicht nachgewiesen wurde, führt von West nach Ost zu deutlichen höheren Werten des Absinkens des Grundwassers. Sind es am westlichen Rand des Moores etwa 2,3-2,5 m, so liegt das Grundwasser auf dem „Sporn“ 2,8 m und im Osten sogar 3,4 m unterhalb des historischen Höchstwertes. Auffällig ist weiterhin, dass der Luchsee mit 50,75 m aktuell einen höheren Wasserstand als seine Umgebung aufweist.

#### 4. Hydrologische Untersuchungen des Luchsees und seiner Umgebung

Im Dezember 2009 wurden hydrologische Messungen am Luchsee südlich und am Schwanensee nördlich der Krausnicker Berge durchgeführt. Beprobt wurden sowohl das Seewasser als auch benachbartes Grundwasser. Neben hydrologischen Feldmessungen (pH, Leitfähigkeit u.a.) wurden im Labor die gängigsten löslichen Ionen sowie die Sauerstoff- und Wasserstoffisotopenverhältnisse bestimmt (Tab. 1).

Während das Luchseewasser die niedrigste Leitfähigkeit hat, liegt sie in dem benachbarten Pegel C1 deutlich

höher. Das Gleiche gilt auch für den pH-Wert. Die deutlichen Unterschiede zwischen dem Pegel C1 und dem benachbarten Wasser des Luchsees treten beim Vergleich zwischen der Quelle am Schwanensee und dem Wasser des Schwanensees nicht auf. Vor allem der hohe pH-Wert spricht dort für eine kräftige Pufferung des See- und Grundwassers. Bei den Gehalten löslicher Ionen spricht vor allem der mehr als doppelt so große Kalziumgehalt im Schwanensee für Lösungsprozesse aus dem dort anstehenden Geschiebemergel. Sowohl der höhere Wasserstand des Luchsees im Vergleich zum angrenzenden Grundwasser als auch seine abweichende Wasserchemie belegen, dass der See keinen Kontakt mit dem Grundwasser des Luchseebeckens besitzt. Die nachgewiesenen Mudden dichten das Seewasser zuverlässig gegen das Grundwasser ab. Das wird ebenfalls von den Ergebnissen der Isotopenmessungen gestützt. Die Anreicherung der schweren Isotope  $^{18}\text{O}$  und D im Luchsee sowie die deutlich negativen Werte des Deuterium-Excesses sprechen für eine starke Beeinflussung des Wassers durch Verdunstungsprozesse. Beim Schwanensee lassen sie sich über die Isotopensignatur ebenfalls nachweisen, sind aber aufgrund der Grundwasserzufuhr weniger ausgeprägt.

**Tab. 1:** Ergebnisse der hydrologischen Messungen vom Luchsee und Schwanensee im Dezember 2009. Bestimmung der Feldparameter mit WTW-Sonden 340i-Reihe; Messung der löslichen Ionen am AAS bzw. ICP-MS der Technischen Universität Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Abt. Hydrogeologie; Isotopenmessungen am MS Delta-S/FRIDA des Alfred-Wegener-Institutes für Polar- und Meeresforschung Potsdam.

| Ort                | Leitf.  | pH  | O <sub>2</sub> | Redox-pot. | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | δ <sup>18</sup> O | 1σ   | δD     | 1σ  | d excess |
|--------------------|---------|-----|----------------|------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|------|--------|-----|----------|
|                    | (μS/cm) |     | (mg/l)         | (mV)       | (mg/l)          | (mg/l)         | (mg/l)           | (mg/l)           | (mg/l)          | (mg/l)                        | (mg/l)                        | V-SMOW            |      | V-SMOW |     |          |
| Luchsee            | 119     | 5,1 | 7-12           | 32,5       | 4,71            | 1,27           | 24,37            | 2,35             | 8,79            | 1,15                          | 26,25                         | -2,38             | 0,02 | -32,9  | 0,4 | -13,9    |
| Pegel C1           | 275     | 5,5 | 0              | n.g.       | 5,08            | 4,38           | 28,39            | 5,82             | 9,83            | < 0,75                        | 90,31                         | -9,05             | 0,04 | -63,4  | 0,4 | 9,1      |
| Schwanensee        | 327     | 9,6 | 20-22          | -148       | 5,54            | 0,50           | 60,09            | 3,80             | 8,49            | < 0,75                        | 36,30                         | -3,69             | 0,01 | -38,6  | 0,4 | -9,0     |
| Quelle Schwanensee | 301     | 8,8 | 2-3            | -111       | 6,60            | 1,17           | 63,41            | 3,66             | 10,39           | < 0,96                        | 23,20                         | -9,70             | 0,03 | -70,7  | 0,3 | 6,9      |

## 5. Hydrologische Modellierung

### 5.1 Einleitung

Im Folgenden wird versucht, die hydrologischen Prozesse am Luchseemoor nachzubilden und die maßgeblichen Wasserhaushaltsgrößen zu bestimmen. Seit Mai 2006 wird der Wasserstand des Luchsees in Zentimetergenauigkeit kontinuierlich gemessen. Für diesen Zeitraum der vergangenen 4 Jahre soll das hydrologische Verhalten des Moorkörpers mit einem einfachen Bilanzmodell nachgebildet werden.

Die Wasseroberfläche des Luchsees zeigt ein natürliches Schwankungsverhalten. Bei völliger Anbindung an den oberen Grundwasserleiter sollten sich die Wasserstände ähnlich wie eine typische Grundwassermessstelle verhalten. Im entgegengesetzten Grenzfall der Abkopplung des Moores durch aushaltende Muddeschichten sollte das Moor nur durch Niederschlag und Verdunstung gesteuert sein und analog einer „Schüssel“ bei Niederschlag ansteigen und dann entsprechend der aktuellen, realen Verdunstung und anderer Zu- und Abflüsse wieder fallen.

### 5.2 Hydrogeologische Verhältnisse

Die Krausnicker Platte wird am West- und Ostrand von den Flüssen Dahme und Spree entwässert. Der Abstand zwischen diesen Flussniederungen beträgt etwa 10 km. Der „Grundwasserberg“ erhebt sich aktuell bis rund 10 m über diese hydraulischen Randbedingungen. Der Luchsee selbst befindet sich fast mittig, etwas östlich der Wasserscheide zwischen Dahme und Spree, jedoch ist die genaue Lage und Höhe der Wasserscheide nicht belegt.

Im Gebiet sind einige Grundwassermessstellen (GWM) vorhanden (Abb. 1). Es existieren allerdings fast keine westlich des Luchsees, also in Richtung der Wasserscheide. Stromab des Luchsees im Osten sind jedoch

einige GWM verfügbar (Pfützner und Mey, 2007). In der Abbildung 3 sind einige Beobachtungsdaten exemplarisch dargestellt. Dabei soll der linke Teil der Grafik symbolhaft gelten. Die Zeitachse ist dort nicht linear – „historische Zeit“ kann eine Zeit vor Jahrhunderten sein (z.B. Zeiten starker Entwaldung im Gebiet). Die Grundwassermessungen entstammen dem Grundwasserbeobachtungsnetz des Landes Brandenburg.

Folgende Besonderheiten seien erwähnt. Die GWM LUA 0830 mit einer Beobachtungsreihe von mehr als 50 Jahren zeigt einen abfallenden Trend ab Mitte der 1990er Jahre. Weiter wird erwartungsgemäß beim Vergleich der Grundwassermessstellen C1, LUA 6014 und LUA 0830 deutlich, dass mit zunehmendem Abstand vom stauregulierten Vorfluter am Westrand der abfallende Trend deutlich zunimmt. Die stärksten Rückgänge der Grundwasserstände sind also im Zentrum der Krausnicker Platte auf der Wasserscheide zu erwarten.

### 5.3 Das „Schüsselmodell“ und seine Bilanzglieder

Das als Modell verwendete System berechnet die Bilanzgleichung vereinfacht nur in ihren wesentlichen Gliedern als Tageswerte und kumuliert den Speicherinhalt des Moorkörpers und des Luchsees, welcher in etwa dem Seewasserstand entspricht.

Dadurch, dass das Moor zum Untergrund hin praktisch vollständig durch Muddeschichten getrennt ist, wirken als Hauptgrößen der Niederschlag P und die Verdunstung ET. Deutlich kleinere Werte nehmen die Austauschgrößen mit der Umgebung wie Sickerwasserverluste und Randzuflüsse ein. Im modelltechnisch praktischen Sinne ist zudem das Moor über Oberflächengewässer vollkommen ab- und zuflusslos (Abb. 4).

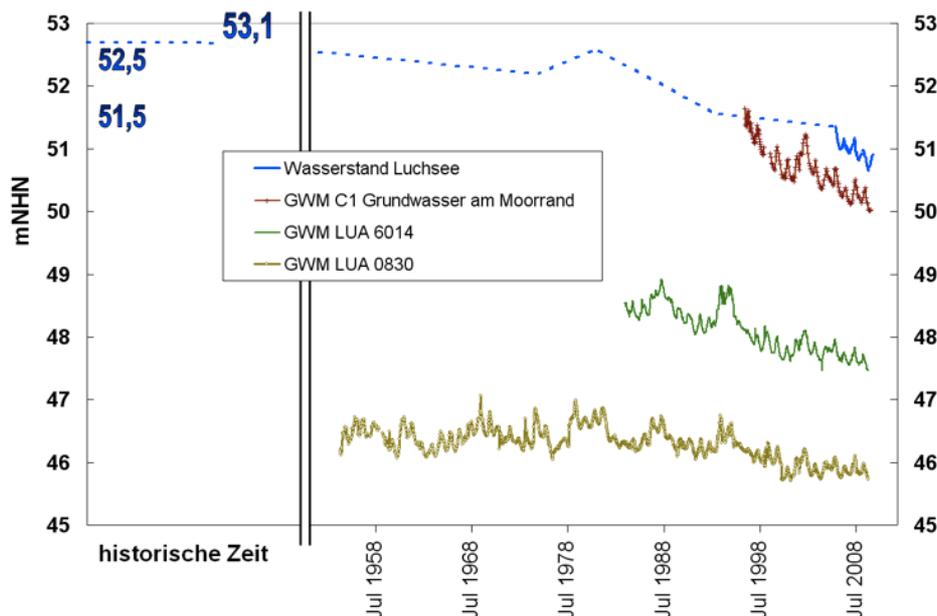


Abb. 3: Beobachtungsdaten der Grundwassermessstellen am Luchsee.

Die Bilanzgleichung lautet nach (Succow und Joosten, 2001):

$$P + R_{Z-F} + R_{Z-D} + R_{Z-GW(h)} + R_{Z-GW(v)} = ET + R_{A-F} + R_{A-D} + R_{A-GW(h)} + R_{A-GW(v)} + \Delta S$$

Der vereinfachte Term der Moorwasserbilanz, umgestellt nach der resultierenden Größe  $\Delta S$ , lautet:

$$\Delta S = P - ET + R_{Z-GW(h)} - R_{A-GW(h)} + R_{Z-GW(v)} - R_{A-GW(v)}$$

Der *Niederschlag*  $P$  wurde in der Ortslage Krausnick ab September 2006 gemessen (private Messung durch eine Mitarbeiterin der Unteren Wasserbehörde). Dieser Standort ist etwa 3 km vom Luchsee entfernt. Ansonsten wurden die Daten der 28 km entfernten Station Lindenberg (DWD) verwendet.

Die *Verdunstung*  $ET$  wurde ausschließlich aus den Klimadaten der Station Lindenberg (DWD) als Tageswerte nach dem Verfahren TURC/IVANOV (Korrekturfaktoren nach GLUGLA) als potentielle Grasreferenzverdunstung ETP berechnet. Eine zufriedenstellende Anpassung ergibt sich bei der Multiplikation der Grasreferenzverdunstung mit dem Faktor 1,1.

Weitere Bilanzglieder sind der vertikale Grundwasserzufluss  $R_{Z-GW(v)}$  und der vertikale Grundwasserabfluss  $R_{A-GW(v)}$  welche vom Grund- und Schichtenwasserkontakt des Moorkörpers abhängen.

Ein *vertikaler Grundwasserzufluss*  $R_{Z-GW(v)}$  findet statt, wenn der Grundwasserstand höher als der Moorwasserstand ist. Nach den vorliegenden Stichtagsmessungen ist der Gradient aktuell nach unten gerichtet. Somit erfolgt

praktisch nur ein vertikaler Grundwasserabfluss  $R_{A-GW(v)}$ , also die Versickerung durch die Mudde nach unten. Um diesen abzuschätzen, muss der Gradient  $I$  als Quotient aus Wasserstandsunterschied vom Grundwasser zum Moorkörper und der mittleren Mächtigkeit der Mudde  $M_{Mudde}$  bestimmt werden. Der Wasserstandsunterschied  $dH$  beträgt nach Stichtagsmessungen zwischen wenigen Dezimetern und etwas über einem Meter. Es wird ein Mittelwert von 0,6 m angenommen.

$$R_{A-GW(v)} = Q = v \times A = I \times k_{Mudde} \times A = \frac{dH}{M_{Mudde}} \times k_{Mudde} \times A$$

Annahmen:

$$k_{Mudde} = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

$$M_{Mudde} = 1 \text{ m (mittlere Mächtigkeit)}$$

$$dH = 0,6 \text{ m}$$

$$A = 500\,000 \text{ m}^2 \text{ (50 ha)}$$

$$R_{A-GW(v)} = 1,5 \text{ l/s} = 130 \text{ m}^3/\text{Tag}$$

Dieser Wert entspricht einer Wassersäule von etwa 95 mm/Jahr (über die gesamte Moorfläche). Entscheidenden Einfluss hat die Durchlässigkeit der Mudde ( $k_{Mudde}$ ). Nimmt man beispielsweise  $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  an, verzehnfachen sich die Sickerverluste, was dann 950 mm/Jahr entsprechen würde. Bei dieser Verlustgröße würde das Moor in wenigen Jahren „leerlaufen“, was in der Realität offenbar nicht der Fall ist. Aus dieser Betrachtung wird klar, dass der errechnete Wert also nur eine grobe Schätzung darstellt und sich daher nur bedingt zu einer Bilanzierung eignet.

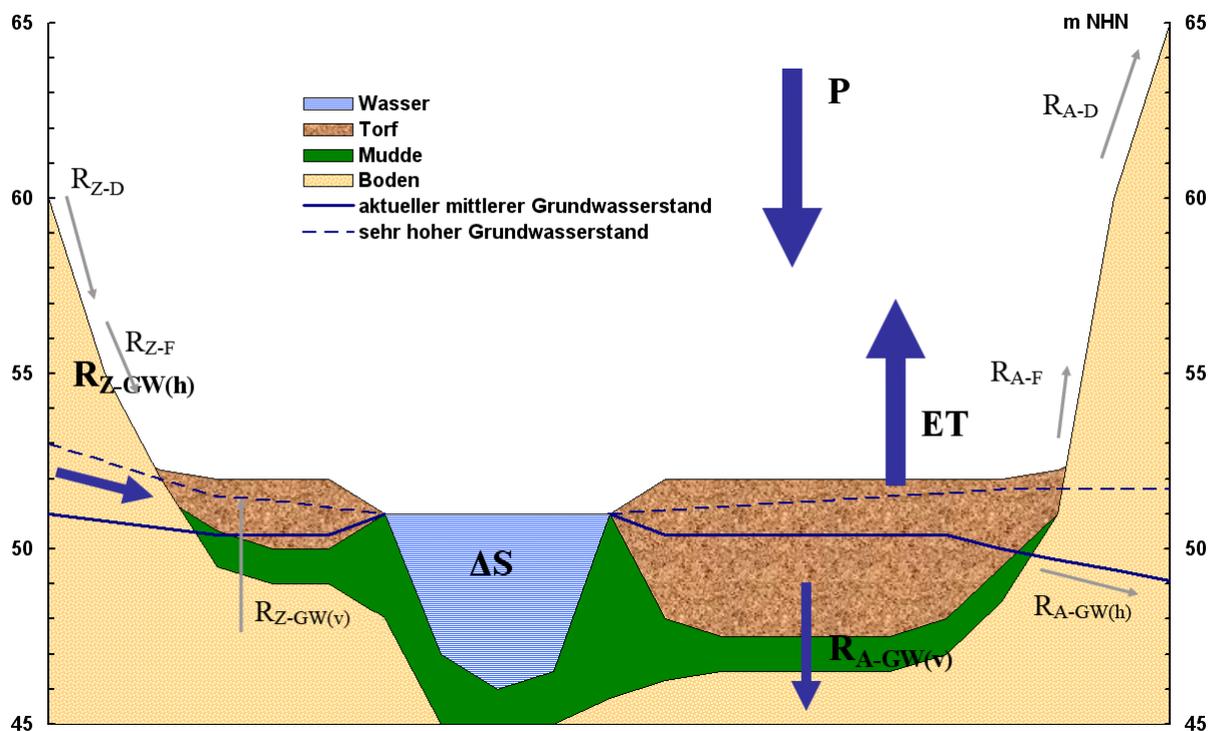


Abb. 4: Moorwasserbilanz des Luchsees.

## 5.4 Zur Änderung der hydrologischen Bedingungen in den letzten Jahren

Ursprünglich (Reihe 1961-1990) haben sich der (korrigierte) Niederschlag (655 mm/Jahr), die reale Verdunstung (688 mm/Jahr) und die grob geschätzten Randzuflüsse  $R_{Z-GW(h)}$  (33 mm/Jahr) in etwa die Waage gehalten bzw. es traten geringe Wasserüberschüsse auf. Wahrscheinlich traten bei hohen Grundwasserständen auch vertikale Zuflüsse  $R_{Z-GW(v)}$  in den Moorkörper über. Hohe Grundwasserstände waren in jüngerer Zeit (nach 1950) durch größere waldfreie Gebiete (Waldbrände, Reparationsholzungen) auf der Krausnicker Platte bedingt. Aber auch eine Jahrhunderte lange Nutzung größerer Areale des Brand-Sanders als Heidelandschaft westlich des Luchsees kann für höhere Grundwasserstände gesorgt haben.

Durch das allgemeine Absinken der Grundwasserstände auf der Hochfläche befindet sich aktuell der Grundwasserstand das gesamte Jahr deutlich unter dem Luchseewasserstand. Es treten geschätzte Versickerungsverluste von 95 mm/Jahr auf, bezogen auf die 50 ha große Moorfläche. Auch die reale Verdunstung ist durch die höhere Mitteltemperatur um rund 20 bis 30 mm/Jahr gestiegen. Der Niederschlag vor Ort hat sich geringfügig um 10 mm/Jahr erhöht. Es tritt also derzeit ein Defizit von etwa 120 mm/Jahr auf, was ein Sinken des Moorwasserstandes um 12 cm im Jahr bewirkt. Das entspricht der Beobachtung der letzten 4 Jahre und scheint auch den Abfall des

Wasserstandes in den letzten 15 Jahren um 1 m bis 1,5 m zu erklären.

## 5.5 Modellierung der Periode April 2006 bis 2010

Die Abbildung 5 zeigt den Versuch der Modellierung des Speicherinhaltes des Moores Luchsee als Wasserstand im Kolk. Dabei werden täglich die Bilanzglieder ermittelt und in der „Schüssel“ kumuliert.

Die GWM C1 (grün), welche unmittelbar am Moorrand im oberen Grundwasserbereich verfiltert ist, zeigt eine deutlich andere Dynamik als der Luchsee. Die Tiefstände treten z.B. um mehrere Monate versetzt später auf. Das unterstreicht die Annahme, dass der Luchsee keinen direkten, unbehinderten Kontakt zum Grundwasser aufweist.

Die erzielte gute Übereinstimmung zwischen Bilanzierung (rot) und Messung (blau) ist infolge der geschätzten Größen und mehrerer Annahmen fachlich nicht hinreichend begründet.

Man kann die einzelnen Annahmen untersetzen, indem man mehrere prägnante Zeitabschnitte genauer analysiert. Beispielsweise lassen sich niederschlagsfreie, verdunstungsarme Perioden (z.B. Winter) nutzen, um die Sickerverluste zu bestimmen. Jedoch bedarf es dazu genauerer Wasserstandsmessungen in Millimetergenauigkeit.

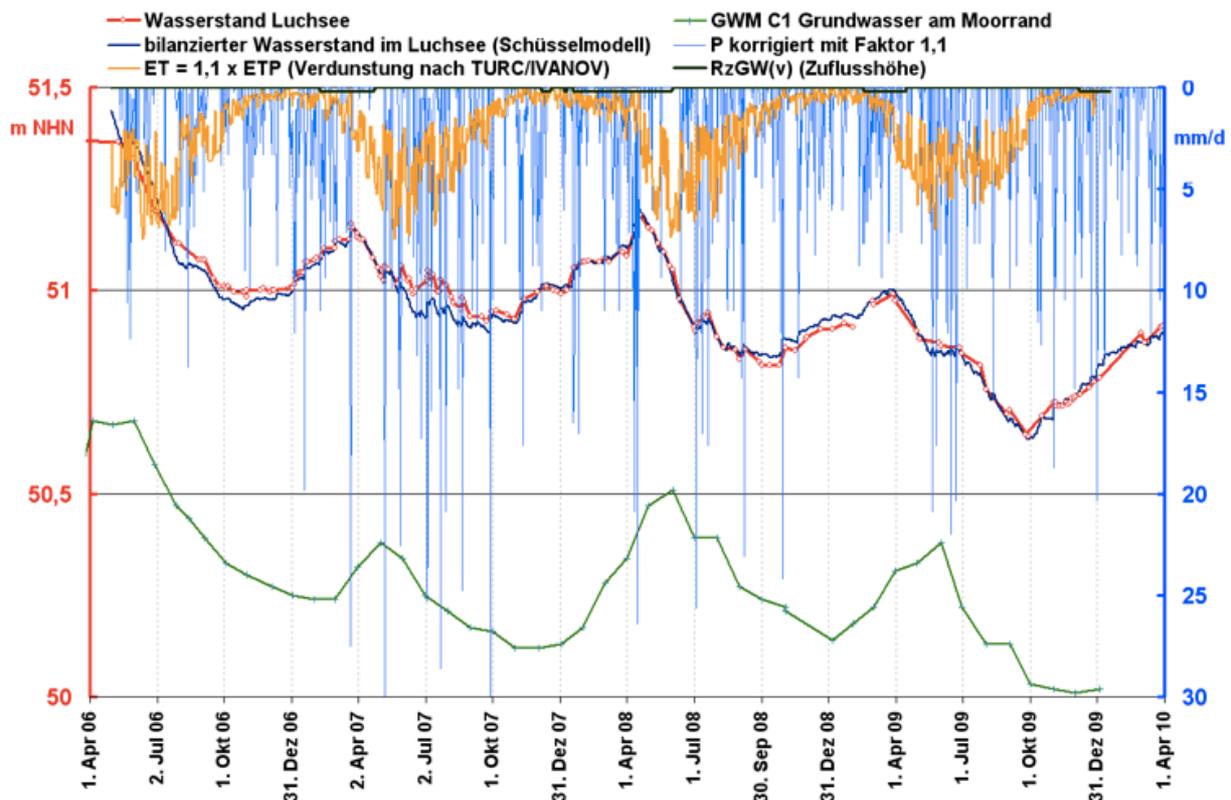


Abb. 5: Modellierung der „Schüssel“ des Luchsees.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich auf diesem Wege bei allen Personen, die mit fachlichen Diskussionen und technischer Hilfe zur Entstehung dieses Artikels beigetragen haben. Der Dank gilt insbesondere Peter Paulick und Frank Wehnert (Oberförsterei Krausnick) sowie Traugott Scheytt (TU Berlin), Hanno Meyer (AWI Potsdam), Antje Möller (UWB Dahme-Spreewald, Lübben) und Albrecht Bauriegel (LBGR Cottbus).

## 6. Literatur

- Juschus, O., 2003. Das Jungmoränenland südlich von Berlin – Untersuchungen zur jungquartären Landschaftsentwicklung zwischen Unterspreewald und Nuthe. Berliner Geographische Arbeiten 95. Berlin.
- Juschus, O., 2006. Zum geologischen Aufbau der „Verlandungszone“ des Luchsees. Bericht zum Limnologischen Praktikum des Instituts für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig am Luchsee vom 18.-21.05.2005, Leipzig.
- Lange, E., Illig, H., Illig, J., Wetzel, G., 1978. Beiträge zur Vegetations- und Siedlungsgeschichte der nordwestlichen Niederlausitz. Abhandlungen und Berichte des Naturkundemuseums Görlitz 52/3.
- LBGR – Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe des Landes Brandenburg, 2009. Hydrogeologische Stellungnahme Luchsee. Cottbus.
- LUA – Landesumweltamt Brandenburg, Regionalabteilung Süd, 2008. Wasserwerk Krausnick, Anfrage – Neubewertung der maximal zulässigen, mittleren Fördermenge (Q365) gemäß der hydrogeologischen und hydrologischen Randbedingungen. Cottbus.
- Mey, S., Albert, H., Hildebrand, C., Pfützner, B., 2008. Modellgestützte Analysen zur Stabilisierung des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet des Moores „Luchsee“. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 52, 310-318.
- Pfützner, B., Mey, S., 2007. Modellierung des Landschaftswasserhaushalts im Einflussbereich des Moores „Luchsee“. Studie im Auftrag des Wasser- und Bodenverbandes „Nördlicher Spreewald“. Berlin.
- Sobottka, J., Lehrkamp, H., 2001. Entwicklung innovativer Methoden zur Kontrolle einer nachhaltigen Bewirtschaftung von Feuchtgebieten und Wasserressourcen am Beispiel der Untersuchung von Moorgebieten im Bereich Krausnicker Berge. Bericht zur Strukturanpassungsmaßnahme Nr. 32004/00/962. Berlin.
- Succow, M., Joosten, H. (Hrsg.), 2001. Landschaftsökologische Moorkunde. Schweizerbart, Stuttgart.
- Strahl, J., 2007. Bericht zur pollenanalytischen Untersuchung der Bohrung Luchsee Lz1127, Land Brandenburg. Bericht des Landesamtes für Bergbau Geologie und Rohstoffe Brandenburg. Kleinmachnow.
- Timmermann, T., Succow, M., 2001. Kesselmoore. In: Succow, M., Joosten, H. (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde. S. 379-390. Schweizerbart, Stuttgart.
- Vött, A., 2000. Ökosystemveränderungen im Unterspreewald durch Bergbau und Meliorationsmaßnahmen – Ergebnisse einer angewandten ökosystemaren Umweltbeobachtung. Marburger Geographische Schriften 136. Marburg.

## Sauerstoffmangel im Tiefenwasser des oligotrophen Stechlinsees: Kann die Klimaerwärmung eine Rolle spielen?

Peter Kasprzak<sup>1</sup>, Rainer Koschel<sup>1</sup>, Arkadi Parparov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Abteilung Limnologie Geschichteter Seen, 16775 Neuglobsow, daphnia@igb-berlin.de; <sup>2</sup>Yigal Allon Kinneret Limnological Laboratory, PO Box 345, Tiberias, 14102, Israel

**Zusammenfassung:** Der oligotrophe Stechlinsee zeigt seit Mitte der 1990er Jahre eine fortschreitende Verschlechterung seiner Wasserqualität. Die Veränderungen betreffen u. a. den Sauerstoffgehalt des Tiefenwassers (>60 m), der in den vergangenen 15-20 Jahren deutlich zurückgegangen ist. Neben der ansteigenden Phytoplanktonbiomasse, deren Auswirkung auf den Sauerstoffgehalt empirisch nicht belegt werden kann, sind vor allem die Einflüsse des Klimawandels ins Blickfeld gerückt. Ansteigende Wassertemperaturen in oberflächennahen Schichten bei gleichzeitig konstanten Werten in der Tiefe lassen auf eine Erhöhung der Schichtungsstabilität und Schichtungsdauer schließen. Beide Faktoren können bei sonst unveränderten Bedingungen zum Rückgang der Sauerstoffkonzentration im Hypolimnion durch Verlängerung des Zehrungszeitraums beitragen.

### Oxygen decline in an oligotrophic deep lake (Lake Stechlin, Germany): Can climate warming be the ultimate reason?

**Abstract:** Lake Stechlin is one of the few remaining oligotrophic deep lakes in Germany's South-Baltic lake region. However, long-term monitoring indicated significant changes in structure and functioning of the ecosystem especially throughout the recent two decades. The most important changes are: (1) depletion of deep-water (>60 m) oxygen concentration, (2) substantial increase of hypolimnetic phosphorus concentration and (3) increase of chlorophyll *a* concentration. As one of the ultimate reasons, climatic warming is considered. Similar to air temperature records, over the past 50 years the surface temperature of the lake has increased by approximately 1.4 °C, while deep-water temperature remained constant. Growing differences in neighbouring water layers may indicate a higher stability of thermal stratification as well as stratification duration. Both factors can result in declining oxygen supply in the deep water of the lake.

#### 1. Einleitung

Der Stechlinsee (Fläche 4,23 km<sup>2</sup>, Volumen 98,7 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, mittlere Tiefe 23,3 m, maximale Tiefe 69,5 m) gehört zu den wenigen tiefen Seen des eiszeitlich geprägten nordostdeutschen Tieflandes, deren kalk-oligotropher Zustand bis in die Gegenwart hinein erhalten geblieben ist. Wegen seines außergewöhnlichen Charakters wurde er bereits 1938 unter Schutz gestellt, und ist heute zentrales Element eines Naturschutzgebietes von 8.670 ha Größe. Im Laufe der letzten 300 Jahre wurde zwei Mal nachhaltig in seinen Wasserhaushalt eingegriffen; zuletzt durch den Bau des Atomkraftwerkes Rheinsberg (AKW) zwischen dem Nehmitz- und dem Stechlinsee. Beide Seen dienten von 1966-1990 als Kühlwasserreservoir. Die enormen Abwärmemengen verbunden mit Nährstoffeinträgen veränderten zahlreiche physikalische, chemische und biologische Merkmale des Stechlinsees. Insgesamt jedoch hat das Gewässer die Periode seiner industriellen Nutzung relativ schadlos überstanden. Detaillierte Darstellungen finden sich in Casper (1985) und Koschel und Adams (2003a). Seit Mitte der 1990er Jahre zeigen sich nun besorgniserregende Veränderungen, welche den oligotrophen Charakter des Sees bedrohen. Dazu zählen vor allem kontinuierlich sinkende Sauerstoff- und zu-

nehmende Phosphorkonzentrationen im Tiefenwasser (Koschel und Adams, 2003b). Die Biomasse und Artenzusammensetzung des Phytoplanktons haben sich geändert (Padisák et al., 2009; IGB, unveröffentlicht). Die Jahresmittelwerte und Maxima der Chlorophyll *a*-Konzentration sind angestiegen (IGB, unveröffentlicht). Große Teile der ehemals weite Flächen bedeckenden Charecenwiesen sind verschwunden (van de Weyer et al., 2008). Schließlich bildet der Ciliat *Stentor amethystinus* seit etwa Mitte der 1990er Jahre Massenentwicklungen im Freiwasser, wie sie früher nicht beobachtet wurden (Casper, 1985; IGB, unveröffentlicht). Diese Veränderungen sind komplexer Natur und können im Rahmen unseres Betrags nicht erschöpfend behandelt werden. Wir wollen uns deswegen ausschließlich der Frage zuwenden, ob der Klimawandel eine Ursache für die sinkenden Sauerstoffwerte im Tiefenwasser des Stechlinsees sein kann. In der Literatur gibt es inzwischen zahlreiche Hinweise über Einflüsse der Klimaerwärmung auf die Wasserqualität von Seen (z. B. Schindler et al., 1990; Magnuson et al., 2006). Sie können sowohl direkt über den Wasserkörper (Gerten und Adrian, 2001) als auch indirekt über das Einzugsgebiet (Baines et al., 2000) wirksam werden. Dabei ist der Sauerstoffgehalt im Tiefen-

wasser thermisch geschichteter, oligotropher Seen ein besonders indikatives Kriterium (Livingstone, 1997).

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Der Stechlinsee (Breite 53°10' N, Länge 13°02' E) befindet sich am südlichen Rand der Mecklenburger Seenplatte, etwa 100 km nördlich von Berlin. Das Seebecken entstand während der Weichselkaltzeit vor ca. 12.000 Jahren. Klimatisch liegt das Gewässer im Übergangsbereich zwischen gemäßigt maritim/kontinental (Fraedrich et al., 2001). Er wird ausschließlich durch Grund- und Regenwasser gespeist. Die mittlere Verweildauer des Wassers beträgt etwa 61 Jahre (Holzbecher et al., 1999). Das Einzugsgebiet ist nahezu vollständig waldbedeckt. Lediglich die Siedlung Neuglobsow-Dagow und das Gelände des AKW Rheinsberg bilden eine Ausnahme. Eine Seespiegelabsenkung 1960 sowie ansteigende externe Nährstoffeinträge durch kommunale Abwässer, aus benachbarten eutrophen Seen, durch den Kühlwasserkreislauf und als atmosphärische Deposition waren die bedeutsamsten anthropogenen Einflüsse in der zweiten Hälfte des 20. Jhs. (Koschel, 1995; Holzbecher, 2003). Von 1966 bis 1990 diente der Stechlinsee gemeinsam mit dem benachbarten Nehmitzsee als Kühlwasserreservoir des AKW Rheinsberg. Letzterem wurden täglich etwa 300.000 m<sup>3</sup> Wasser entnommen und um ca. 10 °C erwärmt in den Stechlinsee eingeleitet. Über einen Verbindungskanal floss das Wasser zurück. Im Mai 1990 wurden der Betrieb des KKW und damit auch der Kühlwasserkreislauf eingestellt. Neben dieser Nutzung für industrielle Zwecke ist der Stechlinsee ein Ort vielfältiger Erholungsformen, wichtiges Naturschutzgebiet (FFH-Gebiet, europäisches Vogelschutzgebiet) und seit 1959 Schwerpunkt gewässerökologischer Forschung (Koschel und Adams, 2003b; Lütkepohl und Flade, 2004; Tab. 1).

**Tab. 1:** Topographische, morphometrische, hydrologische und chemische Merkmale des Sechlinsees (aus Koschel und Adams, 2003b).

|                              |                                     |           |
|------------------------------|-------------------------------------|-----------|
| Oberfläche                   | km <sup>2</sup>                     | 4,23      |
| Volumen                      | 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>      | 98,7      |
| Maximale Tiefe               | m                                   | 69,5      |
| Mittlere Tiefe               | m                                   | 23,3      |
| Uferlänge                    | km                                  | 16,1      |
| Einzugsgebiet                | km <sup>2</sup>                     | 12,6      |
| Waldanteil im Einzugsgebiet  | %                                   | 95        |
| Verweildauer des Wassers     | Jahre                               | >40       |
| SRP-Konzentration            | µg L <sup>-1</sup>                  | 2,5       |
| TP-Konzentration             | µg L <sup>-1</sup>                  | 13,8      |
| NO <sub>3</sub> -Stickstoff  | µg L <sup>-1</sup>                  | 21,3      |
| NH <sub>4</sub> -Stickstoff  | µg L <sup>-1</sup>                  | 39,9      |
| planktische Primärproduktion | g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> | 121       |
| externe Phosphorlast (SRP)   | g P m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> | 0,04-0,06 |

### 2.2 Methoden

Regelmäßige Temperaturmessungen begannen 1958. Zunächst wurden Thermometer benutzt, später kamen elektrische Messsonden zum Einsatz (Richter, 1997; Deutscher Wetterdienst; IGB, unveröffentlicht). Sauerstoffmessungen reichen bis in die 1950er Jahre zurück. In diesem Beitrag werden jedoch nur Werte ab 1972 benutzt. Bis 1990 wurde sowohl mit der Winkler-Methode als auch mit Elektroden gearbeitet (Mothes et al., 1985). Seit 1990/91 wurden nur noch Elektroden verwendet (IGB, unveröffentlicht). In Anlehnung an Wetzel (2001) wurden die jährlichen Sauerstoffzehrungsraten für die Tiefe von 60 m durch lineare Regression der verfügbaren Jahresreihen berechnet. Ausgewählt wurden Messwerte des Zeitraums März/April bis November/Dezember; also aus der Periode unmittelbar vor dem Beginn der thermischen Schichtung bis zu ihrer nahezu vollständigen Auflösung.

### 3. Ergebnisse

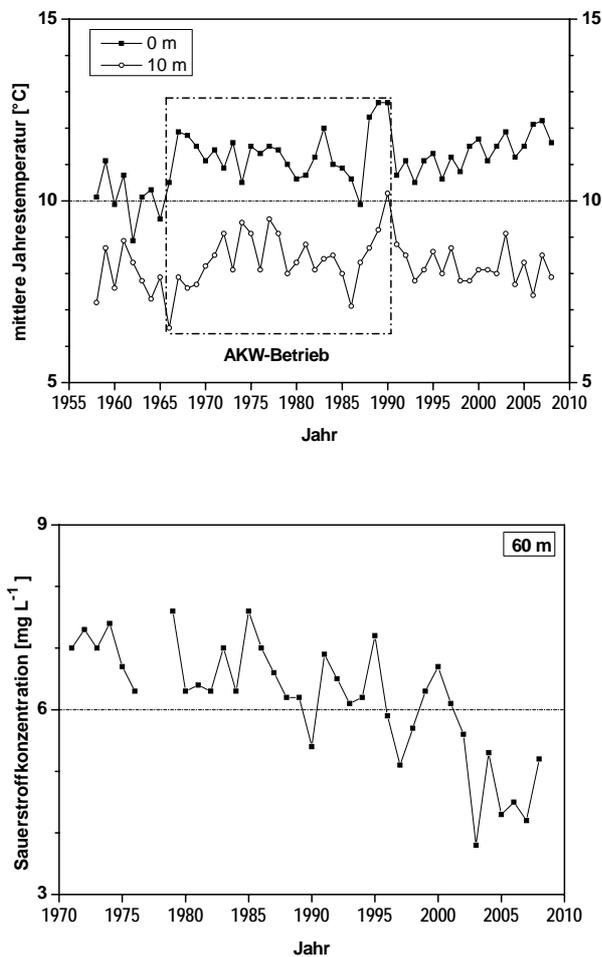
Abbildung 1 (oben) zeigt die Zeitreihe der mittleren Jahrestemperaturen des Stechlinsees für die Tiefen von 0 und 10 m. Drei charakteristische Merkmale sind erkennbar. An der Oberfläche stiegen die Werte über den Beobachtungszeitraum von 50 Jahren um etwa 1,4 °C an. In 10 m Tiefe ist dieser Trend nicht mehr nachweisbar. Im Gegensatz dazu lässt sich der Abwärmeeinfluss des AKW in beiden Wasserschichten deutlich ablesen. Während also die Wirkung des Klimasignals auf die oberflächennahen Horizonte des Gewässers beschränkt bleibt, reichten die Auswirkungen des Kühlwasserkreislaufs bis in tiefere Schichten hinab.

Abbildung 1 (unten) bringt die langfristige Entwicklung der Sauerstoffkonzentration gegen Ende der thermischen Schichtung (November/Dezember) in 60 m Tiefe. Die Werte sind generell durch eine starke Streuung gekennzeichnet, aber bis in die erste Hälfte der 1990er Jahre ist kein Trend erkennbar. Erst danach nahm das Sauerstoffangebot deutlich ab und liegt seit dem Jahr 2002 immer unter 6 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>. 2003 wurde die bisher niedrigste Konzentration von <4 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> festgestellt.

Abbildung 2 (oben) zeigt die Sauerstoffzehrungsraten in 60 m Tiefe in der Periode von 1972-2007. Zwar deuten die Ergebnisse nach 1990 auf einen geringfügig zunehmenden Trend, aber der Anstieg der Regressionsgeraden ist nicht signifikant.

Wenn man nun mit Hilfe der mittleren Sauerstoffzehrungsraten (0,0326 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) aus 60 m Tiefe den Zeitraum berechnet, der verstreichen müsste, um bei einer Ausgangskonzentration von 12,8 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> die jeweils festgestellte Minimumkonzentration vor Auflösung der thermischen Schichtung zu erreichen, dann lassen sich zwei Phasen unterscheiden (Abb. 2, Mitte und unten). Von 1972-1992 variiert die Länge der kalkulierten Perioden sehr stark, aber ein Trend ist nicht nachweisbar. Seit 1992 jedoch nehmen die Werte signifikant zu. Um die fortschreitenden Sauerstoffminima durch die konstante Zehrungsraten erklären zu können, müsste also (bei sonst unveränderten Bedingungen) ein beständig ansteigender Zeitraum der thermischen Schichtung des

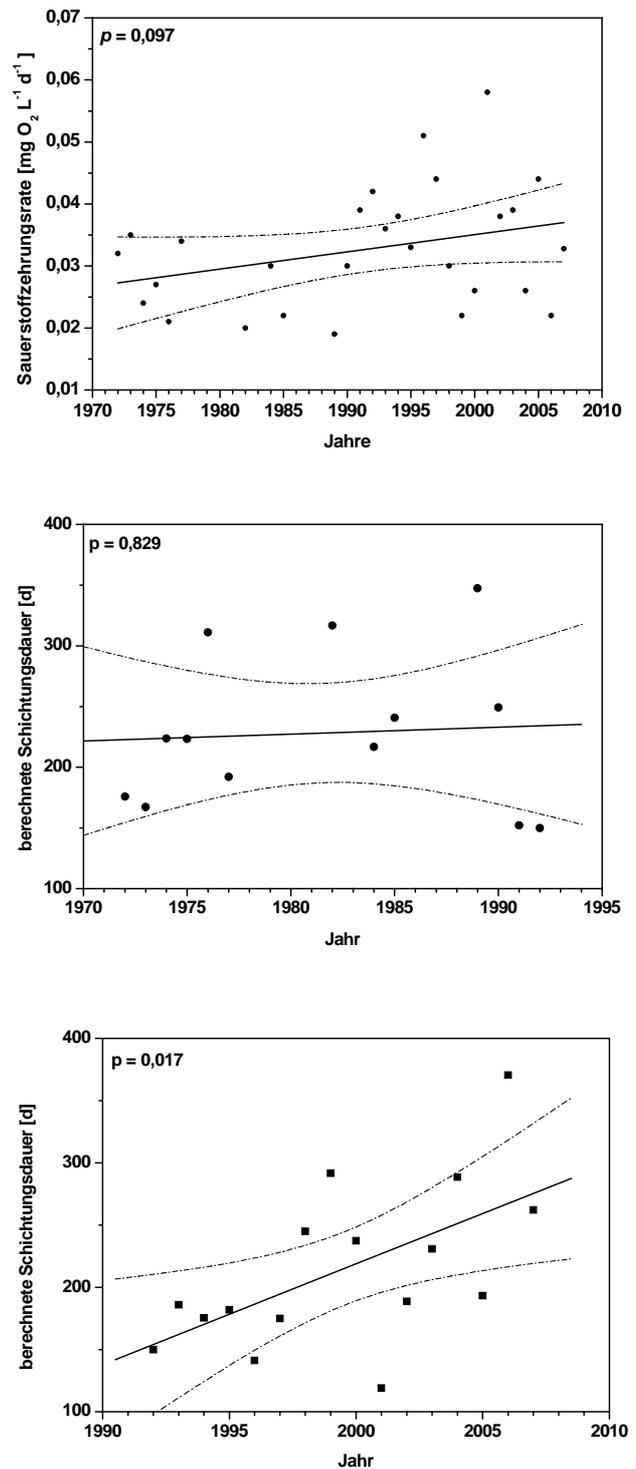
Stechlinsees angenommen werden. Im Vergleich der beiden Regressionsgeraden (1972-92/1992-2007) ergäbe sich eine rechnerische Zunahme der thermischen Schichtung von etwa 220 auf 280 Tage.



**Abb. 1:** Stechlinsee. Zeitreihen der mittleren Jahrestemperatur (1958-2008) in 0 und 10 m Tiefe (oben) und der Sauerstoffkonzentration (1972-2008) in 60 m Tiefe (unten) gegen Ende der thermischen Schichtung (November/Dezember).

#### 4. Diskussion

Die Entwicklung der Wasserqualität des Stechlinsees in den letzten 15-20 Jahren ist u. a. durch den beständigen Rückgang der Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser (>60 m) gekennzeichnet. Steigende Defizite können durch mikrobiellen Abbau vermehrt sedimentierender, organischer Materials entstehen, aber auch durch Verlängerung der thermischen Schichtung (Livingstone und Imboden, 1996). Für den Stechlinsee werden seit Mitte der 1990er Jahre zunehmende Chl. *a*-Konzentrationen und Phytoplanktonbestände festgestellt (IGB, unveröffentlicht). Angaben zur Sedimentation existieren (Mothes und Proft, 1985; IGB, unveröffentlicht), jedoch nicht für den kritischen Zeitraum seit Mitte der 1990er Jahre, so dass die Bedeutung dieser Einflussgröße nicht quantifiziert werden kann. Die zeitlich invarianten Sauerstoffzehrungsraten sprechen jedoch nicht für eine signifikante Zunahme der Sedimentation (Gonsiorczyk et al., 2002).



**Abb. 2:** Stechlinsee. Zeitreihe der Sauerstoffzehrungsrate in 60 m Tiefe (oben) und die daraus berechneten, notwendigen Perioden, um die gemessenen Sauerstoffkonzentrationen am Ende der thermischen Schichtung des jeweiligen Jahres zu erreichen, getrennt nach den Zeiträumen von 1972-1992 (Mitte) und 1992-2007 (unten). Die jährlichen Zehrungsraten wurden durch lineare Regression der Sauerstoffmesswerte aus 60 m Tiefe von März/April bis November/Dezember berechnet. Die mittlere Sauerstoffzehrungsrate im Beobachtungszeitraum betrug  $0,0326 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ .

Unzweifelhaft jedoch ist der lang anhaltende Anstieg der mittleren Jahrestemperaturen in den oberflächennahen Wasserschichten (0 - <10 m) um etwa 1,4 °C bei gleichzeitiger Konstanz in tieferen Bereichen ( $\geq 10$  m). Verursacht werden solche Veränderungen über lange Zeiträume durch die Klimaerwärmung (Magnuson et al., 2006), wobei im Fall des Stechlinsees die Abwärme des AKW Rheinsberg als modifizierender Faktor hinzu kommt (Richter, 1997). Anwachsende Temperaturunterschiede zwischen benachbarten Wasserschichten erlauben aus physikalischen Gründen zwei Schlussfolgerungen: (1) Die Stabilität der thermischen Schichtung nimmt zu (Straile et al., 2003), und (2) die Dauer der Schichtung kann sich verlängern (Gerten und Adrian, 2001).

Für das Klima Mitteleuropas, und damit auch für die Seen, ist die Nordatlantische Oszillation (NAO) das bestimmende, großräumige Klimaphänomen (Hurrell, 1995; Bleckner et al., 2007). Gerstengarbe und Werner (2007) haben gezeigt, dass parallel zu ansteigenden NAO-Indizes die Jahresmittel der Lufttemperaturen in Deutschland von 1971-2000 um 1,2 °C angestiegen sind. In Stechlinseegebiet beträgt die Zunahme seit 1951 ca. 1,6 °C, und wird in den kommenden 50 Jahren vermutlich nochmals um den gleichen Betrag steigen (Postdam-Institut für Klimafolgenforschung, ohne Jahr). Veränderliche Lufttemperaturen, so schließen Maher et al. (2005) aus detaillierten Untersuchungen an einem karelischen See, sind vermutlich die wichtigste Einflussgröße des Wärmehaushalts.

Hondzo und Stefan (1993) haben in einer ausführlichen Modellstudie den Einfluss des Klimawandels auf die Temperatureigenschaften von drei Seenklassen verschiedener Größe, Tiefe und trophischem Status untersucht. Nach dieser Klassifikation gehört der Stechlinsee zur Gruppe mittelgroßer (0,4-5,0 km<sup>2</sup>), tiefer ( $Z_{\max} > 24$  m), mesotropher Seen (Carlsons TSI 1,8-4,5), deren Temperaturregime in einer spezifischen Weise vom Klimawandel betroffen ist (und zukünftig sein wird), die signifikante Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt des Tiefwassers haben kann. Hauptgrund ist die kurze effektive Streichlänge des Windes im Verhältnis zur relativ großen Tiefe.

Der Wärmetransport von der Oberfläche in die Tiefe von Seen erfolgt vor allem durch windinduzierte, turbulente Durchmischung. Kleinere Angriffsflächen des Windes führen zu minderem Energieeintrag und damit zu geringerer vertikaler Durchmischung. Während sich die Temperaturen dieser Seen in der durchmischten Zone um ca. 2 °C erhöhen, bleiben sie im Tiefenwasser nahezu unverändert oder können sogar geringfügig zurückgehen. Auf diese Weise führt der Klimawandel zu einer stabileren Schichtung, die früher im Jahr beginnt und erst später endet. Im Stechlinsee lässt sich dieses Phänomen bereits aus dem zeitlichen Verlauf der Temperatursprungschicht vor und während des AKW-Betriebs erkennen (Richter, 1985). Dadurch kann der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser dieser Seen ohne Anstieg ihrer Produktivität weiter zurückgehen.

Die o. g. Autoren haben in ihrer Studie für den genannten Seentyp mögliche Verlängerungen der thermischen Schichtung von bis zu 40 (!) Tagen berechnet. Dieses

Ergebnis liegt in der Nähe des Wertes (50 Tage), der für den Stechlinsee geschätzt wurde, um die ansteigenden Sauerstoffdefizite der Periode von 1992-2007 bei gleichbleibenden Sauerstoffzehrungsraten erklären zu können. Beim gegenwärtigen Auswertungsstand der Temperaturbeobachtungen ist jedoch keine empirische Verifizierung dieses Befundes möglich. Andere Autoren (Robertson und Ragotzkie, 1990) haben deutlich geringere Zunahmen der Schichtungszeit berechnet (ca. 5-10 Tage). Allerdings gehörte der von ihnen untersuchte Lake Mendota zu den großen, jedoch relativ flachen, thermisch geschichteten Seen, bei denen geringere Zuwächse der Schichtungszeit erwartet werden dürfen.

## Danksagung

Wir bedanken uns bei den zahlreichen Kolleginnen und Kollegen, die durch ihre unermüdliche Arbeit über Jahrzehnte hinweg dazu beigetragen haben, den hier vorgelegten Datensatz verwenden zu können. Dank auch dem Deutschen Wetterdienst für die Bereitstellung unveröffentlichter Daten.

## 5. Literatur

- Baines, S. B., Webster, K. E., Kratz, T. K., Carpenter, S. R., Magnuson, J. J., 2000. Synchronous behavior of temperature, calcium, and chlorophyll in lakes of northern Wisconsin. *Ecology* 81, 815-825.
- Bleckner, T., Adrian, R., Livingstone, D. M., Jennings, E., Weyhenmeyer, G. A., George, D. G., Jankowski, T., Järvinen, M., Aonghusa, C. N., Nöges, T., Straile, D., Teubner, K., 2007. Large-scale climatic signatures in lakes across Europe – a meta-analysis. *Global Change Biology* 13, 1314-1326.
- Casper, S. J., 1985. Lake Stechlin – A temperate oligotrophic lake. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht.
- Fraedrich, K., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P. C., 2001: Climate shifts during the last century. *Climatic Change* 50, 405-417.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 2007. Der rezente Klimawandel. In: Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.): *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. S. 34-43. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Humboldt-Universität zu Berlin.
- Gerten, D., Adrian, R., 2001. Differences in the persistency of the North Atlantic Oscillation signal among lakes. *Limnology and Oceanography* 46, 448-455.
- Gonsioreczyk, T., Casper, P., Koschel, R., 2003. Long-term development of the phosphorus accumulation and oxygen consumption in the hypolimnion of oligotrophic Lake Stechlin and seasonal variations in the pore water chemistry of the profundal sediments. *Archiv für Hydrobiologie Special Issues in Advanced Limnology* 58, 73-86.
- Holzbecher, E., Nützmann, G., Ginzler, G., 1999. Water and component mass balances in the catchment of Lake Stechlin. *International Association of Hydrological Sciences* 258, 37-64.
- Holzbecher, E., 2003. Effects on subsurface watersheds from the construction of the Polzow Canal. *Archiv für Hydrobiologie Special Issues in Advanced Limnology* 58, 25-36.
- Hondzo, M., Stefan, H. G., 1993. Regional water temperature characteristics of lakes subjected to climate change. *Climatic Change* 24, 187-211.
- Hurrell, J., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation – regional temperatures and precipitation. *Science* 268, 676-679.

- Koschel, R., 1995. Manipulation of whole-lake ecosystems and long-term limnological observations in the Brandenburg-Mecklenburg Lake District. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* 80, 507-518.
- Koschel, R., Adams, D. D. (Hrsg.), 2003a. Lake Stechlin – an approach to understanding an oligotrophic lowland lake. *Archiv für Hydrobiologie Special Issues in Advanced Limnology* 58.
- Koschel, R., Adams, D. D., 2003b. Preface – An approach to understanding a temperate oligotrophic lowland lake (Lake Stechlin, Germany) *Archiv für Hydrobiologie Special Issues in Advanced Limnology* 58, 1-9.
- Livingstone, D. M., 1997. An example of the simultaneous occurrence of climate-driven “sawtooth” deep-water warming/cooling episodes in several Swiss lakes. *Verhandlungen des Internationalen Vereins für Limnologie* 26, 822-828.
- Livingstone, D. M., Imboden, D. M., 1996. The prediction of hypolimnetic oxygen profiles – a plea for a deductive approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53, 924-932.
- Lütkepohl, M., Flade, M. (Hrsg.), 2004. Das Naturschutzgebiet Stechlin. *Natur und Text*, Rangsdorf.
- Magnuson, J. J., Benson, B. J., Lenters, J. D., Robertson, D. M., 2006. Climate-driven variability and change. In: Magnuson, J. J., Kratz, T. K., Benson, B. J., (Hrsg.): *Long-term dynamics of lakes in the landscape*. Oxford University Press, Oxford.
- Maher, O. A., Bertacchi, C., Bengtsson, L., 2005. Comparison between two extreme NAO winters on the thermal regime of Lake Vendyurskoe, Kareila. *Journal of Hydrometeorology* 6, 775-783.
- Mothes, G., Koschel, R., Proft, G., 1985. The chemical environment. In: Casper, S. J. (Hrsg.): *Lake Stechlin – A temperate oligotrophic lake*. S. 87-128. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht.
- Mothes, G., Proft, G., 1985. Sediments and sedimentation. In: Casper, S. J. (Hrsg.): *Lake Stechlin – A temperate oligotrophic lake*. S. 375-399. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht.
- Padisák, J., Hajnal, É., Krienitz, L., Koschel, R., 2009. The importance of winter phytoplankton composition in two contrasting lakes – a deep stratifying and a shallow polymictic. *Verhandlungen des Internationalen Vereins für Limnologie* 30, 757-760.
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, ohne Jahr. Klimadaten und Szenarien für die Schutzgebiete der Bundesländer. [http://www.pik-potsdam.de/~wrobel/sg-klima-3/landk/popups/13/sgd\\_t3\\_1280.html](http://www.pik-potsdam.de/~wrobel/sg-klima-3/landk/popups/13/sgd_t3_1280.html)
- Richter, D., Koschel, R., 1985. The hydrometeorology of the Lake Stechlin area. In: Casper, S. J. (Hrsg.): *Lake Stechlin – A temperate oligotrophic lake*. S. 41-86. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht.
- Richter, D., 1997. Das Langzeitverhalten von Niederschlag und Verdunstung und dessen Auswirkung auf den Wasserhaushalt des Stechlinsees. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 201, Offenbach.
- Robertson, D. M., Ragotzkie, R. A., 1990. Changes in the thermal structure of moderate to large sized lakes in response to changes in air temperature. *Aquatic Sciences* 52, 360-380.
- Schindler, D. W., Beaty, K. G., Fee, E. J., Cruikshank, D. R., DeBryn, E. R., Findlay, D. L., Linsey, G. A., Shearer, J. A., Stainton, M. P., Turner, M. A., 1990. Effects of climatic warming on lakes of the central boreal forest. *Science* 250, 967-970.
- Straile, D., Jöhnk, K., Rossknecht, H., 2003. Complex effects of winter warming on the physicochemical characteristics of a deep lake. *Limnology and Oceanography* 48, 1432-1438.
- Van de Weyer, K., Tigges, P., Raape, C., Becker, E., 2008. *Investigatives Monitoring der submersen Makrophyten zur Vorbereitung von Maßnahmen zur Einhaltung des Verschlechterungsverbots am Großen Stechlinsee*. Unveröffentlichter Bericht, Landesumweltamt Brandenburg.
- Wetzel, R. G., 2001. *Limnology – Lake and River Ecosystems* Elsevier Academic Press, San Diego.

## Trocknet der Spreewald aus? Anpassungen des Wasserhaushaltes an aktuelle und zukünftige Herausforderungen im Rahmen eines Naturschutzgroßprojektes

Christine Kehl

Zweckverband Gewässerrandstreifenprojekt Spreewald, Kirchplatz 1, 03222 Lübbenau, zvgrps@web.de

**Zusammenfassung:** Naturschutzgroßprojekte sind Bestandteile eines Förderprogramms des Bundesumweltministeriums. Sie haben zum Ziel, die ökologische Qualität großflächiger natürlicher und naturnaher Landschaftsteile von herausragender überregionaler Bedeutung gegen Gefahren zu sichern und sie zu verbessern. Die Förderkriterien treffen auf den Spreewald zu. Das Niederungsgebiet südöstlich von Berlin weist ein weitverzweigtes Gewässernetz von ca. 1000 km auf und ist als Binnendelta eines Flusses einmalig für Deutschland. Es wurde 1990 als Biosphärenreservat ausgewiesen. Der Spreeverlauf ist durch Eingriffe des Menschen geprägt. In jüngerer Zeit sind die Komplexmelioration und der großflächige Braunkohleabbau im Lausitzer Revier zu nennen. Hinzu kommt, dass sich die Klimabedingungen in Brandenburg in Zukunft verschärfen dürften. Prognosen zeigen, dass trockenere und wärmere Sommer häufiger werden. Sie führen zu schlechterer Wasserqualität und verringerter Fließgeschwindigkeit in den Flüssen des Spreewaldes. Die „Jahrhundertsommer“ 2003 und 2006 haben diese Prognosen bestätigt. Ziel des Projekts ist der Erhalt und die Wiederherstellung natürlicher und naturnaher Bestandteile in der Kulturlandschaft des Spreewaldes durch die Stabilisierung des Wasserhaushaltes auch vor dem Hintergrund des Klimawandels. Die Projektlaufzeit beträgt 13 Jahre und endet 2013.

### Is the Spreewald wetland drying out? Adaptation of the landscape water budget on future challenges by means of a large nature conservation project

**Abstract:** Large-scale nature conservation projects are components of a support programme of the German Federal Ministry for the Environment. Their aim is to protect and improve the ecological quality of large-scale natural and semi-natural landscape elements of outstanding supra-regional importance. Their support criteria apply to the Spreewald. The lowland area southeast of Berlin features a ramified water body network of approximately 1000 km. As an inland river delta it is unique in Germany. In 1990 it was designated as a biosphere reserve. The course of the River Spree in the recent past. In addition, climate conditions in Brandenburg will get worse in the future; prognoses show that drier and warmer summers will occur more frequently. This will lead to lower water quality and reduced flow velocity in the streams of the Spreewald. The ‘hundred-year summers’ in 2003 and 2006 confirmed these prognoses. The aim of this project is the preservation and restoration of natural and semi-natural components of the cultural landscape of the Spreewald by stabilising the water balance – also in the context of climate change. The project will run for 13 years and end in 2013.

### 1. Einführung

Naturschutzgroßprojekte – so auch Gewässerrandstreifenprojekte – sind Bestandteile eines Förderprogramms des Bundesumweltministeriums. Sie haben zum Ziel, die ökologische Qualität großflächiger natürlicher und naturnaher Landschaftsteile von herausragender überregionaler Bedeutung dauerhaft gegen Gefahren zu sichern und sie letztendlich zu verbessern. Im Rahmen der „Förderrichtlinie für Naturschutzgroßprojekte“ wurden seit 1979 in Deutschland insgesamt 73 Naturschutzgroßprojekte mit einer Gesamtfläche von mehr als 2.750 km<sup>2</sup> in die Förderung aufgenommen. Zurzeit laufen bundesweit 28 Projekte (BfN, 2010).

**Abb. 1:** Der Spreewald liegt ca. 80 km südöstlich von Berlin in Brandenburg.



Die Förderkriterien treffen auf den Spreewald zu. Das ca. 75 km lange und 15 km breite Niederungsgebiet südöstlich von Berlin weist ein weitverzweigtes Gewässernetz von ca. 1000 km auf. Es ist als Binnendelta eines Flusses einmalig für Deutschland. Die hier erhaltene Kulturlandschaft wurde 1990 als Biosphärenreservat Spreewald ausgewiesen, um einen langfristigen Schutz und eine nachhaltige Entwicklung des Gebietes sicher zu stellen.

Der Spreewald weist eine reiche Pflanzenwelt auf. Bisher wurden fast 1.600 höhere Pflanzenarten gefunden. Über 585 vorkommende Farn- und Blütenpflanzen stehen auf der Roten Liste der vom Aussterben bedrohten und gefährdeten Arten ([www.mugv.brandenburg.de](http://www.mugv.brandenburg.de)). Dazu gehören die Sumpfdotterblume (*Caltha palustris* L.) und das Duft-Mariengras (*Hierochloe odorata* L.), eine FFH-Art. Eine Vielzahl gefährdeter oder vom Aussterben bedrohter Tierarten leben hier noch. See- und Fischadler, Schwarz- und Weißstorch, Eisvogel, Wiedehopf, Fischotter und Biber geben die Komplexheit der miteinander verzahnten Lebensraumtypen – wie zum Beispiel die der feuchten Wälder, Feucht- und Nasswiesen oder ausgedehnter Wasserflächen – wieder (MUGV, 2010a, 2010b).

Wie der gesamte Spreeverlauf ist auch der Bereich des Spreewaldes durch zahlreiche Eingriffe des Menschen geprägt. In jüngerer Zeit sind hier die Komplexmelioration und der großflächige Braunkohleabbau im Lausitzer Revier zu nennen. Dieser hatte bis in die 1990er Jahre zu einer Erhöhung der Abflüsse im Gebiet durch Einleitung von Sumpfungswässern geführt. Nach der Stilllegung der Tagebaue haben sich die Wassermengen, die den Spreewald durchfließen, drastisch reduziert. Folge: Die durch erhöhte Abflüsse eingetieften und verbreiterten Gewässerprofile führen bei den geringeren Wassermengen zu einer drastischen Reduktion der Fließgeschwindigkeit. Arten, die an natürliche Fließgeschwindigkeiten angepasst sind, bekommen Probleme. Dazu gehört auch die Quappe, der frühere „Brotfisch“ des Spreewaldes, der heute als Logo dem Naturschutzgroßprojekt dient.



Abb. 2: Das Logo des Projektträgers ist die Quappe.

Der Fischreichtum des Spreewaldes war früher bekannt. Durch Flussbegradigungen, Ausbaumaßnahmen und Stauregulierungen sind Fischarten der Bäche und Flüsse vom Artenrückgang betroffen. Noch gibt es neben der Quappe mit Bachneunauge, Hasel, Döbel und Steinbeißer weitere rheophile Arten, die an strömendes Wasser gebunden sind (GRPS, 2003).

Zu den Ausbaumaßnahmen kommt, dass sich die Klimabedingungen in Brandenburg in Zukunft verschärfen dürften. Prognosen zeigen, dass trockenere und wärmere Sommer – wie sie 2003 und 2006 bereits zu verzeichnen waren – häufiger werden (Abb. 3). Sie führen zu schlechterer Wasserqualität und verringerter Fließgeschwindigkeit in den Fließen des Spreewaldes (Abb. 4). Artenrückgang und absinkende Grundwasserstände sind die Folge.

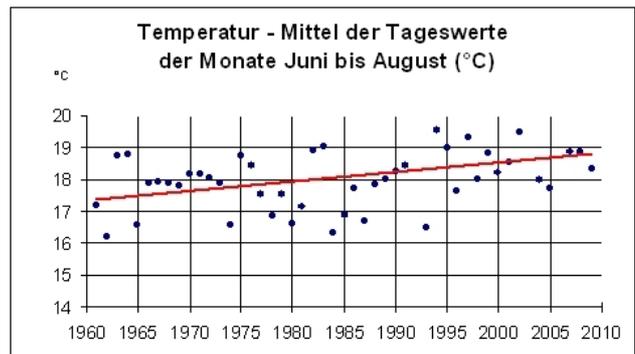


Abb. 3: Anstieg der sommerlichen Mitteltemperaturen (PIK, 2010).

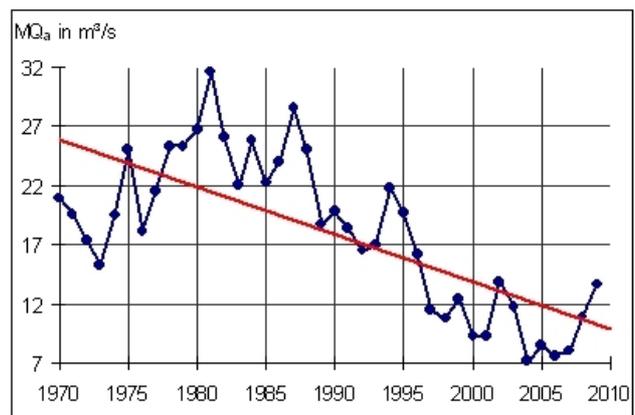


Abb. 4: Die Abflussganglinie am Pegel Leibsch (Unterepegel), Unterspreewald 1970-2009. Der Spreewald muss mit weniger Wasser auskommen, besonders seit dem Ende der Einleitung von Sumpfungswässern (LUA, 2010).

## 2. Das Naturschutzgroßprojekt

Ziel des Projekts ist der Erhalt und die Wiederherstellung natürlicher und naturnaher Bestandteile in der Kulturlandschaft des Spreewaldes, vor allem durch die Stabilisierung des Wasserhaushaltes.

Dabei werden zwei Strategien verfolgt:

- Für die Fließgewässer soll ein System ökologisch durchgängiger kleinerer Nebengewässer, die prioritär als Lebensraum für Fließgewässerorganismen dienen, entwickelt werden. Diese sollen auch in Niedrigwasserzeiten noch eine ausreichende Fließgeschwindigkeit aufweisen.
- Für den Wasserrückhalt (Moorschutz) sollen überdimensionierte Entwässerungssysteme zurückgebaut, Vernässungsflächen gesichert und Überflutungsräume geschaffen werden.

Seit 2005 wurden im Rahmen des Naturschutzgroßprojektes bereits viele wasserbaulichen Maßnahmen durchgeführt, die dieser Strategie zum Erfolg verhelfen sollen. Weitere folgen bis zum voraussichtlichen Projektende 2013 (Tab. 1). Zur Erläuterung der Projektstrategie werden zwei bereits realisierte Vorhaben im Folgenden näher charakterisiert.

### 2.1 Beispiel „Revitalisierung von Janks Buschfließ“

Janks Buschfließ befindet sich im Biosphärenreservat Spreewald westlich der Ortschaft Burg Kauper und verläuft von nordöstlicher Richtung vom Burg-Lübbener-Kanal abzweigend in südwestliche Richtung zum Leiper Graben (Abb. 5). Im Rahmen der Melioration wurde das

strukturreiche und gewundene Spreewaldfließ im Oberlauf abgeschnitten.

Ziele:

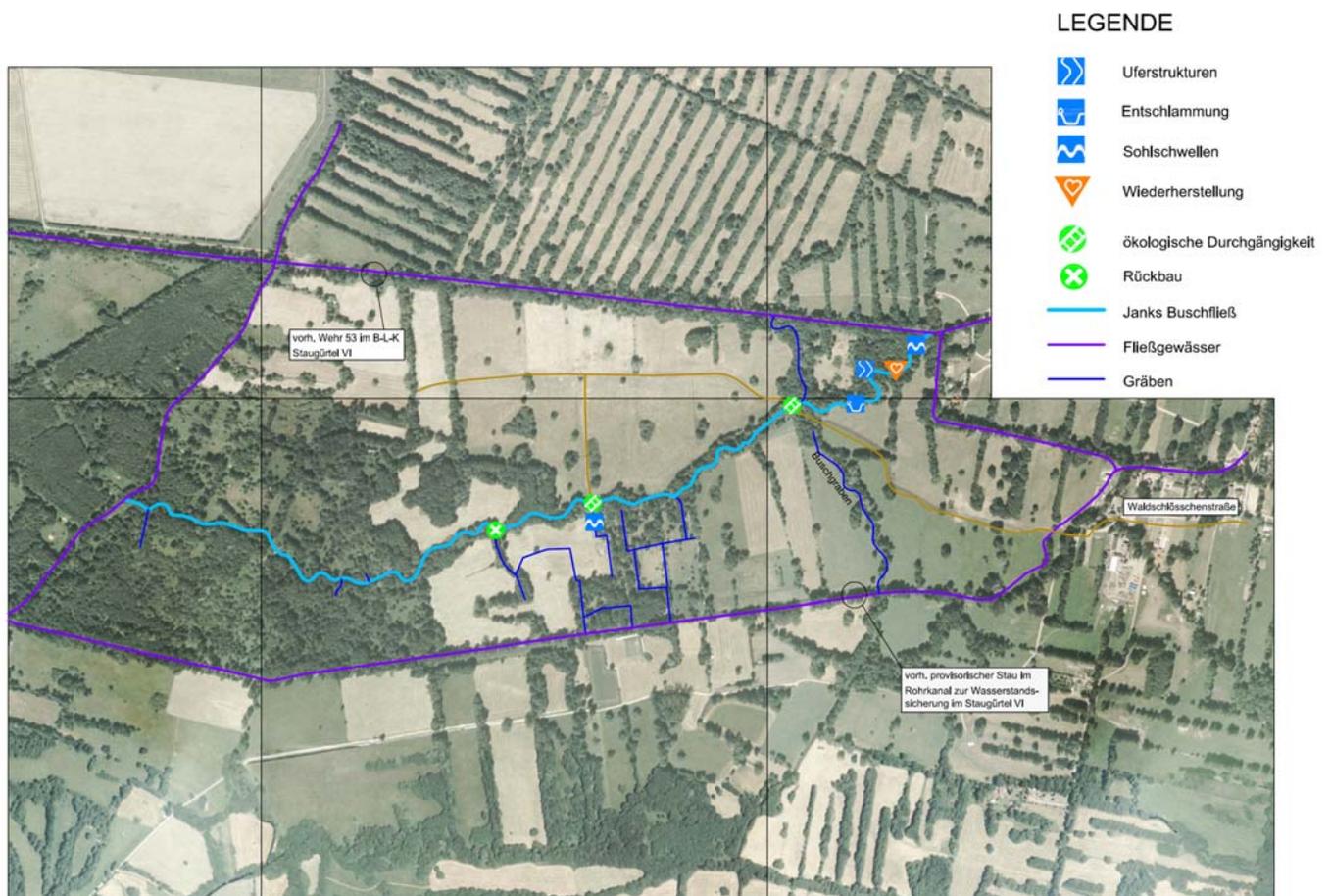
- Wiederanbindung an das Gewässernetz und Entwicklung als ökologisch prioritäres Fließgewässer mit einer Länge von 2.100 m;
- Aufhebung von Wanderbarrieren und Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit;
- Verbesserung der Sohlstruktur im Unterlauf;
- Erhöhung des Biotopverbundes im Oberspreewald.

Inhalte des Vorhabens:

- Wiederanbindung des vom Gewässer abgetrennten Oberlaufes vom Burg-Lübbener-Kanal bis zur ersten Überfahrt, Herstellung einer abflussbegrenzenden Schwelle im Einlaufbereich (Abb. 6, 7);
- Öffnung der Kammerung im Bereich der Querung des Wirtschaftsweges, Errichtung einer ökologisch durchgängigen Überfahrt;
- Rückbau eines Rohrdurchlasses im Mittellauf, Errichtung eines ökologisch durchgängigen Durchlassbauwerkes;
- ersatzloser Rückbau eines Rohrdurchlasses;
- Errichtung einer Überlaufschwelle zur Abflussregulierung in den Verbindungsgräben zum Rohrkanal;
- Einrichtung einer Sedimentzugabestelle zur mittelfristigen Verbesserung der Sohlstruktur.

**Tab. 1:** Biotoperhaltende und -ersteinrichtende Maßnahmen (Fördersumme 7,4 Mio. €).

| Projektziel bis 2013  | Bis 2010 bereits realisiert  |
|---|--|
| Wiederherstellung bzw. Revitalisierung von Fließgewässern: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ insgesamt ca. 25 km</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 15,7 km Fließstrecke im Ober- und Unterspreewald</li> </ul>                                       |
| Anschluss von Altarmen: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 6 bis 8 Altarme mit einer Gesamtlänge von ca. 3 km</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 Altarme mit einer Gesamtlänge von 1,41 km wieder angeschlossen</li> </ul>                       |
| Entschlammung von Altarmen: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 4 entschlammte und teilweise einseitig wieder angeschlossene Altarme im Unterspreewald</li> </ul> |
| Umbau und Herstellung von ökologisch durchgängigen Bauwerken (z. B. technische Fischauftiegsanlagen oder naturnahe Umgehungsgerinne) und Rückbau von Wanderhindernisse für aquatische Lebewesen: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ca. 50 Anlagen</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 30 Anlagen</li> </ul>   |
| Wiedereinführung periodischer Überflutungen in 4 Teilräumen (Moorschutz): <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gesamtfläche ca. 250 ha</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Überflutungsflächen von ca. 65 ha wiederhergestellt</li> </ul>                                    |



**Abb. 5:** Auf dem Luftbild sind die Teilmaßnahmen an “Janks Buschfließ“ zu erkennen.



**Abb. 6:** Einlaufbereich vor dem Anschluss.



**Abb. 7:** Einlaufbereich nach dem Anschluss.

Angaben zum Gewässer:

- Lage: Oberspreewald zwischen Burg-Lübbener-Kanal und Leiper Graben, Naturschutzgebiet „Innerer Oberspreewald“, FFH-Gebiet „Oberspreewald“;
- Sohle: Sand mit Schlammauflagen;
- Sohlbreiten: 1-2 m;
- Sohlgefälle: 0,1 ‰;
- NQ/MQ/HQ 100: 0,10 / 0,15-0,20 / 0,40 m<sup>3</sup>/s;
- Fischregion: Barbenregion;
- vorhandene Arten: Plötze, Barsch, Gründling, Hecht, Döbel und fünf weitere Arten.
- Besonderheit: Die Lage in einem Staugürtelsystem beeinflusst die Wasserstände, Abflüsse und Fließgeschwindigkeiten. Allerdings liegt das Fließ zwischen zwei Staugürteln und hat selbst kein Staubauwerk. Somit bietet es die Möglichkeit, ein fließendes Gewässer zu entwickeln, da der Staugürtel „umgangen“ wird.

Die Fließgeschwindigkeit konnte auf der gesamten Fließstrecke, vor allem im Oberlauf deutlich erhöht werden (jetzt um ca. 0,15-0,20 m/s). Bereits kurz nach der Fertigstellung wurden zahlreiche Jungfische im neuen Gewässerabschnitt beobachtet. Um die Befahrung mit Kanus etc. zu verhindern, wurde im Einlaufbereich vor der Schwelle ein Baumstamm quergelegt. Die Schwelle im Einlaufbereich muss regelmäßig (ca. 1x pro Woche) von Treibgut befreit werden.

## 2.2 Beispiel „Revitalisierung Lehmannstrom und Tuschatz“

Der Lehmannstrom befindet sich im Unterspreewald nördlich der Stadt Lübben (Abb. 8). Das von der Revitalisierung dieses typischen Spreewaldfließes begünstigte Gebiet umfasst den Lehmannstrom mit Abzweig vom Zerniasfließ inklusive Forstgraben F1.1, die angrenzenden Wälder und die Tuschatzwiesen bis zur Spree bzw. zum Puhlstrom und ist ca. 190 ha groß.

Forst- und landwirtschaftliche Nutzungen haben das Fließ in der Vergangenheit stark verändert. Aus Seitenarmen wurden Forst- und Grenzgräben, in den Tuschatzwiesen entstanden Entwässerungssammler. Aus dem gewundenen Waldfließ wurde ein tief in das Gelände eingeschnittenes Rinnsal, das zum Teil zwischen den Uferverwallungen zu verschwinden drohte (Abb. 9).

Ziele und Inhalte des Vorhabens:

- Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes und des Niedermoorschutzes;
- Verbesserung der Wasserführung im Lehmannstrom und im Forstgraben F 1.1, Erhöhung der Fließgeschwindigkeit u.a. durch Aufweitung des Einlaufbereiches;
- Sicherung hoher Wasserstände und Verbesserung des Wasseraustausches zwischen dem Lehmannstrom und den angrenzenden Waldflächen durch Verwallungsöffnungen;
- Erhöhung der ökologischen Durchgängigkeit und damit des Biotopverbundes durch Rückbau von Durchlässen und Neubau von landwirtschaftlichen Überfahrten;

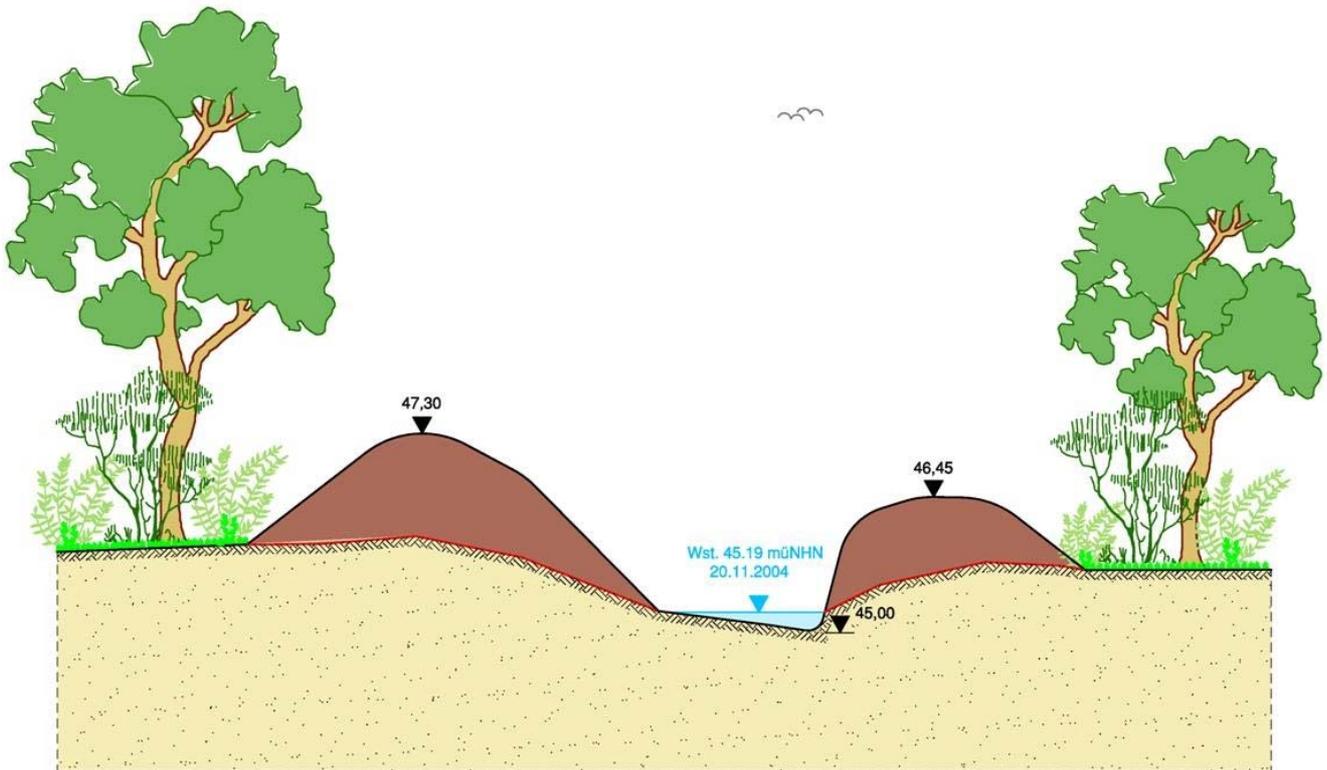
- Verbesserung der Gewässerstruktur z. B. durch Altarmanschluss und Einbau von Erdstoffbuhnen als Strukturelemente;
- Gewährleistung winterlicher Überflutungen in den Tuschatzwiesen (Abb. 10).



Abb. 8: Im digitalen Geländemodell ist der tiefliegende Wiesenbereich des Tuschatz erkennbar. Hier wird der künstliche Winterstau realisiert. Außerdem sind die Teilmaßnahmen verortet.

Angaben zum Gewässer:

- Lage: Unterspreewald Naturschutzgebiet „Innerer Unterspreewald“, FFH-Gebiet „Unterspreewald“;
- Sohle: Sand mit Schlammauflagen (20-40 cm);
- Sohlbreiten: ca. 2-4 m;
- Sohlgefälle: Oberlauf 0,3 ‰, Unterlauf 0,18 ‰;
- NQ/MQ/HQ 1981: 0,25 / 0,35 / 5,0 m<sup>3</sup>/s;
- Fischregion: Blei-/Barbenregion
- vorhandene Arten: Plötze, Barsch, Gründling, Döbel, Bitterling, Hecht und fünf weitere Arten.
- Besonderheit: Die Lage in einem Staugürtelsystem zwischen dem Wehr Hartmannsdorf und dem Wehr Leibsch beeinflusst die Wasserstände, Abflüsse und Fließgeschwindigkeiten.



**Abb. 9:** Seitliche Verwallungen entlang des Gewässers entstehen durch jahrelange Ablagerung von Räumgut und verhindern den Wasseraustausch mit dem umliegenden Gelände.



**Abb. 10:** Wasservögel nehmen die im Winter künstlich überstauten Wiese schnell als Lebensraum an.

Die Wasserversorgung und die Wasserführung des gesamten Gebietes konnte nach Realisierung des Vorhabens stark verbessert werden. Es bleibt abzuwarten, wie sich die Situation in den durch Klimaänderung immer häufiger werdenden extrem trockenen Sommern darstellt. Die Wasserführung und die Fließgeschwindigkeiten konnten von 0 auf ca. 300 l/s bei ca. 0,20 m/s erhöht werden. Punktuell, z. B. an den Fischaufstiegsanlagen am Wehr Lehmannstrom und an den Strukturelementen werden deutlich höhere Geschwindigkeiten erzielt. Vor allem diese Bereiche sind wichtige Nischen für die Fließgewässerarten, wie Döbel und Quappe.

### Danksagung

Das Projekt wird zu 72,5 % vom Bundesumweltministerium, zu 20,5 % vom Land Brandenburg und zu 7 % vom kommunalem Träger „Zweckverband Gewässerrandstreifenprojekt Spreewald“ finanziert. Dafür bedanken wir uns. Für die umfangreiche Unterstützung bei der Erstellung dieser Veröffentlichung gilt unser persönlicher Dank Herrn Dirk Klante vom Ingenieurbüro PROKON GmbH, Lübben.

### 3. Literatur

- GRPS – Gewässerrandstreifenprojekt Spreewald, 2003. Pflege- und Entwicklungsplan. Lübbenau.
  - LUA – Landesumweltamt Brandenburg, 2010. Schriftliche Mitteilung vom 10.06.2010.
  - BfN – Bundesamt für Naturschutz, 2010. [http://www.bfn.de/0203\\_grossprojekte.html](http://www.bfn.de/0203_grossprojekte.html). Zugriff: 20.05.2010.
  - MUGV – Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2010a. <http://www.mugv.brandenburg.de/cms/detail.php/lbml.c.379560.de>. Zugriff: 20.05.2010.
  - MUGV – Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2010b. <http://www.mugv.brandenburg.de/cms/detail.php/lbml.c.377979.de>. Zugriff: 20.05.2010.
  - PIK – Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 2010. <http://www.pik-potsdam.de/~wrobel/sg-klima-3/nav>. Zugriff: 29.06.2010.
- Weitere Informationen unter [www.grps.info](http://www.grps.info) und unter [www.gewässerrandstreifenprojekt-spreewald.de](http://www.gewässerrandstreifenprojekt-spreewald.de).

## Entwicklung der Wasserstände ausgewählter Seen und Renaturierung des Wasserhaushaltes im Müritz-Nationalpark, Mecklenburg-Vorpommern

Joachim Kobel, Volker Spicher

Nationalparkamt Müritz, Schlossplatz 3, 17237 Hohenzieritz, j.kobel@npa-mueritz.mvnet.de

**Zusammenfassung:** Seit 1997, z.T. auch schon länger, werden im Gebiet des Müritz-Nationalparks zahlreiche Oberflächen- und Grundwasserpegel beobachtet. Die Entwicklung zeigt insbesondere bei den im Sander gelegenen Durchströmungsseen ein kontinuierliches Absinken der Wasserspiegel. Seit Beginn der Messungen sind die mittleren Wasserstände dieser Seen um bis zu 90 cm gefallen. Die Ursache für diese Entwicklung wird in Veränderungen des Klimas gesehen. Zur genaueren Klärung bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen. Ein spezieller Schutzzweck des Müritz-Nationalparks ist die Wiederherstellung eines natürlichen Wasserhaushaltes. Die vor diesem Hintergrund vorgenommene Beschäftigung mit der hydrologischen Situation des Gebietes ließ zahlreiche in der Vergangenheit durch den Menschen vorgenommene Veränderungen des Wasserhaushaltes erkennen. Die Renaturierung von Wassereinzugsgebieten ist deshalb seit Nationalparkgründung eine der zentralen Aufgaben der Schutzgebietsverwaltung. Bislang wurden an insgesamt 127 Mooren mit einer Fläche von rd. 1.900 ha sowie an 31 Seen mit rd. 1.430 ha Maßnahmen zur Wiederherstellung eines natürlichen Wasserhaushaltes realisiert. Damit ist ein großer Teil der notwendigen und möglichen Maßnahmen umgesetzt. Aufgabe für die nächsten Jahre ist, die noch ausstehenden Vorhaben zu planen und umzusetzen sowie bereits realisierte Renaturierungsprojekte zu überprüfen und ggf. zu optimieren.

### Water level trends in some lakes and restoration of the water budget in the Müritz National Park, Mecklenburg-Vorpommern

**Abstract:** In the Müritz National Park, founded in 1990, monitoring of lake water levels and groundwater levels have been carried out over the last 13 years and in some areas even longer. The trends show a continuous sinking of water levels especially in lakes which are dominantly fed by groundwater. The average water level in the lakes has declined up to 90 cm since the first measurements. This development is ascribed to the effect of the changing climate. The restoration of the natural water budget is a specific goal of the Müritz National Park. The focus on the hydrological situation with this intention has promoted the discovery of various man-made changes in the water budget. Therefore, renaturation of watersheds is one of the main tasks of the National Park's administration since its foundation. Until now watershed restoration measures have been implemented in 127 bogs and fens (1.900 ha) and also in 31 lakes with a total area of 1.430 ha. Thus, the majority of necessary and possible measures have been carried out. In the coming years, the remaining projects will be planned and implemented. Since the work in this field is not yet completed, the subject will still be of great importance in future projects.

#### 1. Einführung

Der 1990 gegründete Müritz-Nationalpark umfasst eine Fläche von rd. 32.200 ha und besteht aus den beiden Teilgebieten Müritz (ca. 26.000 ha) und Serrahn (ca. 6.200 ha). Das Teilgebiet Müritz erstreckt sich im Wesentlichen auf den Sanderflächen des Pommerschen Stadiums der Weichselvereisung zwischen der Pommerschen Hauptendmoräne im Nordosten und der frankfurtstadialen Grundmoräne im Südwesten. Das Teilgebiet Serrahn liegt zum Teil auf dieser Endmoräne und umfasst des Weiteren den vorgelagerten Sander, rückwärtige Schmelzwassersande und mehrere, durch Rinnenseen markierte Gletschertore (Reinsch und Sauerberg, 1994).

Die Pommersche Hauptendmoräne bildet die Einzugsgebietsgrenze zwischen Nord- und Ostsee, d.h. der Müritz-Nationalpark liegt nahe an bzw. zum Teil direkt auf der Hauptwasserscheide. Durch das Teilgebiet Müritz ver-

läuft zudem die Grenze der Einzugsgebiete von Elde und Havel.

Klimatisch befindet sich der Nationalpark in einem Übergangsbereich, in dem der atlantische Einfluss nur noch schwach ausgeprägt ist und auch der kontinentale Einfluss erst geringe Bedeutung hat. Eine weitere Besonderheit ist der durch die Mecklenburgischen Großseen (Plauer See, Fleesensee, Kölpinsee, Müritz) verursachte Regenschatten östlich der Müritz. Daraus resultiert insbesondere für das Teilgebiet Müritz eine relative Niederschlagsarmut, das langjährige Mittel der Jahresniederschläge beträgt hier nur etwa 575 mm. Im Teilgebiet Serrahn liegt dieser Wert bei 600 mm (Voigtländer, 1992; Reinsch und Sauerberg, 1994).

Das Nationalparkgebiet zeichnet sich durch einen großen Gewässerreichtum aus, der letztlich auch zu dem Allein-

stellungsmerkmal „Land der tausend Seen“ führte. 107 Seen (> 1ha) sowie zahllose Kleingewässer liegen im Schutzgebiet (Abb. 1). Sie bedecken ca. 13 % der Gesamtfläche (Brusdeylins, 1995). Darüber hinaus gehören auch Moore (ausschließlich Niedermoore) zu den bedeutenden und die Landschaft prägenden Elementen. Der Flächenanteil der insgesamt 435 Moore beträgt rd. 11,5 % (Rowinsky, 2005).

Im Müritz-Nationalpark gehört die Renaturierung von Wassereinzugsgebieten seit seiner Gründung im Jahr 1990 zu den zentralen Themen und Arbeitsschwerpunkten der Schutzgebietsverwaltung. Zum Einen handelt es sich um einen konkreten gesetzlichen Auftrag, denn gemäß Nationalparkverordnung gehört die Wiederherstellung eines natürlichen Wasserhaushaltes zur Regenerierung der zahlreichen Moore zu den speziellen Schutzzwecken des Müritz-Nationalparks.

Andererseits ließ uns die intensive Beschäftigung mit der hydrologischen Situation sehr schnell die zahlreichen in der Vergangenheit vorgenommenen Veränderungen an Gewässern, Mooren und Feuchtgebieten erkennen. Dies verwundert nicht, ist doch das Nationalparkgebiet durch eine lange Siedlungs- und Nutzungsgeschichte geprägt, in deren Verlauf die Natur wiederholt und auf unterschiedliche Weise entsprechend der jeweiligen Nutzungsansprüche verändert wurde.

Belege für Eingriffe in den Wasserhaushalt gibt es schon ab der Zeit der Einwanderung deutscher Siedler im 13. Jahrhundert. Diese zielten vor allem auf die Nutzbarmachung von Flächen für die Landwirtschaft, das Flößen

von Holz oder das Betreiben von Wassermühlen ab. Im Nationalparkgebiet existierten einst acht Wassermühlen. In Ermangelung des für den Mühlenantrieb benötigten fließenden Wassers (von Natur aus gab es im Teilgebiet Serrahn nur einen Bach, heute als Godendorfer Mühlenbach bezeichnet, und im Teilgebiet Müritz die Havel, deren natürlicher Beginn allerdings ca. 12 Kilometer weiter südlich lag als heute) wurden ursprünglich abflusslose Seen an die Vorflut angeschlossen oder miteinander verbunden und Moore in die Seen entwässert, um mehr Wasser für die Mühlen zu haben. Die Mühlen wurden im Zuge der industriellen Revolution stillgelegt bzw. abgebaut, die Grabenverbindungen wirkten nunmehr aber als Entwässerungen weiter (Voigtländer, 1992; Rowinsky, 2005).

Besonders schwerwiegende und nachhaltige Veränderungen des Landschaftswasserhaushaltes entstanden in den 1970er Jahren im Rahmen der sogenannten Komplexmelioration. Im Ergebnis existierte im Nationalparkgebiet ein umfangreiches Netz von künstlich angelegten Gräben mit einer Länge von insgesamt ca. 49 km, deren Funktion in erster Linie die Entwässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen war. Im Zusammenhang damit wurden 5 Schöpfwerke betrieben. Grundwasserabsenkungen von teilweise mehr als einem Meter waren die Folge. Vor allem die Mehrzahl der Moore wies einen gestörten Wasserhaushalt auf. Sehr anschaulich wird das Ausmaß der Moorentwässerung am Beispiel des Teilgebietes Serrahn. Hier waren von den insgesamt ca. 470 ha Moorfläche (149 Einzelmoore) etwa 400 ha mehr oder weniger stark entwässert (Jeschke, 2003).

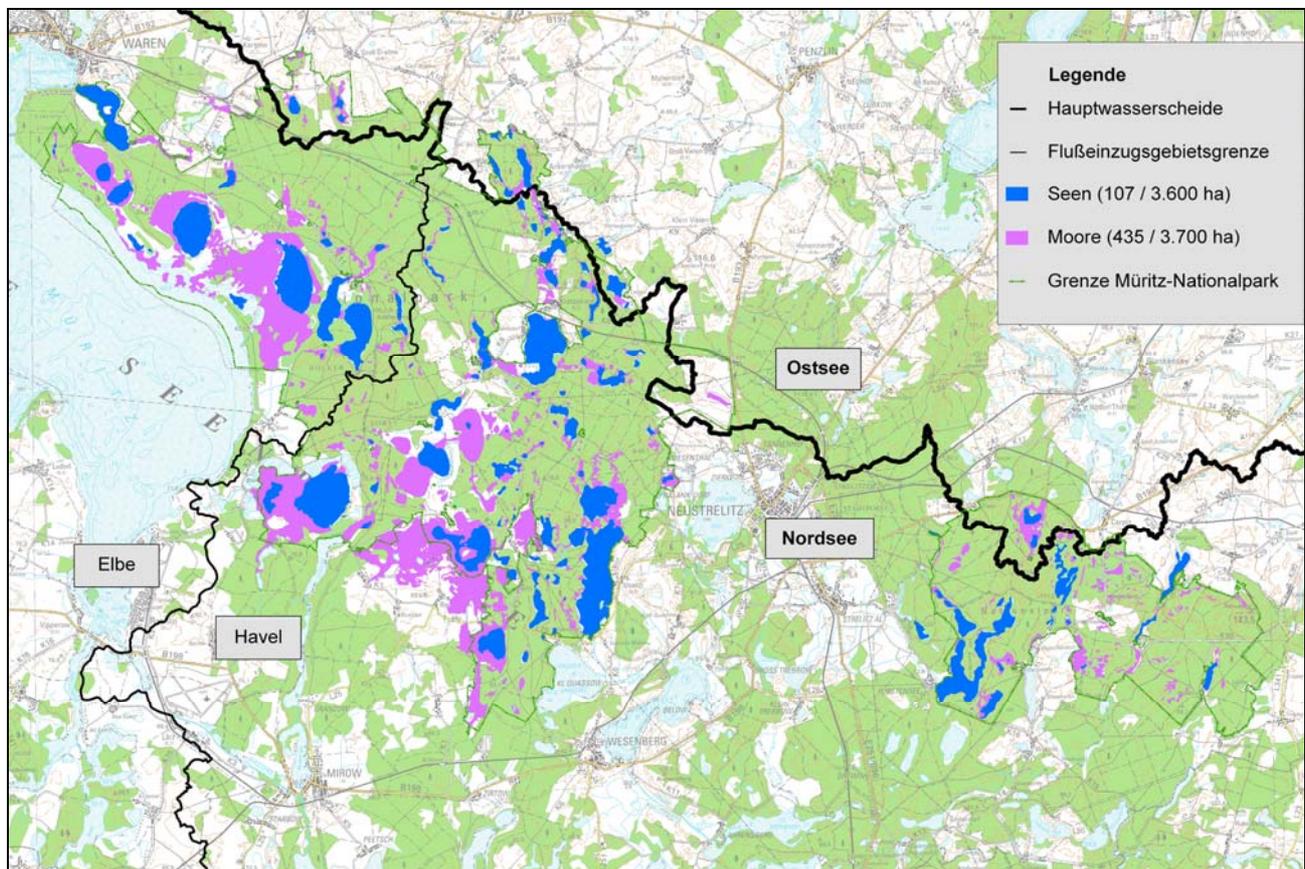


Abb. 1: Einzugsgebiete, Seen und Moore im Müritz-Nationalpark.

Zur Beschäftigung mit der hydrologischen Situation gehört auch die Einrichtung und kontinuierliche Beobachtung von Pegelmessstellen. Anfangs gab es davon nur sehr wenige und einige der vorhandenen Grundwassermessstellen waren schon seit Jahren nicht mehr beobachtet und unterhalten worden. In Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Neubrandenburg, aber auch im Zusammenhang mit Renaturierungsvorhaben wurde das Messnetz schrittweise erweitert bzw. reaktiviert. Dadurch gibt es heute über das gesamte Nationalparkgebiet verteilt etwa 60 Oberflächen- und Grundwasserpegel, von denen die Mehrzahl seit 1997, einige auch schon länger, beobachtet werden.

## 2. Ergebnisse und Diskussion

### 2.1 Entwicklung der Wasserstände

Die Auswertung der Messreihen der Oberflächenwasserpegel zeigt bei einer Reihe von Seen ein kontinuierliches Absinken der Wasserstände. Bei näherer Betrachtung sind dies vor allem die Durchströmungsseen im Sander. Hier sind die mittleren Wasserstände seit Beginn der Messungen um bis zu 90 cm gefallen. Dabei fällt auf, dass sich die Absenkungstendenz seit etwa 2002/2003 verstärkt hat (Abb. 2).

Der Wasseraustausch in Durchströmungsseen erfolgt über das Grundwasser, d.h. sie stehen im direkten Kontakt mit dem oberen unbedeckten Grundwasserleiter. Deshalb liefert ihr Wasserspiegel auch ein gutes Abbild für die Grundwassersituation im Einzugsgebiet. Grundwassermessungen in den betreffenden Gebieten bestätigen das, denn diese weisen ebenfalls fallende Pegelstände auf (Hinz, 2009; Stüve, 2010).

Im Hinblick auf die möglichen Ursachen für diese Entwicklung ist zunächst generell festzustellen, dass der Wasserhaushalt des Nationalparkgebietes maßgeblich durch die Nähe zur Wasserscheide geprägt ist. Wasserscheidennahe Gebiete sind Hochlagen, aus denen Wasser generell abströmt, jedoch nicht zulaufen kann. Zudem sind die Einzugsgebiete vergleichsweise klein.

Dadurch ist der Wasserhaushalt solcher Gebiete bereits von Natur aus angespannt, d.h. er reagiert sehr empfindlich und zeitnah auf Veränderungen des Niederschlagsgeschehens, des Klimas oder auf anthropogene Eingriffe (Voigtländer, 1992; Reinsch und Sauerberg, 1994).

Die meisten der in Rede stehenden Durchströmungsseen liegen isoliert in größeren Waldgebieten und sie bzw. ihre Einzugsgebiete weisen keine erkennbaren hydromeliorativen Eingriffe auf. Die Landnutzung in den Einzugsgebieten blieb ebenfalls unverändert, sie sind mindestens seit mehreren Jahrzehnten mit Wald bestanden. Weiter ist festzustellen, dass dieses Phänomen nicht nur lokal begrenzt auftritt, sondern mehr oder weniger stark ausgeprägt das gesamte Nationalparkgebiet und ebenso Seen in der Nachbarschaft betroffen sind (Abb. 3). Beispielsweise fielen die Wasserstände im ca. 20 km westlich liegenden Drewitzer See sowie in Seen der Neustrelitzer Kleinseenplatte südlich und östlich des Nationalparkgebietes in ähnlicher Größenordnung (Stüve, 2010). Im ca. 25 km weiter südöstlich gelegenen Großen Kronsee (Land Brandenburg, Naturpark Uckermärkische Seen) beträgt die Absenkung seit 1987 sogar ca. 2 m (Mauersberger, 2006). Sinkende Grundwasser- und Seespiegel werden darüber hinaus seit etwa 20 bis 30 Jahren in ganz Nordostdeutschland beobachtet.

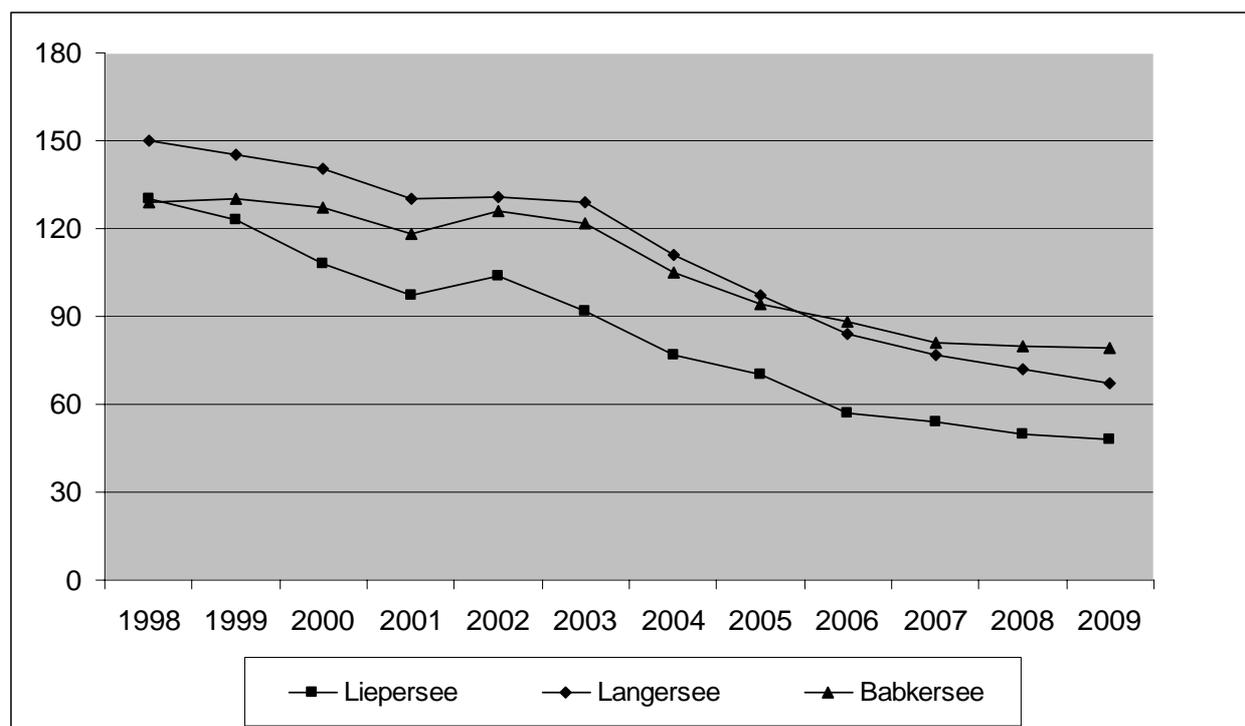


Abb. 2: Wasserstandsentwicklung in ausgewählten Durchströmungsseen (Jahresmittelwerte in cm).



**Abb. 3:** Trocken gefallenes Seeufer am Großen Fürstenseer See (Foto: A. Korzetz).

Insoweit deutet vieles darauf hin, dass diese Entwicklung auf Veränderungen des Klimas zurückzuführen ist. Einen Zusammenhang zur jährlichen Niederschlagsmenge gibt es aber offensichtlich nicht, denn diese hat sich im Raum Südmecklenburgs in den letzten etwa 100 Jahren nicht signifikant geändert.

Geändert hat sich jedoch die durchschnittliche Lufttemperatur, sie nahm im gleichen Zeitraum um 0,8 K zu. Dies führt zu einer Zunahme der Evapotranspiration, die durch die mit der Temperaturerhöhung einher gehende Verlängerung der Vegetationsperiode noch verstärkt wird. Damit hat sich die klimatische Wasserbilanz geändert. Legt man diese der Betrachtung zugrunde, zeigt sich eine sehr gute Korrelation mit den festgestellten Veränderungen der Grundwasserspiegel (Stüve, 2010).

Durch Germer et al. (2010) wurden Seepiegel-Zeitreihen von 19 Seen aus drei Teilregionen in Nordostdeutschland entlang eines Nordwest-Südost-Transektes miteinander verglichen. Darunter befanden sich auch fünf Seen innerhalb des Müritz-Nationalparks. Erste Ergebnisse zeigen, dass sich einige der betrachteten Seen bezüglich ihrer Dynamik und mehrjährigen Trends ähnlich verhalten, andere bei vergleichbaren Rahmenbedingungen jedoch nicht. Weiter deutet sich bei den Seen mit rückläufigen Pegeln eine Dominanz von Grundwasserseen an.

## 2.2 Renaturierung von Wassereinzugsgebieten

Die ersten Renaturierungsmaßnahmen im Müritz-Nationalpark wurden 1993/94 geplant und umgesetzt. Es handelte sich u.a. um ein Wiedervernässungsprojekt im Teilgebiet Serrahn (Jeschke und Paulson, 2001). Der damalige Antrag auf wasserrechtliche Genehmigung beinhaltete etwa 20 Moore. Da diese alle in landeseigenen Waldflächen lagen, war die Landesforst im Rahmen des Genehmigungsverfahrens der einzige „Betroffene“. Zu diesem Zeitpunkt handelte es sich noch um eine eigenständige Verwaltung, die Bildung der Nationalparkämter, d.h. die Zusammenlegung der jeweiligen Nationalpark- und Landesforstverwaltungen erfolgte erst 1996. Dies führte dazu, dass auf Grund des Vetos der Forstverwaltung, die Schaden am Wald befürchtete, durch die Wasserbehörde für vier der beantragten Maßnahmen zunächst keine Genehmigung erteilt wurde. Die Ämterfusion 1996 erleichterte die Verfahrensweise erheblich und nach anfangs noch bestehenden „Hemmungen“ entwickelte sich für Wasserhaushalts- und Mooreraturierungen sehr bald ein Selbstverständnis. Damit konnte die Renaturierung gerade in Waldbereichen schrittweise weiter umgesetzt und bis heute weitgehend abgeschlossen werden.

Das bislang schwierigste und aufwändigste Vorhaben war die Renaturierung der Zotzenseeniederung. Planung und Realisierung beanspruchten fast 5 Jahre. Neben der mit rd. 1.000 ha beträchtlichen Größe ergab sich dies daraus, dass im Projektgebiet Siedlungen liegen oder

unmittelbar angrenzen, es zu einem großen Teil landwirtschaftlich genutzt wurde und in größerem Umfang privates Flächeneigentum sowie Infrastruktureinrichtungen betroffen waren. Diese Dimension und Komplexität erforderte ein Planfeststellungsverfahren. Das Projekt wurde unter der Bezeichnung „Moore und Große Rohrdommel an der oberen Havel“ geführt und im Rahmen des EU-Life-Programms gefördert (Spicher, 2000). Die Kosten betragen rd. 1,1 Mio € und wurden je zur Hälfte durch die Europäische Union und das Land Mecklenburg-Vorpommern getragen.

Insgesamt wurden bis heute im Müritz-Nationalpark an 127 Mooren mit einer Fläche von rd. 1.900 ha sowie an 31 Seen mit rd. 1.430 ha, zusammen also auf ca. 3.330 ha Maßnahmen zur Wiederherstellung eines natürlichen Wasserhaushaltes realisiert (Kobel, 2009). Hierfür wurden u.a. etwa 140 Grabenverschlüsse errichtet und alle ehemals vorhandenen fünf Schöpfwerke rückgebaut. Die Kosten dafür beliefen sich auf insgesamt rd. 1,58 Mio €

In diesem Zusammenhang soll erwähnt werden, dass unter Berücksichtigung der nationalparkspezifischen Ziele bei allen Maßnahmen die Wiederherstellung eines natürlichen Wasserhaushaltes im Vordergrund steht. D.h., die Maßnahmen beschränken sich in aller Regel darauf, Entwässerungseinrichtungen im Sinne einer Initialmaßnahme rückzubauen bzw. funktionslos zu machen, um anschließend der natürlichen Entwicklung Raum zu geben (Galz, 2004). Ein weiteres vorheriges oder spätere

Management in den betreffenden Gebieten (z.B. Entfernen von auf entwässerten Mooren aufgewachsenen Gehölzen) erfolgt nicht. Es wird also bewusst in Kauf genommen, dass in Folge von Wiedervernässungsmaßnahmen Bäume in mehr oder weniger großem Umfang absterben (Abb. 4), d.h. der Wiederherstellung eines natürlichen Wasserhaushaltes wird der Vorrang eingeräumt.

Die anfänglichen Motive für die Renaturierung des Wasserhaushaltes waren vor allem der sich aus der Nationalparkverordnung ergebende „Reparaturauftrag“, das Wissen um die Bedeutung des Wassers im Naturhaushalt sowie um die vielfältigen Funktionen von intakten Mooren und die Folgen ihrer Entwässerung.

Mit dem durch die regelmäßigen Pegelbeobachtungen festgestellten Absinken der See- und Grundwasserspiegel als Ausdruck eines zunehmenden Wasserdefizits kam im Laufe der Zeit ein neuer Aspekt hinzu. Auch aus diesem Blickwinkel ist es richtig und notwendig, Eingriffe, die eine verstärkte oder beschleunigte Ableitung von Wasser aus der Landschaft bewirken, rückgängig zu machen und damit deren natürliche Fähigkeit zur Wasserrückhaltung und -speicherung wieder herzustellen. Darin wird zumindest ein kleiner Beitrag gesehen, die Folgen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt abzumildern. Dies erfordert jedoch großräumiges Handeln über den Nationalpark hinaus.



**Abb. 4:** Abgestorbener Erlenbruchwald am Mühlensee (Foto: U. Meßner).

### 3. Ausblick

Zur genaueren Klärung der Ursachen und Auswirkungen sinkender Grundwasser- und Seespiegel in Nordostdeutschland sind in Trägerschaft der Helmholtz-Gemeinschaft weitere Untersuchungen und Forschungsarbeiten geplant. Bezogen auf den Müritz-Nationalpark steht dabei der Große Fürstenseer See im Fokus. Er gehört zu dem durch das Deutsche GeoForschungsZentrum in Potsdam eingerichteten TERENO-Observatorium „Nordostdeutsches Tiefland“.

Der weitaus größte Teil der notwendigen und möglichen Projekte zur Renaturierung des Wasserhaushaltes wurde bereits umgesetzt. Aufgabe für die nächsten etwa fünf Jahre wird sein, die noch ausstehenden Maßnahmen zu planen und umzusetzen sowie bereits realisierte Renaturierungsprojekte zu überprüfen und ggf. zu optimieren.

Eine weitere Aufgabe ist die Erfolgskontrolle und ein Monitoring bei bereits erfolgten Wiedervernässungsmaßnahmen. Dazu sollen an ausgewählten Mooren und Seen die Auswirkungen der Wiedervernässung z.B. auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt oder die Vegetationsentwicklung untersucht und dokumentiert werden.

### 4. Literatur

- Brusdeylins, S., 1995. Seenkataster Müritz-Nationalpark. Unveröffentlichtes Gutachten.
- Galz, S., 2004. Vegetationsveränderungen in renaturierten Mooren des Müritz-Nationalparks. Diplomarbeit, Fachhochschule Eberswalde.
- Germer, S., Kaiser, K., Mauersberger, R., Stüve, P., Timmermann, T., Bens, O., Hüttl, R.F., 2010. Sinkende Seespiegel in Nordostdeutschland: Vielzahl hydrologischer Spezialfälle oder Gruppen von hydrologisch ähnlichen Seesystemen? In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O. & Hüttl, R.F. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10, S. 40-48. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Hinz, J., 2009. Geohydrologisches Gutachten Schweingarten-see. Unveröffentlichtes Gutachten.
- Jeschke, L., Paulson, C., 2001. Revitalisierung von Kesselmooren im Serrahner Wald (Müritz-Nationalpark). In: Succow, M., Joosten, H. (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde. S. 523-528. Schweizerbart, Stuttgart.
- Jeschke, L., 2003. Die Situation der Moore im Teilgebiet Serrahn des Müritz-Nationalparks. Unveröffentlichtes Gutachten.
- Kobel, J., 2009. 18 Jahre Renaturierung von Wassereinzugsgebieten im Müritz-Nationalpark. Naturschutz und Biologische Vielfalt 72, 77-91.
- Mauersberger, R., 2006. Das Naturschutzprojekt des Bundes „Uckermärkische Seen“. In: Naturschutzbund Deutschland, Kreisverband Mecklenburg-Strelitz (Hrsg.): Labus, Sonderheft 10, 51-58.
- Reinsch, D., Sauerberg, I., 1994. Gutachtliche Bearbeitung zur Hydrologie und den Bodenverhältnissen im Nationalpark Vorpommersche Boddenlandschaft und im Müritz-Nationalpark. Unveröffentlichtes Gutachten.
- Rowinsky, V., 2005. Erfassung von Mooren im Müritz-Nationalpark. Unveröffentlichtes Gutachten.
- Spicher, V., 2000. Moore und Große Rohrdommel an der oberen Havel (EU-LIFE-NATURPROJEKT 98Nat/D/5081). Naturschutzarbeit in Mecklenburg-Vorpommern 43, 48-53.
- Stüve, P., 2010. Die Wasserhaushaltssituation der letzten 40 Jahre im Raum der Neustrelitzer Kleinseenplatte. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O. & Hüttl, R.F. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10, S. 206-211. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Voigtländer, U., 1992. Erfassung der Hydromeliorationsanlagen im Müritz-Nationalpark und Erarbeitung von Vorschlägen zu deren Rückbau. Unveröffentlichtes Gutachten.

## Ermittlung von Art und Intensität künstlicher Entwässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen in Mecklenburg-Vorpommern

Franka Koch<sup>1</sup>, Andreas Küchler<sup>1</sup>, Dietmar Mehl<sup>2</sup>, Tim G. Hoffmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 18273 Güstrow, Goldberger Straße 12, franka.koch@lung.mv-regierung.de; <sup>2</sup>biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH, 18246 Bützow, Nebelring 15

**Zusammenfassung:** Im Hinblick auf diffuse Einträge der Pflanzennährstoffe Stickstoff und Phosphor in die Gewässer zählen die Folgen anthropogener Nährstoffzufuhr (Düngung, atmosphärische Deposition) zu den Hauptursachen. Künstliche Entwässerung verstärkt die Belastung bezüglich der Freisetzung von Nährstoffen aus der Humussubstanz von Böden (insbesondere Mooren) sowie durch den schnellen Abtransport der Nährstoffe aus der für Stoffumsetzungsprozesse hochwirksamen Bodenzone. Weiterhin bewirkt künstliche Entwässerung eine Vielzahl negativer Beeinträchtigungen des Wasserhaushalts. Mit Hilfe der Fuzzylogik-Methode wurden ausgehend von großräumig vorliegenden Geofaktoren künstlich entwässerte, landwirtschaftliche Flächen sowie die durch künstliche Entwässerung beeinflussten Flächen in Mecklenburg-Vorpommern ermittelt und nach hydrologischen Wirkungstypen differenziert. Die Ergebnisse stellen eine verbesserte Datengrundlage für die Entwicklung von Maßnahmen zur Optimierung des Landschaftswasserhaushaltes sowie zur Reduzierung der diffusen Nährstoffbelastungen der Oberflächengewässer dar.

### Determining mode and intensity of artificial drainage of agricultural land in Mecklenburg-Vorpommern

**Abstract:** Anthropogenic sources (fertilization and atmospheric deposition in particular) are the main causes of the diffuse emissions of the plant nutrients nitrogen and phosphorus to water bodies. Artificial drainage intensifies the water load through nutrient loss from the top soil of drained land (particularly peatlands) as well as by the rapid transport of nutrients from the soil zone which otherwise would be converted in this highly effective zone. Furthermore, artificial drainage causes a huge number of negative effects on the water balance. With the help of a Fuzzylogik method, artificially drained agricultural lands as well as surfaces influenced by artificial drainage in Mecklenburg-Vorpommern were identified based on a number of large-scale geofactors and then differentiated according to hydrologic effect types. The results provide an improved database for the development of measures to optimize the landscape water budget as well as to reduce the diffuse nutrient load of surface waters.

### 1. Einführung

Art und Intensität künstlicher Flächenentwässerung hängen maßgeblich von der beabsichtigten Nutzung ab. Im Wesentlichen kann man in Mecklenburg-Vorpommern von folgenden flächenhaft dominierenden Nutzungszwecken und demzufolge durchgeführten Entwässerungsmaßnahmen ausgehen (1) Entwässerung von urbanen Flächen und Infrastrukturanlagen sowie (2) Entwässerung von Flächen, die einer landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Nutzung unterliegen. Neben der Entwässerung unterstützen Meliorationsmaßnahmen die Wasserregulierung und Bewässerung.

Die durch flächenhafte künstliche Entwässerung veränderten hydrologischen Prozessstrukturen betreffen regelmäßig alle drei Phasen des Niederschlags-Abfluss-Prozesses: (1) Abflussbildung, (2) Abflusskonzentration und (3) Durchflussverlauf in den Gewässersystemen, wobei die Entwässerung grundsätzlich zu einer Prozessverstärkung im Sinne einer Intensivierung führt. Das bedeutet, dass es zu größeren Abflussmengen insgesamt und vor allem zu einer Abflusserhöhung je Zeiteinheit

kommt. Zu den wichtigsten hydrologischen Folgen zählen:

- Verringerung der landschaftlichen Retentionsprozesse für Wasser und vom Wasser transportierte Stoffe;
- Verschärfung von Hochwasser- und Niedrigwassersituationen;
- Vergrößerung der hydraulischen Belastung und des hydraulischen Stresses für Gewässerorganismen;
- Verminderung der realen Verdunstung und Veränderung des Lokalklimas;
- Verringerung der Grundwasserneubildung;
- Verschiebung von Wasserscheiden beim Anzapfen von Binnenentwässerungsgebieten und vergleichbaren Maßnahmen und daraus resultierende großräumige Systemveränderungen.

Umfangreiche Entwässerung führt somit auch zu einer Abnahme der Fließgewässerstrecken mit permanenter Wasserführung zugunsten solcher mit periodischer oder episodischer Wasserführung. Diese Verschiebungen zeigen sich primär in den Quellregionen und Oberläufen der Gewässer und verstärken die wahrscheinlich klimatisch bedingten Abflussrückgänge in Mecklenburg-

Vorpommern (Mehl, 2004; Mehl et al., 2004). Daneben erhöht sich regelmäßig der Aufwand für die Gewässerunterhaltung.

Bei der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000) gewinnt neben den hydrologischen Folgen für Grund- und Oberflächenwasserkörper die Kopplung mit den Aspekten des Stoffhaushalts eine hohe Bedeutung (Mehl et al., 2009). Gerade im Hinblick auf die diffuse Belastung der Gewässer mit den Pflanzennährstoffen Stickstoff und Phosphor zählt die künstliche Entwässerung zu den verstärkenden Faktoren, vor allem im Hinblick auf die Freisetzung der Nährstoffe aus der Humussubstanz entwässerter Böden (insbesondere Moore). Sie verstärkt die Folgen anthropogener Nährstoffzufuhr über Düngung und atmosphärische Deposition.

Ein effektives Management muss an den Haupteintragspfaden ansetzen. Eine deutschlandweite Berechnung im Auftrag des Umweltbundesamtes ergab einen Anteil der Dränung an den Eintragspfaden in der Flussgebietseinheit Warnow/Peene von rd. 60 % bei Stickstoff und rd. 10 % bei Phosphor. Im bundesdeutschen Durchschnitt hat dieser Eintragspfad einen Anteil von nur etwa 20 % (UBA, 2009). Darin zeigt sich die besondere Bedeutung des Eintragspfades Dränung in Mecklenburg-Vorpommern und sicher im gesamten norddeutschen Tiefland.

Im Rahmen der Bestandsaufnahme für die Umsetzung der WRRL wurden 2003 im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern die archivierten Dränprojekte der ehemaligen Meliorationsbaukombinate der Bezirke Rostock, Schwerin und Neubrandenburg erfasst und digitalisiert. Dieser Bestand ist jedoch unvollständig und unscharf. Beispielsweise sind Projekte ohne vorliegende Planung, von anderen Trägern vorgenommene Entwässerungsprojekte sowie ältere oder jüngere Projekte nicht erfasst. Auch ist die Übereinstimmung der Bauausführung mit der Planung nicht belegt. Die für die Umsetzung der WRRL zu entwickelnden Maßnahmen müssen jedoch räumlich konkretisiert werden, wofür die vorliegenden Unterlagen nicht ausreichend waren. Eine landesweite Bestandsaufnahme aller Entwässerungsanlagen z. B. durch Begehungen oder Auswertung von Archivmaterialien bei den 27 Wasser- und Bodenverbänden des Landes

wäre zu aufwändig. Deshalb wurde die Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Erfassung von Umfang und Intensität künstlicher Flächenentwässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Mecklenburg-Vorpommern auf Grundlage vorliegender Geodaten beauftragt.

## 2. Untersuchungsgebiet und Methode

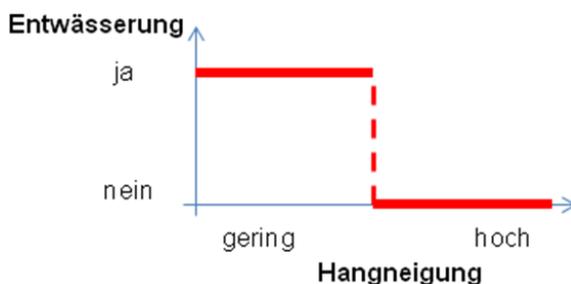
Die gesamte Analyse ist auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen beschränkt, deren Flächenumfang und hydrologische Bedeutung für Mecklenburg-Vorpommern von besonderer Bedeutung.

Der methodische Ansatz fußt auf der statistischen Auswertung landesweit vorliegender Daten, die einen Informationsgehalt bezüglich der Entwässerungsbedürftigkeit enthalten. Es wurden 15 potentielle Parameter nach Indikationsmöglichkeiten, entsprechenden Datengrundlagen und Methoden zur Identifizierung des potenziellen (ursprünglichen) Entwässerungsbedarfes zusammengestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Fragestellung bewertet.

Jeder einzelne für eine Prognose zur Verfügung stehende Daten- bzw. Parametersatz spricht mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit für eine Entwässerung, erreicht aber keine Eineindeutigkeit (= Indiz für Entwässerung). Einen methodischen Ausweg eröffnet das Prinzip der Fuzzylogik, das eine Modellierung von Unsicherheiten und Unschärfen verschiedener Daten ermöglicht. Das Konzept eröffnet die Möglichkeit, die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens eines vordefinierten Ergebnisses berechnen zu können (damit besteht sozusagen eine „stochastische Unsicherheit“). Die Wahrscheinlichkeit wird dabei zwischen wahr (1) und unwahr/falsch (0) bestimmt (Abb. 1).

Für die als geeignet ausgewählten Parameter, die im Weiteren eine Berücksichtigung erfahren, wurde jeweils eine Wahrscheinlichkeitsfunktion, d. h. eine Entwässerungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der jeweiligen Parameterklasse, festgelegt. Als Ergebnis der Parameterauswahl standen schließlich 11 Entwässerungsmerkmale mit Wahrscheinlichkeitsfunktionen zur Verfügung (Abb. 2). Um die (gesamte) Entwässerungswahrscheinlichkeit einer Fläche zu bestimmen, wurden die Merkmale kalibriert und zusammengefasst.

### Konventionelle Logik



### Fuzzylogik



Abb. 1: Prinzip der konventionellen und der Fuzzylogik am Beispiel der Einflussgröße Hangneigung.

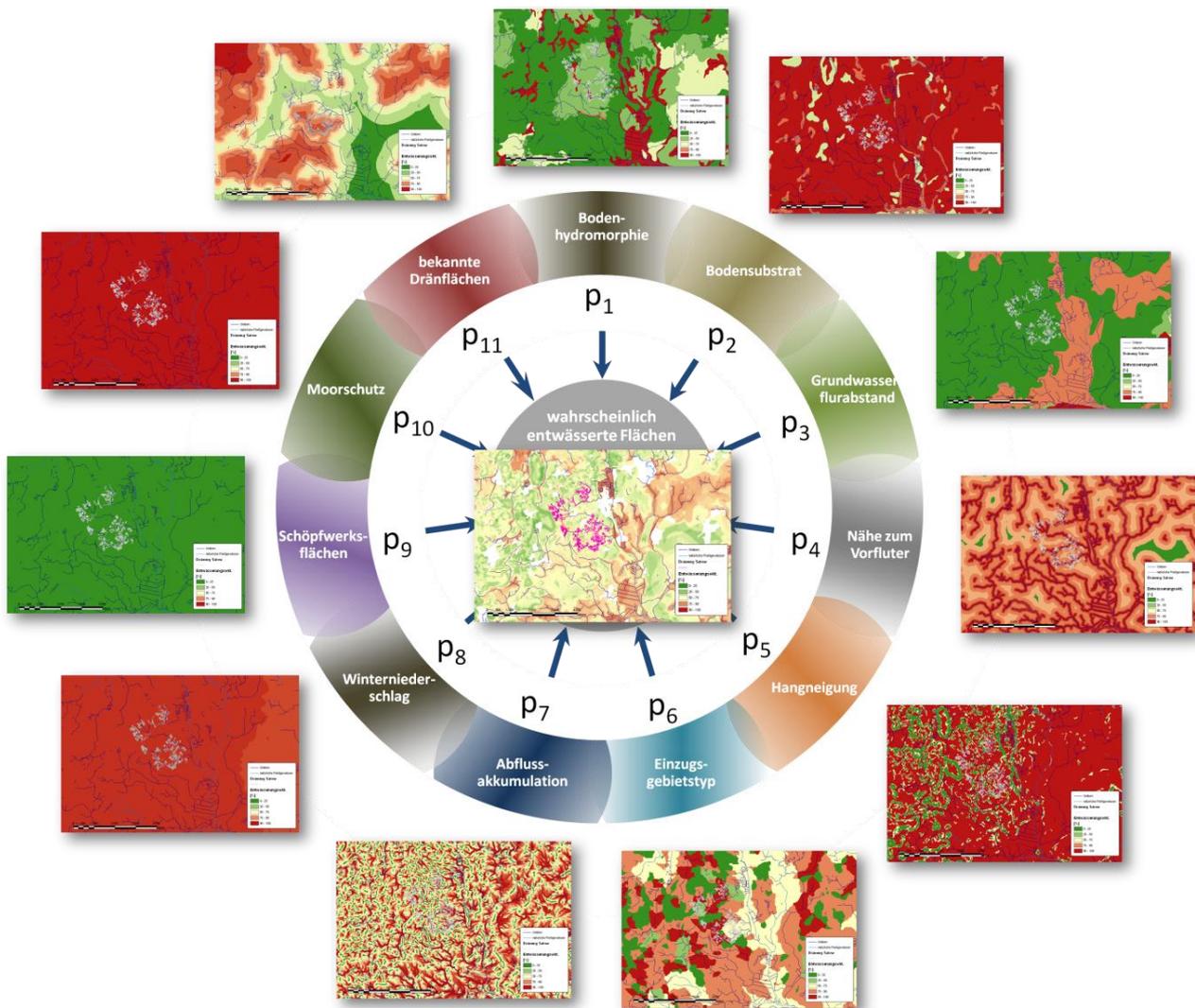


Abb. 2: Entwässerungsmerkmale zur Bestimmung der wahrscheinlich entwässerten Fläche.

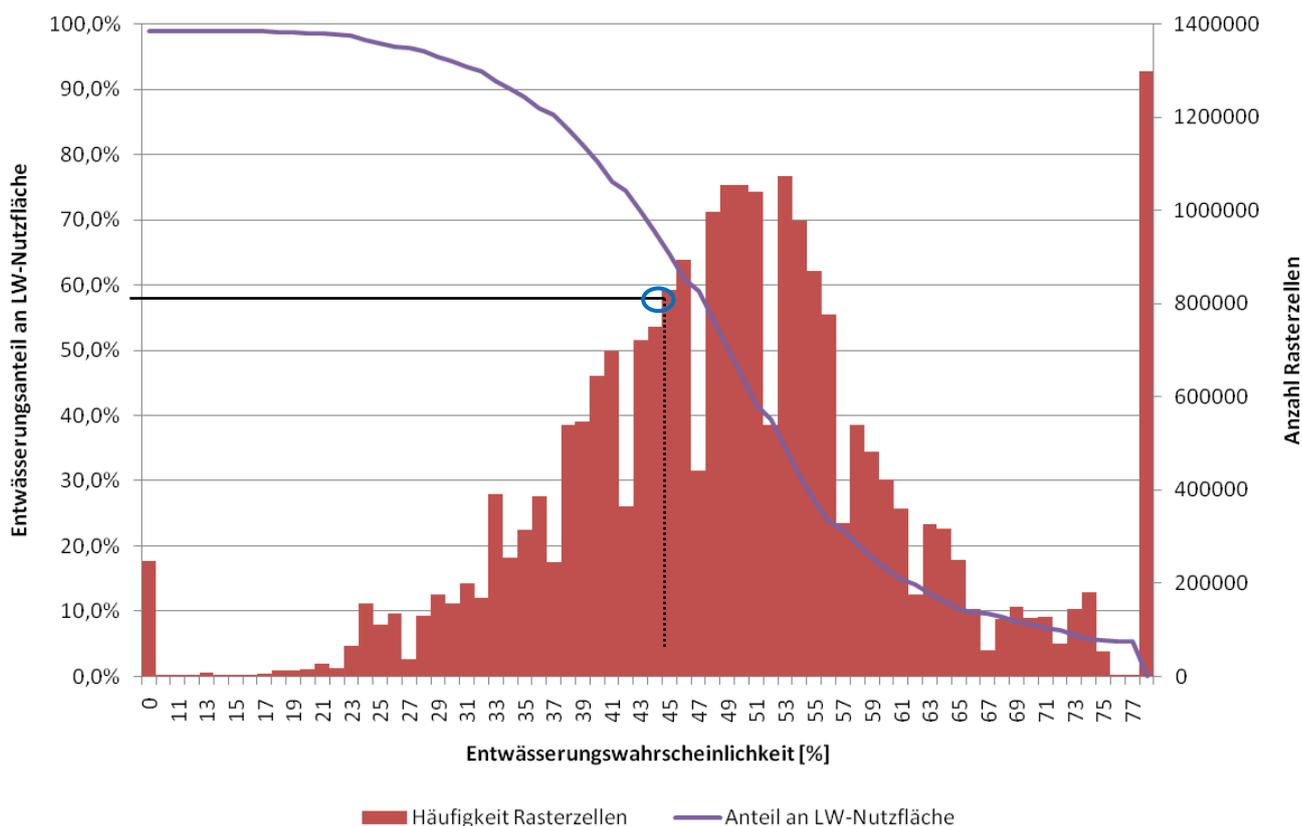
Als Ergebnis der Merkmalskalibrierung ist die folgende Gleichung 1 zur Bestimmung der zusammengefassten Entwässerungswahrscheinlichkeit aufgestellt worden. Diese ist ein Ergebnis mehrerer Kalibrierungs- und Vali-

dierungsdurchgänge und stellt bei den vorliegenden Daten und unter den festgelegten Voraussetzungen die beste Näherung der realen Entwässerungswahrscheinlichkeit dar.

Gleichung 1:

$$p_{Entw} = \min(p_{10}, \max(p_9, \frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + 1,1 \cdot p_5 + 1,1 \cdot p_6 + 1,1 \cdot p_7 + p_8 + 1,3 \cdot p_{11}}{9,6}))$$

- $p_{Entw}$  - zusammengefasste Entwässerungswahrscheinlichkeit
- $p_1$  - Entwässerungswahrscheinlichkeit nach Bodenhydromorphie
- $p_2$  - Entwässerungswahrscheinlichkeit nach Bodensubstrat
- $p_3$  - Entwässerungswahrscheinlichkeit nach Grundwasserflurabstand
- $p_4$  - Entwässerungswahrscheinlichkeit nach Nähe zum Vorfluter
- $p_5$  - Entwässerungswahrscheinlichkeit nach Hangneigung
- $p_6$  - Entwässerungswahrscheinlichkeit nach Einzugsgebietstyp
- $p_7$  - Entwässerungswahrscheinlichkeit nach Abflussakkumulation
- $p_8$  - Entwässerungswahrscheinlichkeit nach Winterniederschlag
- $p_9$  - Entwässerungswahrscheinlichkeit nach Schöpfwerksflächen
- $p_{10}$  - Entwässerungswahrscheinlichkeit nach Moorschutz
- $p_{11}$  - Entwässerungswahrscheinlichkeit nach bekannten Dränflächen



**Abb. 3:** Verteilungs- und inverse Summenfunktion der zusammengefassten Entwässerungswahrscheinlichkeit.

Das Ergebnis der Fuzzy-Funktion der Gleichung 1 wurde per Rasteroperator im GIS für alle Rasterzellen der Ausgangsdaten berechnet und mit der Gebietskulisse der Landwirtschaftsflächen Mecklenburg-Vorpommerns verknüpft. Dadurch wurde eine Karte der zusammengefassten Entwässerungswahrscheinlichkeiten für diese Flächen generiert. Jede der 25-m-Rasterzellen enthält einen Wert von 0 % bis 100 %, welcher die Wahrscheinlichkeit der Existenz einer landwirtschaftlichen Flächenentwässerung ausdrückt.

Bei Darstellung der Verteilungs- und Summenfunktion der zusammengefassten Entwässerungswahrscheinlichkeit ist erkennbar, dass eine Grenzwahrscheinlichkeit  $p_{\text{Entw}} > 47\%$  einem Entwässerungsanteil von ca. 56 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche entspricht (Abb. 3).

Diese Zahl entspricht nahezu der Angabe im Planungsatlas Landwirtschaft und Nahrungsgüterwirtschaft der DDR (Autorenkollektiv, 1968). Deshalb wurde festgelegt, dass Flächen mit einer Entwässerungswahrscheinlichkeit von  $p_{\text{Entw}} > 47\%$  als entwässerte Flächen angesehen werden können. Die Validierung der Ergebnisse anhand bekannter Dränflächen und statistischer Angaben ergab eine gute Übereinstimmung. So beträgt die mittlere Abweichung zwischen Angaben des Planungsatlasses Landwirtschaft und Nahrungsgüterwirtschaft der DDR (Autorenkollektiv, 1968) und den hochgerechneten Flächengrößen für entwässertes Grünland 7 % und für entwässertes Ackerland 5 %.

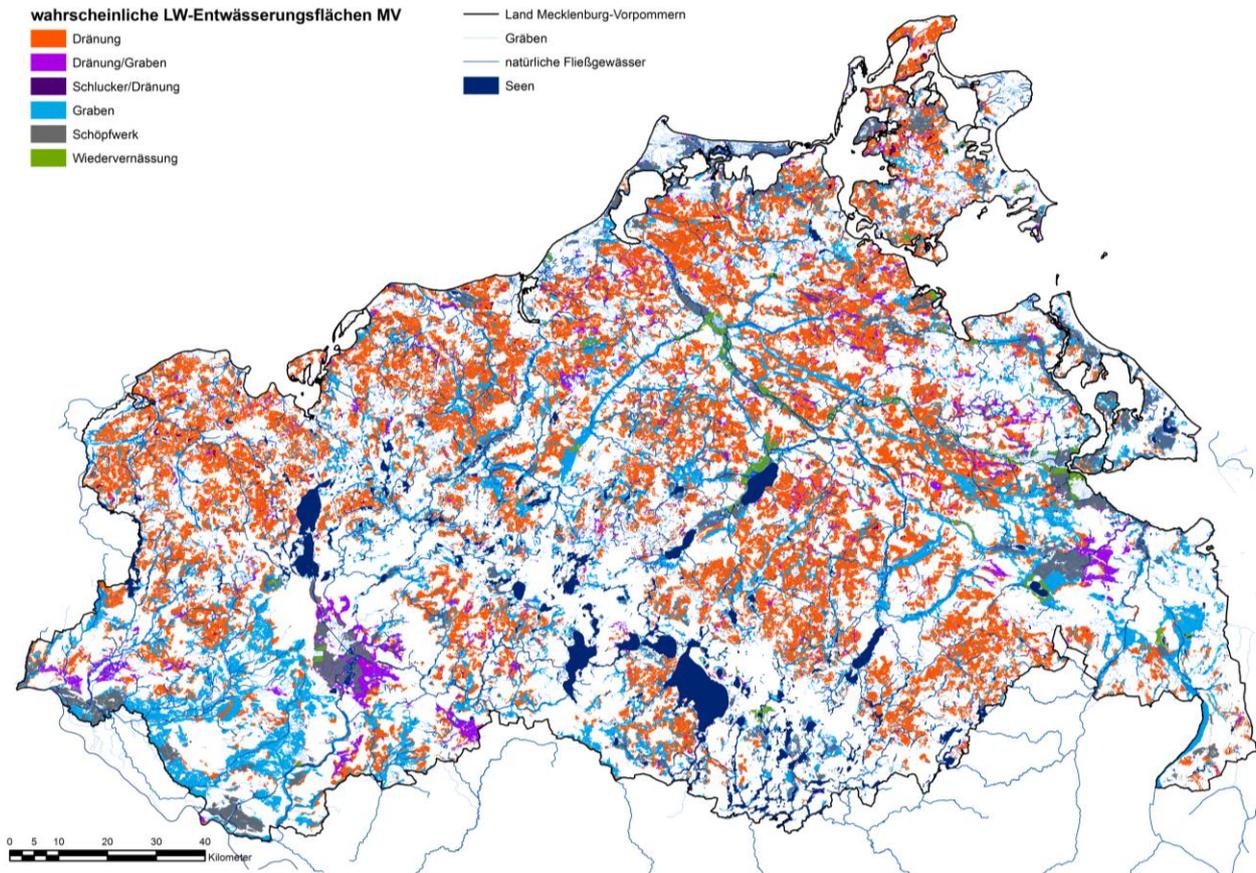
### 3. Ergebnisse

Zentrales Ergebnis ist eine Gebietskulisse, die konkret quantifizierbare Aussagen über die Flächengröße der

künstlichen Entwässerung ermöglicht. Demnach sind ca. 885.000 ha der Landwirtschaftsflächen in Mecklenburg-Vorpommern künstlich entwässert. Dies entspricht einem Anteil von ca. 60 %. Bei Acker beträgt die Entwässerungsquote 53 %; bei Grünland 83 %. Nord- und Ostsee-einzugsgebiete weisen insgesamt kaum Unterschiede auf. Durch landwirtschaftliche Entwässerungsmaßnahmen beeinflusst wird mit ca. 1,6 Millionen ha fast die doppelte Fläche der direkt entwässerten Gebiete.

Neben der Gebietskulisse bietet die vorgestellte Methodik auch einen Ansatz zur Bestimmung des wahrscheinlichen hydrologischen Wirkungstyps einer entwässerten Fläche. Dieser Wirkungstyp wird beim Ergebnisdatensatz über die wahrscheinlich entwässerten Flächen als Geoattribut mitgeführt und erlaubt eine differenziertere Kartendarstellung (Abb. 4).

Demzufolge werden 39 % des Ackerlandes per Dränage, 8 % durch Grabensysteme und 6 % durch kombinierte Systeme mit Graben, Dränage bzw. durch Schöpfwerke entwässert. 47 % der Ackerflächen werden nicht entwässert. Beim Grünland ist der Anteil der Grabenentwässerung mit 39 % gegenüber 15 % Dränenentwässerung wesentlich höher. 9 % der Grünlandgebiete verfügen über ein kombiniertes Graben-Drän-Entwässerungssystem. 16 % des Grünlandes liegt in Schöpfwerksgebieten. Immerhin 4 % ehemaliger Grünlandflächen wurden wieder vernässt. Nur 17 % des Grünlandes in Mecklenburg-Vorpommern verfügen über kein künstliches Entwässerungssystem.



**Abb. 4:** Gebietskulisse der wahrscheinlich entwässerten Landwirtschaftsflächen des Landes Mecklenburg-Vorpommern nach Entwässerungstypen.

#### 4. Diskussion

Der gewählte wahrscheinlichkeitsorientierte Ansatz einer Bestimmung der künstlich entwässerten Landwirtschaftsflächen für das Land Mecklenburg-Vorpommern hat sich als zielführend erwiesen. Es ist eine deutliche Verbesserung des Kenntnisstandes zu den Dränanlagen und -flächen vor allem im Hinblick auf wasser- und stoffhaushaltliche Betrachtungen erreicht worden.

Der landesweit einheitliche Ansatz wurde mit statistischen Daten abgeglichen, so dass eine höhere Übereinstimmung zwischen Flächeninformationen und Statistik erzielt werden konnte. Als großer Zugewinn ist die Differenzierung der Entwässerungsflächen nach hydrologischem Wirkungstyp zu betrachten. Sie erlaubt im Weiteren eine Berücksichtigung der unterschiedlichen hydrologischen Auswirkungen von Drän-, Graben-, Schlucker- (Versickerungsschächte) oder Schöpfwerksentwässerung.

Betont werden muss an dieser Stelle, dass die Ausweisung der Entwässerungsflächen allein auf einer intelligenten Verschneidung großräumig vorliegender Geofaktoren mit mittlerem räumlichen und fachlichen Detailgrad basiert. Lagedaten zu realen Entwässerungssystemen sind mit Ausnahme der Schöpfwerksflächen nur zu Vergleichs- und Kalibrierungszwecken in die Gebietskulisse eingegangen. Eine Überlagerung mit Planungsunterlagen und den Ergebnissen von Vor-Ort-Untersuchungen wird aus den o. g. Gründen und gerade für relativ klein-

räumige Fragestellungen weiterhin für unverzichtbar gehalten.

#### 5. Schlussfolgerungen

Gegenüber konventionellen Methoden wie Sammlung und Digitalisierung von Altunterlagen oder gar Bestandserhebung vor Ort ist der deutlich geringere Aufwand einer Entwässerungsflächenbestimmung hervorzuheben.

Der in Mecklenburg-Vorpommern verfolgten Strategie zur Reduzierung der diffusen Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft in die Gewässer entsprechend, werden neben den ursachenbezogenen landwirtschaftlichen Maßnahmen im engeren Sinne (Düngemanagement usw.) auch nachgeschaltete, wasserseitige Maßnahmen geprüft (Koch, 2010). Diese ermöglichen über eine Steuerung des Wasserhaushaltes unter Inanspruchnahme natürlicher Stoffumsetzungsprozesse eine Verminderung von Nährstoffeinträgen in die Gewässer (Trepel, 2007, 2009). Vor allem handelt es sich dabei um Maßnahmen des landwirtschaftlichen Wasserbaus. Es sind dazu in Mecklenburg-Vorpommern Demonstrationsvorhaben, z. B. zur Reaktivierung von Feuchtflächen als Nährstoffsinken zwischen Dränabläufen und Einleitung in das Fließgewässer sowie zum Dränmanagement im Sinne einer Bodenwasserregulierung geplant.

Das Ergebnis liefert zudem einen wichtigen Beitrag zur Grundlagenforschung. Generell notwendig sind u. a. die Verbesserung des Kenntnisstandes zur hydrologischen

und stofflichen Prozessstruktur bei gedränten Flächen (Kahle et al. 2005a, 2005b, 2007; Kahle und Lennartz, 2005) und Untersuchungen zum Abfluss beschleunigenden und Stoffrückhalt mindernden Einfluss verrohrter Gewässer (Mehl et al., 2003).

## 6. Literatur

- Autorenkollektiv, 1968. Planungsatlas Landwirtschaft und Nahrungsgüterwirtschaft der DDR. Rat für landwirtschaftliche Produktion und Nahrungsgüterwirtschaft der DDR, Greifswald.
- Kahle, P., Lennartz, B., 2005. Untersuchungen zum Stoffaustausch aus landwirtschaftlich genutzten Dränflächen in Nordostdeutschland. *Wasserwirtschaft* 9, 45-49.
- Kahle, P., Tiemeyer, B., Lennartz, B., 2005a. Skalenabhängige Stickstoffausträge aus gedränten Einzugsgebieten des Norddeutschen Tieflands. In: TU Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft (Hrsg.): Workshop: N-Umsatz in der Dränzone und im Grundwasser. S. 5. Dresden.
- Kahle, P., Tiemeyer, B., Lennartz, B., 2005b. Stoffausträge aus landwirtschaftlichen Nutzflächen über Dränung. *Wasserwirtschaft* 12, 12-16.
- Kahle, P., Tiemeyer, B., Deutsch, B., Lennartz, B., 2007. Untersuchungen zum Stickstoffaustrag über Dränung in einem nordostdeutschen Tieflandinzugsgebiet. *Wasserwirtschaft* 6, 25-29.
- Koch, F., 2010. Konzept zur Minderung der diffusen Nährstoffbelastungen in den Oberflächengewässern und im Grundwasser in Mecklenburg-Vorpommern. Vortrag auf dem 15. Gewässersymposium des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern in Güstrow. [http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/gewsymp\\_15\\_12\\_koch\\_diffuse\\_naehrstoffe.pdf](http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/gewsymp_15_12_koch_diffuse_naehrstoffe.pdf). Zugriff: 08.10.2010.
- Mehl, D., Marquardt, A., Kollatsch, R.-A., Neumann, B., 2003. Bestandsaufnahme nach Wasserrahmenrichtlinie in Mecklenburg-Vorpommern: Zum Ausmaß der Fließgewässerverrohrung. *Wasserwirtschaft* 9, 42-46.
- Mehl, D., Steinhäuser, A., Klitzsch, S., 2004. Die Trends der mittleren Niederschlags- und Abflußverhältnisse in den Flußgebieten Mecklenburg-Vorpommerns. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* 43, 63-134.
- Mehl, D., 2004. Grundlagen hydrologischer Regionalisierung: Beitrag zur Kennzeichnung der hydrologischen Verhältnisse in den Flußgebieten Mecklenburgs und Vorpommerns. Dissertation, Universität Greifswald.
- Mehl, D., Steinhäuser, A., Koch, F., Kuchler, A., 2009. Regionalisierung der Nährstoffbelastung in Oberflächengewässern in Mecklenburg-Vorpommern. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 53, 336-341.
- Mehl, D., Hoffmann, T. G., Helbig, H., 2009. Bestimmung der morphologischen Auen in Sachsen-Anhalt mit Hilfe eines Fuzzylogik-Ansatzes. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2, 659-665.
- Trepel, M., 2007. Dränung – Nährstoffausträge, Flächenausweisung und Management. *Wasserwirtschaft* 6, 30-32.
- Trepel, M., 2009. Nährstoffrückhalt und Gewässerrenaturierung. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2, 211-215.
- UBA – Umweltbundesamt Dessau-Roßlau, 2009. Nährstoffeinträge in die Oberflächengewässer Deutschlands. <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2873>. Zugriff: 23.09.2009.
- WRRL – Europäische Wasserrahmenrichtlinie, 2000. Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der EG Nr. L 327/1 vom 22.12.2000. Brüssel.

## Historische und aktuelle Gewässerentwicklung im Havel-Quellgebiet (Mecklenburg-Vorpommern)

Mathias Küster<sup>1</sup>, Knut Kaiser<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universität Greifswald, Institut für Geographie und Geologie, Friedrich-Ludwig-Jahn Straße 16, 17487 Greifswald, mathias.kuester@uni-greifswald.de; <sup>2</sup>Deutsches GeoForschungsZentrum – GFZ, Telegrafenberg, 14473 Potsdam

**Zusammenfassung:** Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Gewässerentwicklung im Havel-Quellgebiet innerhalb der letzten ca. 1000 Jahre. Geowissenschaftliche Untersuchungen, ergänzt durch archäologische und historische Quellen, ermöglichen die Rekonstruktion von Wasserständen (See-, Fluss- und Grundwasserspiegel). Im 10.-12. Jahrhundert lagen die Wasserstände etwa im heutigen Niveau, lokal sogar etwas darunter. Im 13. Jahrhundert wurden ehemalige Binnenentwässerungsgebiete für den Betrieb von Wassermühlen an die Vorflut angeschlossen. Im 17.-18. Jahrhundert lagen die Wasserstände ca. 1-2 m über dem heutigen Niveau. Als Grund für diesen Anstieg werden anthropogene Eingriffe und Auswirkungen der Kleinen Eiszeit vermutet. Hydromeliorationen führten im 19. und 20. Jahrhundert zu einer sukzessiven Abnahme der Wasserstände. In den 1960er-90er Jahren kam es durch Moorentwässerungen für eine intensive landwirtschaftliche Nutzung, Ausbringung und Einleitung kommunaler Abwässer sowie eine intensive Fischereiwirtschaft zu erheblichen Umweltschäden (Moordegradation, Abnahme der Gewässergüte, Minderung der Biodiversität). Seit Gründung des Müritz-Nationalparks 1990 wurden Maßnahmen zur lokalen Revitalisierung des Wasser- und Stoffhaushaltes umgesetzt. Während der hydrologische und ökologische Zustand der von der Havel durchflossenen Seen stabil ist bzw. teilweise sogar positiv beeinflusst wurde, weist der überwiegende Teil zu- und abflussloser Seen und Moore im Gebiet mindestens seit den 1990er Jahren um bis zu 1 m gefallene Wasserspiegel auf.

### Historical and current development of the headwaters of the Havel River (Mecklenburg-Vorpommern)

**Abstract:** This contribution focuses on the local hydrological and ecological development of the headwaters of the Havel River during the last ca. 1000 years. Geoscientific investigations, supplemented by archaeological and historical data, allow a reconstruction of water levels for the study area. During the 10<sup>th</sup>-12<sup>th</sup> century water levels approx. were at the current topographic level, locally even somewhat below. During the 13<sup>th</sup> century this former area of interior drainage was connected to the upper Havel receiving water in order to operate water mills. In the 17<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> century the water levels lay approx. 1-2 m above the current level. Human impact and climate influence during the Little Ice Age are assumed to be the responsible factors. In the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> century drainage measures led to a gradual decline of water levels. During the 1960s to 90s, intensive agriculture and fishery as well as waste water release caused serious environmental damages (peatland degradation, decreasing water quality/eutrophication, decreasing biodiversity). After foundation of the Müritz National Park in 1990 several local measures on the revitalisation of the water and matter balance were implemented. The hydrological and ecological status of lakes and peatlands directly influenced by the Havel River could be stabilised or even improved by these measures. By contrast, the groundwater water levels of the elevated relief positions (dominating outwash plains) are decreasing. Accordingly, the water levels of several groundwater-fed lakes and peatlands without surficial drainage are falling; partly around 1 m since the 1990s.

### 1. Einleitung

Der Landschaftswasserhaushalt in Nordostdeutschland unterliegt einem umfassenden Wandel. Großräumig absinkende Grundwasser- und Seespiegel, zurückgehende Abflussmengen in den Fließgewässern und austrocknende Moore werden zunehmend als Ausdruck eines regionalen „Wasserdefizit-Syndroms“ thematisiert. Mit verschiedenen Mitteln wird versucht, dem entgegen zu wirken (z.B. Quast, 2008; Kaiser et al., 2010; Lischeid, 2010; Germer et al., im Druck). Das Problem betrifft auch geschützte Landschaften, darunter Großschutzgebiete, die zumindest teilweise formal vor einer (weiteren) Beeinträchtigung ihrer Feuchtgebiete durch Entwässerungsmaßnahmen und intensive Landnutzung geschützt sind. Allerdings wirken sich hier die historischen Veränderungen des Wasserhaushaltes in der Gegenwart ebenso aus, wie auch vielfach die aktuelle Landnutzung und Vegetationsbedeckung nicht im Einklang mit dem zur Feuchtgebietserhaltung Notwendigen steht. Hinzu kommen die Folgen des Klimawandels.

Natürliche, ursächlich primär mit der Klimaentwicklung verbundene und anthropogene Prozesse steuern gemeinsam seit etwa 800 Jahren in Nordostdeutschland den Landschaftswasserhaushalt. Ohne Wissen über diese historisch-anthropogene Komponente bleibt das Verständnis der langfristigen hydrologischen Dynamik min-

destens vage, wenn nicht fehlerhaft. Für praktische Maßnahmen mit dem Ziel der Feuchtgebietserhaltung/-entwicklung ist daher eine zeitlich möglichst hoch aufgelöste Kenntnis der hydrologischen Gebietsentwicklung erforderlich. Wenngleich diese historisch-hydrologischen bzw. paläohydrologischen Prozesse regional wenigstens in groben Zügen bekannt sind (z.B. Driescher, 2003; Bleile, 2004, 2005; Kaiser et al., im Druck), ist für räumlich konkrete Zwecke lokales landschaftsgeschichtliches Wissen jeweils neu zu erarbeiten.

Das Havel-Quellgebiet (HQG) im südlichen Mecklenburg gehört zu denjenigen Landschaften in Nordostdeutschland, die aufgrund ihres naturräumlichen Potenzials sowohl touristisch attraktiv und weitgehend (natur-)geschützt, als auch historisch recht gut untersucht sind (z.B. Hube, 1932; Treichel, 1957; Kaiser und Zimmermann, 1994; Driescher, 2003; Küster und Janke, 2009). Man kann hier sogar von einer gewissen Tradition historisch-geographischer Forschung mit Bezug zur Gewässerentwicklung sprechen. Der nachfolgende Beitrag gibt einen Überblick zum gegenwärtigen lokalen Forschungsstand und verbindet dabei die historische mit der aktuellen Perspektive auf den Wasserhaushalt.

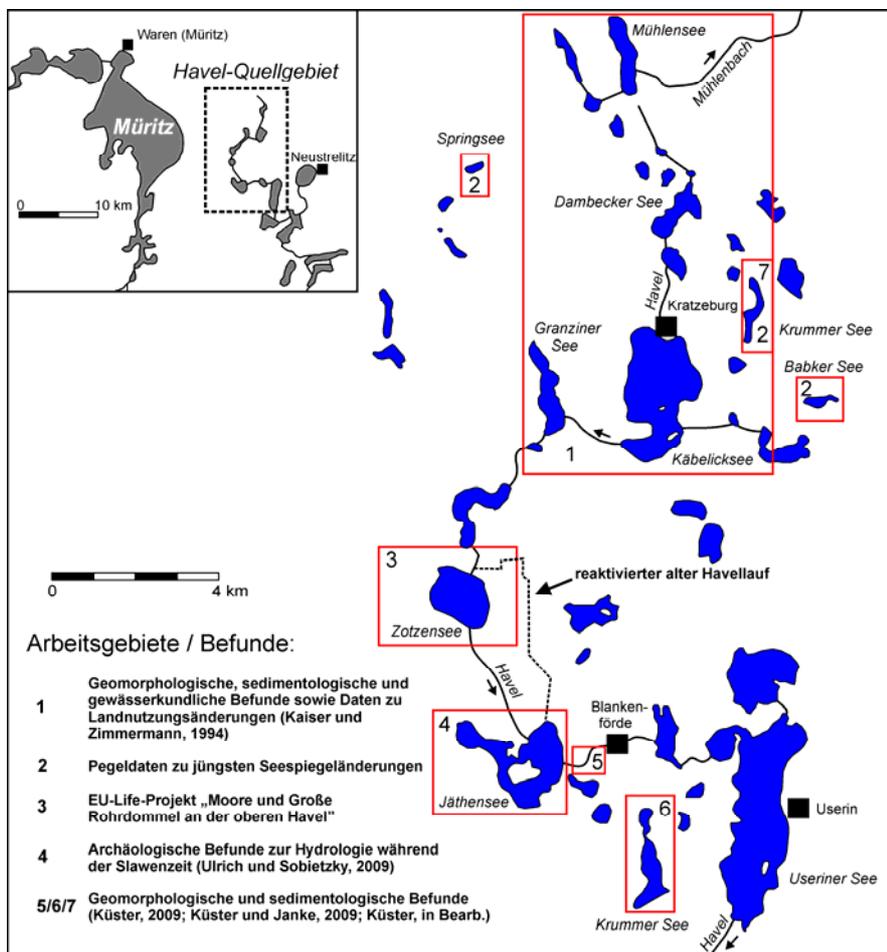
## 2. Untersuchungsgebiet

Das HQG – damit wird hier ein über das Haveleinzugsgebiet im hydrographischen Sinne hinausgreifender Raum bezeichnet – ist naturräumlich Bestandteil des Mittelmecklenburgischen Höhenzugs- und Kleinseengebietes (nordwestlicher Randbereich der Neustrelitzer

Kleinseenplatte; alle nachfolgenden Angaben aus Kaiser und Zimmermann, 1994). Der größte Teil des Gebietes gehört zum Sander des weichselglazialen Pommerschen Stadiums, d.h. sandig-kiesige Sedimente dominieren. Unmittelbar nordöstlich des Dambecker Sees (Abb. 1) befindet sich die Pommersche Hauptendmoräne, die Höhen von ca. 100 m HN erreicht. Die im HQG zumeist in Rinnenstrukturen angeordneten Seen, Moore und Fließgewässer haben ein Niveau von ca. 60-65 m HN. Der mittlere Jahresniederschlag im HQG beträgt 580 mm, die mittlere Jahrestemperatur beträgt 8,0 °C.

Das HQG entwässert zum einen nordwärts über den Mühlenbach (Peene-Einzugsgebiet) in Richtung Ostsee und zum anderen südwärts über die Havel in Richtung Nordsee. Als „Quelle“ der Havel gilt das Diekenbruch. Entsprechend dem unterschiedlichen jährlichen bzw. jahreszeitlichen Wasserdargebot lässt sich jedoch erst am Ausfluss des Dambecker Sees, zuweilen auch erst am Ausfluss des Käbelicksees ein steter Durchfluss feststellen.

Die Grundwasserdynamik entspricht in etwa den oberirdischen Abflussbedingungen. Im HQG befinden sich zwei lokal in Kontakt stehende Grundwasserleiter. Der Grundwasserflurabstand zum ersten (unbedeckten) Aquifer beträgt großflächig oft weniger als 5 m. Die Seen im HQG gehören verschiedenen hydrologischen Typen an (z.B. Grundwasserseen, Fließseen und Quellseen; Mauersberger, 2002). Trotz einer teilweisen Anbindung an Fließgewässer werden aber sämtliche Seen dominierend durch Grundwasserzustrom gespeist.



**Abb.1:** Teilarbeitsgebiete und Befunde im Havel-Quellgebiet.

Der größte Teil des HQG ist seit 1990 Bestandteil des Müritz-Nationalparks, wobei vor allem die Seen und Moore die wertvollsten Ökosysteme darstellen. Im Gebiet dominieren vergleichsweise naturferne Altersklassenforsten aus Kiefer. Daneben gibt es kleinflächig Ackerland sowie intensiv und extensiv genutztes (Moor-) Grünland; hinzu kommen Siedlungs- und Infrastrukturf lächen. Ein Teil der Seen wird extensiv fischereiwirtschaftlich genutzt.

### 3. Daten und Methoden

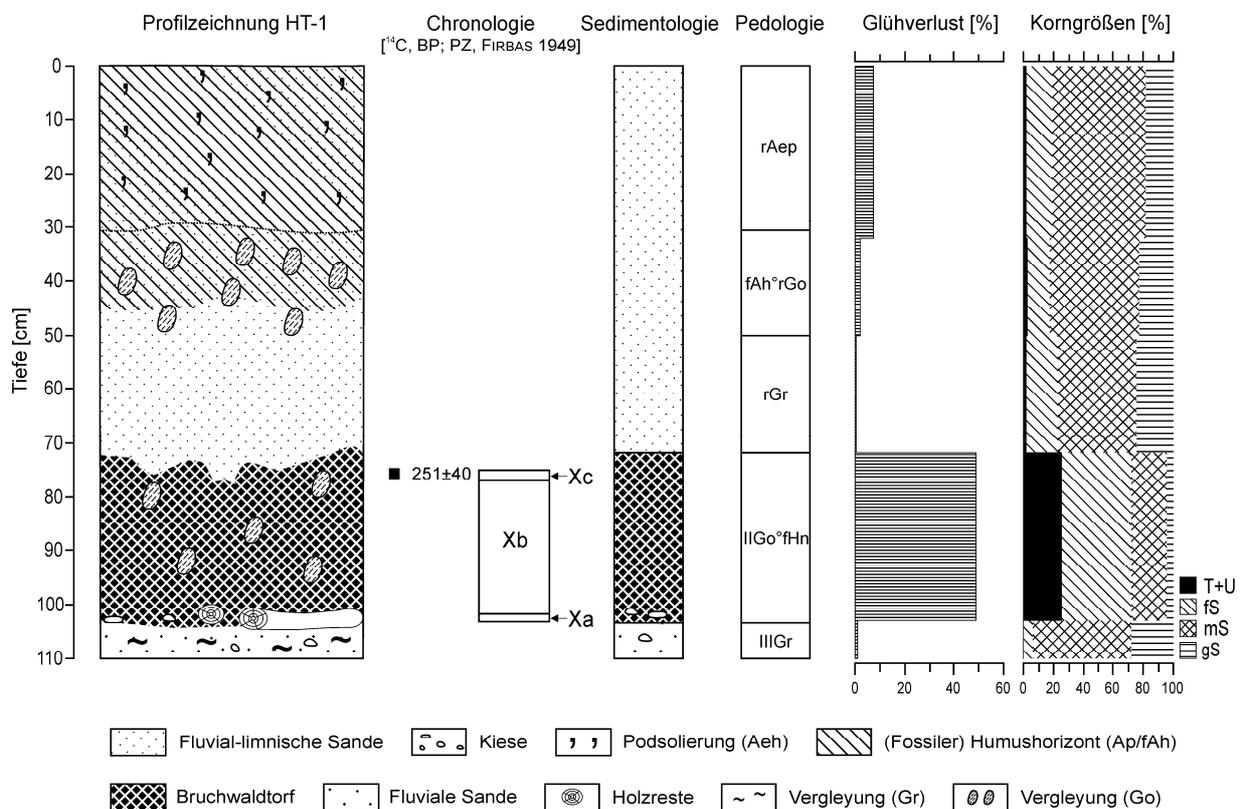
Zur Rekonstruktion der hydrologischen Verhältnisse wurde eine Zusammenschau geomorphologisch-sedimentologischer und archäologischer Befunde vorgenommen und durch Daten aus archivalischen Quellen ergänzt. Hinzu kommen aktuelle Seepegeldata, die durch das Staatliche Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburgische Seenplatte in Neubrandenburg zur Verfügung gestellt wurden. Die Geländeuntersuchungen erfolgten an ausgewählten Standorten durch Anlage von Bodengruben auf einer durch Meinke et al. (1967) und Peter (1967) beschriebenen und flächenhaft im HQG vorkommenden Terrasse ca. 1 m oberhalb der rezenten Seespiegel bzw. der heutigen Abflussschwellen der Havel. Die Bodenprofile wurden jeweils lithologisch und pedologisch beschrieben und teilweise für Laboruntersuchungen beprobt. Die Datierung der Profile erfolgte durch palynologische und archäologische Befunde sowie eine AMS-<sup>14</sup>C-Datierung (Erl-13098; kalibriert nach Stuiver et al., 2005). Die Chronologie der Pollendaten fußt auf Pollenzonen nach Firbas (1949). Die vorliegenden Datierungen ergeben zum einen Hinweise auf das

Alter bestimmter Sedimentschichten und zum anderen ein Maximalalter der überlagernden Terrassensande. Sämtliche Profilloberflächen wurden durch Nivellements eingemessen und auf den rezenten Wasserspiegel bezogen. Aufgrund der in den neuen Bundesländern verwendeten geodätischen Grundlagen mit Höhenbezug zum Kronstädter Pegel, werden die folgenden Höhenangaben in „m HN“ angegeben. Beträge von Seespiegelsenkungen seit dem 19. Jh. AD basieren auf Angaben in archivalischen Quellen (umfassend zusammengefasst durch Hube, 1932) sowie auf dem Vergleich mit topographischen Karten (Kaiser und Zimmermann, 1994).

### 4. Ergebnisse und Diskussion

#### 4.1 Paläohydrologische Befunde

Die Havelniederung westlich von Blankenförde ist durch eine beidseitig des Flusses vorhandene Terrasse gekennzeichnet, die im südlichen Teil mit einem inaktiven Steilufer markant an eine pleistozäne Hochfläche grenzt. Auf der Terrasse wurde das Profil HT-1 angelegt (Oberfläche auf ca. 60,5 m HN; Abb. 2). Der Aufschluss zeigt an der Terrassenbasis grobkörnige fluviale Sande und Kiese, bedeckt durch einen 30 cm mächtigen Bruchwaldtorf. Das untersuchte Pollenspektrum verweist auf den Beginn des Torfwachstums in spätslawischer Zeit (PZ Xa; Küster und Janke, 2009). Das Torfwachstum ist dann über das deutsche Mittelalter bis in die Neuzeit hinein belegt (PZ Xb, Xc). Eine an der Torfoberkante durchgeführte AMS-<sup>14</sup>C-Datierung ergab ein Alter von 251 ± 40 BP (1616-1683 AD, 2σ).



**Abb. 2:** Sedimentologie, Pedologie und Chronologie des Terrassenprofils HT-1 westlich von Blankenförde (verändert nach Küster und Janke, 2009).

Diese Datierung stützt somit die palynologische Alterseinordnung und verweist auf ein maximal frühneuzeitliches Alter der darüberliegenden fluvial-limnischen Sande. Ein angestiegenes Abflussniveau der Havel bzw. ein am Standort wahrscheinlich durch Mühlenstau entstandener See führte zu verstärkter Ufererosion, wobei die vermoorten Randbereiche der Havel in Folge überandeten. Im Oberboden (30-45 cm) befindet sich ein begrabener (fossiler) Humushorizont (fAh<sup>r</sup>Go), der möglicherweise bei Flussbeträumungen oder durch Überschwemmungen mit Sand überdeckt wurde. In diesem Sand ist ein schwach podsolierter Pflughorizont (rAep) entwickelt, der auf die ehemalige ackerbauliche Nutzung der Terrasse verweist.

Am Südwestufer des Dambecker Sees wurden drei Profile aufgenommen; eine Bohrung im Flachwasser des Sees (Seeoberfläche 63,3 m HN) und zwei Bodengruben auf einer sanft gegen ein inaktives Steilufer ansteigenden Uferterrasse (Steiluferfuß ca. 65 m HN; Kaiser und Zimmermann, 1994; Abb. 3). In Profil 2 wird ein spät-mittelalterliche-frühneuzeitliche Artefakte (15./16. Jh.) führender Holztorf von limnischen Sanden überdeckt. In Profil 3 lagern über einer Kalkmudde unbekanntes Alters ebenfalls limnische Sande; darin befinden sich bis 10 cm große Steine. Letztere werden als im Flachwasser aufbereiteter und konzentrierter Schutt vom ehemals aktiven Steilufer interpretiert. Die Befunde von Profil 2 und Profil 3 lassen einen frühneuzeitlichen Wasserspiegelanstieg des Dambecker Sees auf etwa 65 m HN vermuten. In welcher Höhe der Seespiegel vor diesem Anstieg gelegen haben könnte, ist anhand von Profil 1 in Verbindung mit archäologischen Funden im ca. 2 km havelabwärts gelegenen Käbelicksee zu vermuten. In Profil 1 wurzeln in einem von Wasser und Kalkmudde überdeckten Torf Baumstubben (Kiefer). Torf und Stubben belegen einen zeitweisen Wasserstand des Sees von mindestens 0,5-1 m unter dem heutigen Niveau. Neolithische und slawische Artefakte vom „Werder“ – einer Insel im

südlichen Käbelicksee (Hollnagel, 1955) – sowie mesolithische, neolithische, slawische und mittelalterliche Artefakte aus dem Flachwasser der unweit gelegenen „Kleinen Rohrinsel“ (Schoknecht, 1994) deuten auf einen tieferen vormittelalterlichen-vorneuzeitlichen Seespiegel des Käbelicksees. Dessen Wasseroberfläche lag dabei etwa 0,5-1 m unter dem rezenten Niveau von 62,2 m HN. Der Käbelicksee und der Dambecker See besaßen und besitzen nach Ausweis historischer und aktueller topographischer Karten einen Wasserspiegelunterschied von ca. 1 m. Selbst nach einer beide Seen betreffenden anthropogenen Wasserspiegelsenkung in den 1920er Jahren (s.u.) blieb diese Differenz erhalten. Daher vermuten wir für den Dambecker See ein Niveau vor dem frühneuzeitlichen Wasserspiegelanstieg von etwa 62,5 m HN.

Die eigenen Befunde und Ergebnisse weiterer Autoren erlauben für das HQG die Ableitung eines Wasserstandsmodells für den Zeitraum der letzten 1000 Jahre (Abb. 4). Aufgrund archäologischer *in situ*-Funde von Brückenösenpeilern als Reste einer Brückenverbindung zwischen der Insel Schulzenwerder und dem Ufer des Jäthensees (dendrochronologisch datiert) postulieren Ulrich und Sobietzky (2009) hier für das 11. Jh. AD einen Wasserstand, der etwa dem heutigen entsprechen hat. Sedimentologisch-palynologisch lässt sich in der Havelniederung bei Blankenförde ab der ausklingenden Slawenzeit bis in die Frühe Neuzeit ein Moormilieu rekonstruieren. Das ununterbrochene Aufwachsen des Torfkörpers zeichnet einen moderat ansteigenden mittelalterlichen (Grund-) Wasserstand nach. Während dieser Zeit führen die Schaffung künstlicher Seenverbindungen und die Errichtung von Mühlenstauen im HQG zu Veränderungen der (See-) Einzugsgebiete, der Seeniveaus und -flächen sowie zur Verringerung der Größe und Anzahl von Binnenentwässerungsgebieten (Treichel, 1957; Driescher, 2003).

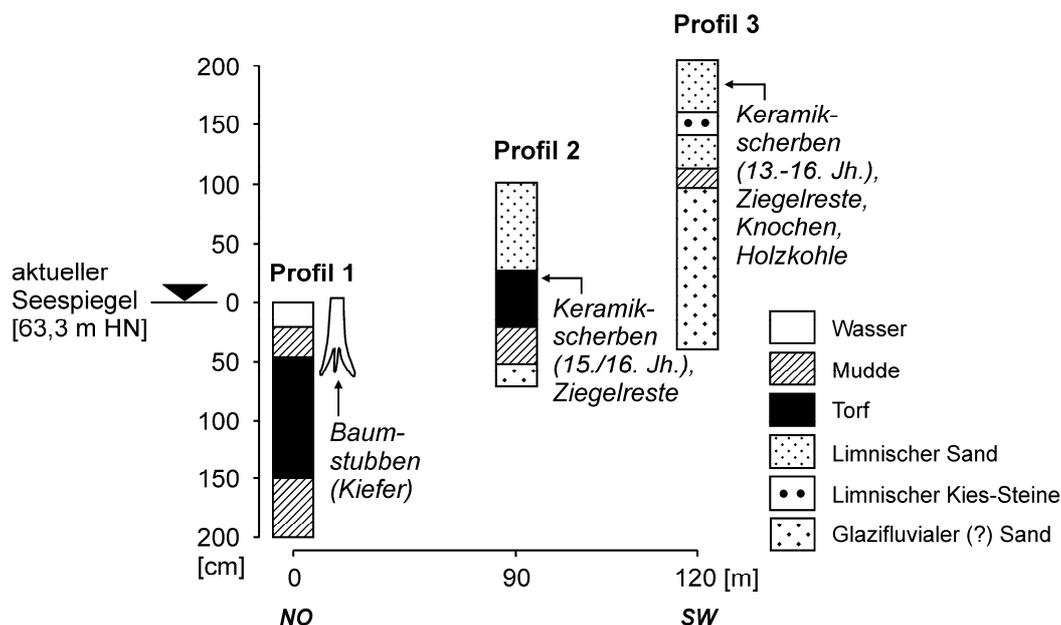


Abb. 3: Sedimentprofile am Südwestufer des Dambecker Sees (verändert nach Kaiser und Zimmermann, 1994).



wirtschaftlich genutzte Flächen (mit Gülleausbringung, Mineraldüngung, Pestizideinsatz und teilweiser Abwassererregung) direkt an die Seen. Von 1978 bis zum Ende der 1990er Jahre erfolgte während der Vegetationsperiode in den oberirdischen Einzugsgebieten des Käbelicksees, des Granziner Sees und des Dambecker Sees sowie im unterirdischen Einzugsgebiet des Großen Bodensees die Verregnung mechanisch behandelter Kommunalabwässer aus Neustrelitz. Die Abwassererregung fand auf einer Fläche von ca. 190 ha statt; die verregneten Wassermengen betragen je nach Anbaukultur 150-500 mm a<sup>-1</sup>. Ein Vergleich mit Gewässergütedaten für den Zeitraum vor der Abwassererregung belegte eine nachfolgende Eutrophierung der Seen (Kaiser und Zimmermann, 1994). Bis Mitte der 2000er Jahre war hier noch die Verregnung des gereinigten Ablaufs der Kläranlage Neustrelitz zu verzeichnen.

Bis zum Beginn der 1990er Jahre wurden große Flächen im HQG jahrzehntelang durch die Sowjetarmee für militärische Übungszwecke genutzt (Meßner, 2009). Die Folgen waren neben der nutzungsbedingten Offenhaltung und einer damit gegenüber Waldflächen verstärkten Grundwasser- und Abflussbildung auch die lokale Kontamination mit Kampfmitteln und Treibstoffen.

Mit der Einrichtung des Müritz-Nationalparks 1990 wurde die Grundlage für einen wirkungsvollen Schutz der trotz der Nutzungsbeeinträchtigungen immer noch wertvollen Naturausstattung des HQG geschaffen. Dazu zählen vor allem die Seen und Moore, deren teilweise Revitalisierung – insbesondere was den Wasserhaushalt betrifft – einen naturschutzfachlichen Schwerpunkt bildet (Kobel und Spicher, 2010).

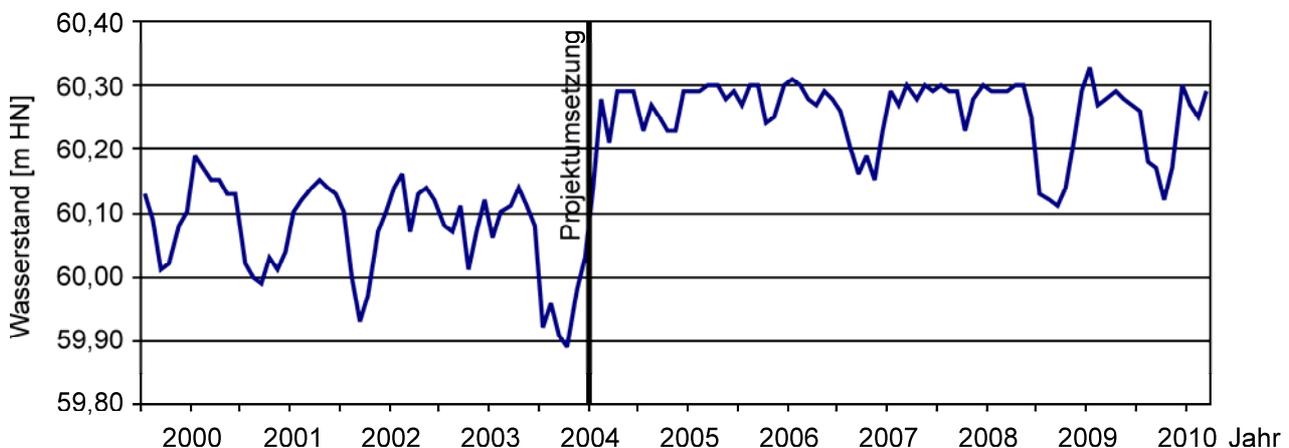
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die wirtschaftliche Nutzung des HQG zu erheblichen Eingriffen in den Landschaftswasserhaushalt und -stoffhaushalt führte. Hauptfolgen der intensivierten Landnutzung im 20. Jh. waren für die Seen deren (Wieder-) Absenkung/Verkleinerung und Eutrophierung, für die Moore deren weitgehende Trockenlegung und Vegetationsveränderung sowie für den Havellauf dessen weitgehender Ausbau/Neubau. Wird der Gesamtcharakter der Landschaft

betrachtet, so verdeutlicht eine Sequenz von topographischen Karten den Wandel von einer hauptsächlich landwirtschaftlich genutzten Kulturlandschaft im 18. Jh. zu einer vorwiegend forstwirtschaftlich geprägten Kulturlandschaft im endenden 20. Jh. (Kaiser und Zimmermann, 1994).

### 4.3 Revitalisierung des Wasserhaushaltes

Die anthropogenen Eingriffe in den Wasserhaushalt der letzten ca. 100 Jahren und deren negative ökologische Folgewirkungen sind Anlass von verschiedenen Revitalisierungsmaßnahmen, die seit den 1990er Jahren im HQG umgesetzt wurden. So wurde beispielsweise im Jahr 2003 in der Zotzensee-Niederung auf ca. 1.000 ha Fläche das EU-Life-Projekt „Moore und Große Rohrdommel an der oberen Havel“ weitgehend fertig gestellt (Kobel und Spicher, 2010). Zu den wasserbaulichen Maßnahmen gehören unter anderem der Rückbau von Schöpfwerken, die Wiederherstellung der Binnenentwässerung durch den Verschluss von Gräben sowie die Reaktivierung des ursprünglichen(?) Havellaufes (Abb. 1). Dies führte innerhalb eines Jahres zu einem Anstieg des Wasserspiegels des Zotzensees um ca. 20 cm (Abb. 5).

Mittel- bis langfristig wird durch diese Eingriffe ein ansteigender Grundwasserstand erhofft, welcher zum Erhalt und zur Revitalisierung der angrenzenden Niedermoore führen soll. Durch den herabgesetzten Austrag von Nährstoffen aus den Mooren und durch die Wiederherstellung eines naturnahen Flusslaufes kann eine Verbesserung der Gewässertrophie und -struktur erwartet werden. In welchem Umfang die Stoffflüsse aus den Niedermooren durch das ansteigende Grundwasser verändert werden bzw. die Revitalisierung der Moore voranschreitet ist Gegenstand eines aktuellen Forschungsprojektes (Zauft und Zeitz, 2009). Weitere Maßnahmen betrafen die Wiederherstellung des Binnenentwässerungsgebietes um den Großen und Kleinen Bodensee (Teilverfüllung des Bodenbaches), den Bau einer Fischertreppe im Havellauf bei der (ehemaligen) Granziner Mühle – mit nachfolgender geringer Wasserstandsanhhebung des Granziner und Käbelicksees – und die Wiedervernässung des Diekenbruches (Havelquelle).



**Abb. 5:** Pegelstand vom Zotzensee von 1999 bis 2010 (Daten: P. Stüve, Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburgische Seenplatte, Neubrandenburg).

#### 4.4 Aktuelle Seespiegelentwicklung

Für 12 der im Müritz-Nationalpark gelegenen Seen des HQG liegen langjährige Pegelreihen vor, wobei die Mehrzahl regelmäßig seit Ende der 1990er Jahre und wenige Seen bereits schon seit den 1980er Jahren beobachtet werden. Hydrologisch handelt es sich bei den von der Havel durchflossenen Seen um Fließseen (Mauersberger, 2002). Trotz des Zu- und Abflusses der hier noch sehr schmalen Havel erfolgt ihre Wasserspeisung jedoch hauptsächlich durch zuströmendes Grundwasser. Der Wasserspiegel dieser teilweise staugeregelten Seen ist entweder nahezu konstant (z.B. Käbelicksee, Granziner See) oder – aufgrund des oben beschriebenen EU-Life-Projektes – mit ca. 0,2-0,3 m sogar leicht ansteigend (Jäthensee, Zotensee). Der überwiegende Teil der zu- und abflusslosen Seen (Grundwasserseen) im HQG weist jedoch seit dem Beginn der Messungen um bis zu 1 m gefallene Wasserspiegel auf. Dazu gehören z.B. der Springsee östlich von Speck (ca. 1 m Absenkung), der Krumme See östlich von Kratzeburg (ca. 0,5 m) und der Babker See südwestlich von Adamsdorf (ca. 0,5 m; Abb. 6).

Diese mit bis zu 16 ha relativ kleinen Seen liegen alle im Sander. Ihre Wasserspeisung erfolgt hauptsächlich durch das Grundwasser des obersten unbedeckten Aquifers. Die Seeumgebung ist weitgehend bewaldet. Da sich die Seen zumeist in Wasserscheidennähe befinden, ist ihr Einzugsgebiet klein. Eine ähnliche Situation wird für vergleichbare Seen im Teilgebiet Serrahn des Müritz-Nationalparks (mit bis zu ca. 1,2 m Absenkung seit 1982; Stüve, 2010) und im ca. 40 km nordwestlich des HQG gelegenen Naturpark „Nossentiner/Schwinzer Heide“ (mit bis zu ca. 1,2 m Absenkung seit 1982; Lorenz et al., 2010), darüber hinaus aus vielen Gebieten Brandenburgs beschrieben (mit bis zu ca. 3 m Absenkung seit 1975; Germer et al., 2010; Nathkin et al., 2010). Wie für Brandenburg gezeigt wurde – dies ist auch auf die angrenzenden

Bereiche der benachbarten Bundesländer übertragbar – sinkt seit einigen Jahrzehnten großflächig der Grundwasserstand besonders auf den pleistozänen Hochflächen (Landgraf und Krone, 2002). Hinsichtlich der Ursache(n) der Grundwasser- und damit auch der Seespiegelsenkungen wird eine gleichgerichtete Überlagerung von Effekten der Landnutzung (Dominanz wasserzehrender Kieffermonokulturen), der letztlich regional wirksamen Hydromeliorationen vor allem der 1960er-70er Jahre und des Klimawandels diskutiert (z.B. Germer et al., im Druck).

#### 5. Schlussfolgerungen

Nach den bislang vorliegenden Daten kann angenommen werden, dass im HQG zur Zeit der slawischen Besiedlung zwischen dem 10. und 12. Jh. AD die Wasserstände etwa dem heutigen Niveau entsprochen, eventuell lokal sogar etwas darunter gelegen haben. Dies korrespondiert mit weiteren Befunden aus Nordostdeutschland (z.B. Kaiser, 1996; Driescher, 2003; Bleile, 2004, 2005). Mit dem Beginn der deutschen Besiedlung im 13. Jh. AD lassen sich erhebliche menschliche Eingriffe in den Wasserhaushalt nachweisen. Die wirtschaftliche Nutzung der Landschaft führte zum (Aus-) Bau von Fließgewässern, zum Anschluss von Binnenentwässerungsgebieten an die Vorflut und zur Anhebung von See- und Grundwasserständen. Die Havel ist in ihrem obersten Abschnitt ein künstliches Gerinne. Für das 17./18. Jh. AD werden maximale Wasserstände von 1-2 m oberhalb des heutigen Niveaus rekonstruiert. Im 19. und 20. Jh. AD erfolgte durch den Rückbau von Wassermühlen, Hydromeliorationsmaßnahmen und großflächige Aufforstungen eine Absenkung auf das heutige Niveau. Eine intensive Landnutzung – lokal ergänzt durch Abwassereinleitungen – führte v.a. seit den 1960er Jahren zu einer Eutrophierung der Seen, zu einer Trockenlegung von Mooren und zu einer generellen Abnahme der Arten- und Lebensraumvielfalt im HQG.

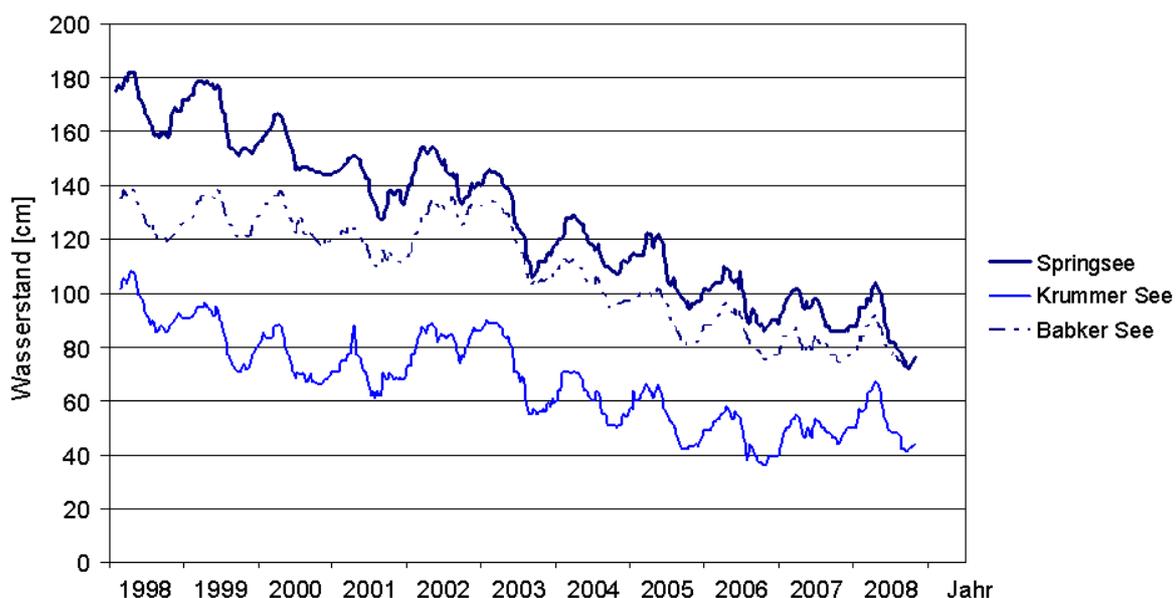


Abb. 6: Seespiegelentwicklung ausgewählter Grundwasserseen im Havel-Quellgebiet von 1998 bis 2008 (Daten: P. Stüve, Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburgische Seenplatte, Neubrandenburg).

Im Rahmen des Schutzstatus als Nationalpark wurden seit 1990 verschiedene Maßnahmen zur Revitalisierung des Wasser- und Stoffhaushaltes umgesetzt, die u.a. auf eine Anhebung der Grundwasser- und Seespiegel entlang der Havel orientiert waren. Kleinere zu- und abflusslose Seen auf den umgebenden Sanderhochflächen weisen hingegen seit mindestens den 1990er Jahren eine negative Tendenz ihrer Wasserspiegel auf. Verbunden mit der Abnahme des Wasservolumens, der Mineralisierung freigelegter Seesedimente und der teilweisen Austrocknung von (Seerand-) Mooren (Abb. 7, 8) ist eine zunehmende Verlandung und möglicherweise auch Eutrophierung dieser Seen zu erwarten (z.B. Veränderung vom mesotrophen zum eutrophen Status).



**Abb. 7:** Zunehmende Verlandung des Springsees infolge der aktuellen Wasserspiegelsenkung (Foto: U. Meßner, Mai 2009).



**Abb. 8:** Durch Torfswund freigelegte Erlenwurzeln in einem Verlandungsmoor am Springsee (Foto: U. Meßner, Mai 2009).

Unter Berücksichtigung des gegenwärtigen Klimatrends und der eine weitere Verschärfung der Wasserbilanzsituation anzeigenden Klimaprojektionen sind zur Erhaltung der Seen, Fließgewässer und Moore weitergehende Maßnahmen im HQG und in den angrenzenden (Grund-) Wasserspeisungsgebieten erforderlich (z.B. Umbau der Kiefernforste in Laubmischwaldbestockungen, Moornaturierung, Extensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung).

Aufgrund der vorliegenden historischen und aktuellen Daten kann die Dynamik hydrologischer Änderungen für

eine Seenlandschaft in Nordostdeutschland nachgezeichnet und die hohe Sensibilität regionaler hydrologischer Systeme auf anthropogene und klimatische Einflüsse aufgezeigt werden. Allgemein lässt sich nach den aus Nordostdeutschland vorliegenden Befunden schlussfolgern, dass – vor dem Hintergrund der jahrhundertelangen und z.T. starken anthropogenen Eingriffe – für die Ableitung eines Referenz-, sprich „natürlichen“ Zustandes des Landschaftswasserhaushaltes eine hydrologische Rekonstruktion für den Zeitraum der mindestens letzten ca. 1000 Jahre erforderlich ist.

### Danksagung

Teilergebnisse der hier vorgestellten Untersuchungen vor allem zur jüngeren Gewässer- und Landnutzungsgeschichte wurden in den 1990er Jahren mit Unterstützung des Nationalparkamtes Müritz und des Umweltministeriums von Mecklenburg-Vorpommern erzielt. Diesen Institutionen möchten wir auch für aktuelle Informationen und Daten herzlich danken. Die Daten zur jüngeren Seespiegelentwicklung wurden freundlicherweise von P. Stüve (Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburgische Seenplatte, Neubrandenburg) zur Verfügung gestellt. Zudem sei der Jost-Reinhold-Stiftung (Ankershagen) für die aktuelle finanzielle Förderung der Untersuchungen gedankt.

### 6. Literatur

- Bleile, R., 2004. Die Auswirkungen des spätmittelalterlichen Wassermühlenbaus auf die norddeutsche Gewässerlandschaft. In: Biermann, F., Mangelsdorf, G. (Hrsg.): Die bäuerliche Ostsiedlung des Mittelalters in Nordostdeutschland. Untersuchungen zum Landesausbau des 12. bis 14. Jahrhunderts im ländlichen Raum. Greifswalder Mitteilungen – Beiträge zur Ur- und Frühgeschichte und Mittelalterarchäologie 7, S. 175-192. Peter Lang, Frankfurt.
- Bleile, R., 2005. Ergebnisse unterwasserarchäologischer Untersuchungen in den Binnenseen Mecklenburg-Vorpommerns. Nachrichtenblatt Arbeitskreis Unterwasserarchäologie 11/12, 103-120.
- Driescher, E., 2003. Veränderungen an Gewässern Brandenburgs in historischer Zeit. Studien und Tagungsberichte des Landesumweltamtes Brandenburg 47. Potsdam.
- Firbas, F., 1949. Die spät- und nacheiszeitliche Waldgeschichte Mitteleuropas nördlich der Alpen. Bd. 1: Allgemeine Waldgeschichte. Fischer, Jena.
- Germer, S., Kaiser, K., Bens, O., Hüttl, R.F., im Druck. Water balance changes and responses of ecosystems and society in the Berlin-Brandenburg region (Germany) – a review. Die Erde.
- Germer, S., Kaiser, K., Mauersberger, R., Stüve, P., Timmermann, T., Bens, O., Hüttl, R.F., 2010. Sinkende Seespiegel in Nordostdeutschland: Vielzahl hydrologischer Spezialfälle oder Gruppen von ähnlichen Seesystemen? In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10, S. 40-48. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Glaser, R., 2001. Klimageschichte Mitteleuropas – 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Hollnagel, A., 1955. Kulturreliktpflanzen auf slawischen Inselfiedlungen im Kreis Neustrelitz. Bodendenkmalpflege in Mecklenburg, Jahrbuch 1953, 151-164.

- Hube, P.O., 1932. Die Entwässerungsverhältnisse im Gebiet der „Oberen Havel“. Dissertation Universität Rostock. Universitätsverlag Robert Noske, Borna-Leipzig.
- Kaiser, K., 1996. Zur hydrologischen Entwicklung mecklenburgischer Seen im jüngeren Quartär. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 140, 323-342.
- Kaiser, K., Zimmermann, A., 1994. Physisch-geographische Untersuchungen an Mooren und Seen im Havelquellgebiet (Müritz-Nationalpark). *Naturräumliches Inventar, jüngere Landschaftsgeschichte und Raumnutzung einer mecklenburgischen Seenlandschaft*. *Berichte der Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege Laufen/Salzach (Bayern)* 22, 147-173.
- Kaiser, K., Schoknecht, T., Prehn, B., Janke, W., Kloss, K., 2002. Geomorphologische, palynologische und archäologische Beiträge zur holozänen Landschaftsgeschichte im Müritzgebiet (Mecklenburg-Vorpommern). *Eiszeitalter und Gegenwart* 51, 15-32.
- Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.), 2010. Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. *Scientific Technical Report 10/10*. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Kaiser, K., Günther, K., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F., im Druck. Historische Veränderungen des Wasserhaushaltes und der Wassernutzung in Nordostdeutschland. In: Kaiser, K., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): *Historische Perspektiven auf Wasserhaushalt und Wassernutzung in Mitteleuropa*. *Cottbuser Studien zur Geschichte von Technik, Arbeit und Umwelt*. Waxmann-Verlag, Münster.
- Kobel, J., Spicher, V., 2010. Entwicklung der Wasserstände ausgewählter Seen und Renaturierung des Wasserhaushaltes im Müritz-Nationalpark. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): *Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen*. *Scientific Technical Report 10/10*, S. 104-109. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Küster, M., 2009. *Holozäne Bodenerosion und Paläohydrologie im Sander des Pommerschen Stadiums bei Blankenförde (Mecklenburg-Strelitz)*. Diplomarbeit, Universität Greifswald, Institut für Geographie und Geologie.
- Küster, M., Janke, W., 2009. Neue Erkenntnisse zur Hydrologie der Oberen Havel in historischer Zeit. *Neubrandenburger Geologische Beiträge* 9, 40-45.
- Landgraf, L., Krone, A., 2002. Wege zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes in Brandenburg. *GWF Wasser/Abwasser* 143, 435-444.
- Lischeid, G., 2010. *Landschaftswasserhaushalt in der Region Berlin-Brandenburg*. Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppen, IAG Globaler Wandel – Regionale Entwicklung, Diskussionspapier 2. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin.
- Lorenz, S., Rowinsky, V., Koch, R., 2010. Historische und rezente Wasserstandsentwicklung von Seen und Mooren im Naturpark "Nossentiner/Schwinzer Heide" im Spiegel der Landnutzungsgeschichte. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): *Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen*. *Scientific Technical Report 10/10*, S. 133-139. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Mauersberger, R., 2002. Hydrologische Seentypen und ihre Kennzeichnung am Beispiel der Seenlandschaften Nordostdeutschlands. In: Kaiser, K. (Hrsg.): *Die jungquartäre Fluss- und Seegenese in Nordostdeutschland*. *Greifswalder Geographische Arbeiten* 26, 227-231. Greifswald.
- Meinke, D., Richter, H., Schulz, J., 1967. Die Terrassenbildungen im Bereich der Oberseen und der Kleinseen des Müritzgebietes. Diplomarbeit, Humboldt-Universität Berlin.
- Meßner, G., 2009. *Geschichte der Müritz-Nationalparkregion*. Wegwarte, Waren/Müritz.
- Nathkin, M., Steidl, J., Dietrich, O., Dannowski, R., Lischeid, G., 2010. Modellgestützte Analyse der Einflüsse von Veränderungen der Waldwirtschaft und des Klimas auf den Wasserhaushalt von Seen. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): *Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen*. *Scientific Technical Report 10/10*, S. 167-172. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Peter, L., 1967. Aufnahmebericht zur Geologischen Übersichtskartierung (1:100 000) der Meßtischblätter Kratzeburg (2543) und Blankenförde (2643). Unveröffentlichter Bericht. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow.
- Quast, J., 2008. Wie können wir besser mit dem knappen Landschaftswasser haushalten? In: *Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (Hrsg.): Ökologische Folgen des Klimawandels*. 5. Stechlinsee-Forum, S. 31-47. Stechlin-Neuglobsow.
- Schoknecht, U., 1994. *Kurze Fundberichte 1993 – Kreis Neustrelitz*. *Bodendenkmalpflege in Mecklenburg-Vorpommern* 41, Jahrbuch 1993, 353-356.
- Stüve, P., 2010. Die Wasserhaushaltssituation der letzten 40 Jahre im Raum der Neustrelitzer Kleinseenplatte. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): *Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen*. *Scientific Technical Report 10/10*, S. 206-211. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Stuiver, M., Reimer, P.J., Reimer, R.W., 2005. CALIB 5.0. WWW program and documentation.
- Treichel, F., 1957. *Die Haupt- und Nebenwasserscheiden Mecklenburgs*. Dissertation, Universität Greifswald.
- Zauft, M., Zeitz, J., 2009. DOC-export from rewetted fens as a function of soil degradation and hydrogenetic mire type. *Proceedings of the 4th Annual Meeting of the European Chapter of the Society of Wetlands Scientists (SWS)*. Progress and problems in wetland sciences – with a particular focus upon wetland restoration in Europe. 20.-24.05.2009, Erkner/Germany, S. 52-53.

## Moorschutz in Brandenburg: Beiträge zur Stützung des Landschaftswasserhaushaltes

Lukas Landgraf

Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Referat Ö 4, Seeburger Chaussee 2, 14476 Potsdam, OT Groß Glienicke, lukas.landgraf@lugv.brandenburg.de

**Zusammenfassung:** Das Land Brandenburg hat eine kritische Situation im Landschaftswasserhaushalt wie kein anderes Bundesland in Deutschland. Sinkende Grundwasserstände prägen die Hochflächen und auch die Niedrigwasserabflüsse zahlreicher Fließgewässer sinken von Jahr zu Jahr im Sommer. Angesichts dieser Situation und der zu beobachtenden Klimatrends ist es in einigen Regionen schwierig, Moore wiederzuvernässen. Dass der Mensch jedoch nicht ohnmächtig dem Klimawandel gegenüber steht, sondern den Landschaftswasserhaushalt selbst entscheidend verbessern kann, zeigen Praxisbeispiele und Modellierungen. Besonders erfolgreich sind Moorschutzprojekte dort, wo der negative Einfluss des Menschen auf den Landschaftswasserhaushalt gering ist oder durch Maßnahmen kompensiert werden kann. Im Moorschutz wurden in den vergangenen 20 Jahren mit etwa 3.000 ha Wiedervernässungsfläche im Vergleich zu anderen Bundesländern eher geringere Erfolge erzielt. Notwendig ist die konsequente Umsetzung eines Moorschutzprogramms, wie es sich die Landesregierung im Jahr 2009 zum Ziel gesetzt hat.

### Peatland conservation in Brandenburg: contributions to the stabilisation of the landscape water budget

**Abstract:** The status of the landscape water budget in the Federal State of Brandenburg is critical; it is more extreme than in any other state in Germany. On the plateaus, declining groundwater levels dominate, while the minimal summer flows of numerous rivers fall from year to year. Given this situation and the observed climate trends in some regions, it is difficult to carry out the goal of rewetting peatland. But man is not helpless during this climate change. Practical examples and modelling results show that the landscape water budget can be significantly improved. Particularly successful projects of mire conservation can be found where the negative impact of humans on the landscape water budget is low or can be offset by management measures. In the past 20 years about 3,000 ha of mire has been successfully rewetted, however, this area is small compared to other states. What is needed is the consistent implementation of a mire conservation program, which is the goal that the state government of Brandenburg has set in 2009.

### 1. Einführung

Moore sind Ausdruck eines langfristigen Wasserüberschusses in der Landschaft und als solche ideale Indikatoren für den Zustand des Landschaftswasserhaushaltes. Das Land Brandenburg gehört zu den moorreichsten Bundesländern Deutschlands. Trotz relativ geringer Abflussspenden der märkischen Wassereinzugsgebiete bedeckten Moore noch vor zwei Jahrhunderten über 300.000 ha Landesfläche. Seit der Komplexmelioration der DDR, die in den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts begann, schrumpfte der Moorbestand von 280.000 ha auf heute etwa 210.000 ha. Aktuell befindet sich mit 65 % Flächenanteil der Großteil der Moore in intensiver Nutzung. Lediglich 1,5 % der Moore blieben unentwässert (Abb. 1). Dadurch belasten die brandenburgischen Moore das Klima durch Emission klimaschädlicher Gase in einer Größenordnung, die den Straßenverkehr noch übertrifft (Abb. 2)

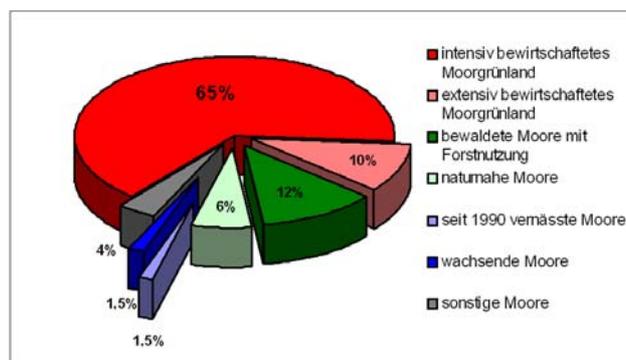
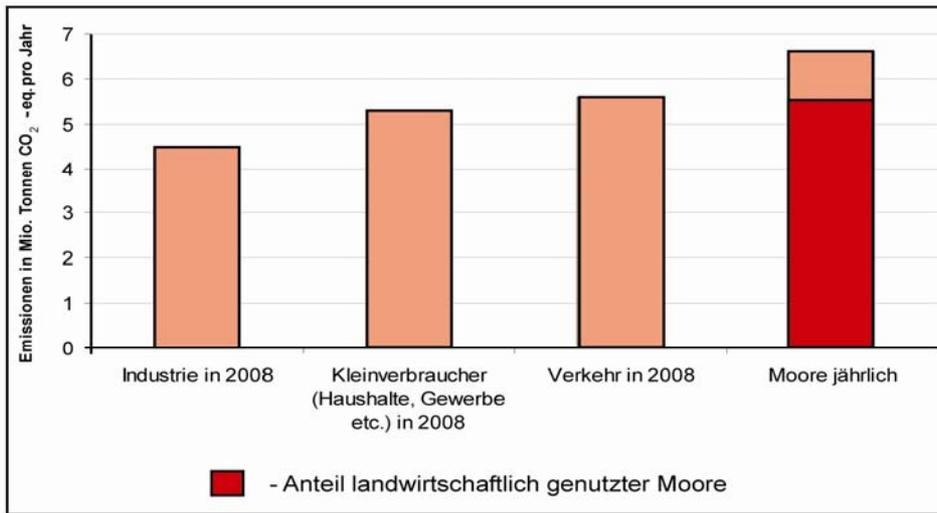


Abb. 1: Zustand der Moore in Brandenburg.



**Abb. 2:** Emissionen aus brandenburgischen Mooren im Vergleich zu anderen Quellen bezogen auf Deutschland (Berechnung für Moore mit Hilfe des GEST-Modells der Universität Greifswald).

Entwässerungsmaßnahmen sind als Hauptursache für den gewaltigen Moorverlust zu nennen, wie er in Brandenburg noch heute zu beobachten ist. Aber auch Änderungen der Landnutzung im Einzugsgebiet von Mooren haben negativ auf deren Wasserhaushalt gewirkt (Abb. 3). Dazu zählt vor allem der großflächige Anbau von Kiefernforsten. In den vergangenen zwei Jahrzehnten werden in vielen Fließgewässern im Einzugsgebiet der Havel rapide sinkende Grundwasserstände im Sommer registriert. Auf vielen Hochflächen sanken in den letzten Jahrzehnten die Grundwasserstände. Vor diesem Hintergrund ist die Frage zu diskutieren, ob angesichts der subkontinentalen Klimabedingungen Brandenburgs und der globalen Klimaveränderungen hier zukünftig überhaupt noch Moorbewuchs möglich ist. Was wird im Land Brandenburg getan, um diesem Trend entgegen zu wirken?

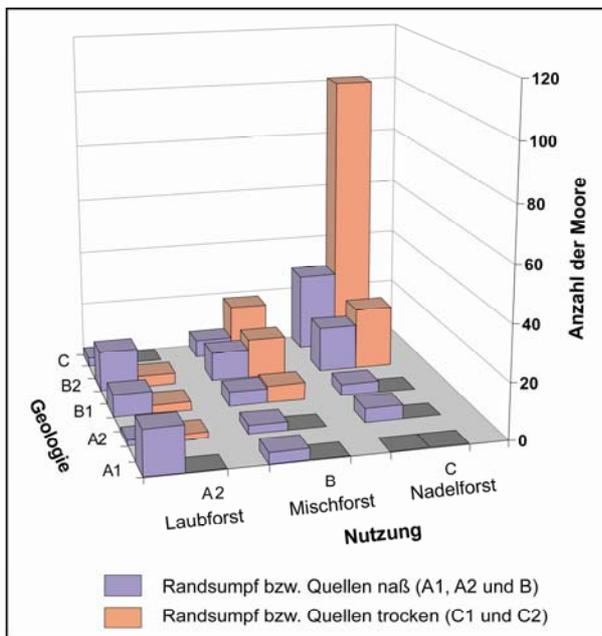
## 2. Landschaftswasserhaushalt und Moore in Brandenburg

Vergleicht man die wasserhaushaltliche Situation verschiedener Regionen in Deutschland, so lässt sich feststellen, dass Brandenburg – wie kein anderes Bundesland – große Probleme mit negativen Veränderungen im Landschaftswasserhaushalt hat. Ausgangspunkt für Maßnahmen zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes war das Trockenjahr 2000. Aufgrund unterdurchschnittlicher Niederschläge in den Monaten Juni und Juli entstanden in der Landwirtschaft Schäden in Höhe von fast 150 Mio € für die es Entschädigungszahlungen gab. Daraufhin wurde vom Umweltministerium eine Projektgruppe einberufen, der 2001 eine Förderrichtlinie zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes folgte. Die Förderrichtlinie wendet sich an die Wasser- und Bodenverbände als Träger der Projekte. In der Förderperiode von 2002 bis 2007 wurden Maßnahmen an ca. 1.900 Wehren durchgeführt, etwa 1.000 Sohlbauwerke errichtet und etwa 290 Durchlässe umgebaut (MLUV, 2008). Die Umsetzung der Maßnahmen steht auch in der neuen Förderperiode bis 2013 immer im Zusammenhang mit einer landwirtschaftlichen Nutzung.

Daher machten Renaturierungsprojekte nur 5 % und Rückbau von Gräben nur 1 % der Maßnahmen aus. Echte Moorschutzmaßnahmen mit der Wiederherstellung wachsender Moore spielen in diesem Förderprogramm

kaum eine Rolle. Von den Wasser- und Bodenverbänden wurde eine Koordinierungsstelle Landschaftswasserhaushalt eingerichtet, die eine fachliche Unterstützung der Zuwendungsempfänger übernimmt und die die zentrale Steuerung zur Verbesserung der Programmumsetzung durchführt. Bislang ist es mit den umgesetzten Maßnahmen nur kleinräumig gelungen, Grundwasserstände und Niedrigwasserabflüsse anzuheben.

Es gibt Stimmen aus der Wasserwirtschaft, die bezweifeln, dass Moore in Brandenburg noch eine Zukunft haben werden. Ist überhaupt genügend Wasser für den Moorschutz da? Kann der Mensch den Wasserhaushalt so beeinflussen, dass Moore wieder wachsen können? Dahinter verbirgt sich die Frage, ob nicht die aktuellen Klimabedingungen die Handlungsmöglichkeiten der Wasserwirtschaft stark einschränken. Tatsächlich führen zahlreiche Moorschutzprojekte nicht zum gewünschten Erfolg, weil das Wasserdargebot für die Speisung nicht ausreicht oder die Grundwasserstände zu tief liegen. Die Betrachtung völlig ungestörter Mooreinzugsgebiete in der besonders trockenen Region Uckermark und Barnim zeigt allerdings, dass hier selbst in ausgesprochenen Trockenjahren wassergesättigte Moore existieren können (Landgraf, 2007; Luthardt et al., 2010). Das sind Moore in regionalen Einzugsgebieten ohne Kontakt zu Grundwasserleitern, die vom Menschen beeinflusst wurden. Deren Einzugsgebiete weisen eine naturnahe Waldbestockung auf, so wie es schon der Fall war, bevor der Mensch in den Landschaftswasserhaushalt eingegriffen hat. Moore mit solchen Rahmenbedingungen sind auch heute noch überwiegend nass und zeigen z. T. sogar steigende Wasserstände, haben also eine positive klimatische Wasserbilanz. Das legt die Schlussfolgerung nahe, dass weniger der Klimawandel als die großräumigen menschlichen Eingriffe in den Wasserhaushalt für die sinkenden Grundwasserstände verantwortlich sind. Andernfalls müsste in den betrachteten ungestörten Mooren ebenfalls eine Austrocknung feststellbar sein. Dies ist aber nicht der Fall. Daher kann angenommen werden, dass der Hauptgrund für den Misserfolg mancher Moorprojekte weniger in der aktuellen Klimasituation, dafür mehr in der massiven negativen Beeinflussung des Landschaftswasserhaushaltes durch den Menschen zu suchen ist.



**Abb. 3:** Zustand der Arm- und Zwischenmoore in Abhängigkeit vom Einzugsgebiet (Geologie: abnehmende Isolation des Grundwasserleiters: A1-Ton und Lehm, Hang steil, A2-Ton und Lehm, Hang flach, B1-Lehm und Sand, Hang steil, B2-Lehm und Sand, Hang steil oder Sand, Hang steil, C-Sand, Hang flach).

Die Erfahrungen mit Moorschutzprojekten haben gezeigt, dass gute Erfolge am ehesten in Poldergebieten, quellgespeisten Mooren, durchströmten Mooren und Mooren in regionalen Grundwasserleitern zu erzielen sind. Berechnungen auf Basis eines Landschaftswasserhaushalts-Modells für die Schorfheide zeigen, dass unter Berücksichtigung von Klimaszenarien allein der Waldumbau zu einem Anstieg der Grundwasserstände führen könnte. In Verbindung mit einem Rückbau des künstlichen Entwässerungssystems wäre es dann für einen großen Teil der Schorfheide möglich, Grundwasserstände herzustellen, wie es sie noch in der 1980er Jahren gegeben hat. Dadurch könnten viele Moore im betrachteten Gebiet wiedervernässt werden (Goral und Müller, 2010).

### 3. Moorschutz – ein langer Weg

Seit 20 Jahren existieren in Brandenburg für den Moorschutz und den Landschaftswasserhaushalt veränderte Rahmenbedingungen. Vor allem Anfang der 1990er Jahre fanden in Niederungen Nutzungsauffassungen, die Abschaltung von Schöpfwerken und Extensivierungen der Nutzung statt. Im Jahr 2001 existierten von ehemals 459 nur noch 229 aktive Schöpfwerke, wodurch sich die geschöpfte Fläche von 233.000 ha auf 158.000 ha reduzierte (Bioplan, 2001). Anders als im benachbarten Bundesland Mecklenburg-Vorpommern, konnte die Mehrzahl dieser Flächen durch Ausbau der freien Vorflut weiterhin genutzt werden.



**Abb. 4:** Quell- und Durchströmungsmoor an der Kunster 2008 vor der Grabenverfüllung (Foto: L. Landgraf).



**Abb. 5:** Quell- und Durchströmungsmoor an der Kunster 2008 während der Grabenverfüllung (Foto: J. Thormann).

Zahlreiche Renaturierungsprojekte fanden in Mooren seit der politischen Wende statt. Gute Erfolge gab es mit dem im Jahr 2005 gestarteten Waldmoorprogramm (Abb. 4, 5). Trotz einer Vielzahl an Maßnahmen ist die Fläche wiedervernässter Moore mit max. 3.000 ha im Vergleich zu anderen Bundesländern relativ klein. Mit Ausnahme einer Übergangsphase in den 1990er Jahren blieben Moorschutzprojekte auf naturnahe Moore und Waldmoore beschränkt. Weder konnten seither größere tief entwässerte Moorflächen durch angepasstes Wassermanagement wiedervernässt werden, noch werden Nutzungsalternativen für nasse Moore in der Praxis angewendet (Paludikulturen).

**Tab. 1:** Chronologie des Moorschutzes in Brandenburg.

| Zeitraum, Jahr             | Aktivität   |
|----------------------------|---|
| Anfang der 1990er Jahre    | Umstellung der Landwirtschaft, Außerbetriebnahme von Schöpfwerken, Extensivierungen, größere Moorvernässungen |
| seit Ende der 1990er Jahre | Umsetzung überwiegend kleiner Moorschutzprojekte im Wald sowie einiger Großprojekte (LIFE, BfN)               |
| seit 2000                  | Thema Landschaftswasserhaushalt wird ein Schwerpunkt der Umweltpolitik / Projektförderung ab 2001             |
| 2005                       | Start des Waldmoorprogramms durch Landesforstverwaltung und Landesumweltamt                                   |
| 2006                       | Start des Moorschutzrahmenplans des NaturSchutzFonds Brandenburg  |
| 2007                       | Beginn der Arbeit der Projektgruppe Moorschutz im Landesumweltamt   |
| 2008                       | Erste Moorschutzförderrichtlinie mit ILE  |
| 2009                       | Moorschutzprogramm als Arbeitsschwerpunkt im Koalitionsvertrag der Landesregierung Brandenburg                |

#### 4. Handlungsbedarf und Ausblick

Die neue brandenburgische Landesregierung hat im Herbst 2009 die Erarbeitung eines Moorschutzprogramms in den Koalitionsvertrag von SPD und LINKE aufgenommen. Besondere Herausforderungen werden Nutzungsalternativen für Moorgrünland, der zunehmende Maisanbau in Niederungen und der Klimaschutz durch Moorschutz sein. Dabei wird es neben einer guten Zusammenarbeit der betreffenden Ressorts auch auf leistungsfähige Träger für Moorschutzprojekte ankommen.

Um ein Moorschutzprogramm zum Erfolg zu führen, sollten folgende Inhalte und Ziele gesetzt werden:

- Fortführung des Waldmoorprogramms / des Waldumbaus vor allem in den Einzugsgebieten von Mooren und Seen;
- Wiedervernässung von 3.000 ha Moorfläche bis 2015;
- verstärkte Umsetzung von Großprojekten;
- Einführung von Paludikulturen als Nutzungsalternativen auf nassen Mooren, Initiierung eines Förderprogramms und landwirtschaftlicher Beratung;
- Überarbeitung der „guten fachlichen Praxis“ auf Moorböden;
- Honorierung von Moorschutz als Klimaschutzmaßnahme.

Ein Moorschutzprogramm kann eine große Chance sein, bei der neben dem Landschaftswasserhaushalt auch das Klima und der wirtschaftende Mensch gewinnen können.

#### 5. Literatur

- Bioplan, 2001. Erfassung der Schöpfwerke im Land Brandenburg. Gutachten im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg.
- Goral, F., Müller, J., 2010. Auswirkungen des Waldumbaus im Waldgebiet der Schorfheide auf die Entwicklung der Grundwasserhöhen und den Zustand der Waldmoore. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg 19 (3/4), 158-166.
- Landgraf, L., 2007. Zustand und Zukunft der Arm- und Zwischenmoore in Brandenburg – Bewertung und Bilanz. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg 16 (4), 104-115.
- Luthardt, V., Meier-Uhlherr, R., Schulz, C., 2010. Moore unter Wassermangel? Entwicklungstrends ausgewählter naturnaher Moore in den Wäldern des Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin unter besonderer Berücksichtigung ihrer naturräumlichen Einbettung und des Witterungsverlaufs der letzten 16 Jahre. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg 19 (3/4), 146-157.
- MLUV – Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz, 2008. Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes. Bericht über das Förderprogramm des Landes Brandenburg 2000 bis 2006. Potsdam.

## Methanfreisetzungen im Rahmen des Auftauens eines überfluteten Küstenmoors

Steffi Lasak, Juliane Hahn, Gerald Jurasinski, Stefan Köhler, Stephan Glatzel

Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Landschaftsökologie und Standortkunde,  
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18051 Rostock, steffi.lasak@uni-rostock.de

**Zusammenfassung:** Saisonales Eis ist ein Speichermedium für klimarelevante Spurengase. Daher spielen Änderungen der Frequenz und Dauer der Eisbedeckung in jahreszeitlich überfluteten Ökosystemen möglicherweise eine große Rolle für dessen Treibhausgasbilanz. Wir untersuchten während des kalten und langen Winters 2009/2010 die Methankonzentration und Methanspeicherung im Eis, welches das Hütelmoor (Rostock, Mecklenburg-Vorpommern) bedeckte. Durchschnittlich beinhaltete das Eis 1,6 bis 3,6 % Gasvolumen, davon 0,26 bis 0,69 % Methan. Die Entfernung von der Ostsee steuerte nicht die Methankonzentrationen. Insgesamt setzte das Gebiet durch Auftauen durchschnittlich 1,13 kg Methan frei. Dies ist im Vergleich zu den Gesamtmethanemissionen unbedeutend. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, wie viel Methan unter dem Eis gespeichert und beim Auftauen freigesetzt wird.

### Seasonal methane release during the thawing of a flooded coastal peatland

**Abstract:** Seasonal ice stores greenhouse gases. Thus, the frequency and duration of ice cover in seasonally flooded ecosystems may influence their greenhouse gas balance. During the long and cold winter 2009/2010, we examined methane concentration and storage in the ice that covered the Hütelmoor peatland (Rostock, Mecklenburg-Vorpommern). On average, the ice consisted to 1.3 to 3.6 % of gas, of which 0.26 to 0.69 % were methane. The distance from the Baltic Sea did not control methane concentration. Compared to the annual total methane release of the peatland, the release rate is small. Further examinations need to show how much methane is stored underneath the ice and consequently released to the atmosphere during thaw.

### 1. Einleitung

Im Rahmen der globalen Erwärmung spielen klimarelevante Spurengase wie Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ) eine entscheidende Rolle. Eine natürliche Methanquelle stellen unter anderem wachsende und wiedervernässte Moore dar. Bis vor wenigen Jahren ging man davon aus, dass Stoffumsetzungsprozesse und damit verbundene Emissionen in Mooren, ausschließlich während der frostfreien Zeit stattfinden. Aktuellere Untersuchungen in Grönland zeigten dagegen einen erhöhten Methanausstoß zu Beginn der Frostsaison (Dise, 1992; Mastepanov et al., 2008). In Japan wurden Messungen während der Tauperiode durchgeführt und beachtliche Methanflüsse verzeichnet (Tokida et al., 2007). Bereits seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts werden im Polareis Gaseinschlüsse festgestellt und gemessen (Brook, 2005). So scheint die Eisbedeckung für das Emissionsverhalten einer Moorfläche von entscheidender Bedeutung zu sein. Der strenge Winter 2009/2010 ermöglichte eine umfangreiche Analyse entnommener Eiskerne. Es konnten unter anderem Erkenntnisse über die Umstände von Gaseinschlüssen ins Eis gewonnen werden. Resultierend ist das Eis zwar für die Speicherung der Emissionsprodukte verantwortlich, setzt selbst jedoch nur geringe Mengen (ca. 2,6 % vom Gesamtvolumen) fest. Das liegt an der polykristallinen Struktur, die nicht mehr Hohlraum bietet. Ist das Dickenwachstum abgeschlossen und damit der Raum zwi-

schen den Molekülen ausgefüllt, sammelt sich die Nachlieferung aus dem Torf unter der Eisschicht

### 2. Material und Methoden

Die Untersuchungen erfolgten in einem brackwasserbeeinflussten Küstenüberflutungsmoor im 490 ha großen Naturschutzgebiet „Heiligensee und Hütelmoor“ in der Rostocker Heide. Die Eiskernentnahmen fanden in unregelmäßigen Abständen vom 21.12.2009 bis 18.02.2010 statt. Während dieser Zeit war die Eisdecke stellenweise bis zu 20 cm stark. Das Eis wurde an 12 Standorten der Untersuchungsfläche entnommen und in Folienbeutel verpackt. Nach dem Transport ins Institut lagerten sie in der Tiefkühltruhe bei  $-20^\circ\text{C}$ .

Vor dem Auftauen, wurden die Eiskerne zunächst dokumentiert, ggf. zurechtgesägt und vermessen. Daraufhin folgte das Verpacken in Folienbeutel, die mittels Vakuummiergerät luftdicht verschweißt wurden. Im Laborkühlschrank tauten sie dann bei  $7^\circ\text{C}$ . In der Regel war das Eis nach drei Tagen vollständig getaut. Die Beutel enthielten zu diesem Zeitpunkt Moorwasser, Pflanzenreste und einige Gasblasen, die sich durch leichtes Schütteln meist zu einer Gasphase zusammenschlossen. Physikalisch bedingt befand sie sich an der höchsten Stelle des Beutels. Hinterher wurde sie, durch Einstechen der Folie, mit einer Kanüle in eine Spritze gezogen. Die Messungen der Gaskonzentrationen erfolgten an einem Gaschroma-

tographien (GC). Da sie in den meisten Fällen zu hoch für eine direkte Messung waren, wurden sie mit Stickstoff verdünnt. Der so entstandene Verdünnungsfaktor wurde nach der Messung verrechnet.

Die Werte lagen vorerst als Konzentrationen [ppb] vor. Die Berechnung einer Freisetzungsrates erfolgte schrittweise. Über die Umwandlung in einen Normzustand, die Massekonzentration und die Masse an CH<sub>4</sub> konnte letztlich die Freisetzung [ $\mu\text{g m}^{-2}$ ] über die Grundfläche der Eiskerne berechnet werden. Eine Freisetzungsrates [ $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ] wurde über die Zeit des Auftauens im Labor ermittelt.

Es folgte die Rückrechnung auf die gesamte Moorfläche, indem die Mittelwerte der Methanfreisetzungen pro Standort miteinander addiert wurden. Ergebnis war eine Freisetzungsrates des Gebiets. Über die Arealgröße (63 ha) und eine angenommene Auftauzeit von 2,5 Tagen (Prahm, 1951), konnte die Gasmenge, die aus dem Eiskörper beim Auftauen freigesetzt wird, abgeschätzt werden.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

Die Messwerte der Eiskerne wurden bezüglich ihrer räumlich und zeitlich variierenden Gasgehalte hin untersucht.

Durchschnittlich beinhalteten sie 1,6 bis 3,6 % Gasvolumen, davon 0,26 bis 0,69 % Methan. Mit maximal 10,7 und 13,9  $\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  übertrafen lediglich zwei Eisproben die sonst relativ geringe Variabilität der Freisetzungsrates (Abb. 1). Auch eine Regressionsgerade mit dem korrigierten Bestimmtheitsmaß von  $r^2 = -0,041$

zeigt, dass dementsprechend die Methankonzentrationen im Eis nicht differieren.

Der anhaltende Frost allerdings scheint sich bei den Freisetzungsrates bemerkbar zu machen (Tab. 1). Bei dieser Betrachtung nehmen sie vom 21.12.2009 bis zum 18.02.2010 zu.

Jedoch ist zu berücksichtigen, dass der Datenumfang der Probetermine sehr unterschiedlich ist, sodass diese Aussage nur vage verfasst werden kann.

Insgesamt setzte das Gebiet bei einer angenommenen mittleren Abschmelzzeit von 2,5 Tagen nach Prahm (1951) durch Auftauen durchschnittlich 1,13 kg Methan frei.

Vergleichbare Gasgehalte im Eis (3,2 % vom Gesamtvolumen) stellten auch Tokida et. al. (2007) fest, die während der Tauperiode im April 2006 ähnliche Messungen auf einem eisbedeckten Moor in Japan durchführten. Allerdings betrug dort der Methananteil ca. 20 %. Da sich nur dieser Gehalt deutlich unterscheidet, werden die Umstände, die zur Methanproduktion im japanischen Moor führen, andere sein. Sowohl die Ähnlichkeit der Gasgehalte im Eis, als auch der einheitliche Aufbau der Eiskerne aus dem Hütelmoor, lassen die Vermutung entstehen, dass es sich beim Gaseinschluss ins Eis eher um physikalische als um ortsbedingte Prozesse handelt.

Bereits während der Dokumentation einzelner Eisschichten entwickelte sich die Annahme, dass der Großteil an Gaseinschlüssen vorrangig im Eisbrei, also während der Eisbildung einfriert.

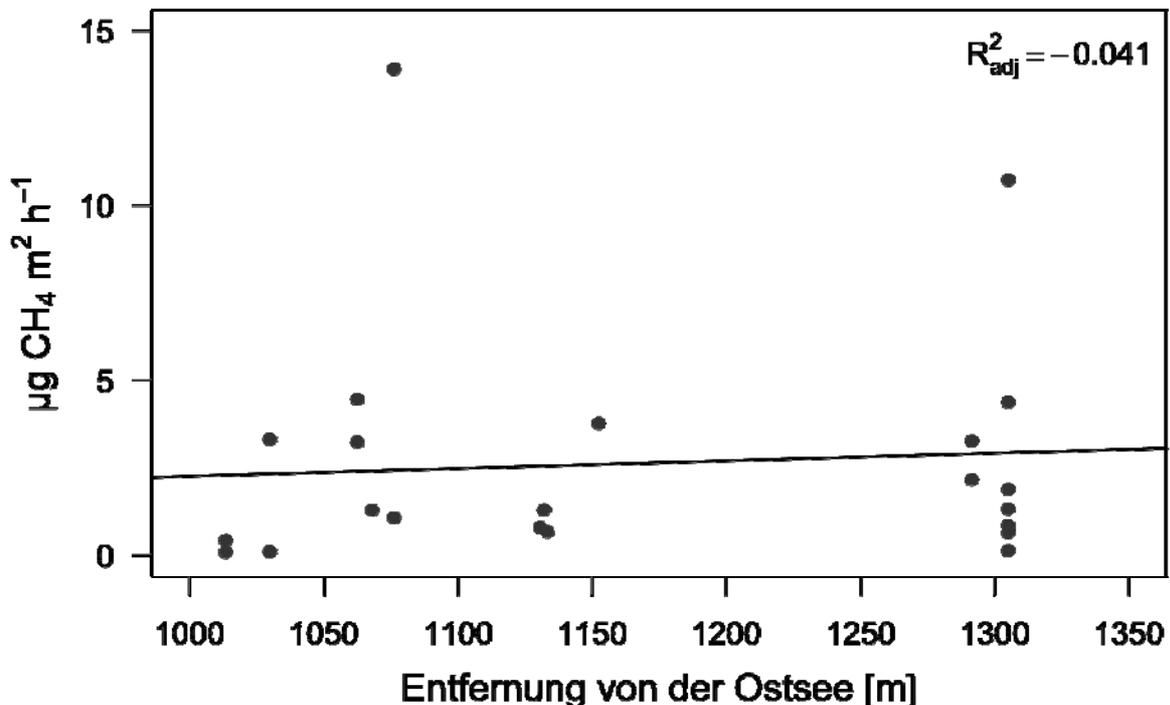


Abb. 1: Methanfreisetzung der Eiskerne verteilt über die Untersuchungsfläche. Die Abszisse zeigt die Entfernung zur Ostsee. Die Regressionsgerade ( $y = 0,0681 + 0,0022x$ ) beschreibt die lokalen Methankonzentrationen.

**Tab. 1:** Methanfreisetzungen der Eiskerne ihrer Lage und ihrer Probenahme zugeordnet. Erkennen lässt sich eine Zunahme der Gehalte mit andauerndem Frost. Angaben: CH<sub>4</sub> in µg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

| Ostseeentfernung [m] | Mittelwert | 21.12.2009 | 07.01.2010 | 11.02.2010 | 18.02.2010 |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1013,54              | 0,43       | -          | -          | 0,43       | -          |
| 1013,54              | 0,26       | -          | 0,09       | 0,43       | -          |
| 1029,89              | 1,71       | -          | 0,11       | 3,32       | -          |
| 1062,59              | 3,85       | -          | -          | 3,24       | 4,46       |
| 1068,04              | 1,29       | -          | -          | 1,29       | -          |
| 1076,21              | 7,49       | -          | -          | 13,91      | 1,08       |
| 1130,71              | 0,80       | -          | -          | 0,80       | -          |
| 1132,07              | 1,30       | -          | -          | 1,30       | -          |
| 1133,43              | 0,68       | -          | -          | 0,68       | -          |
| 1152,51              | 3,77       | -          | -          | -          | 3,77       |
| 1291,47              | 2,72       | -          | -          | 3,27       | 2,16       |
| 1305,10              | 2,54       | 1,33       | -          | 1,89       | 4,38       |
| 1305,10              | 3,10       | 0,66       | 0,14       | 0,86       | 10,74      |



**Abb. 2:** Fotografie einer natürlich „gewachsenen“ Eisprobe. In der obersten Schicht (Primary Ice) sind große Gaseinschlüsse zu erkennen. Die Blasen der darunter liegenden Schicht sind klein und lang entsprechend der Säulenstruktur des Secondary Ice. Die unterste Schicht scheint sich durch den Druck der darunter liegenden Gasblase so auszuformen und bildet wahrscheinlich den Abschluss des Secondary Ice.

Unter natürlichen Umständen bildet eine Eisdecke verschiedene Schichten aus, die durch einen unterschiedlichen Kristallaufbau charakterisiert sind. Zu Beginn bildet sich ein plättchenförmiges Gefüge, das geschlossen aufschwimmt. Bei anhaltender Gefriertemperatur kommt es zum Zusammenschluss von Kristallen, die durch Wind

oder Flut in ihrer Ordnung gestört werden und in einer Suspension vorliegen (Petrenko und Whitworth, 1999) Aufgrund dieser Unordnung stände ausreichend Hohlraum für Gaseinträge zur Verfügung. Kompression könnte der Grund für die Größe der Gasblasen sein (Abb. 2), die anschließend durch Gefrieren eingeschlossen werden.

Unter dieser "Primary Ice"-Schicht kommt es in stillen Gewässern bei anhaltend tiefen Temperaturen zur Ausbildung von "Secondary Ice". In ihr bilden sich die Kristalle säulenartig unter der Oberfläche aus. Sie sind deutlich breiter, als die der darüber liegenden Schicht und daher weniger an der Zahl. Ihre Anordnung unterliegt keinem Zufall. Eine Komprimierung ist nicht möglich (Petrenko und Whitworth, 1999).

Mit dieser Symmetrie lässt sich die dichte und regelmäßige Verteilung der kleinen Blasen in dieser Schicht erklären (Abb. 2). Sind diese Zwischenräume ausgefüllt, wird das übrige Gas weiter nach unten geschoben, wobei sich Beobachtungen zufolge große Gasblasen unter der Eisdecke bilden. Nimmt diese Gasblase über die Frostdauer an Volumen zu, wird auch der Druck, den sie von unten auf die Eisfläche ausübt, größer werden. Ein erhöhter Druck bewirkt bei Eis allgemein das Zerfallen der Kristallstruktur (Atkins et al., 1998). Dies ist vermutlich die Ursache dafür, dass bei fast allen Eisproben eine weitere unter dem Secondary-Ice liegende Schicht festgestellt werden konnte, in der große Gasblasen vorzufinden waren. Das würde auch die leicht zunehmenden Methankonzentrationen über die Frostperiode erklären (Tab. 1).

Resultierend ist das Eis zwar für die Speicherung der Emissionsprodukte verantwortlich, setzt selbst jedoch nur geringe Mengen (ca. 2,6 % vom Gesamtvolumen) fest. Das liegt an der polykristallinen Struktur, die nicht mehr Hohlraum bietet. Ist das Dickenwachstum abgeschlossen und damit der Raum zwischen den Molekülen ausgefüllt, sammelt sich die Nachlieferung aus dem Torf unter der Eisschicht.

#### 4. Literatur

- Atkins, P.W., Beran, J.A., 1998. Chemie einfach alles. VCH, Weinheim.
- Brook, E. J., 2005. Tiny bubbles tell all. *Science* 310, 1255-1287.
- Dise, N. B., 1992. Winter fluxes of methane from Minnesota peatlands, *Biogeochemistry* 17, 17-83.
- Mastepanov, M., Sigsgaard, C., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Ström, L., Tamstorf, M. P., Christensen, T. R., 2008. Large tundra methane burst during onset of freezing. *Nature* 456, 628-631.
- Petrenko, V. F., Whitworth, R. W., 1999. *Physics of ice*. Oxford University Press.
- Prahm, G., 1951. Die Abschmelzzeit des Eises an den deutschen Küsten zwischen Ems und Oder. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 4(1/2).
- Tokida, T., Mizoguchi, M., Miyazaki, T., Kagamoto, A., Nagata, O., Hatano, R., 2007. Episodic release of methane bubbles from peatland during spring thaw. *Chemosphere* 70, 165-171.

## Historische und rezente Wasserstandsentwicklung von Seen und Mooren im Naturpark „Nossentiner/Schwinzer Heide“ (Mecklenburg-Vorpommern) im Spiegel der Landnutzungsgeschichte

Sebastian Lorenz<sup>1</sup>, Volkmar Rowinsky<sup>2</sup>, Ralf Koch<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universität Greifswald, Institut für Geographie und Geologie, Jahn-Straße 16, 17487 Greifswald, sebastian.lorenz@uni-greifswald.de; <sup>2</sup>IHU – Geologie & Analytik GmbH, Tieplitzer Straße 8, 18276 Groß Upahl; <sup>3</sup>Naturpark „Nossentiner/Schwinzer Heide“, Ziegenhorn 1, 19395 Karow

**Zusammenfassung:** Im Naturpark „Nossentiner/Schwinzer Heide“ liegen für über 100 Grundwasser-, Moor- und Seepegel Aufzeichnungen aus den letzten 15 bis 50 Jahren vor. Diese erlangten für hydrogeologische und hydrologische, stratigraphische und vegetationskundliche Untersuchungen große Bedeutung, wobei vor allem die Klocksiner Seenkette, die Große Wisch, die Dobbiner und Klädener Plage sowie der Drewitzer See Untersuchungsgegenstand waren. Zur Verbesserung des Wasserhaushaltes wurde in den Jahren 1996 bis 1999 eine größere Zahl von Maßnahmen umgesetzt, z.B. der Rückbau von Schöpfwerken und die Wiederherstellung von Binnenentwässerungssystemen. Mit Hilfe von Pegeldaten erfolgt eine Dokumentation der Grund-, Moor- und Seewasserstände im Sinne eines Monitorings. Seit 1982 liegen für den Drewitzer See Pegelaufzeichnungen vor, welche bis zum Jahr 2008 ein Absinken des Wasserspiegels um mehr als 1,2 m dokumentieren (durchschnittliches Absinken der Grundwasserstände von 4,6 cm/a). Darüber hinaus liegen Beschreibungen von Wasserstandsschwankungen und deren landnutzungsgeschichtlicher Relevanz zwischen ca. 1800-1940 vor. In diesem Zeitraum bewirkten Eingriffe in den Wasserhaushalt der Oberen Seen mit dem Ausbau der Müritz-Elde-Wasserstraße und die Verringerung von intakten Binnenentwässerungsgebieten negative Veränderungen der Grundwassersituation.

### Historical and recent water-level changes of lakes and peatlands in the Nature Park "Nossentiner/Schwinzer Heide" (Mecklenburg-Vorpommern) as mirrored by the land use history

**Abstract:** More than 100 groundwater, peat bog and lake level gauging records are available from the last 15-50 years for the area of Nature Park "Nossentiner/Schwinzer Heide". These data were of great importance for hydrogeological and hydrological, vegetation and stratigraphic investigations covering several study areas. To improve the regional water budget, a large number of practical measures were implemented in the years 1996-1999, such as the dismantling of pumping stations and the restoration of interior landscape drainage systems. The effect of these measures on the groundwater table was monitored with gauging sites. Lake level records are available since 1982 for Lake Drewitzer See, which document a decrease in the water level of more than 1.2 m by the year 2008 (4.6 cm/a average decline of groundwater table). In addition, descriptions of water level variations and their historical land use relevance exist for the period 1800-1940. During this period anthropogenic interventions in the adjacent Obere Seen area and the reduction in interior drainage areas had negative influences on Lake Drewitzer See and on surrounding mires and lakes.

#### 1. Thematische und naturräumliche Einführung

Der mecklenburgische Naturpark „Nossentiner/Schwinzer Heide“ ist seit Juli 1994 mit einer Fläche von 365 km<sup>2</sup> gesetzlich gesichert. Er erstreckt sich zwischen den Höhenzügen der Endmoränen der Frankfurter Phase im Süden und jener der Pommerschen Phase der Weichselvereisung im Norden. Die naturräumliche Ausstattung der Nossentiner/Schwinzer Heide wird vor allem durch Sanderflächen bestimmt, die von Norden nach Süden abdachen und größtenteils von Wald (v.a. Kieferforste) bedeckt sind (60 % der Fläche; Abb. 1). Nur 20,5 % werden landwirtschaftlich genutzt, Seen nehmen einen Anteil von 13 % ein (Naturpark Nossentiner/Schwinzer Heide, 1999). Bedeutende Fließgewässer sind die Nebel

und die Mildnitz, die über die Warnow in die Ostsee entwässern. Neunzehn Prozent der Naturparkfläche nehmen Naturschutzgebiete ein. Niedermoore stellen mit 3.548 ha (10 % der Fläche) ebenso wie die Seen und Fließgewässer ein bedeutendes Landschaftselement im Naturpark dar.

In den Jahren 1999-2001 wurden daher durch das Landesamt für Forsten und Großschutzgebiete Mecklenburg-Vorpommern eine Erfassung der Moore im Naturpark „Nossentiner/Schwinzer Heide“ in Auftrag gegeben (Gesellschaft für Ingenieur-, Hydro- und Umweltgeologie mbh, 2001). Von den 347 erfassten Niedermooren überwiegen die Klein- und Kleinstmoore, 135 Moore nehmen eine Fläche von maximal 1 ha ein.

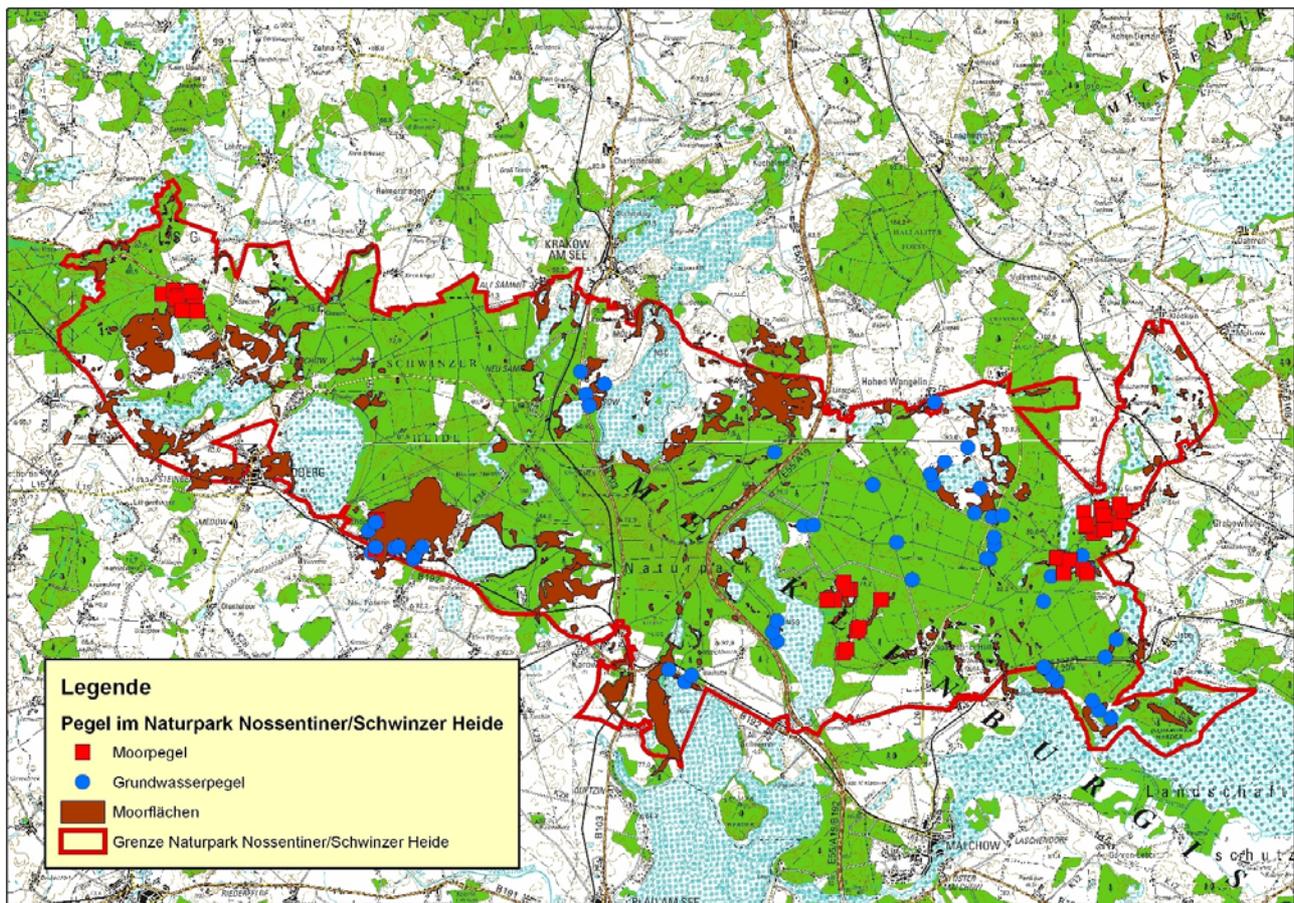


Abb. 1: Niedermoorflächen und Pegelstandorte im Naturpark „Nossentiner/Schwinzer Heide“.

Die überwiegend tiefgründigen Moore (71 % der Moorfläche mit Moormächtigkeit über 12 dm) sind hauptsächlich den hydrogenetischen Moortypen Versumpfungs- (35,8 % Flächenanteil), Verlandungs- und Durchströmungs- (59,8 % Flächenanteil) und Kesselmoor (4,5 % Flächenanteil) zuzuordnen. Sie befinden sich in Abhängigkeit von Entwässerungsgrad und Nutzungsintensität in unterschiedlichen Erhaltungszuständen. Nur noch 8 % der im Naturpark vorkommenden Niedermoores sind naturnah, d. h. ihr Wasserspiegel liegt nahe oder über der Geländeoberfläche. Hierzu gehören überwiegend die relativ kleinen, nicht entwässerten Moore, v. a. torfmoosreiche Kessel- und Verlandungsmoores.

Während der letzten 40 Jahre bewirkten der Ausbau von Gräben und Drainagen zur tiefgreifenden Entwässerung von Moorflächen, der Bau von Schöpfwerken, die sukzessive Tieferlegung der Flüsse Milde nitz und Nebel sowie die zunehmende Nutzungsintensität der Moorgrünlandflächen vor allem in den Sanderflächen eine deutliche Absenkung der Grundwasserstände. Diese verursachten schwerwiegende Standortveränderungen im Bereich der Niedermoorflächen und zeigten auch an Seepegeln deutliche negative Auswirkungen (Rowinsky, 2003). Zusätzlich wurden Binnenentwässerungsgebiete zerschnitten. Langfristig beeinflusste auch die Forstwirtschaft über Baumartenwahl und Bestandespflege den Wasserhaushalt.

Ein hydrologisch und ökologisch herausragendes Gewässer ist der Drewitzer See (ca. 61 m HN, A=6,92 km<sup>2</sup>,

T<sub>max</sub>=33 m, AE=24 km<sup>2</sup>, mesotroph), der zentral im Naturpark gelegen ist (Abb. 1) und sich auf der Wasserscheide zwischen Ostsee und Nordsee erstreckt (Rowinsky, 2003; Lorenz, 2007). Er verzeichnete in den vergangenen drei Jahrzehnten eine Absenkung seines Wasserspiegels um mehr als 1,2 m (Abb. 2). Für den Drewitzer See liefern paläohydrologische und limnogeologische Untersuchungen zudem Aussagen zu säkularen Wasserstandsveränderungen seit dem Spätglazial (Lorenz 2007).

## 2. Methoden und Datengrundlage

Im Naturpark liegen für mehr als 100 Grundwasser-, Moor- und Seepiegel mehr oder weniger kontinuierliche Aufzeichnungen aus den letzten 15 bis 50 Jahren vor (Abb. 1). Die Pegel daten wurden in der jüngeren Vergangenheit durch die Staatlichen Ämter für Umwelt und Natur Rostock und Neubrandenburg, im Rahmen von Gutachten durch die IHU Geologie & Analytik GmbH sowie vor allem durch den Naturpark selbst erhoben.

Schwerpunkte der Untersuchungen bildeten mehrere große Mooregebiete und Seen, vor allem die Klocksiner Seenkette, die Große Wisch, die Dobbiner und Klädener Plage sowie der Drewitzer See. Ziel der Untersuchungen war neben der Erhebung von moorkundlichen Daten, wie Stratigraphie und Vegetation, v. a. die Erfassung der hydrogeologischen und hydrologischen Situation. Im Rahmen eines LIFE-Projektes wurde in den Jahren 1996 bis 1999 eine größere Zahl von Maßnahmen zur Verbes-

serung des Wasserhaushaltes umgesetzt, wie der Rückbau von Schöpfwerken und die möglichst weitgehende Wiederherstellung von Binnenentwässerungssystemen. Mit Hilfe von Pegel­daten erfolgt eine Dokumentation der Grund-, Moor- und Seewasserstände.

Die historischen Wasserstandsveränderungen des abflusslosen Drewitzer Sees stehen in engem Zusammenhang mit den Oberen Seen (die Kette großer Seen von der Müritz im Osten bis zum Plauer See im Westen) und entstammen für Angaben zum 19. Jahrhundert aus Akten des Landeshauptarchivs in Schwerin (Lorenz, 2007) und für jüngere Entwicklungen der Literatur (u.a. Thiemann, 1949; Schulz, 1968; Ruchhöft, 2002).

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Die historische Wasserstands­entwicklung des Drewitzer Sees

Ab November 1982 liegen für den Drewitzer See Pegel­aufzeichnungen vor, welche bis zum Jahr 2008 ein Absinken des Wasserspiegels um mehr als 1,2 m dokumentieren. Gemittelt über diese 26 Jahre ist ein durchschnittliches Absinken der Grundwasserstände von 4,6 cm pro

Jahr zu verzeichnen. Als Perioden besonders starken Absinkens sind die Jahre 1987-1992 ( $\sim 23 \text{ cm a}^{-1}$ ), 1994-1997 ( $\sim 17 \text{ cm a}^{-1}$ ) und 2001-2006 ( $\sim 11 \text{ cm a}^{-1}$ ) erkennbar. Es deutet sich eine Verminderung der jährlichen Senkungsbeträge an (Abb. 2). Sinkende Seewasserstände führen zu einer sukzessiven Freilegung der Schorre und zur Ausbildung kleiner Terrassen, Strandwall- und Eisschubwallabfolgen. Schon Terrassennivellements der 1960er Jahre (Schulz, 1968) verdeutlichen eine stufenartige Abfolge von bis zu drei Terrassen geringer Verbreitung, deren unterste Stufe heute mindestens 1,5 m über dem gegenwärtigen Seespiegel liegt (Abb. 3). Daraus kann ein Abwärtstrend des Seespiegels abgeleitet werden, der schon deutlich vorher eingesetzt hat. Historische Quellen verdeutlichen den engen Zusammenhang zwischen hydrologischen Veränderungen im Bereich der Oberen Seen und Schwankungen des Drewitzer Sees. In erster Linie sind hier die zweimaligen wasserbaulichen Korrekturen der Oberen Seen in den Jahren 1798-1803 und 1831-1837 zu nennen, die auf strenge Regulierung der Wassermühlenstau, eine verbesserte Schiffbarkeit und eine Nivellierung der Seewasserspiegel abzielten (Ruchhöft, 2002; Lorenz, 2007).

Abb. 2: Wasserstands­entwicklung des Drewitzer Sees im Zeitraum 1982-2008.

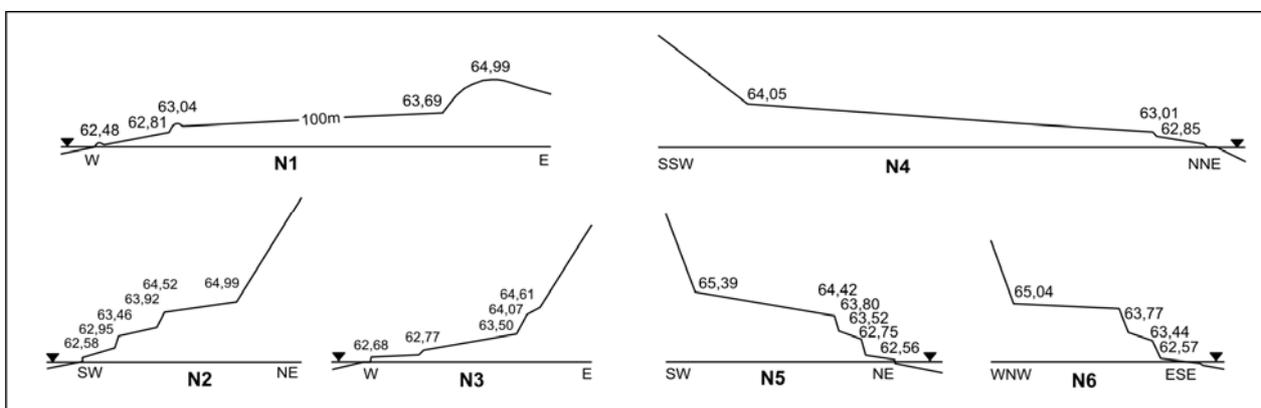
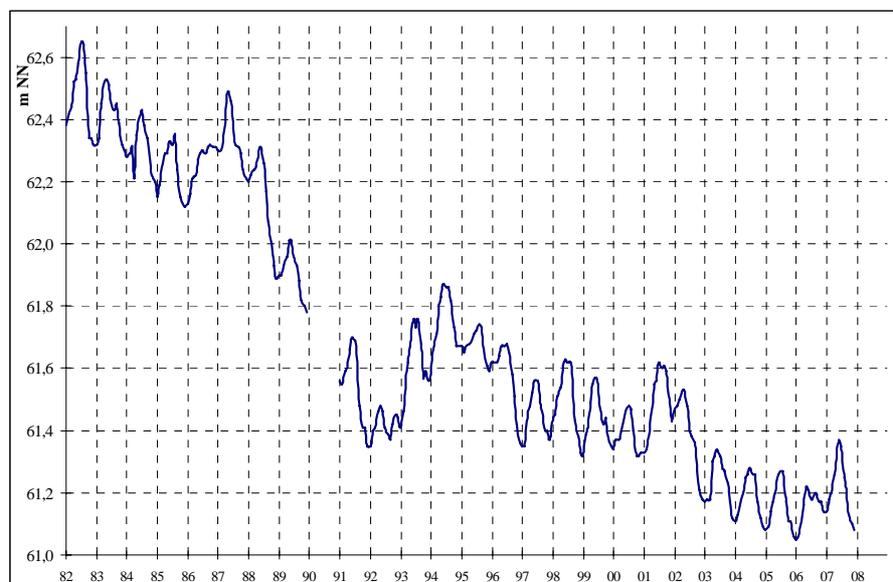


Abb. 3: Terrassennivellements am Drewitzer See (nach Schulz, 1968). Die dargestellten Terrassierungen liegen heute in einiger Distanz ca. 1,5 m oberhalb des Sees.

Bereits auf der Wiebeking'schen Karte (1786) ist ein Graben verzeichnet, der den Drewitzer See mit dem Nordufer des Plauer Sees und damit mit dem Nordsee-Einzugsgebiet verbindet – noch vor den ersten Regulierungen der Oberen Seen. Das Alter der künstlichen Verbindung ist unbekannt, höchstwahrscheinlich diente der Graben der Niveauangleichung des Drewitzer Sees an den Plauer See, aber auch eine Verwendung als Wasserstraße zum Flößen erscheint plausibel.

Im Jahr 1803 sind die Kanäle im Bereich der Oberen Seen fertiggestellt und alle Stauungen beseitigt. Verbunden mit den Absenkungen um 1,8-2,3 m sind ein Trockenfallen der Ufer und am Plauer See die Entstehung von bis zu 500 m breitem „Vorland“. Um diese neu entstandenen Flächen wird hart zwischen Gewässereignern und Anrainern gestritten. Die Auswirkungen auf den per Graben verbundenen Drewitzer See sind noch vor 1805 durch Vorlandbildung spürbar. Im Jahr 1806 lässt der Gutsbesitzer Raven zu Alt Schwerin den Graben zusätzlich um angeblich 9 Fuß (2,6 m) vertiefen. Das Vorland am Drewitzer See wird rasch bewirtschaftet, leider liegen keine Flächenangaben vor. Auch der Lübow-See, Samother See und Dreier See sind in gleichem Maße deutlich kleiner geworden (Schuldt, 1964). Von 1831-1837 wird eine erneute Senkung der Oberen Seen um 4 Fuß (ca. 1,2 m) zur Schiffbarmachung vorgenommen, über deren Auswirkungen am Drewitzer See im Jahr 1852 berichtet wird. Bis dato fielen demnach 8,7 ha trocken, die mittlerweile von einem 16-20 Jahre alten Baumbestand bewachsen sind. Ein Güstrower Advokat hält 1860 ein Fallen des Drewitzer Sees seit Johannis 1839 schriftlich fest (Lorenz 2007). Die hydrologisch bedeutsamen Angaben sind „Nebenprodukte“ von Landstreitigkeiten, die um die Vorländer an den abgesenkten Seen entbrannten.

Im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts vollzieht der Drewitzer See kurzfristige Seespiegelschwankungen. Ahrens (1913) und Stahl (1913) beschreiben für die 1910er Jahre „infolge andauernder Senkung“ niedrige, mit den rezenten vergleichbare Wasserstände am Drewitzer See. Auf dem Messtischblatt von 1882 ist der Pegel des Drewitzer Sees mit 62,8 m NN verzeichnet, im Jahr 1913 betrug der Pegelstand 61,3 m NN (Stahl, 1913). Hohe Niederschlagssummen Mitte der 1920er Jahre führen zu einem starken Ansteigen des Drewitzer Sees, welches Kiefernwälder auf den Seeterrassen „ertrinken“ lässt (Thienemann, 1933), ohne dass Pegelangaben rekonstruierbar sind. Das Phänomen steigender Grundwasserstände wird zu dieser Zeit überregional festgestellt (Koehne und Friedrich, 1937; Thienemann, 1949). Bis zum Einsetzen der Pegelaufzeichnungen im Jahr 1982 (Abb. 2) verbleibt der See wahrscheinlich ohne größere Schwankungen bei einem Niveau um 62,50 m HN. Die Nivellements in Abbildung 3 stützen diese Annahme.

Vor dem historischen Kontext relativieren sich die gegenwärtigen Senkungstendenzen, denn sinkende Seewasserstände sind hier demnach kein Phänomen des ausgehenden 20. Jahrhunderts. Jedoch vollzogen sich die historischen Absenkungen der Oberen Seen seit dem Ende des 18. Jahrhunderts durch direkte menschliche Einflussnahme und gezielte wasserbauliche Aktivitäten (Ruch-

höft, 2002), was auch für zahlreiche Niedermoorflächen und ihre jüngere Nutzungsgeschichte gilt (Mohr und Ratzke, 2000; Rowinsky, 2003; Abb. 4). Die jüngeren Trends am Drewitzer See vollziehen sich dagegen ohne direktes melioratives Einwirken auf den See und bedürfen deshalb näherer Untersuchungen.

### 3.2 Rückbau von Schöpfwerken

Im Naturpark „Nossentiner/Schwinzer Heide“ bestanden Anfang der 1990er Jahre insgesamt 18 Schöpfwerke, die eine Moorfläche von 1.097 ha entwässerten. Im Rahmen eines LIFE-Projektes wurde ab 1998 eine größere Zahl stillgelegt und zurückgebaut (Abb. 4). Größere landwirtschaftlich genutzte Moorflächen werden gegenwärtig noch durch die beiden Schöpfwerke „Plosch“ und „Dobbiner Plage“ entwässert.

### 3.3 Wiederherstellung von Binnenentwässerungssystemen

Die Klocksiner Seenkette mit den Gewässern Flacher See, Tiefer See, Hofsee, Bergsee, Lankhagensee und Loppiner See erstreckt sich innerhalb einer glazialen Schmelzwasserrinne im Randbereich der Pommerschen Haupteisrandlage (Lorenz 2007). Durch ausschmelzendes Toteis bildeten sich in der Rinne Becken und Schwellen aus. In den Becken entstanden Seen, die ursprünglich hydrographisch isoliert waren. Nur zwischen Hofsee und Tiefer See besteht eine natürliche Verbindung. Teile der Klocksiner Seenkette sind Bestandteil des Naturschutzgebietes „Seen- und Bruchlandschaft südlich Alt Gaarz“. Die hier gelegenen Seen gehören zu den wenigen größeren mesotrophen Seen in Mecklenburg-Vorpommern, in denen eine reich entwickelte Submersvegetation nachgewiesen ist.

Die Hauptgrundwasserscheide zwischen Nord- und Ostsee quert im Bereich vom Tiefer See und Hofsee die Rinne. Nördlich der Grundwasserscheide fließt das Grundwasser Richtung Westpeene (Malchiner Becken) ab. Im Bereich von Bergsee und Lankhagensee strömt das Grundwasser vor allem aus östlichen Richtungen mit südlicher Abflussrichtung an. Die Wasserspeisung durch kalkreiches Grundwasser ist ursächlich für die gute Wasserqualität der Seen.

Die Seen wurden bereits frühzeitig durch Gräben miteinander verbunden. Auch die älteste kartographische Darstellung des Gebietes, der Atlas von Hoinckhusen (um 1700), zeigt bereits Verbindungen zwischen den Seen. Die als Binnenentwässerungssysteme funktionierenden Seen erhielten so frühzeitig Anschluss an den Jabelschen See und damit an das Gewässersystem der Elde, welche über die Elbe zur Nordsee entwässert. Durch die mit dem Eingriff zusammenhängende Absenkung der Seewasserspiegel kam es zur Degradierung der in der Niederung gelegenen Versumpfungs- und Verlandungsmoore. Dies betraf vor allem die am Lankhagensee gelegenen Niedermoore sowie das Versumpfungsmoor Grasse, da hier im Untergrund gut wasserdurchlässige Sande anstehen. Im Jahr 1978 wurde am Bergsee ein Pumpwerk zur Tiefenwasserentnahme für Beregnungszwecke gebaut. Am Ablauf des Bergsees bestand ein Staubauwerk. Der Wasserspiegel im Lankhagensee liegt 40-60 cm unter dem Bergsee-Wasserspiegel. An etwa 120 Tagen im Jahr

erfolgte auch vor dem Bau der Sohlschwelle kein Oberflächenwasserabfluss aus dem Bergsee, da der Wasserspiegel unter dem Sohlniveau am Ablaufgraben liegt. Aufgrund der Lage des Seebeckens im obersten, unbedeckten Grundwasserleiter ist für den Bergsee von einem unterirdischen Zu- und Abfluss auszugehen.

Die Ganglinie der Seewasserstände belegt die Wasserstandsänderungen durch den Pumpbetrieb mit Stauhaltung am Bergsee und die Umgestaltung des Seeablaufes im Jahr 1999 (siehe Abb. 5). Nach Bau des Ablaufstaubauwerkes am Bergsee im Zuge des Pumpwerkbetriebes sind höhere mittlere Seewasserstände feststellbar. Bis zur Stilllegung der Pumpstation wurde der Bergsee in den Sommermonaten allerdings um bis zu 40 cm abgesenkt. Die mittlere jährliche Schwankungsbreite beträgt 0,6-0,8 m. Die maximale Amplitude von 1,4 m (Abb. 5) ist auf extreme Witterungsverhältnisse sowie auf den Stau- und Pumpwerksbetrieb zurückzuführen. Außerdem kam es durch unbefugte Personen zu Manipulationen der Stauanlage am Seeablauf, so dass das Stauziel von 63,15 m HN nicht erreicht werden konnte.

Im Jahr 1999 wurde am Bergsee der regulierbare Stau durch eine Sohlgleite ersetzt, über die das Wasser erst ab einem definierten Stauziel (63,2 m HN) über den Krebsbach zum Lankhagensee abfließen kann. Hierdurch können nun ganzjährig höhere Wasserstände im Bergsee gehalten werden. Es hat sich ein mittlerer Seewasserstand von 63,0-63,1 m HN eingestellt. In trockenen

Sommern kann der Seewasserspiegel allerdings bis 62,2 m HN absinken (Abb. 5).

Im Winterhalbjahr 1998/99 wurde am unterhalb gelegenen Lankhagensee ein Staubauwerk mit einer Überfallhöhe von 62,8 m HN am Seeablauf errichtet, über das in den Folgejahren ebenfalls ein höherer Wasserstand in der Niederung eingestellt werden kann. Bei Überschreiten der Stauhöhe am Lankhagensee kommt es nun zum Abfluss Richtung Loppiner See, zeitverzögert zum Zufluss vom Bergsee. In Jahren ohne Zufluss aus dem Bergsee werden die Wasserstände am Lankhagensee ausschließlich von der Witterung beeinflusst (siehe Abb. 6).

Die Grundwasserstände in den Randbereichen der Niederung am Lankhagensee werden bei Erreichen des Stauzieles um etwa 40 cm angehoben. Die in den obersten Grundwasserleiter infiltrierte Wassermenge wurde deutlich vergrößert. Während die Grundwasserflurabstände vor dem Einbau des Staus überwiegend bei >50 cm unter Flur lagen, wurde die Moorniederung nach Durchführung der Maßnahme bis in das Frühjahr überstaut. Der Moorspiegel konnte um 50-70 cm angehoben werden. Flächen unter 62,6 m HN, etwa 50 % der Moorfläche, bleiben langanhaltend überstaut. Insgesamt kann auf ca. 80 % der Moorfläche der Torfabbau gebremst werden bzw. eine Torfneubildung stattfinden. Nach trockenen Witterungsperioden können die Wasserstände allerdings immer noch deutlich absinken, wenn der Zufluss aus dem Bergsee ausbleibt.

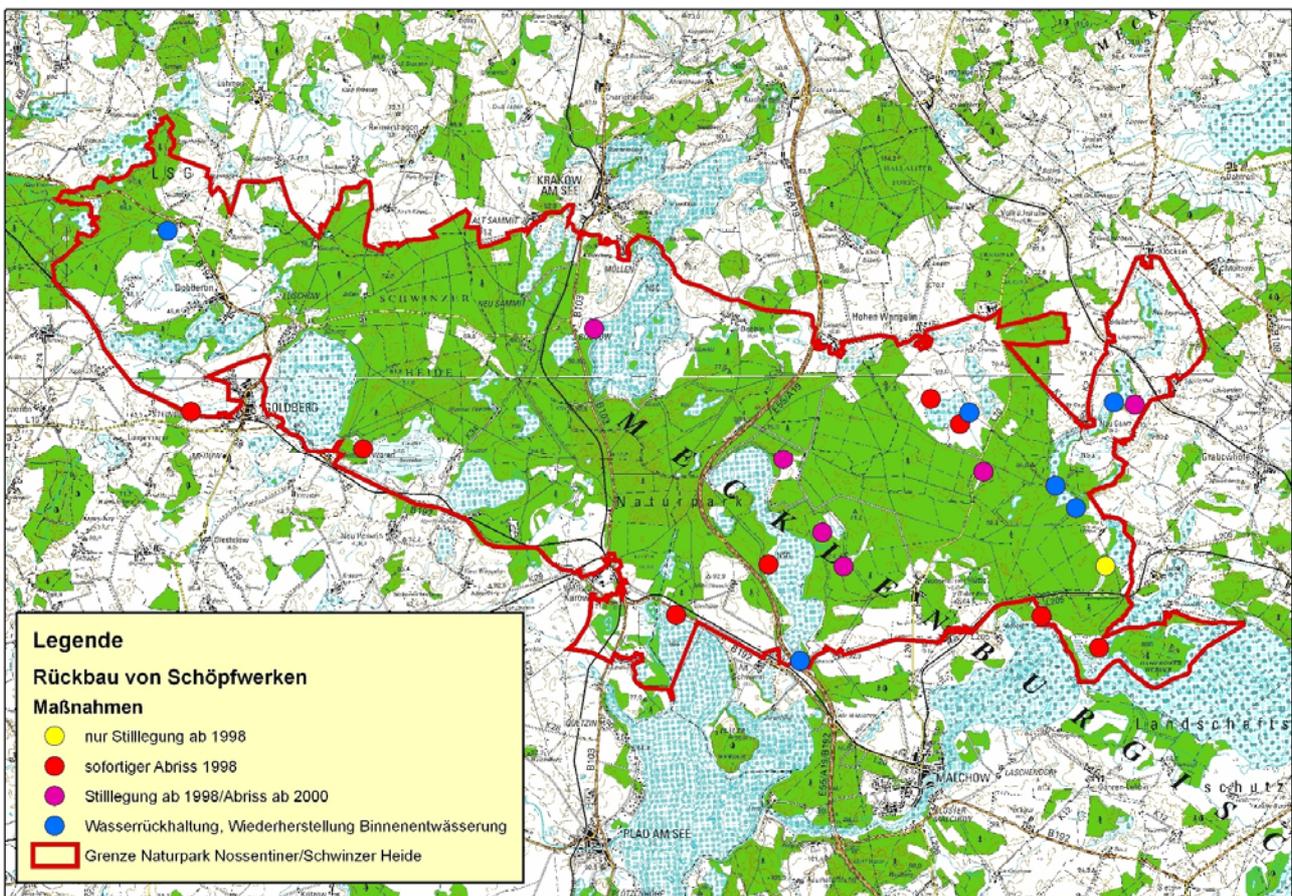
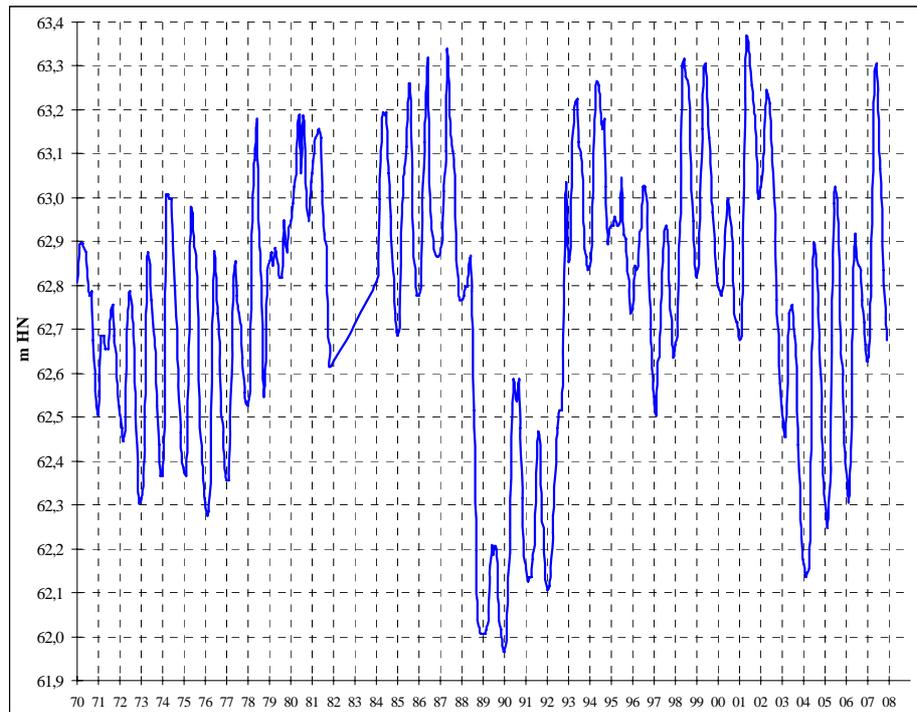
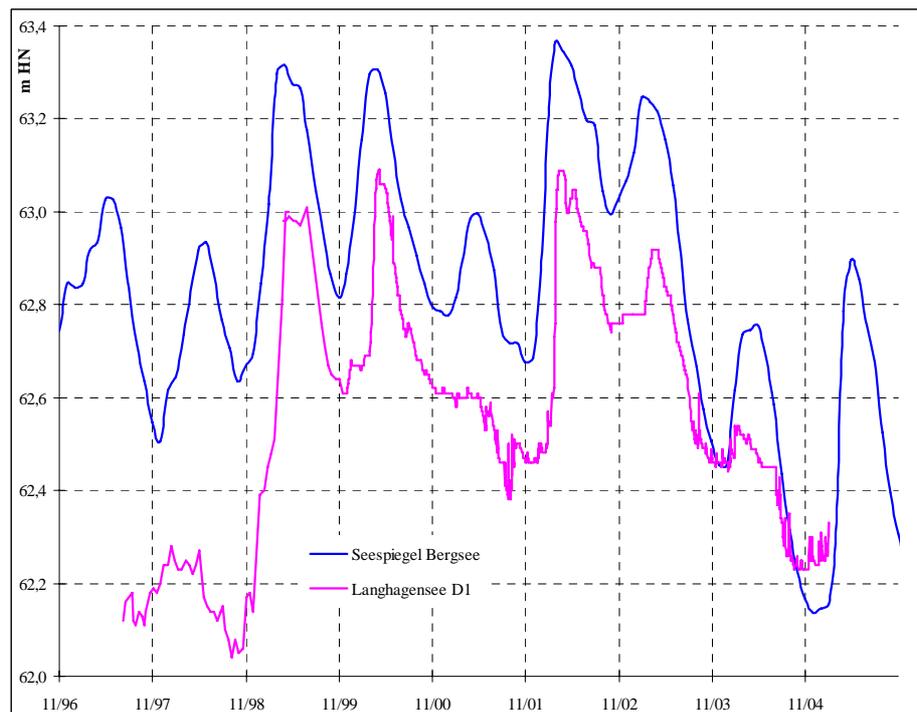


Abb. 4: Rückbau von Schöpfwerken im Naturpark „Nossentiner/Schwinzer Heide“.

**Abb. 5:** Ganglinie der Wasserstände des Bergsees im Zeitraum 1970-2008.



**Abb. 6:** Ganglinie der Wasserstände von Bergsee und Lankhagensee (Klocksiner Seenkette) im Zeitraum 1996-2004.



Die tief liegenden Waldflächen lassen sich nach Maßnahmenumsetzung forstwirtschaftlich nicht mehr nutzen. Wertvolle Nadel- und Laubholzbestände sind nur dort von Staunässe gefährdet, wo ihr Wuchsort nicht den natürlichen Standortbedingungen entspricht. Hiervon ist vor allem die Sand-Birke (*Betula pendula*) betroffen, die keine Überflutungen erträgt. Ältere Bestände der Schwarz-Erle (*Alnus glutinosa*) werden durch nachwachsende Baumgenerationen ersetzt, die auf das veränderte Wasserregime eingestellt sind. Auf den nicht ganzjährig

überstauten Moorflächen werden sich mittelfristig Walzeneggen-Schwarzerlen- bzw. Torfmoos-Schwarzerlen-Bruchwälder entwickeln.

#### 4. Literatur

- Ahrens, H., 1913. Terrassen an den Seen Mecklenburgs. Archiv des Vereins der Freunde der Naturgeschichte in Mecklenburg 67, 1-55.  
 Gesellschaft für Ingenieur-, Hydro- und Umweltgeologie mbh, 2001. Moorerfassung im Naturpark Nossentiner/Schwinzer Heide. Gutachten im Auftrag des Landesamtes für Forsten

- und Großschutzgebiete Mecklenburg-Vorpommern. Groß Upahl.
- Koehne, W., Friedrich, W., 1937. Ungewöhnliches Steigen des Grundwassers und Überschwemmungen in Senken ohne sichtbaren Abfluß. Jahrbuch für die Gewässerkunde Norddeutschlands. Besondere Mitteilungen 8(1), 3-56.
- Lorenz, S., 2007. Die spätpleistozäne und holozäne Gewässernetzentwicklung im Bereich der Pommerschen Haupteisrandlage Mecklenburgs. Dissertation, Universität Greifswald. <http://ub-ed.uni-greifswald.de/opus/volltexte/2007/425/>.
- Mohr, H.-J., Ratzke, U., 2001. Geschichte der landwirtschaftlichen Nutzung der Moore in Mecklenburg-Vorpommern. Telma 31, 263-271.
- Naturpark Nossentiner/Schwinzer Heide, 1999. Ausstattung, Entwicklung und Pflege wertvoller Naturräume. Aus Kultur und Wissenschaft Heft 2/1999 – Schriftenreihe des Landesamtes für Forsten- und Großschutzgebiete Mecklenburg-Vorpommern Naturpark Nossentiner/Schwinzer Heide.
- Rowinsky, V., 2003. Erfassung und Bewertung von Niedermooren im Naturpark „Nossentiner-Schwinzer Heide“. Telma 33, 191-208.
- Ruchhöft, F., 2002. Wasserstände der „Oberen Seen“ (Mecklenburg) in historischer Zeit. In: Kaiser, K. (Hrsg.): Die jungquartäre Fluss- und Seegenese in Nordostdeutschland. Beiträge zur Tagung in Hohenzieritz (Mecklenburg) vom 26.-28. Februar 2002. Greifswalder Geographische Arbeiten 26, 197-200. Greifswald.
- Schuldt, R., 1964. Anthropogene Veränderungen in der Nossentiner Heide und ihrer Umgebung. Diplomarbeit, Universität Greifswald.
- Schulz, W., 1968. Spätglaziale und holozäne Seespiegelschwankungen an den westlichen Oberen Seen Mecklenburgs. Archiv der Freunde der Naturgeschichte in Mecklenburg 14, 7-43.
- Stahl, R., 1913. Aufbau, Entstehung und Geschichte mecklenburgischer Torfmoore. Mitteilungen der Großherzoglichen Mecklenburgischen Geologischen Landesanstalt 23.
- Thienemann, A., 1933. Ertrinkende Wälder. Natur und Museum 63, 41-49.
- Thienemann, A., 1949. Wasserstandsschwankungen im Garrensee, Pinnsee und Drewitzer See 1931-1944. Archiv für Hydrobiologie 43, 1-20.

## Seespiegelanhebung und Grundwasseranreicherung im Naturschutzgroßprojekt „Uckermärkische Seen“ (Brandenburg)

Rüdiger Mauersberger

Förderverein Feldberg-Uckermärkische Seenlandschaft e.V., Am Markt 13, 17268 Templin, foerderverein\_uckermaerk.seen@t-online.de

**Zusammenfassung:** Der Landschaftswasserhaushalt im Nordosten Brandenburgs ist seit Jahrzehnten angespannt; Seespiegel und Grundwasserstände sinken, Moore sind zum großen Teil trocken gelegt. In naturschutzrelevanten Flächen (FFH-Gebiete und Naturschutzgebiete) mit einer Ausdehnung von 25.000 ha zwischen Templin, Prenzlau und Fürstenberg wurden im Rahmen des Naturschutzgroßprojektes „Uckermärkische Seen“ Anstrengungen unternommen, gegenzusteuern und Wasserspiegel wieder anzuheben sowie Grundwasservorräte zu vergrößern. Primär ging es dabei um den Erhalt und die Entwicklung von Lebensgemeinschaften der Gewässer und Feuchtgebiete; die Einflussnahme auf abiotische Landschaftsfaktoren spielte dabei eine indirekte Rolle. Im Zeitraum von 1999 bis 2009 gelang es, durch wasserbauliche Maßnahmen den Wasserspiegel von 27 eiszeitlich entstandenen Seen, zahlreichen Kleingewässern und ca. 50 Mooren wieder anzuheben.

### Lake-level rise and increasing groundwater recharge as results of the large-scale nature conservation project „Uckermärkische Seen“ (Brandenburg)

**Abstract:** The water budget in the northeast of Brandenburg has been strained for decades; lake and ground water levels are sinking, peatlands are drying out to a large extent. The large-scale nature conservation project „Uckermärkische Seen“ (Uckermark Lakes) is underway to counteract these trends in nature conservation areas (FFH areas and reserves) covering 25.000 ha between Templin, Prenzlau and Fürstenberg with measures to raise water levels and increase groundwater recharge. The preservation and development of aquatic communities in water bodies and wetlands were the primary focus; the influencing of abiotic landscape factors played an indirect role. Over the period from 1999 to 2009, the water level of 27 glacial lakes, numerous small waters and approx. 50 peatlands were successfully raised through water engineering measures.

#### 1. Einleitung

Wachsende, torfbildende Moore sind selten geworden; die meisten wurden zur Nutzung trockengelegt und Seespiegelstände und Grundwasserspiegel durch jahrhundertelange wasserbauliche Bemühungen abgesenkt. Durch den Klimawandel, der sich in Nordost-Brandenburg in Form von höheren Temperaturen und einer zunehmend negativen klimatischen Wasserbilanz äußert (z.B. Werner et al., 2005; Natkhin et al., 2009), sind nun auch Gewässer und Feuchtgebiete betroffen, die keiner direkten wasserbaulichen Veränderung unterlagen (Abb. 1).

Aquatische und semiaquatische Lebensräume haben daher quantitativ und qualitativ enorme Verluste hinnehmen müssen, was dazu führt, dass ein großer Teil der spezifischen Biozönosen heute auf Roten Listen der gefährdeten Arten zu finden ist. Es liegt daher nahe, dass es zu den wichtigsten Zielsetzungen im aktuellen Naturschutz in Brandenburg gehört, die Habitaterstörung durch Entwässerung nicht nur zu stoppen, sondern gegenzusteuern, auch gegen den Trend des Klimawandels.

Im zum Förderprogramm des Bundes „Chance Natur“ (BfN, 2010) zählenden Naturschutzgroßprojekt „Ucker-

märkische Seen“ (Förderverein Feldberg-Uckermärkische Seenlandschaft e.V., 2010) wurde die Wiederanhebung der Wasserstände von Grund- und Oberflächenwasser als Hauptarbeitsschwerpunkt festgelegt.



**Abb. 1:** Der Große Kronsee in Nord-Brandenburg besitzt keinen oberirdischen Zu- und Abfluss. Sein seit den 1980er Jahren stark gesunkener Wasserspiegel kann als Zeuge der abnehmenden klimatischen Wasserbilanz in der Region dienen.

Nachfolgend sollen daher Teile des Projektes und seine Wirkungen auf den Landschaftswasserhaushalt vorgestellt werden.

## 2. Das Projekt und seine Rahmenbedingungen

Für das von Bund und Land geförderte Naturschutzgroßprojekt „Uckermärkische Seen“ (Laufzeit 1996-2010) sind acht Zielvorgaben formuliert worden (Mauersberger, 1998), drei davon werden nachfolgend wiedergeben:

- den Wasserhaushalt im Projektgebiet stabilisieren, um die Weiterexistenz noch intakter Moor- und Bruchwaldstandorte zu gewährleisten;
- degradierte Moorstandorte revitalisieren;
- den Lebensraum vieler, vor allem bedrohter und seltener gebietstypischer Pflanzen- und Tierarten (z.B. Biber, Fischotter, Kranich, Seeadler, Fischadler, Schwarzstorch, Große Rohrdommel, Zwergdommel, Rot- und Schwarzhalstaucher, Tüpfelsumpfhuhn sowie Rotbauchunke, Moor- und Laubfrosch) sowie deren Populationsstärken erhalten und optimieren.

Die Instrumente des mit insgesamt 21 Mio. Euro ausgestatteten Projektes bestehen in erster Linie im Flächenerwerb durch Grundstückskauf oder langfristige Anpachtung sowie in der Durchführung von sogenannten „biotopenkenden“ oder „biotopersteinrichtenden“ Maßnahmen (vgl. Schumann und Mauersberger, 2009; Mauersberger und Bukowsky, 2010; Mauersberger et al., 2010).

## 3. Die Wasserhaushaltssituation vor Projektbeginn

Hintergrund für die Zielsetzung war, dass ca. 90 % aller Moore in den Kerngebieten des Projektes mit einer Flächengröße von 25.000 ha vor Beginn des Projektes direkt meliorativ oder indirekt entwässert und auch bei zahlreichen Seen und Kleingewässern die Wasserstände künstlich abgesenkt waren.

Viele Entwässerungen, die vor allem der Grünland- und forstlichen Nutzung von Moorflächen sowie der Vergrößerung von Ackerflächen dienten, stammten aus dem 18. und 19. Jahrhundert. Eine besonders effektvolle Hydromeliorationsphase fand in den 1950er-70er Jahren statt. Am Ende der 1980er Jahre hatte die Technisierung in der Agrarproduktion so weit zugenommen, dass immer mehr kleine und mit schwerer Technik nicht zu bearbeitende Flächen aus der Bewirtschaftung fielen. Bis zum Projektbeginn 1996 hatte die Flächenausdehnung entwässert, aber dennoch ungenutzter Flächen weiter zugenommen.

## 4. Maßnahmen des Projektes

1999 wurde im Projekt begonnen, Maßnahmen zur Wiedervernässung von Mooren und zur Wasserspiegelanhebung von Seen durchzuführen, wovon einige exemplarisch vorgestellt werden. In den Mooren sollten möglichst flurgleiche oder über Flur liegende Wasserstände erreicht werden, um die Torfdegradierung zu stoppen und ein erneutes Torfwachstum zu ermöglichen. Für die Seen dienten von der Geländemorphologie ableitbare frühere Zustände als Leitbild.

Von 1999 bis heute gelang es:

- den Wasserstand von 27 Seen (>1 ha) anzuheben, zwei Gewässer sind im Zuge der Maßnahmen nach über 80jähriger Entwässerung wieder hergestellt worden (Abb. 2);
- in 48 Mooren zwischen 1 und 40 ha Größe den Wasserstand so weit anzuheben, dass in Teilbereichen oder auf ganzer Fläche wieder Torfwachstum möglich ist;
- in ca. 90 Kleinmooren, Söllen und anderen Kleingewässern höhere Wasserstände herzustellen, so dass die Lebensraumfunktion für feuchtgebietsbesiedelnde Tier- und Pflanzenarten gestärkt wurde.



**Abb. 2:** Der Kleine Letzelthinsee bei Warthe/Uckermark. Als Folge mehrerer Meliorationsvorhaben innerhalb der letzten 200 Jahre war dieser kleine See im 20. Jahrhundert völlig verschwunden; seinen Platz nahm ein Feuchtgrünland mit einem zentralen Großseggen-Weiden-Erlen-Schwinggehölz ein. Die Wasserstandsanhhebung im Rahmen des Naturschutzgroßprojektes ließ im Herbst 2009 wieder ein Gewässer entstehen.

Der Ablauf der Maßnahmen folgte diesem Muster:

- Flächenerwerb;
- Grundlagenenerhebung (Hydrologie, Geländevermessung, Stratigrafie- und Baugrunduntersuchung);
- Maßnahmenplanung und Ermittlung von Betroffenheiten (private wie öffentliche Belange);
- wasser- und naturschutzrechtliches Genehmigungsverfahren;
- bauliche Umsetzung.

Die praktischen Tätigkeiten bestanden aus Verfüllungen oder Kammerungen von Gräben, Suche und Zerstörung von Drainagen und Rohrleitungen, Bau von Sohlgleiten an Abflüssen von Seen und Mooren, Anhebung der Sohle von Fließgewässern oder die Auslenkung von Fließgewässern aus künstlich eingetieften Abflussprofilen durch die Aue oder über Moorflächen auf Geländeneiveau. In wenigen Fällen wurden auch klassische Staubauwerke genutzt, sofern diese noch intakt oder reparabel waren. Dies waren aber nur Ausnahmen, da hierbei die ökologische Durchgängigkeit für Fließgewässerorganismen nicht gewährleistet ist, Wasserspiegel leichter illegal manipuliert werden können und die Unterhaltung aufwändiger ist.

## 5. Effekte für den Landschaftswasserhaushalt

### 5.1 Verlagerung des Abflussgeschehens in das Grundwasser

Bei zahlreichen Vorhaben ist eine Rückstauwirkung in das Grundwasser der umliegenden mineralischen Flächen belegt oder anzunehmen. Lokal konnte das Abflussgeschehen von den (meist künstlichen) oberirdischen Abflussbahnen zurück in das Grundwasser verlagert werden.

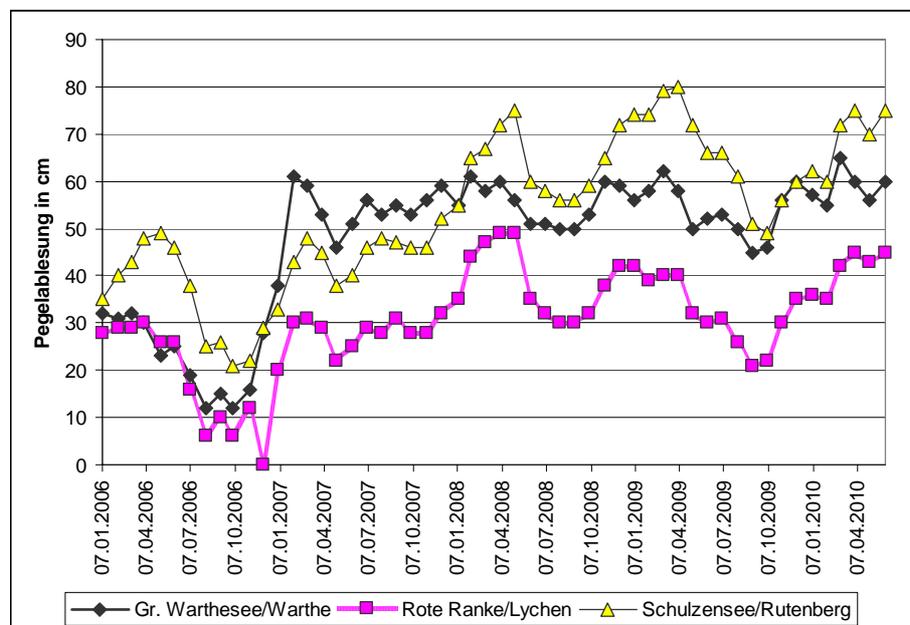
Folgende prinzipielle Wirkungsweise ist denkbar: Seen haben durch jahrtausendelange Ablagerung von Mudden eine wasserdichte (kolmatierende) Schicht geschaffen. Wenn Seespiegel sinken oder abgesenkt werden, füllt die dichtende Schicht nicht nur den Seeboden aus, sondern auch bestimmte Anteile der Ufer sind von Mudden ausgekleidet; der Austausch von Seewasserkörper und Grundwasser ist hier dann fast vollständig unterbunden. Der gegenteilige Effekt tritt ein, wenn der Seespiegel steigt oder angehoben wird und die Muddeschichten überstaut werden: an einem sandigen Uferstreifen kann Wasser in Größenordnungen ein- oder austreten. So wird ein durchflossener See sein Wasser nicht mehr nur über den oberirdischen Abfluss abgeben, sondern auch in den abstromseitigen Grundwasserleiter. Je höher der See angehoben wird, desto stärker ist das Gefälle im Grundwasser und desto höher ist die Versickerungsgeschwindigkeit und damit auch die Abgabemenge.

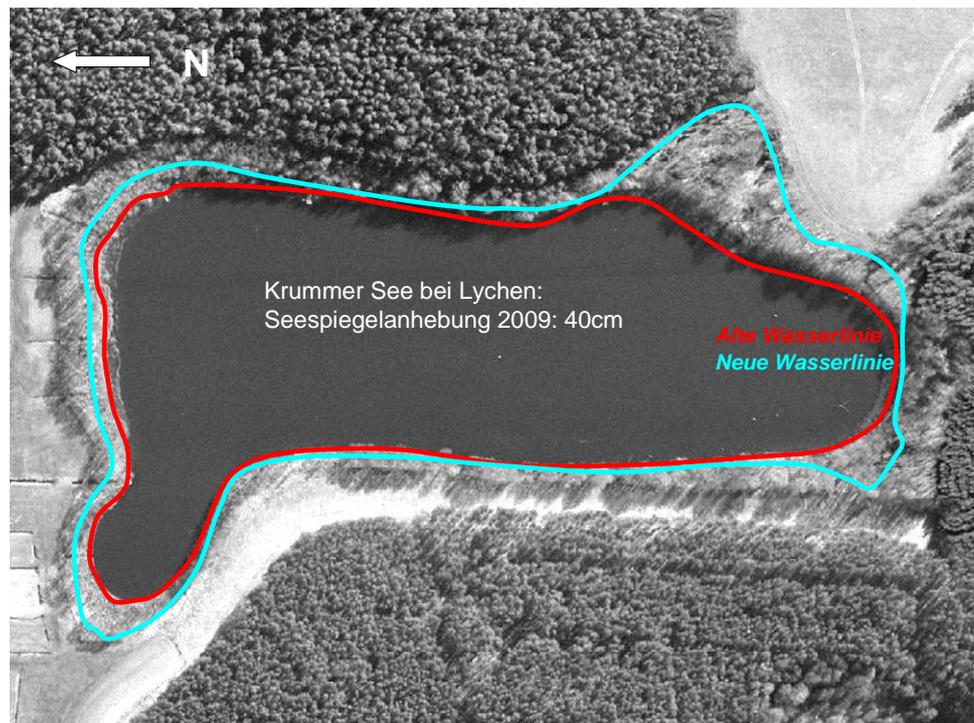
Im Abstromgebiet können daher folgende Effekte eintreten:

- der Grundwasserspiegel steigt und der Grundwasservorrat vergrößert sich;
- in benachbarten grundwasserabhängigen Ökosystemen (Seen, Moore) verbessert sich die Wasserversorgung (Abb. 3);
- die Quellfähigkeit wird verstärkt (ökologisch relevant für Fließgewässer und Quellmoore);
- Grundwasserpassage bedeutet verzögerte Abflussgeschwindigkeit (im Gegensatz zum oberirdischen Abfluss) – dort, wo das Grundwasser wieder zutage tritt, wird das Abflussgeschehen der Fließgewässer beeinflusst, d.h. Hochwasserspitzen werden gekappt und das Niedrigwasser gestützt – die Abflussextrême werden gedämpft;
- die Bodenpassage kann eine Reinigung des Wassers bewirken (relevant für in Fließrichtung unterhalb gelegene Seen).

Der Schulzensee bei Rutenberg besaß einen künstlichen oberirdischen Abfluss, der 2006 verschlossen wurde. Seitdem steigt der Seespiegel langsam an (Abb. 3). Der Große Warthensee besitzt zwei oberirdische Zuflüsse aus der Agrarlandschaft, die vor allem nach dem Winter größere Wassermengen heranbringen. Die Ende 2006 errichtete Sohlgleite führte umgehend zum Wasserspiegelanstieg; seitdem ist die Pegelganglinie quasi-konstant (Abb. 3). Am Krümmen See bei Lychen (Abb. 4), dessen Wasserspiegel 2009 um 38 cm (Halbjahresmittel) angehoben wurde, konnte anhand von Grundwassermessdaten nachgewiesen werden, dass der Grundwasserspiegel in Abstromrichtung (westlich des Sees) mit geringer Verzögerung um ca. 27 cm angestiegen ist.

**Abb. 3:** Pegelgang dreier Seen deren Wasserstand durch 2006 durchgeführte Maßnahmen des Projektes beeinflusst wurde (Warthensee: Bau einer Sohlgleite am Abfluss, Schulzensee: Verschluss des künstlichen Abflusses, Rote Ranke: Anhebung des Grundwasserspiegels in der Umgebung).





**Abb. 4:** Mit Hilfe einer Sohlgleite am Abfluss des oberirdisch durchflossenen Krummer Sees wurde eine Wasserspiegelanhebung erreicht, in deren Folge ausge dehnte Flachwasserbereiche entstanden und die Versickerung in den obersten unbedeckten Grundwasserleiter verstärkt wurde.

## 5.2 Wasserrückhaltung und Klimawirkung

Es besteht die Hoffnung, dass als Folge der Wasserrückhaltungsmaßnahmen der Gebietsabfluss verringert werden konnte und stattdessen lokal die Verdunstung verstärkt wurde.

Die Verdunstung ist ein wichtiger klimarelevanter Parameter; sie bewirkt die Kühlung der Landschaft und vermag die ansonsten extreme Temperaturkurve von Sommertagen zu dämpfen. Die feuchte Luft steigt zum Teil auf und kondensiert zu Wolken, wobei die der Erdoberfläche als Verdunstungskälte entzogene Energie in der Atmosphäre bei der Kondensation als Wärme wieder frei wird. Der Teil der feuchten Luft, der vor Ort verbleibt, beeinflusst das Mikroklima; der Ortsniederschlag als Tau und Reif erhöht sich und die Bedingungen für feuchtebedürftige Ökosysteme, wie z.B. Buchenwälder, verbessern sich.

All die genannten Effekte sind gegenläufig zu den durch den Klimawandel prognostizierten.

## 5.3 Erfolgreiche Wasserrückhaltungsmaßnahmen

In sechs Maßnahmeflächen kam es trotz Beseitigung der künstlichen Entwässerung nicht zu einem Wasserspiegelanstieg. Es handelt sich, wie z.B. beim Zerwelinsee nördlich Boitzenburg, um wasserscheidennahe Hochlagen mit kleinen Einzugsgebieten. Hier zeigt sich die bereits angespannte Wasserhaushaltssituation durch den Klimawandel sowie die Auswirkung großflächiger Nadelholzfors ten mit ihrer reduzierten Grundwasserneubildung.

## 5.4 Indikatorfunktion

Im Gebiet existieren einige größere Gewässer in Binneneinzugsgebieten, die nach wie vor nicht in das oberirdische Entwässerungssystem eingebunden sind. Hier ist die Wasserstandsentwicklung gering bis erheblich rückläufig

(z.B. Kleiner und Großer Kronsee nördlich von Lychen; Abb. 1). Da eine direkte hydrologische Einflussnahme auf diese Seen nicht ohne Weiteres möglich ist, kann hier die Entwicklung der Wasserbilanz vor dem Hintergrund großräumiger Landschaftsfaktoren, wie dem Klimawandel, verfolgt werden.

## 6. Schlussfolgerungen

Es zeigte sich, dass auch in einer dünnbesiedelten Landschaft mit zahlreichen Naturschutzgebieten die meliorativen Eingriffe der letzten Jahrhunderte so tiefgreifend waren, dass nahezu alle Seen und Moore einer anthropogenen Veränderung des Wasserhaushaltes unterlagen. Naturnahe Zustände als Ziel vorausgesetzt, bestand enormer Handlungsbedarf.

Für Maßnahmen zur Wiederanhebung des Wasserstandes ist ein langer Vorbereitungszeitraum notwendig, in dem sorgfältige Grundlagenerfassungen (z.B. Höhenvermessungen) und wasserbauliche Planungen vorzubereiten sind, aber vor allem auch (Nutzungs-) Konflikte gelöst werden müssen. Der Erfolg des Naturschutzgroßprojektes beruht in erster Linie auf dem jeweils bereits Jahre zuvor begonnenen Flächenankauf.

Wenn Stau einrichtungen zugunsten von Seen und Mooren gebaut werden, ist darauf zu achten, dass dabei Fließgewässerökosysteme nicht dauerhaft negativ verändert werden, z.B. durch den Verlust der Durchgängigkeit oder durch den Einbau unnatürlicher Sohlabstürze. Es erwies sich als vorteilhaft, auf alle Arten technischer Staubauwerke (z.B. Wehre, regulierbare Staue, Spundwände) zu verzichten, stattdessen Sohlgleiten mit möglichst geringer Längsneigung zu bauen. Unter dieser Voraussetzung kann vielerorts der anstehende Boden als Baumaterial verwendet und somit auf Antransporte ver-

zichtet werden. Damit sinken die Baukosten deutlich. Insbesondere bei kleineren Vorhaben ist es dann üblich, dass die Aufwendungen für die Vorbereitung (Genehmigungsplanung, Grunderwerb usw.) die Baukosten übersteigen.

Bei vielen Vorhaben, die in bewaldeten Gebieten stattfanden, zeichnete sich ab, dass die angenommenen Abflussspenden (insbesondere für den Hochwasserfall), die in der Regel auf Datenreihen aus den 1960er bis 1990er Jahren basieren, deutlich höher lagen als die realen Abflusswerte, die sich nach Abschluss der Maßnahmen einstellten. Daher kam es vor, dass Bauwerke zur Erlangung einer Genehmigung zu groß dimensioniert werden mussten.

### **Danksagung**

Ich danke dem Bundesamt für Naturschutz, dem brandenburgischen Umweltministerium, dem Landkreis Uckermark sowie dem NaturschutzFonds Brandenburg und dem WWF Deutschland.

### **7. Literatur**

BfN – Bundesamt für Naturschutz Bonn, 2010. Naturschutzgroßprojekte. <http://www.bfn.de/36.html>. Zugriff: 15.10.2010.

Förderverein Feldberg-Uckermärkische Seenlandschaft e.V., 2010. Das Naturschutzgroßprojekt „Uckermärkische Seen“.

<http://www.uckermaerkische-seen.de/PROJEKTE/GROSSPROJEKT/grossprojekt.html>. Zugriff: 15.10.2010.

Mauersberger, R., 1998. Naturschutzgroßprojekt Uckermärkische Seen, Brandenburg. *Natur und Landschaft* 73, 320-326.

Mauersberger, R., Bukowsky, N., 2010. Moor-Wiedervernässung als Maßnahme zur Grundwasseranreicherung und Hochwasserableitung – Praxisbeispiel aus dem Naturpark Uckermärkische Seen. *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg* 19, 167-169.

Mauersberger, R., Gunnemann, H., Rowinsky, V., Bukowsky, N., 2010. Das Mellenmoor bei Lychen – ein erfolgreich revitalisiertes Braunmoosmoor im Naturpark Uckermärkische Seen. *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg* 19, 182-186.

Natkhin, M., Steidl, J., Dietrich, O., Dannowski, R., Hoffmann, D., 2009. Der Einfluss von Waldumbau auf den Wasserhaushalt eines Sees in einem niederschlagsarmen Tieflandeinzugsgebiet. *Forum der Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 26, 59-64.

Schumann, M., Mauersberger, R., 2009. Naturschutzorientierte Flachabtorfungen in Kalkflachmooren – ein Erfahrungsbericht aus Nord-Brandenburg. *Telma* 39, 157-174.

Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W., Lahmer, W., Lasch, P., Suckow, F., Wechsung, F., 2005. Klima, Klimaveränderungen und deren Auswirkungen im Gebiet der Märkischen Eiszeitstraße zwischen 1951 und 2055. In: Gesellschaft zur Erforschung und Förderung der Märkischen Eiszeitstraße e.V. (Hrsg.): *Entdeckungen entlang der Märkischen Eiszeitstraße* 10. Eberswalde.

## **Moore unter Wassermangel auch ohne direkte Entwässerung? – Erhaltungszustände ausgewählter Moore im Biosphärenreservat Schorfheide- Chorin (Brandenburg) unter besonderer Berücksichtigung ihrer naturräumlichen Einbettung und klimatischer Entwicklungen**

Ron Meier-Uhlherr, Corinna Schulz, Vera Luthardt

Hochschule für nachhaltige Entwicklung (FH) Eberswalde, Fachbereich Landschaftsnutzung und Naturschutz,  
Friedrich-Ebert-Straße 28, 16225 Eberswalde, vluthardt@fh-eberswalde.de

**Zusammenfassung:** Nordost-Brandenburg ist ein stark von Klimaänderungen betroffener Teil Deutschlands. Der sommerliche Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre um 3,5 K liegt deutlich über dem bundesweiten Mittel. Gleichzeitig zeigt sich eine Verschiebung der Niederschlagsmengen innerhalb des Jahresverlaufs. Neun Moore, die Anfang der 1990er Jahre als intakte, wachsende, nährstoffarm-saure „Perlen“ klassifiziert wurden und keiner direkten Entwässerung unterliegen, dienen als Beispiel um die Auswirkungen der laufenden klimatischen Veränderungen zu verdeutlichen. Je nach ihrer landschaftlichen Einbettung zeigen die Moore im Untersuchungszeitraum von 1993 bis 2008 eine sehr unterschiedliche Entwicklung. Während Moore innerhalb von Endmoränenzügen ihren naturnahen Zustand erhalten konnten, erfuhren in Grundmoränenlandschaften eingebettete Moore extreme Austrocknung und offenbaren einen drastischen Standortwandel.

### **Mires suffering from water shortage even without direct anthropogenic drainage? – Status of selected mires in the biosphere reserve Schorfheide-Chorin (Brandenburg) under special consideration of landscape properties and climate change**

**Abstract:** Northeast Brandenburg is a part of Germany which is considerably affected by climate change. The 3.5 K increase in summer temperatures over the past 100 years exceeds the average increase in Germany significantly. Concomitantly, a decrease in precipitation during the growing season has been recorded. Nine mires that had been classified as growing, completely intact and oligotrophic „treasures“ in the early 1990s and since then have not been directly affected serve as an example to demonstrate the effects of the ongoing climatic change. The mires experienced very different developments in the period from 1993 to 2008 dependent on how they are embedded in the landscape. While mires embedded in an end moraine landscape have hardly changed in regards to their water balance, state of top soil and vegetation development, mires located within a ground moraine landscape suffer extreme dehydration and reveal a drastic change of habitat qualities within the same period of time.

#### **1. Einführung**

Weitgehend bekannt sind die bedeutsamen Funktionen naturnaher, torfakkumulierender Moore: Sie fungieren als großräumige Wasser- und Stoffspeicher im Landschaftshaushalt, wirken als Lokalklimaregulatoren und bieten Lebensraum für zahlreiche spezialisierte und gefährdete Arten (Schultz-Sternberg et al., 2000). Speziell unter dem Gesichtspunkt aktueller klimatischer Entwicklungen ist die beträchtliche Bindung von klimawirksamen Kohlenstoffdioxid in Form von akkumulierter organischer Substanz von enormer Bedeutung.

Mit ca. 211.000 ha Niedermoorfläche (8 % der Landesfläche) gilt Brandenburg als eines der moorreichsten Bundesländer Deutschlands. Der Großteil dieser Moorflächen ist aufgrund von land- oder forstwirtschaftlicher Nutzung degradiert – die genannten landschaftsökologischen Funktionen sind nicht mehr oder nur sehr eingeschränkt gewährleistet. Neben der Wiederherstellung

naturnäherer Zustände von Moorökosystemen ist vor diesem Hintergrund der Schutz und Erhalt der naturnahen, wachsenden Moore, die mit mittlerweile 1 % Flächenanteil nur noch ein verschwindend geringes Restvorkommen der einst verbreiteten Feuchtlebensräume darstellen (Schultz-Sternberg et al., 2000), von herausragender Bedeutung.

Das im Nordosten Brandenburgs gelegene Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin (BR SC) beherbergt eine Vielzahl von Feuchtlebensräumen in allen für den nordostdeutschen Raum typischen Ausprägungen. Insbesondere kennzeichnend ist die hohe Dichte an naturnahen, meist kleinflächigen Mooren, die sich innerhalb der Waldflächen befinden.

Gleichzeitig ist NO-Brandenburg ein stark von Klimaänderungen betroffener Teil Deutschlands. Moore reagieren als stark wasserabhängige Ökosysteme besonders sensibel gegenüber Veränderungen von hydrologischen Ein-

flussgrößen. Untersuchungen in ausgewählten Mooren des BR SC zeigen auf, dass diese zum Teil mit erheblichen Austrocknungserscheinungen auf die veränderten Witterungsbedingungen der letzten 16 Jahre reagieren (Luthardt et al., 2010). Neun Moore, die Anfang der neunziger Jahre als naturnahe, nährstoffarm-saure „Perlen“ klassifiziert wurden und seither keiner direkten Einflussnahme unterlagen, zeigen je nach ihrer landschaftlicher Einbettung eine sehr unterschiedliche Entwicklung und dienen als Beispiele, um die Auswirkungen der vergangenen Witterungsperiode und veränderter Wasserhaushaltsgrößen zu verdeutlichen.

## 2. Untersuchungsgebiet

### 2.1 Klima

NO-Brandenburg ist durch ein subkontinental geprägtes Übergangsklima mit einer Jahresmitteltemperatur von 8,3 °C und einer Jahresniederschlagssumme von 532 mm im langjährigen Mittel (1961-1990) geprägt (DWD, 2009a). Der sommerliche Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre um 3,5 K lag weit über dem bundesweiten Mittel (Gränitz und Grundmann, 2002). Die ohnehin geringen Niederschlagsmengen sind durch eine jahreszeitliche Verschiebung von den Sommer- zu den Wintermonaten gekennzeichnet, die klimatische Wasserbilanz ist tendenziell negativ (Bronstert et al., 2003).

Die den Mooren nahe gelegene Messstation Angermünde zeigt einen neuerlichen Anstieg der durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur innerhalb des Untersuchungszeitraumes von 1993 bis 2008 um 1,0 K im Vergleich zum langjährigen Mittel von 1961 bis 1990. Die mittlere Jahresniederschlagssumme blieb hingegen weitgehend konstant. Deutlich präsentiert sich aber eine saisonale Verschiebung der Niederschlagsmengen. Es lässt sich eine Erhöhung in den Winter- und Sommermonaten, die mit

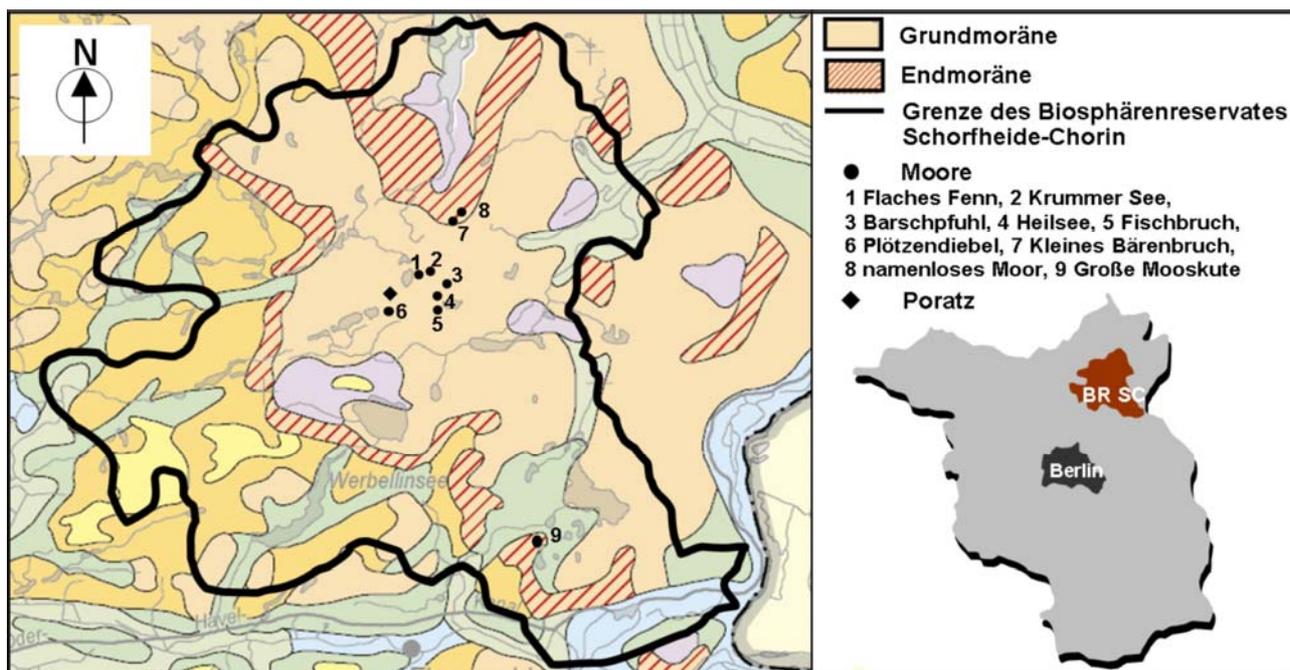
einem deutlichen Rückgang im Frühjahr und Herbst einhergeht, erkennen (DWD, 2009a, 2009b).

Aufgrund regionalisierter Klimaprojektionen, die die Fortsetzung und zukünftige Verstärkung dieser Trends ausweisen (Jacob et al., 2008; Werner, 2008) und letztendlich auch zu geringeren Sickerwassermengen und Grundwasserneubildungsraten führen, ist von einer weiteren Verschärfung der Landschaftswasserhaushalts-situation in Brandenburg auszugehen (Bronstert et al., 2003).

### 2.2 Geomorphologie und hydrologische Verhältnisse

Das BR SC bildet einen typischen Ausschnitt des nordostbrandenburgischen Jungmoränengebiets, wobei sich die untersuchten Moore hinsichtlich ihrer Einbettung innerhalb der glazialen Serie unterscheiden (vgl. Abb. 1). Moore 1-6 liegen in einer durch mäßige Reliefenergie charakterisierten Grundmoränenlandschaft. Die sandig-lehmigen Geschiebemergel sind zum überwiegenden Teil durch bis zu 2 m mächtige Decksande überlagert. Die Bestockung der oberirdischen Einzugsgebiete besteht vornehmlich aus Kiefernforsten. Die Moore 7-9 befinden sich innerhalb von stark reliefierten Endmoränenzügen, die aus kleinräumig wechselnden Blockpackungen mit Lehm, Sand und Kies zusammengesetzt sind (KPGL, 1893, 1899; LBGR und LGB, 2005). Die oberirdischen Einzugsgebiete werden vornehmlich von naturnahem Buchenwald bestanden.

Bei allen untersuchten Mooren handelt es sich um Binneinzugsgebiete in Kessellage, die keiner künstlichen Entwässerung unterliegen. Der Abstand zwischen den jeweiligen Mooroberflächen der Grundmoränenmoore und dem obersten Grundwasserleiter liegt laut ZGIB (1984) zwischen 1 und 3 m. Dieser oberste Grundwasserleiter weist jedoch im Untersuchungszeitraum einen erheblich negativen Trend auf:



**Abb. 1:** Lage der untersuchten Moore innerhalb des Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin, ihre Einbettung innerhalb der glazialen Serie sowie Lage des Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin innerhalb Brandenburgs (LGRB, 2004; verändert).

**Tab. 1:** Erfasste Parameter bei der Kartierung ausgewählter Moore im BR SC zu verschiedenen Zeitpunkten (Timmermann, 1993, 1998; Luthardt et al., 1999; FH und LUA, 2009).

| Kartierung                                 | Erfasste Parameter   |
|--|--|
| Gutachten (Timmermann, 1993)               | Vegetationszonierungen (Biotope), Vegetationsaufnahmen nach BRAUN-BLANQUET, Entwässerungsanlagen, Einzugsgebietscharakteristik, Fotodokumentation  |
| Dissertation (Timmermann, 1998)            | Vegetationsaufnahmen nach BRAUN-BLANQUET, Bodentyp/ Oberbodenzustand, Stratigrafie, hydrogenetischer Moortyp, hydrostatischer Typ, Moorrelief, Oszillation, Moorwasserstand (Pegel), Entwässerungsanlagen, Einzugsgebietscharakteristik, Fotodokumentation   |
| ÖÜB Langzeitbeobachtung von Ökosystemen    | Vegetationszonierungen, Vegetationstransekte, Vegetationsaufnahmen nach BRAUN-BLANQUET, floristische Gesamtartenliste, Fauna ( <i>Odonata</i> , <i>Amphibia</i> , <i>Rhophalocera/ Zygaenidae</i> ), Bodentyp/ Oberbodenzustand, Stratigrafie, Bodenchemismus, Moorwasserstand (Pegel), Wasserchemismus, Entwässerungsanlagen, Einzugsgebietscharakteristik, Fotodokumentation |
| Standardkartierung für Niedermoore im Wald | Vegetationszonierungen (Biotope), Vegetation/Flora (generalisierte Vegetationsliste), Moorrelief, Randsumpf und Quellen, hydrostatischer Typ, hydrogenetischer Moortyp, Bodentyp/ Oberbodenzustand, Stratigrafie, Nutzung, Entwässerungsanlagen, Einzugsgebietscharakteristik und -ausgrenzung, Fotodokumentation  |

**Tab. 2:** Konkrete Aufnahmezeitpunkte der einzelnen Moore.

| Moore             | Datenerfassung               |                                 |   |  |                         |
|-------------------|------------------------------|---------------------------------|---|--|-------------------------|
|                   | Gutachten (Timmermann, 1993) | Dissertation (Timmermann, 1998) | ÖÜB Langzeitbeobachtung von Ökosystemen | Standardkartierung für Niedermoore im Wald |                         |
| Grundmoränenmoore | Heilsee                      | 1993                            | 1998                                    | -  | 2006, April & Sep. 2008 |
|                   | Barschpfuhl                  | 1993                            | 1998                                    | -  | 2006, April & Sep. 2008 |
|                   | Krummer See                  | 1993                            | 1998                                    | -  | 2006, April & Sep. 2008 |
|                   | Fischbruch                   | 1993                            | 1998                                    | -  | 2006, April & Sep. 2008 |
|                   | Flaches Fenn                 | 1993                            | 1998                                    | -  | 2006, April & Sep. 2008 |
|                   | Plötzendiebel                | 1993                            | 1998                                    | 1999, 2000, 2002, 2005, 2008               | -                       |
| Endmoränenmoore   | Große Mooskute               | -                               | 1998                                    | 1999, 2002, 2005, 2008                     | -                       |
|                   | Kleines Bärenbruch           | 1993                            | -                                       | -  | 2003                    |
|                   | namenloses Moor              | 1993                            | -                                       | -  | 2003                    |

Der nahe gelegene Pegel Poratz zeigt einen Grundwasserabfall von 0,84 m innerhalb der letzten 16 Jahre (LUA, 2009). Der Seewasserspiegel des unweit gelegenen Redernswalder Sees sank zwischen 1995 und 2008 gar um 1,4 m (BR SC, 2009).

Im Bereich der Endmoränenmoore sind durch die heterogenen Substratverhältnisse wechselhaft aufgebaute und häufig nur lokal ausgebildete Grundwasserleiter vorherrschend (Scholz, 1962). Die Flurabstände des obersten Grundwasserleiters im Umfeld der untersuchten Endmoränenmoore liegen nach LGRB (2004) zwischen 10 und 20 m. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass kleinräumig wechselnde und höher gelegene lokale grundwasserführende Schichten über stauendem Substrat ausgebildet sind, die zumindest zeitweise den Moorwasserhaushalt beeinflussen.

### 3. Methoden

Die vorgestellten neun Moore wurden im Zeitraum von 1993 bis 2008 zu verschiedenen Zeitpunkten wiederholt untersucht und bewertet. Einen Überblick über die jeweils eingesetzten Methoden, spezifischen Parameter und konkreten Untersuchungszeiträume geben die Tabellen 1 und 2.

### 4. Ergebnisse

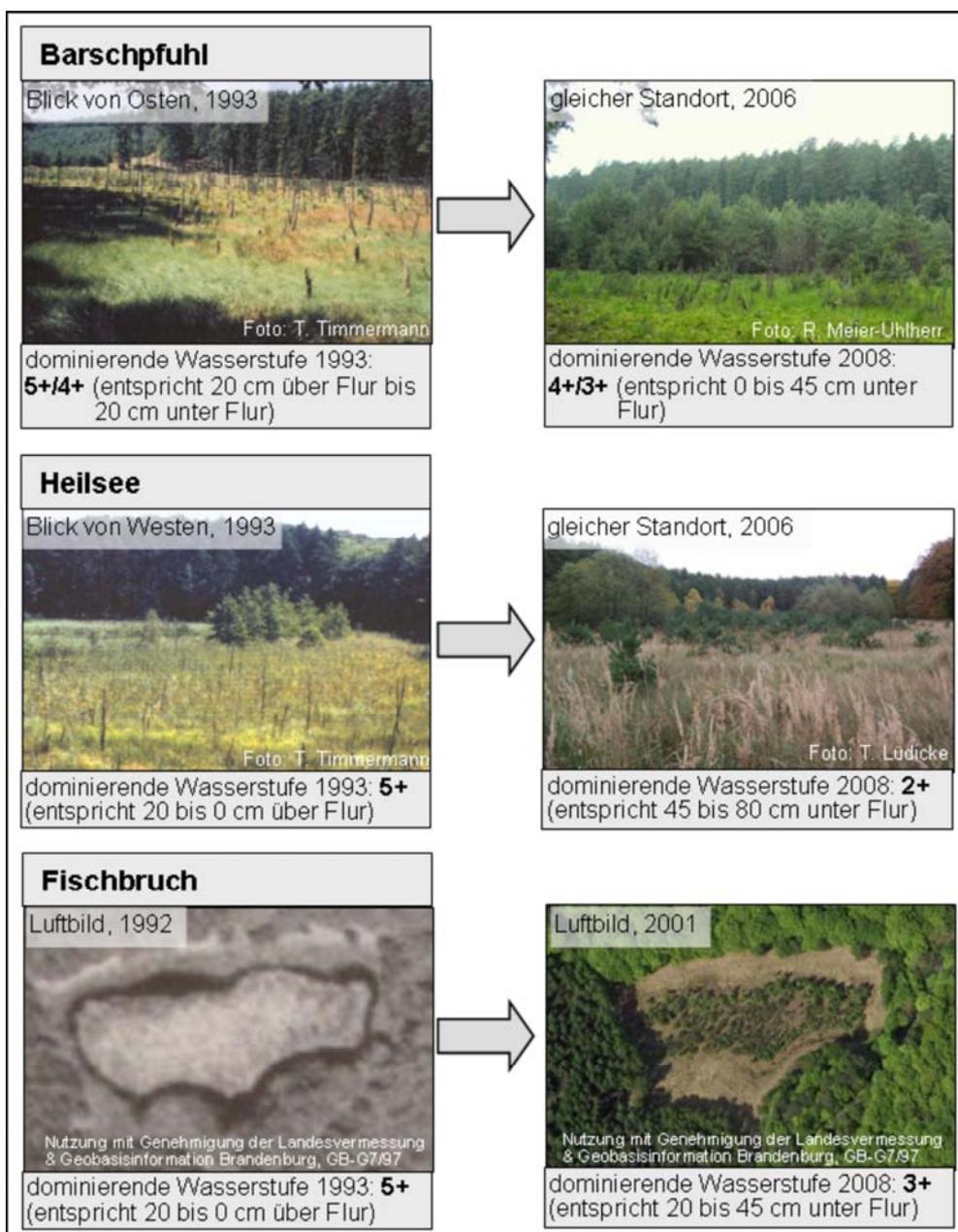
Zu Beginn des Untersuchungszeitraumes befanden sich alle Moore aufgrund einer durchgängig guten Wasserversorgung in einem naturnahen, torfakkumulierenden und

intakten Zustand, der sich unter anderem über die standorttypischen Phytozönosen widerspiegelte. Stratigrafische Untersuchungen zeigen, dass es sich bei den Grundmoränenstandorten um hydrologische Übergangstypen der Kessel-Verlandungsmoore mit mächtigen Muddekörpern handelt, auf denen in der jüngste Phase der Moorgenese 1-2 m mächtige Torfmoostorfe angewachsen sind. Die Endmoränenmoore sind als Kesselmoore mit 4-6 m mächtigen Torfmoostorfschichten über unterlagernden Mudden klassifiziert. Entsprechend des hohen Wasserdargebots dominierten Riedböden als ungestörte Bodentypen der naturnahen Moore. Ausgehend von schmalen eutrophen Randbereichen zeigten sich typische Trophiegradienten in Richtung der nährstoffarm-sauren Zentren. Die typisch zonierte Moorstandorte zeigten korrelierend standortgemäße, von Torfmoosen und Wollgräsern dominierte Vegetationsausbildungen. Die Standorte waren weitgehend gehölzfrei, spärlich gesäte Exemplare der Wald-Kiefer und Birke überschritten die Strauchschicht nicht (Timmermann, 1993, 1998).

Die nachfolgenden Untersuchungen zeigten, dass die drei in der Endmoräne eingebetteten Moore bezüglich ihres Wasserhaushaltes, des Oberbodenzustandes und der Vegetationsentwicklung kaum Veränderungen aufweisen. Sie zeigen eine hohe Stabilität ihrer Standortqualitäten innerhalb des Untersuchungszeitraumes und befinden sich auch aktuell in intaktem Zustand (Guilbert und Meier, 2003; Luthardt et al., 2006, 2008, 2010).

In allen Grundmoränenmooren hingegen, offenbarten die erneuten Untersuchungen einen drastischen Standortwandel. Die Moorwasserstände sanken beträchtlich um mehrere Dezimeter, so dass die Moore nunmehr durch erhebliche Austrocknungserscheinungen gekennzeichnet sind. Der Wassermangel in den oberen Bodenschichten initiierte Moorsackungsprozesse sowie Nährstofffreisetzungen durch Torfmineralisation: 1993 noch kleinflächig vorhandene oligotrophe Areale verschwanden oder verkleinerten sich zugunsten mesotropher Bereiche. Auch die Flächenanteile eutropher Ausprägungen haben zugenommen. Entsprechend den veränderten Standortbedingungen unterlag auch die Vegetation einem deutlichen Wandel. Der Flächenanteil der Phytozöosen, die schwerpunktmäßig auf nassen Standorten vorkommen, hat drastisch abgenommen. Die einst kennzeichnenden,

gehölzfreien Gemeinschaften aus Torfmoosen und Wollgräsern sind mittlerweile auf die Moorzentren beschränkt. Speziell die Randbereiche sind aktuell überwiegend durch eine deutliche Artenverarmung in Form von Land-Reitgras-Verheidungsstadien gekennzeichnet. Die augenscheinlichste Veränderung ist die flächige Verjüngung, Ausbreitung und dauerhafte Etablierung von Gehölzen (Wald-Kiefer, Birke) in Form von wasserzehrenden Vorwäldern. Generell befinden sich die einst naturnahen Moore in einem schlechten Erhaltungszustand, der Torfakkumulation nur noch in kleinen zentral gelegenen Bereichen zulässt (Luthardt et al., 2006, 2008, 2010; Schulz et al., 2008). Ein Überblick der geschilderten Standortveränderungen ist den Abbildungen 2 und 3 zu entnehmen.



**Abb. 2:** Exemplarische Entwicklungstrends der untersuchten Grundmoränenmoore im Foto/Luftbild und Wasserstufenvergleich (nach Koska, 2001) der Jahre 1993 und 2008.

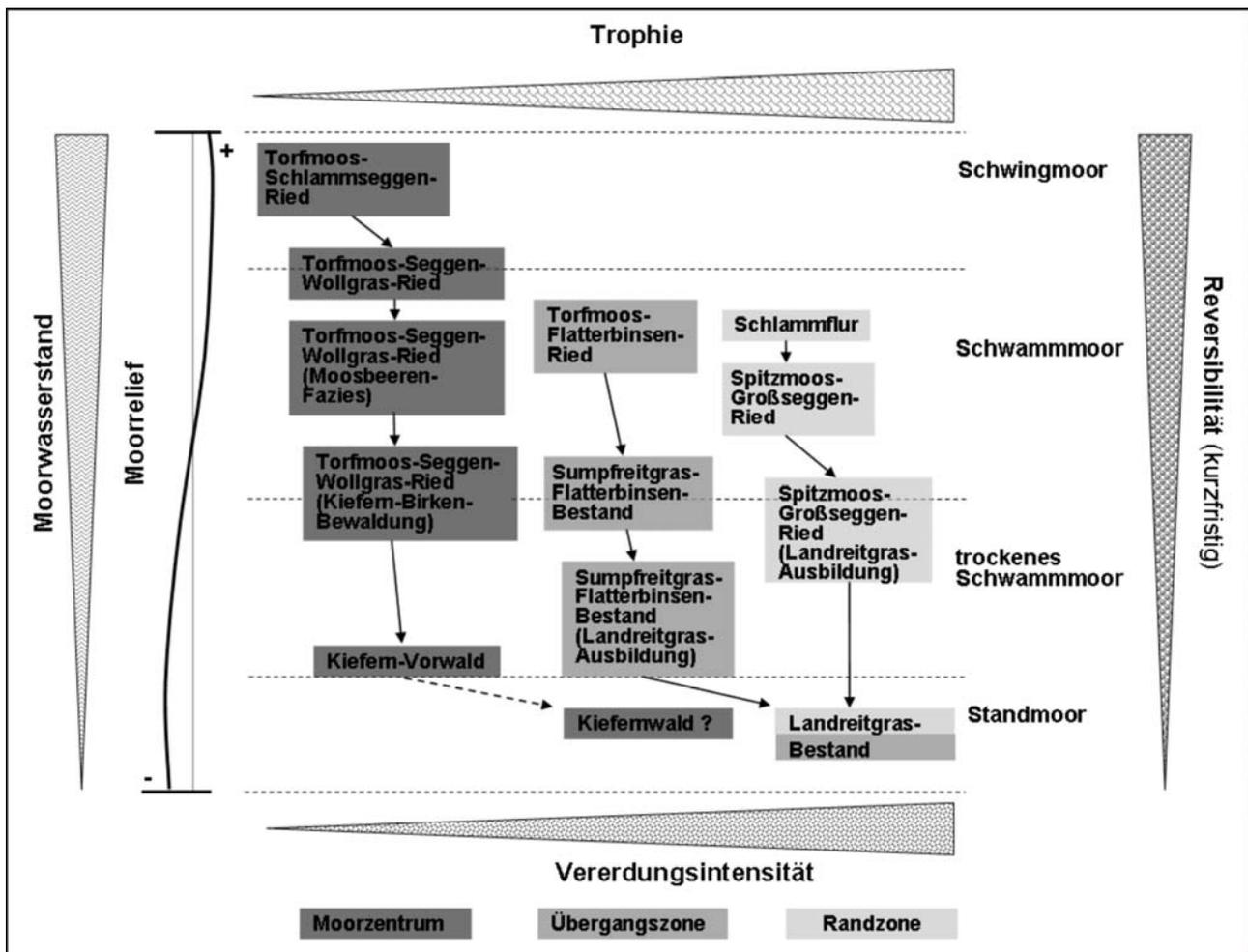


Abb. 3: Schematische Darstellung des Standortwandels in den untersuchten Sauer-Arm- und Zwischenmooren bei stark sinkenden Moorwasserständen zwischen den Jahren 1993 und 2008.

## 5. Diskussion

Wie geschildert, fand innerhalb der letzten 16 Jahre in den Grundmoränenmooren ein drastischer Standortwandel statt, während die Endmoränenmoore im selben Betrachtungszeitraum ihren naturnahen Zustand erhalten konnten.

Ursächlich für die alarmierenden Veränderungen in den Grundmoränenstandorten ist zweifellos der starke Abfall der Moorwasserstände innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes. Dieser Abfall ist wiederum auf einen Komplex von Faktoren zurückzuführen, die in ihrer Kombinationswirkung zu dieser dramatischen Entwicklung führten: Speziell in sandigen Gebieten bleibt trotz einer bei Verlandungs- und insbesondere Kesselmooren gebildeten Abdichtungsschicht (Kolmationsschicht) zum mineralischen Boden eine hydrostatische Wechselwirkung zwischen Moorwasserspiegel und Grundwasserspiegel des mineralischen Umfeldes bestehen (Timmermann und Succow, 2001). Wie bereits erläutert, ist das Umfeld der Moore durch einen erheblichen Grundwasserabfall, der sich auf vergleichbarem Niveau wie der Abfall der Moorwasserstände bewegt, gekennzeichnet. Diese Entwicklung ist nach LUA (2006) charakteristisch für weite Teile Brandenburgs.

Die genauen Ursachen der Grundwasserdefizite sind aufgrund der Komplexität der ökosystemaren Wirkungsmechanismen und anthropogenen Einflussnahmen noch nicht abschließend geklärt. Diskutiert wird ein ungünstiges Zusammentreffen von mehreren Einflussgrößen. Dazu gehören die zunehmend intensiven Meliorationen der Niederungen seit dem 18. Jahrhundert (Landgraf, 2005), der Anschluss von Binneneinzugsgebieten an die Entwässerungsnetze, Grundwasserfassungen, abnehmende Sickerwassermengen durch großflächige Aufforstungen mit Nadelbäumen seit dem 19. Jahrhundert sowie die Zunahme kontinentaler Wetterlagen.

Verstärkend wirken die geschilderten Witterungsveränderungen innerhalb des Untersuchungszeitraumes, die zu steigenden Verdunstungsraten sowohl in den oberirdischen Einzugsgebieten als auch auf den Moorflächen selbst führen. So reduziert sich die Menge an oberflächennahen Zuflüssen aus den oberirdischen Einzugsgebieten, die eine zentrale Rolle für die Wasserversorgung der Moore darstellt (Timmermann, 1998). Weiterhin werden diese oberflächennahen Zuflüsse durch die dominierende Kiefernbestockung in den Einzugsgebieten weiter verringert, da die Sickerungsrate unter Kiefernforsten signifikant geringer ist als unter Buchenbeständen (Müller, 2002). Die stark verringerten Wassermengen, die letztlich in den Boden versickern, werden durch das

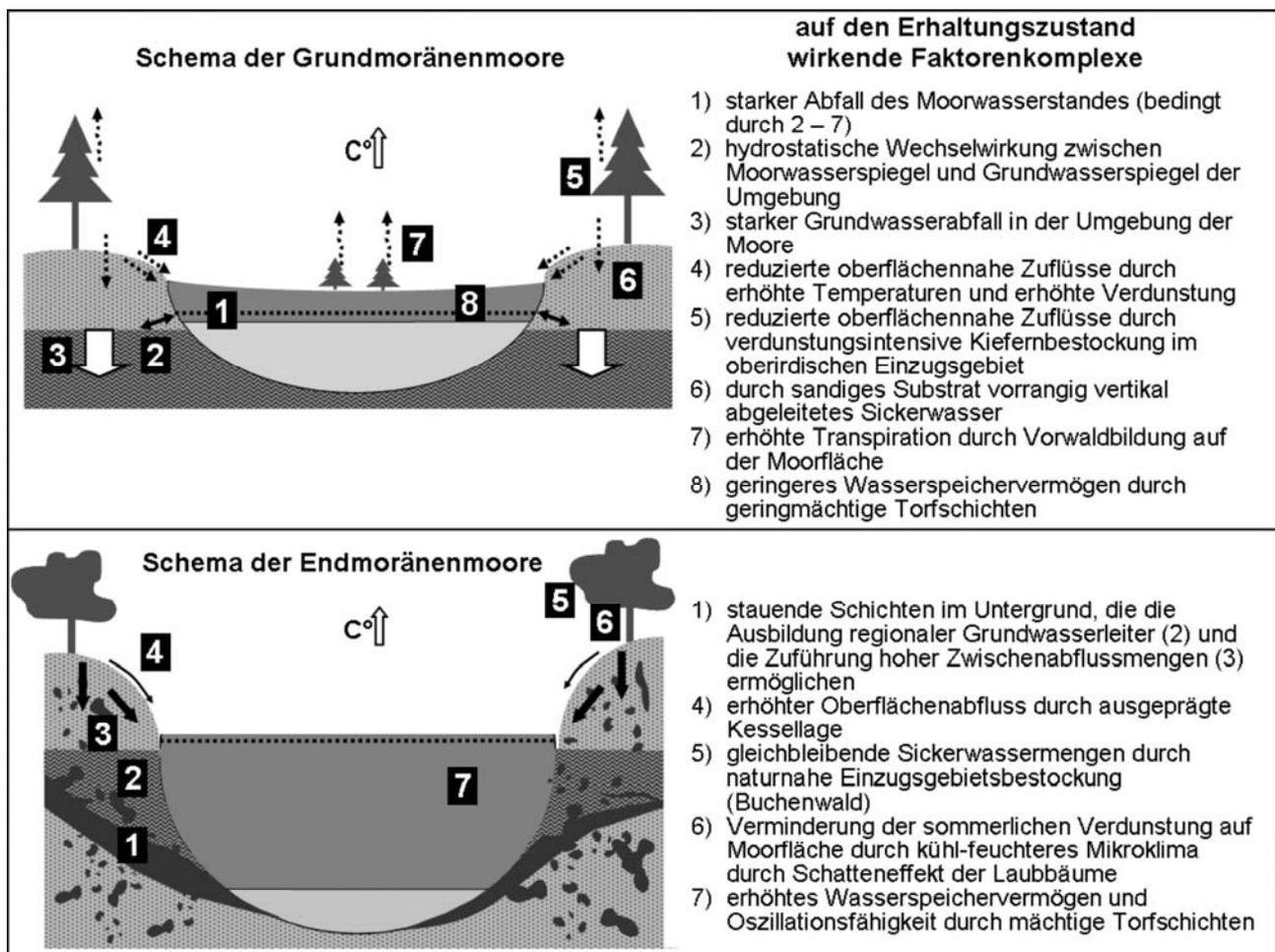
sandige Substrat vorrangig vertikal abgeleitet und tragen somit nur eingeschränkt zur seitlichen Anströmung der Moore bei. Zusätzlich führen die Vorwaldbildungen auf den Mooren selbst zu einem erhöhten Wasserdefizit, da die Gehölze mehr Wasser transpirieren als die einstige Offenvegetation.

Die hohe Stabilität der Endmoränenmoore ist hingegen durch eine andere Konstellation der eben beschriebenen Merkmale und Faktoren zu erklären: Da sich der oberste, großräumige Grundwasserleiter in den betreffenden Endmoränen in beträchtlicher Entfernung zur Geländeoberfläche befindet, ist anzunehmen, dass der Wasserhaushalt der drei Moore nicht mit diesem in Verbindung steht. Die über historische Zeiträume kontinuierliche Wasserversorgung ist somit durch begünstigende geologische Verhältnisse im Einzugsgebiet zu erklären: Die direkte Umgebung der Moore ist von stauenden lehmigen bzw. tonigen Schichten durchzogen, die die Zuführung einer hohen Zwischenabflussmenge in die ausgeprägten Kessel ermöglichen, die bei diesen „klassischen“ Kesselmooren die Hauptwasserversorgung darstellt. Auch die Ausbildung kleinräumiger, lokaler Grundwasserleiter über diesen stauenden Schichten kann zur Stabilität des Moorwasserhaushaltes beitragen. Durch die naturnahe

Einzugsgebietsbestockung ist die Sickerwassermenge im Vergleich zu den Grundmoränenmooren nochmals erhöht. Der hohe Schatteneffekt der Laubbäume auf die relativ kleinen Moorareale bedingt weiterhin ein kühlfeuchteres Mikroklima, das der sommerlichen Verdunstung auf den Moorflächen entgegenwirkt. Zusätzlich günstig wirken sich die mächtigen Torflager der Endmoränenmoore aus: Bei Wassermangel können die Torfe oszillieren, d. h. sich soweit zusammenziehen, dass der Moorwasserstand zumeist bei Geländehöhe liegt und somit eine stabile Wasserversorgung der Phytozönosen gewährleistet bleibt. Ein kurzfristiger Wassermangel kann folglich derzeit noch besser abgepuffert werden.

Die geschilderten Entwicklungen konnten auch im Rahmen anderer Untersuchungen bestätigt werden. Wiegen (2009) zeigte anhand von 20 untersuchten Mooren im östlichen und nördlichen Bereich des BR SC auf, dass innerhalb des gleichen Zeitraumes alle Grundmoränenmoore einer starken Degradierung durch anhaltende Wasserdefizite unterlagen. Hingegen konnten die in den Endmoränengebieten gelegenen Kesselmoore ihren sehr guten Ausgangszustand weitgehend erhalten.

Eine detaillierte Übersicht der jeweils wirkenden Faktorenkomplexe gibt Abbildung 4.



**Abb. 4:** Auf den jeweiligen Erhaltungszustand wirkende Faktorenkomplexe von Mooren unterschiedlicher naturräumlicher Einbettung im BR SC.

## 6. Schlussfolgerungen

Der Erhaltungszustand der untersuchten Moore im BR SC ist von vielfältigen Einflussfaktoren abhängig. Eine landschaftliche Einbettung in Gebieten mit hoher Reliefenergie und stauenden Substraten, eine naturnahe Bestockung des Einzugsgebietes und mächtige Torflager können ungünstige klimatische Entwicklungen vorerst besser abpuffern. Diese Merkmalskombination trifft vor allem für Endmoränenlandschaften zu und bevorteilt die hier eingebetteten Moore zu diesbezüglichen Gunststandorten. Der hinsichtlich seiner Geschwindigkeit und seines Ausmaßes dramatische Standortwandel der Grundmoränenmoore hingegen hat seine Ursache in der kulminierenden Wirkung von maßgeblich anthropogen bedingtem Grundwasserabfall, Fehlbestockungen im Einzugsgebiet und zunehmender Kontinentalisierung. Diese Moore sind Indikatoren für die Wirkung der laufenden klimatischen Veränderungen – auch auf weitere Ökosysteme, wie die umgebenden Wälder. Da die Standorte keiner direkten Entwässerung unterliegen, gibt es prinzipiell keine Ansatzpunkte für kurzfristige Renaturierungsmaßnahmen. In diesem Fall sind Maßnahmen anzusetzen, die zu einer langfristigen Verbesserung der Wasserhaushaltssituation und insbesondere zur Grundwasseranreicherung beitragen. Eine Machbarkeitsstudie zur „Stabilisierung des Landschaftswasserhaushaltes der Schorfheide“ nennt als vordringliche Maßnahmenkomplexe die Wiederherstellung von ursprünglichen Binneneinzugsgebieten durch Entfernung von Entwässerungssystemen, die Erhöhung der Grundwasserneubildung durch Waldumbau von Nadel- zu Laubwald sowie den Wasserrückhalt in Fließ- und Stillgewässern um den Abfluss aus der Landschaft zu verzögern (DHI-WASY GmbH und FPB GmbH, 2008). Neben diesen auf die Moore langfristig begünstigend wirkenden Maßnahmen ist der schnelle Waldumbau in ihren direkten oberirdischen Einzugsgebieten als vordringliche Aufgabe zu sehen, um das Wasserdargebot mittelfristig zu erhöhen.

Vor dem Hintergrund der Klimaprojektionen für NO-Brandenburg tragen moorreiche Gebiete wie das BR SC eine besondere Verantwortung für den Erhalt ihrer „feuchten Kostbarkeiten“. Darüber hinaus muss ihre Vorwarnfunktion jetzt erkannt und wahrgenommen und proaktiv dem großflächigen Kollaps des Landschaftswasserhaushaltes entgegengewirkt werden, der die Kulturlandschaft als ganzes treffen wird.

## 7. Literatur

Bronstert, A., Lahmer, W., Krysanova, V., 2003. Klimaänderung in Brandenburg und Folgen für den Wasserhaushalt. Naturschutz und Landschaftspflege Brandenburg 12, 72-79.

BR SC – Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin, 2009. Datenbereitstellung Pegelverlauf Redernswalder See.

DHI-WASY GmbH, FPB GmbH, 2008. Machbarkeitsstudie „Stabilisierung des Landschaftswasserhaushaltes der Schorfheide“. Gutachten im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg. Berlin.

DWD – Deutscher Wetterdienst, 2009a. Klimadaten Deutschland. <http://www.dwd.de/...> Zugriff: 26.06.2009.

DWD – Deutscher Wetterdienst, 2009b. Klimadaten Wetterstation Angermünde 1993-2008.

FH und LUA – Fachhochschule Eberswalde, Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.), 2009. Standardkartierung für Nieder-

moore im Wald. <http://www.dss-wamos.de>. Zugriff: 02.02.2010.

Gränitz, F., Grundmann, L. (Hrsg.), 2002. Um Eberswalde, Chorin und den Werbellinsee. Landschaften in Deutschland – Werte der deutschen Heimat 64. Böhlau, Köln.

Guilbert, S., Meier, R., 2003. Ist-Zustandsanalysen der Moore und vernässten Senken in zwei ausgewählten Waldgebieten Nordbrandenburgs, einschließlich der Entwicklung eines praktikablen Kartierverfahrens. Diplomarbeit, Fachhochschule Eberswalde.

Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P., Sieck, K., 2008. Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Climate Change 11/08. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

KPGL – Königlich-Preußische Geologische Landesanstalt, 1893. Geologische Karte Blatt 57 Ringenwalde i. M. 1:25 000. Berlin.

KPGL – Königlich-Preußische Geologische Landesanstalt, 1899: Geologische Karte Blatt 58 Greiffenberg i. M. 1:25 000. Berlin.

Koska, I., 2001. Ökohydrologische Kennzeichnung. In: Succow, M., Joosten, H. (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde. S. 92-111. Schweizerbart, Stuttgart.

Landgraf, L., 2005. Veränderungen in Feuchtgebieten am Schwielowsee bei Potsdam zwischen 1995 und 2003. Beiträge zur Forstwirtschaft und Landschaftsökologie 38 (3), 97-112.

LBGR – Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe, LGB – Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (Hrsg.): Geologische Übersichtskarte i. M. 1:100 000. Landkreis Uckermark. Potsdam-Kleinmachnow.

LGRB – Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (Hrsg.), 2004. Atlas zur Geologie von Brandenburg i. M. 1: 100 000. Kleinmachnow.

LUA – Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.), 2006. Umweltdaten aus Brandenburg – Bericht 2006. Potsdam.

LUA – Landesumweltamt Brandenburg, 2009. Datenbereitstellung zum Grundwasserstand Messstelle 2948 1334. Referat RO 5, Wasserbewirtschaftung, Hydrologie.

Lüdicke, L., Neumann, R., 2006. Das „Heilsee“-Moor – Vergleich der Moorkartierungen von 1993 und 2006. Belegarbeit, Fachhochschule Eberswalde.

Luthardt, V., Vahrson, W.-G., Dreger, F., Brauner, O., Hirsch, A.-K., Witt, B., 1999. Aufbau der Ökosystemaren Umweltbeobachtung in den UNESCO-Biosphärenreservaten Schorfheide-Chorin und Spreewald. Zwischenbericht im Auftrag der Landesanstalt für Großschutzgebiete Brandenburg.

Luthardt, V., Friedrich, S., Brauner, O., Hoffmann, C., Kabus, T., 2006. Lebensräume im Wandel – 2. Bericht zur ökosystemaren Umweltbeobachtung (ÖUB) in den Biosphärenreservaten Brandenburgs. Fachgutachten im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg.

Luthardt, V., Brauner, O., Hoffmann, C., Hagenmüller, K., 2008. Lebensräume im Wandel - Jahresbericht der ökosystemaren Umweltbeobachtung (ÖUB) zum Offenland des Biosphärenreservates Flusslandschaft Elbe und des Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin. Fachgutachten im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg.

Luthardt, V., Meier-Uhlherr, R., Schulz, C., 2010. Moore unter Wassermangel? Entwicklungstrends ausgewählter naturnaher Moore in den Wäldern des Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin unter besonderer Berücksichtigung ihrer naturräumlichen Einbettung und des Witterungsverlaufs der letzten 16 Jahre. Naturschutzarbeit und Landschaftspflege in Brandenburg 19, 146-157.

Müller, J., 2002. Wasserhaushalt von Kiefern- und Buchen-Mischbeständen im nordostdeutschen Tiefland. Funktionen des Waldes in Verbindung mit dem Landschaftswasserhaushalt. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 15, 66-76.

- Scholz, E., 1962. Die naturräumliche Gliederung Brandenburgs. Potsdam.
- Schulz, C., Luthardt, V., Meier-Uhlherr, R., 2008. Veränderungen der hydromorphologisch/-dynamischen Verhältnisse und der Vegetation ausgewählter Moore im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin nach einer niederschlagsreichen Periode in den Jahren 2007/08. Gutachten, Fachhochschule Eberswalde.
- Schultz-Sternberg, R., Zeitz, J., Landgraf, L., Hoffmann, E., Lehrkamp, H., Luthardt, V., Kühn, D., 2000. Niedermoore in Brandenburg. *Telma* 30, 144-146.
- Timmermann, T., 1993. Erfassung, Bewertung und Schutz der Moore im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin. Gutachten im Auftrag der Landesanstalt für Großschutzgebiete Brandenburg.
- Timmermann, T., 1998. Sphagnum-Moore in Nordostbrandenburg: Stratigraphisch-hydrodynamische Typisierung und Vegetationsentwicklung seit 1923. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Timmermann, T., Succow, M., 2001. Kesselmoore. In: Succow, M., Joosten, H. (Hrsg.): *Landschaftsökologische Moorkunde*. S. 379-390. Schweizerbart, Stuttgart.
- Werner, P. C., 2008. Die Klimaentwicklung in Deutschland zwischen 1951 und 2050. *Insecta* 11, 5-24.
- Wiegen, S., 2009. Analyse von Vegetationsentwicklungen in 20 ausgesuchten Waldmooren im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin seit 1992, unter Berücksichtigung der Einflüsse von Klimaänderungen. Diplomarbeit, Fachhochschule Eberswalde.
- ZGIB – Zentrales Geologisches Institut Berlin (Hrsg.), 1984. Hydrogeologische Karte der DDR. Karte der Hydroisohypsen-Grundwasserleiter i. M. 1: 50 000. Blatt Templin O / Greiffenberg 0609-3/4. Berlin.

## Wassermangelsituation in Brandenburg – gekoppelte Grund- und Oberflächenwassermodellierung zur Unterstützung des Wassermanagements

Silke Mey, Bernd Pfützner

Büro für Angewandte Hydrologie, Köberlesteig 6, 13156 Berlin, bah@bah-berlin.de

**Zusammenfassung:** Ob sinkende Seewasserstände, Versiegen von kleineren Fließgewässern oder Moordegradation – in vielen Regionen Brandenburgs werden die Klimaänderungen und die damit einhergehenden geringeren Wassermengen, die der Landschaft zur Verfügung stehen, bereits sichtbar. So gibt es immer mehr Bemühungen, der lokalen Wasserknappheit mit verschiedenen Strategien entgegenzuwirken. Für ein nachhaltiges Wassermanagement sind komplexe Planungen unter Berücksichtigung des Landschaftswasserhaushalts im gesamten Einzugsgebiet notwendig. Hier werden Praxisbeispiele vorgestellt, die sich mit verschiedenen Lösungen zur Bekämpfung von Wassermangelsituationen beschäftigen. Folgende Strategien wurden dabei untersucht: Umverteilung aus Wasserüberschussgebieten in Wassermangelgebiete, Wasserrückhalt in der Landschaft durch Sohlgleiten und Kleinstau oder mäandrierende Wasserläufe, Einleitung von „weitgehend gereinigtem“ Abwasser und Waldumbaumaßnahmen zur Reduzierung des Wasserverbrauchs der Landschaft. Welche Optionen in der Praxis am wirkungsvollsten sind oder welche Maßnahmen miteinander kombiniert werden können, ob dabei nicht erwünschte Nebeneffekte zu erwarten sind und ob das zukünftige Wasserdargebot ausreicht, um die Wirkung der Maßnahmen auszuschöpfen, ist im Vorfeld der Planungen von hohem Interesse. Zur Beantwortung dieser Fragestellungen werden Modelluntersuchungen des Wasserhaushalts unter Berücksichtigung seiner gebietsspezifischen Besonderheiten eingesetzt. Ein geeignetes Werkzeug dafür ist die Modellierungsumgebung ArcEGMO. Damit können Rückkopplungen und Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser unter Einbeziehung der saisonal wechselnden Vegetationswirkung abgebildet werden.

### Water scarcity in Brandenburg – supporting water management by coupled modelling of surface and subsurface water

**Abstract:** In Brandenburg water scarcity is already apparent in the sinking lake and creek levels and in the degradation of peat bogs due to climate change. Therefore, increasing efforts are being undertaken to develop strategies against this increasing aridity. Integrated planning which considers the whole water cycle in the catchment area is essential towards achieving sustainable water management. This paper presents examples of various practical solutions to deal with water scarcity such as: the redistribution of water from surplus regions to deficiency regions, water storage in the landscape of upstream regions by sleepers and weirs or by meandering watercourses, the use of treated wastewater to support the water balance, and the reduction of water consumption by forest conversion. In the preliminary planning, it is important to assess which option is most effective. Moreover, the water managers need to know whether a combination of measures will produce beneficial interactions or undesirable side effects, and whether the prospective water supply will be sufficient to achieve the desired effects. Modeling of the water balance with special regard to local peculiarities can be used to answer these questions. Appropriate modelling software for this task is ArcEGMO. Feedbacks and interactions between surface and subsurface water can be modelled taking the seasonal vegetation development into consideration.

#### 1. Einführung und Methodik

Zur Modellierung der verschiedenen hydrologischen Prozesse im gesamten Einzugsgebiet müssen alle Komponenten des Landschaftswasserhaushalts in die Berechnung mit einbezogen werden. Dafür ist eine Beschreibung der Abflussbildung inklusive des Bodenwasserhaushalts, der Grundwasserströmung und der Abflussprozesse zum und im Gewässersystem notwendig. Die Wasserstände der Fließgewässer müssen im Modell dynamisch berechnet werden. Unter Einbeziehung lokal unterschiedlicher Leakagewerte können dann Interaktionen zwischen Fließgewässer und Grundwasser (wechselnde effluente und influente Verhältnisse) dynamisch

abgebildet werden. Um auch die Interaktionen zwischen Vegetation und Grundwasser richtig zu erfassen, müssen die zeitvariablen Grundwasserstände gemeinsam mit den saisonal veränderlichen Pflanzenparametern (phänologische Parameter) betrachtet werden. Zusätzlich ist für die Simulation von Bewirtschaftungsszenarien auch die Berücksichtigung von Eingriffen in das Fließgewässersystem (wie z.B. zeitvariable Stauregulierung, Aufteilungsregeln, Entnahmen und Einleitungen) notwendig.

Trotz der großen Anzahl existierender Modelle, die sich mit der Abbildung des Wasserhaushalts beschäftigen, werden diese Anforderungen nur von wenigen Modellen erfüllt. In den reinen Grundwassermodellen wird die



Über die Modellierung verschiedener Szenarien kann die Wirkungsweise der unterschiedlichen Maßnahmen auf den Wasserhaushalt dargestellt und quantitativ bewertet werden. Dabei abgebildete Veränderungen der Wasserbilanz (z.B. Verdunstungserhöhung infolge höherer Grundwasserstände) können auch (meist unerwünschte) Effekte für die Unterlieger nach sich ziehen. Die Modelle können also nicht nur zur Ausarbeitung von Maßnahmenplanungen beitragen, sondern auch zum Konfliktmanagement der verschiedenen Interessen im Einzugsgebiet eingesetzt werden.

## **2. Praxisbeispiele zu Wassermanagementanalysen mit gekoppelten Modellen**

### **2.1 Lietzengraben**

Zur Behebung der Wassermangelsituation in einem ehemaligen Rieselfeldgebiet im Norden Berlins (Pfützner et al., 2006) wurde das gekoppelte Modell ArcEGMO-PSCN-ASM eingesetzt, um verschiedene Maßnahmen zur Stützung des Wasserhaushalts zu untersuchen. Seit Einstellung der Rieselfeldwirtschaft im Jahr 1985 hat sich die Wasserbilanz im Einzugsgebiet des Lietzengrabens stark verändert. Grundwasserstände und Gebietsabfluss waren durch die großen Mengen an Verrieselungswasser massiv erhöht, wovon unter Naturschutz gestellte Feuchtgebiete im Unterlauf des Lietzengrabens profitierten, die heute durch Trockenheit gefährdet sind.

Da der Wasserbedarf der Feuchtgebiete (etwa 50 l/s) in sommerlichen Trockenperioden nicht aus dem natürlichen Wasserangebot gedeckt werden kann, wird weitgehend gereinigtes Abwasser vom Klärwerk Schönerlinde in das Lietzengrabengebiet übergeleitet. Durch gezielte Wehrsteuerung sollen die Feuchtgebiete begünstigt werden. Mit dem Modell wurden verschiedene Wehrsteuerungen und deren Auswirkung auf Grundwasserstand und Abfluss untersucht. Durch verschiedene Wehrkombinationen wird das Zusatzwasser entweder über den kürzesten Weg (um vor allem im Sommer schnellstmöglich die Feuchtgebiete zu erreichen) oder über einen längeren Weg (um vor allen in feuchten Perioden den Wasserrückhalt in der Landschaft zu stützen) zum Lietzengraben transportiert. Die Abflusserhöhung über den kurzen Weg wurde dem Wasserrückhalt in der Landschaft über den längeren Weg gegenübergestellt. Die berechneten Abflüsse der beiden Szenarien unterscheiden sich im Mittel um 20 l/s. Hier zeigt sich, dass jede Grundwassererhöhung in grundwassernahen Gebieten den Wasserverbrauch über die Vegetation erhöht und letztlich zu Lasten der Unterlieger geht, was entlang des Fließgewässerlängsschnittes häufig zu Konflikten führt.

Mit dem Modell konnte eine sinnvolle Kombination der beiden Abflusswege aufgezeigt werden, die im Winterhalbjahr und feuchten Perioden den Landschaftswasserhaushalt stützt und in trockenen Sommermonaten die sensiblen Feuchtgebiete bevorteilt.

### **2.2 Oberes Hammerfließ**

Im Rahmen der „Revitalisierung des Mittleren Baruther Urstromtals“ wurde auch für das Hammerfließ nach

Möglichkeiten zur Stabilisierung der Abflussverhältnisse gesucht. Bereits der Oberlauf des Hammerfließes fällt in den Sommermonaten trocken, während im Winter genügend Abfluss zur Verfügung steht. Der benachbarte Horstgraben führt aufgrund seiner besseren Anbindung an das Grundwasser ganzjährig Wasser und zeigt eine ausgeglichene Abflusssdynamik.

In dem sehr flachen, stauregulierten Untersuchungsgebiet können sich kleine Veränderungen bereits stark auf den Wasserhaushalt auswirken, so dass zur Abflussvergleichmäßigung verschiedene Maßnahmen zur Verfügung stehen, die in einer Modellierung auf ihre Effektivität und eventuelle Wechselwirkungen untereinander untersucht wurden:

- (1) Durch den Einbau von Sohlgleiten soll der Wasserstand im Oberlauf angehoben werden und über längere Sicht auch die Grundwasserstände erhöht werden, um so die Anbindung des Fließgewässers an das Grundwasser zu verbessern.
- (2) Eine Laufverlängerung über die Umleitung des Fließgewässers einerseits und eine Mäandrierung andererseits soll das Gefälle verringern und den Abfluss verzögern.
- (3) Ein Bruchwaldgebiet soll im Hochwasserfall als Polder dienen, gleichzeitig Hochwasserspitzen abfangen und die Vernässung fördern.

Mit der Modellierung der verschiedenen Maßnahmen konnte gezeigt werden, dass der Einbau von Sohlgleiten zur Abflussvergleichmäßigung führt (Abb. 2). Allerdings muss die Höhe der Sohlgleiten genau abgestimmt sein, um weder eine Abflussunterbrechung noch eine zu starke Vernässung der benachbarten Flächen zu riskieren.

Eine Fließwegverlängerung wirkt sich in dem flachen Gelände nur unerheblich auf die Fließgeschwindigkeit aus. Bei der Mäandrierung muss aber darauf geachtet werden, dass die Mäanderbögen nicht zum Grundwasserberg ausgerichtet werden, um Grundwasseranschnitte zu vermeiden. Der Polder im Bruchwald zeigte in der Modellierung keinen großen Einfluss auf den Wasserhaushalt, da eine Überflutung aufgrund der Abflussvergleichmäßigung und damit Reduzierung der Abflussspitzen noch seltener eintreten würde als heute.

### **2.3 Moorgebiet Luchsee**

Ein drittes Untersuchungsgebiet befindet sich etwa 50 km südlich Berlins an der Grenze zum unteren Spreewald. Die Wasserstände des in den Krausnicker Bergen gelegenen Luchsees und des ihn umgebenden Moorgebietes sind seit den 1970er Jahren um etwa einen Meter abgesunken. Dadurch wird das Vordringen des angrenzenden Baumbestandes in den Moorbereich und die Degradierung des Moores begünstigt. Da die Entfernung der jungen Bäume (Entkusselung) in dem zur Schutzzone 1 des Biosphärenreservates Spreewald gehörenden Gebietes nicht erwünscht ist, wurde nach naturnahen Lösungen zur Wasserstandsanhhebung gesucht, deren Effektivität anhand eines Modells untersucht wurden (Mey et al., 2008).

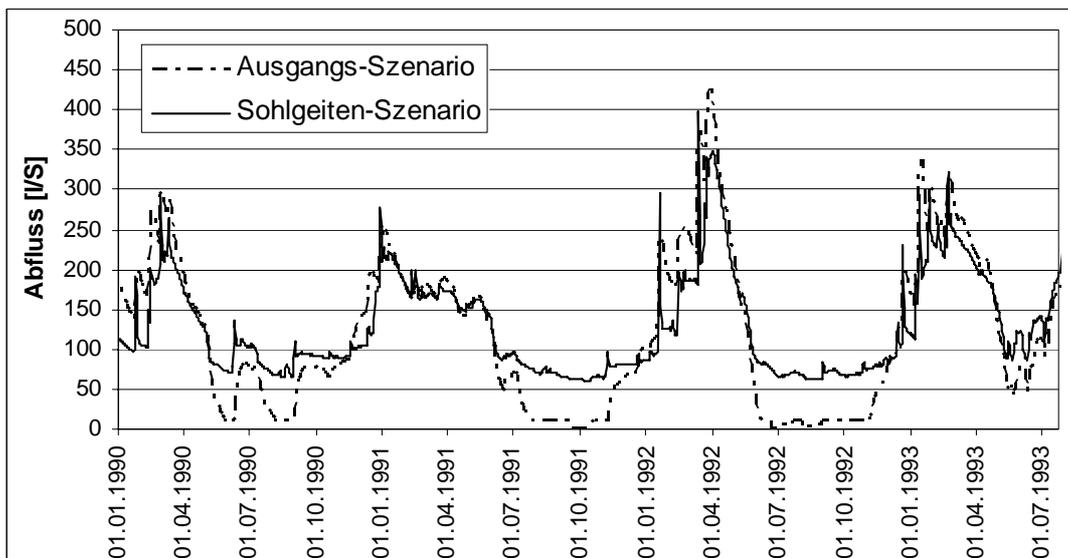


Abb. 2: Abflussvergleichmäßigung durch Einbau von Sohlgeiten.

Verschiedene Szenarien beschäftigten sich mit der Verminderung des Grundwasserabstroms aus dem Gebiet über eine Erhöhung der Wasserstände in benachbarten Gewässern. Andere Szenarien bildeten verschiedene Waldumbaumaßnahmen von reinen Kiefernwaldbeständen hin zu Mischwaldbeständen ab. Die dadurch zu erwartende Reduzierung des Wasserverbrauchs soll den Wasserinput in das direkte Einzugsgebiet des Luchsees erhöhen. Die Untersuchungen zeigten, dass der Waldumbau positive Effekte auf den Wasserhaushalt haben wird, während die Wasserstandsänderungen der Nachbargewässer aufgrund ihrer teilweise großen Entfernung zum Luchsee nur geringe bis gar keine Auswirkungen erkennen ließen.

#### 2.4 Planungshilfen für Waldumbaumaßnahmen in Brandenburg

Für die Entwicklung von Entscheidungshilfen bei der Planung von Waldumbaumaßnahmen war deren Wirkung auf die Grundwasserneubildung und auf die Grundwasserhältnisse für repräsentative Standorttypen in Brandenburg zu untersuchen. Für die Untersuchung der Flächen- bzw. Fernwirkung des Waldumbaus auf das

Grundwasser wurde das für den Luchsee verwendete Modell modifiziert, um standortunabhängige Aussagen dazu treffen zu können. Die Ergebnisse zeigten, dass auf grundwasserfernen Standorten eine zunehmende Flächenwirkung bei steigender Umbauintensität und Umbaufläche zu erwarten ist. Dabei wurden auf Standorten mit höheren Durchlässigkeiten des Grundwasserleiters und geringerem Grundwassergefälle weitere Wirkungsreichweiten berechnet als auf Standorten mit geringen Durchlässigkeiten und stärkerem Grundwassergefälle. Auf letzteren wurden dagegen lokal hohe Grundwasseranstiege mit geringerer Reichweite simuliert.

Für die Ermittlung der Entwicklungspotenziale hinsichtlich der Grundwasserneubildung, die sich durch eine Auflichtung der Bestände oder deren Umbau (Änderung der Artenzusammensetzung) ergibt, wurde das Waldvegetationsmodell 4C (Lasch et al., 2005) innerhalb des PSCN-Moduls auf typische Standorte und Bestandesformen in Brandenburg angewendet (Suckow et al., 2001). Im Ergebnis entstanden regional differenzierte Graphiken, die das Entwicklungspotenzial für verschiedene Standorttypen aufzeigen (Abb. 3).

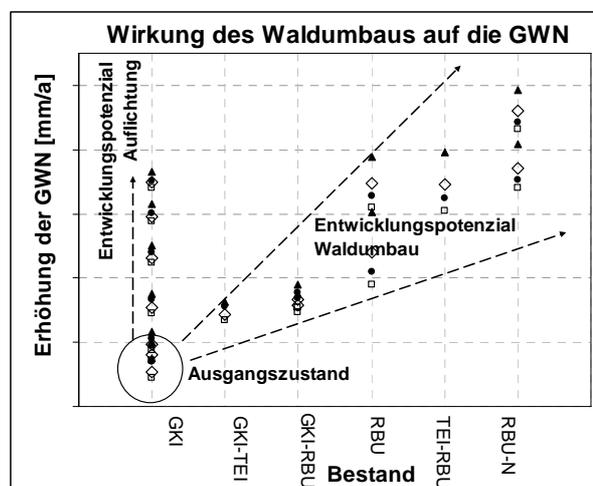


Abb. 3: Möglicher Anstieg der Grundwasserneubildung durch verschiedene Waldumbauszenarien

### 3. Schlussfolgerungen

Die Praxisbeispiele zeigen, dass Kopplungen zwischen (Vegetations-) Oberflächenwasser- und Grundwassermodellen ein effektives Werkzeug zur physikalisch fundierten Abbildung der wesentlichen hydrologischen Prozesse im Tiefland sind.

Modelluntersuchungen gewinnen als planungsbegleitende Instrumente an Bedeutung, da die Wirkung einzelner Maßnahmen zwar oft qualitativ bekannt ist, quantitative Wirkungsprognosen aber ohne Modelle kaum mehr möglich sind, insbesondere dann, wenn das Zusammenwirken verschiedener Maßnahmen inklusive ihrer Wechselwirkungen berücksichtigt werden soll.

In Wassermangelgebieten (bzw. Mangelsituationen) sind (künftig) Verteilungskonflikte zu erwarten. Modelle müssen den Gesamtkomplex inklusive der Auswirkungen auf Betroffene im Gebiet und auf die Unterlieger abbilden und belastbare Aussagen und damit einen Beitrag für ein effektives Konfliktmanagement liefern.

### 4. Literatur

Kinzelbach, W., Rausch, R. 1995. Grundwassermodellierung: Eine Einführung mit Übungen. Borntraeger, Stuttgart.  
Klöcking, B. (Hrsg.), 2008. Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebietsmodells ArcEGMO. [http://www.arcegmo.de/PSCN\\_2008.pdf](http://www.arcegmo.de/PSCN_2008.pdf).

Lasch, P., Badeck, F. W., Suckow, F., Lindner, M., Mohr, P., 2005. Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany). *Forest Ecology and Management* 207, 59-74  
Mey, S., Albert, H., Hildebrand, C., Pfützner, B., 2008. Modellgestützte Analysen zur Stabilisierung des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet des Moores „Luchsee“. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 52, 310-318.  
Pfützner, B. (Hrsg.), 2002. Homepage des hydrologischen Modellierungssystem ArcEGMO. <http://www.arcegmo.de>.  
Pfützner, B., Mey, S., Nützmann, G., Scheffler, E., 2006. Modellgestützte Analyse des Gebietswasserhaushaltes für ein Einzugsgebiet im Berliner Nordosten. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50, 12-19.  
Refsgaard, J. C., Storm, B., 1995. MIKE SHE. In: Singh, V. P. (Hrsg.): *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publication. S. 809-846. Highlands Ranch, Colorado.  
Suckow, F., Badeck, F-W., Lasch, P., Schaber, J., 2001. Nutzung von Level-II-Beobachtungen für Test und Anwendungen des Sukzessionsmodells FORESEE. *Beiträge Forstwirtschaft und Landschaftsökologie* 35, 84-87.  
Therrien, R., McLaren, R.G., Sudicky, E.A., Panday, S.M., 2007. *HydroGeoSphere – A Three-Dimensional Numerical Model Describing Fully-Integrated Subsurface and Surface Flow and Solute Transport*. Users's Guide. University of Waterloo, Canada.

## Stabilisierung der hydrologischen Situation im Großen Seddiner See (Brandenburg) durch Überleitung von gereinigtem Nieplitzwasser

Olaf Mietz, Franziska Vedder

Institut für angewandte Gewässerökologie GmbH, Schlunkendorfer Straße 2e, 14554 Seddiner See, franziska.vedder@iag-gmbh.info

**Zusammenfassung:** Der Große Seddiner See ist ein 217 ha großer Flachsee, der in den letzten 30 Jahren massiven Seespiegelabsenkungen unterlegen war. Laut der durch DHI-WASY (2007) erarbeiteten Wasserbilanz ist das Absinken der Wasserstände zu ca. 70 % klimatisch und zu 30 % nutzungsbedingt. Das regelmäßige Trockenfallen größerer Uferbereiche führt zu einer Beeinträchtigung der ökologisch sensiblen Flachwasserzonen und fördert die Eutrophierung und Verlandung des Sees. Um die Nährstoffgehalte in der Seddiner Seenkette zu senken, ist von 2006-2009 eine komplexe Restaurierung durchgeführt worden. Eine weitere Stabilisierung der ökologischen Verhältnisse ist nur über eine schrittweise Wiederherstellung der hydrologischen Ausgangssituation zu erreichen. Es ist geplant, in einem ersten Schritt den durch die Abwasserentsorgung entstandenen Wasserexport aus dem Einzugsgebiet zur Nieplitz zu kompensieren. Die Entnahme von Nieplitzwasser soll vorwiegend zu Zeiten des Wasserüberschusses, also im Winterhalbjahr erfolgen und ist an einen  $Q_{\min}$  von 1,5 m<sup>3</sup>/s gekoppelt. Erst ab Erreichen dieses Grenzwertes dürfen pro Tag ca. 2000 m<sup>3</sup> (= 0,023 m<sup>3</sup>/s o. 23 l/s) entnommen werden, was bei einem winterlichen MQ von 2,5 m<sup>3</sup>/s weniger als 1 % des täglichen Abflussvolumens der Nieplitz ausmacht und aufgrund der geringen Menge zu keinerlei Auswirkungen auf die unterhalb gelegenen Gewässer führt. Das Wasser wird über eine Rohrleitung zum Standort der Aufbereitung geführt und anschließend in den See eingeleitet.

### Hydrological stabilisation of lake Großer Seddiner See (Brandenburg) using a transfer of purified water from Nieplitz River

**Abstract:** Lake Großer Seddiner See is a 217 hectare shallow lake that is characterized by massive lake level lowering during the last 30 years. According to the by DHI-WASY (2007) developed water balance the drop in water levels is about 70 % climatically and 30 % caused by land use. The regular drying out of large areas leads to an impairment of environmentally sensitive shore areas and promotes the eutrophication and the silting up of the lake. In order to reduce nutrient levels in the lakes of the Seddiner Seenkette, 2006-2009 a complex restoration was carried out. A further stabilisation of the ecological conditions can only be achieved through a gradual restoration of the initial hydrological situation. In a first step, it is intended to compensate the export of water from the catchment area to Nieplitz River, which is created by sewage disposal. The removal of water of the Nieplitz River is mainly at times of water surplus in the winter and is linked to a  $Q_{\min}$  of 1.5 m<sup>3</sup>/s. Only after reaching this limit 20,000 m<sup>3</sup> (= 0.023 m<sup>3</sup>/s or 23 l/s) of water per day may be taken from the Nieplitz River. At a wintery mean discharge of 2.5 m<sup>3</sup>/s this corresponds less than 1 % of the daily runoff volume of Nieplitz River and leads, because of the small amount, to no impact on the water bodies situated below. The water is fed through a pipe to the location of the treatment and then launched into the lake.

### 1. Einleitung

Die Seddiner Seenkette ist glazial im Brandenburger Stadium des Weichselglazials angelegt worden und befindet sich ca. 15 km südlich der Landeshauptstadt Potsdam (Abb. 1). Geomorphologisch gesehen, liegen die Seen im Bereich der Maximalausdehnung des Brandenburger Stadiums und gehören somit zu den ältesten Seen im glazial geprägten norddeutschen Tiefland mit relativ geringen mittleren und maximalen Seetiefen.

Die Seddiner Seenkette hat insgesamt eine Wasserfläche von 247,5 ha (4,5 ha Kleiner Seddiner See, 217 ha Großer Seddiner See und 26,0 ha Kähnsdorfer See) mit einem Wasservolumen von ca. 7,5 Mio. m<sup>3</sup>.



Abb. 1: Lage der Seddiner Seenkette.

Der Gr. Seddiner See zählt zum hydrologischen Typ des ungeschichteten Landsees mit einer mittleren Verweilzeit von ca. 3 Jahren (LAWA, 1998). Der See entspricht dem Typ 11a (ungeschichteter See mit großem Einzugsgebiet; Mathes et al., 2002; Pätzolt und Schönfelder, 2005).

Die Seenkette spielt heute eine wichtige touristische Rolle. Vor allem der Große Seddiner See wird von den Einwohnern Potsdams und Berlins sowie den umliegenden Gemeinden als Bade-, Angel- und Wassersportgewässer und auch als Kulisse zur Erholung und Entspannung genutzt. Die Seen liegen im Naturpark Nuthe-Nieplitz und stellen einen sensiblen Lebensraum für eine Vielzahl von Tieren und Pflanzen dar. Die Seenkette hat sich zu einer wichtigen Wirtschaftskraft der Region entwickelt. Diese Entwicklung soll weiter vorangetrieben werden. Die Gemeinde Seddiner See als Eigentümerin strebt eine nachhaltige Bewirtschaftung der Seenkette und des Einzugsgebietes an, um der Vielzahl der Nutzungsansprüche zu genügen.

## 2. Hydrologische Situation der Seddiner Seenkette

Für den Großen Seddiner See liegen Daten zum Seepiegel von Mai 1977 bis August 2010 vor (Abb. 2). Der See wies über den gesamten Beobachtungszeitraum große saisonale und zwischenjährliche Schwankungen der Wasserspiegelhöhen auf. Dabei sind Zeiten mit niedrigen Wasserständen zu erkennen, die durch kurzzeitige Phasen der Auffüllung unterbrochen worden sind. Die jährlichen Schwankungen der Seespiegelhöhen liegen seit Beginn der Aufzeichnungen zwischen 2 (bedingt durch eine geringe Anzahl an Messwerten) und 51 cm und betragen im Mittel 26 cm. Dies entspricht einem Wasservolumen von ca. 565.755 m<sup>3</sup>.

Im vorliegenden Beobachtungszeitraum ist insgesamt eine kontinuierliche Abnahme der Pegelhöhen zu erkennen, die in mehreren Phasen mit unterschiedlich starken

Tendenzen verlief. So sind die ersten 10 Jahre der Beobachtungsreihe, also bis etwa 1987/88, zwar durch Seespiegelschwankungen (zw. 38,93 und 39,46 m ü. NN) gekennzeichnet, ein deutlicher Abfall der Werte zeigt sich jedoch erst ab 1988/1989. Dieser setzt sich bis etwa 2000/2001 fort und erreicht mit dem Tiefstand von 38,31 m ü. NN sein bisheriges Minimum. In diesem Zeitraum fanden auch die letzte maximale Füllung des Sees (39,28 m ü. NN) im April 1995 und der letzte natürliche Abfluss zum Kähnsdorfer See statt. Als Ursachen dieses rapiden Rückgangs sind, neben den allgemeinen klimatischen Veränderungen, vor allem die Intensivierung der Nutzung des Grundwassers und die Umgestaltung und Nutzungsänderung der Landschaft im Einzugsgebiet des Sees zu vermuten. So wurde im nördlichen Speisungsgebiet des Sees der Golfplatz mit einer Einfamilienhaus-siedlung und den entsprechenden Infrastrukturen zur Zu- und Abführung von Trink- und Abwasser und damit verbundenen tiefen Gräben und Rohrsystemen errichtet. Im südlichen Bereich des Sees siedelte sich zudem zu dieser Zeit großflächig wasserintensiver Gemüseanbau (v.a. Spargel) an. Zudem wurde die Abwasserentsorgung neu geregelt. Die Verrieselung des gereinigten Abwassers im Einzugsgebiet wurde eingestellt und ein Anschluss an die Kläranlage Beelitz realisiert. Eine leichte Dämpfung erfuhr der Seespiegelabfall erst nach 2001, als mit dem Einleiten von Grundwasser aus den Tiefbrunnen der ehemaligen Entenfarm (ca. 200.000-300.000 m<sup>3</sup>/a) begonnen wurde. Gleichwohl wurde in dieser Phase im Spätsommer 2006 der maximale Tiefststand von 38,29 m ü. NN erreicht.

Tendenziell kann für den Wasserstand im Großen Seddiner See festgehalten werden, dass, abgesehen von wenigen Ausnahmen, die Maxima in durchschnittlichen Jahren immer geringer werden und die Tiefstände des Wasserspiegels sich gleichzeitig weiter vergrößern.

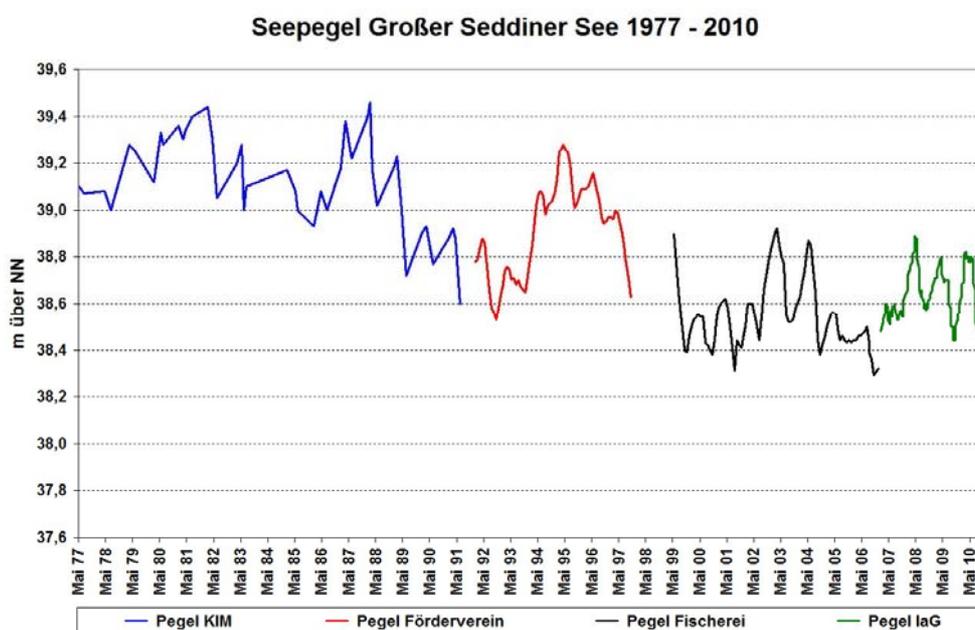


Abb. 2: Entwicklung der Seespiegelstände von 1977-2010.

Selbst nach dem sehr feuchten Sommer 2007 und dem niederschlagsreichen Winter 2007/2008 konnte nur eine Auffüllung auf maximal 38,89 m ü. NN registriert werden. Das niederschlagsreiche hydrologische Jahr 2007/2008 führte dazu, dass die Seespiegelstände im See, gegenüber den minimalen Seespiegelständen im Jahr 2006, um ca. 0,60 m angehoben wurden. Dieser relativ geringe Anstieg ist ein Indiz dafür, dass günstige Niederschlagsverhältnisse auch in der Zukunft zu keiner kontinuierlichen Füllung des Großen Seddiner See beitragen können. Aus meteorologischer Sicht können relativ feuchten Jahren auch immer wieder Jahre mit geringem Niederschlag folgen. Langanhaltende niederschlagsarme Zeiträume von mehr als 5 Wochen sind im Frühjahr 2007, 2008 und im Frühjahr und Sommer 2009 und 2010 beobachtet worden. Negativ haben sich in der Periode von 2002 bis 2009 vor allem die niederschlagsarmen Frühjahre ausgewirkt. Zu diesen Zeiten gab es Trockenheitsphasen mit mehr als 40 aufeinander folgenden Tagen ohne Niederschlag und Strahlungswetter und den damit verbundenen hohen Verdunstungsraten. Die Jahre 2009 und 2010 können als niederschlagsreiche Jahre angesehen werden. Die Seespiegelstände stiegen im Winter auf Werte von 38,80 bzw. 38,82 m ü. NN an. Diese Werte lagen aber immer noch unter dem Wert von 39,25 m ü. NN, bei dem ein natürlicher oberirdischer Abfluss der Seenkette eintritt.

### 3. Ökologische Folgen der Wasserstandsrückgänge

Nach Schönborn (2003) stellen Wasserstandsschwankungen einen erheblichen Stressfaktor für den Schilfbestand dar. Die Seeufer erfüllen wichtige ökologische Funktionen innerhalb des Seeökosystems und beeinflussen somit über komplexe und z. T. indirekte Wirkungen auch die Wasserqualität des Freiwassers (Scheffer et al., 1993; Jeppesen et al., 2002). Das gilt insbesondere für Flachseen (Walz et al., 2003). Der Verlust besiedelbarer Litoralflächen, die in Folge der Wasserstandsabsenkung trocken fallen, führen zur Reduktion des potentiellen Siedlungsraums des Phytals (submerse und emerse Makrophyten) und können die Schutzmechanismen (wie Filtration, Rückhalt) bzw. ökologischen Funktionen (Lebensraum, Nährstofffestlegung usw.) enorm beeinträchtigen und zur weiteren Eutrophierung der Seen beitragen.

Die Folgen der Wasserspiegelschwankungen sind am Großen Seddiner See besonders gravierend (siehe Abb. 3). Aufgrund seiner Morphometrie fallen schon bei geringem Wasserstandsrückgang größere Litoralflächen und damit auch die Schilfbestände trocken. Neben dem Röhrichtgürtel sind auch die – soweit vorhanden – submersen Makrophyten von den Wasserstandsschwankungen betroffen.

Durch das schrittweise Aufklaren des Großen Seddiner Sees infolge der restaurativen Maßnahmen, besiedelten seit 2007 wieder flächig submerse Makrophyten (vor allem *Najas*) das Litoral bis in maximal 1,4 m Tiefe (Abb. 4). Hierbei stellten insbesondere die großen Flachwasserzonen im Norden und Süden des Hauptbeckens Besiedlungsschwerpunkte dar (Mertens, 2007). Durch die Wasserstandsschwankungen fallen diese Bereiche trocken, was zu einem Vertrocknen und letztlich zum Verlust der an den aquatischen Lebensraum gebun-

denen Wasserpflanzen führt und den Zielen der Restauration, einer möglichst großflächigen Etablierung von submersen Makrophyten zur Stabilisierung von Klarwasserzuständen, entgegensteht (Abb. 5). Ferner werden durch das Trockenfallen auch die Populationen der Großmuscheln, die vor allem in den sandigen Flachwasserbereichen leben, in Mitleidenschaft gezogen. Großmuscheln sind in der Lage pro Tag bis zu 2 m<sup>3</sup> Wasser zu filtern und sind somit elementar für das Selbstreinigungspotential eines Gewässers. Der Wasserstand im Großen Seddiner See fällt mitunter jedoch so schnell, dass die Tiere keine Möglichkeit zum Rückzug in noch wasserführende Bereiche haben und somit vertrocknen bzw. von Raubtieren, wie z.B. dem Waschbär, gefressen werden. Im Jahr 2009 sind infolge dessen im Großen Seddiner See mehrere 1000 Großmuscheln durch Waschbären vernichtet worden (Abb. 6).



Abb. 3: Spätsommer 2010: mit submersen Makrophyten besiedelte Flachwasserzonen im Bereich der Fischerei im Großen Seddiner See.



Abb. 4: *Najas marina* im Spätsommer 2010 in einem Flachwasserbereich des Großen Seddiner Sees.



Abb. 5: Spätsommer 2009: trockengefallene submerse Makrophyten im Großen Seddiner See.



Abb. 6: Spätsommer 2009: leere Muschelschalen mit Bissspuren des Waschbären.

Ein weiterer Effekt des Trockenfallens ist die Mineralisierung der organischen Substanz. Im Falle eines Wasseranstiegs von Wasser (z. B. temporär in feuchten Jahreszeiten oder bei Starkregen) wird die mineralisierte Substanz im Wasser gelöst und damit der Nährstoffgehalt im Freiwasser erhöht.

Es ist heute unbestreitbar, dass es einen direkt steuernden Einfluss der Hydrologie auf die Trophie gibt. Geringe Wasserstände im See sind eutrophierungsfördernd und stehen dem Restaurationsziel eines makrophytendominierten Klarwassersees entgegen. Dies kann man am Großen Seddiner See besonders deutlich an der Korrelation des Chlorophyll-a-Gehaltes mit dem Wasserstand beobachten (Abb. 7, 8).

Mit fallenden Wasserständen kommt es zu einem allgemeinen Anstieg der Chlorophyll-a-Gehalte. Im Zusammenhang mit einer Erhöhung des Chlorophyll-a-Gehaltes steht immer eine Verringerung der Sichttiefenverhältnisse.

Wasserstände  
im Gr. Seddiner See  
(Juliwerte)

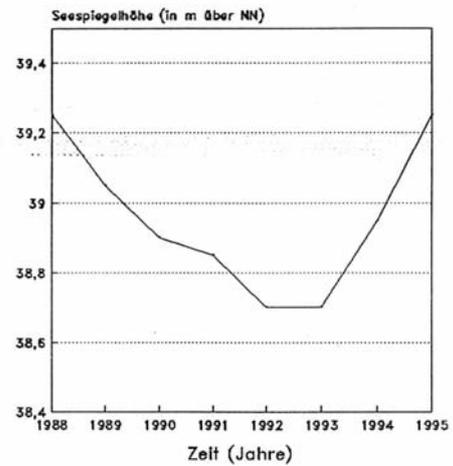


Abb. 7: Wasserstände im Großen Seddiner See von 1988-1995.

Chlorophyll-a-Gehalt  
im sommerlichen Mittel  
im Gr. Seddiner See von 1988 - 1995

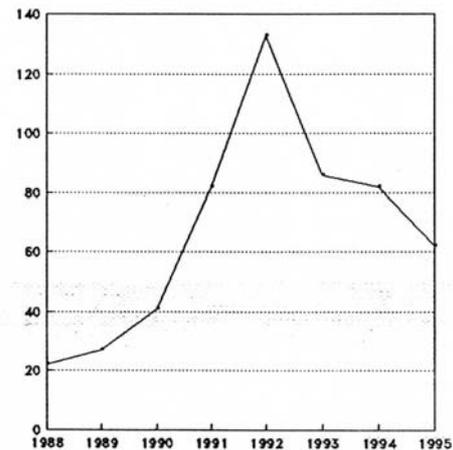
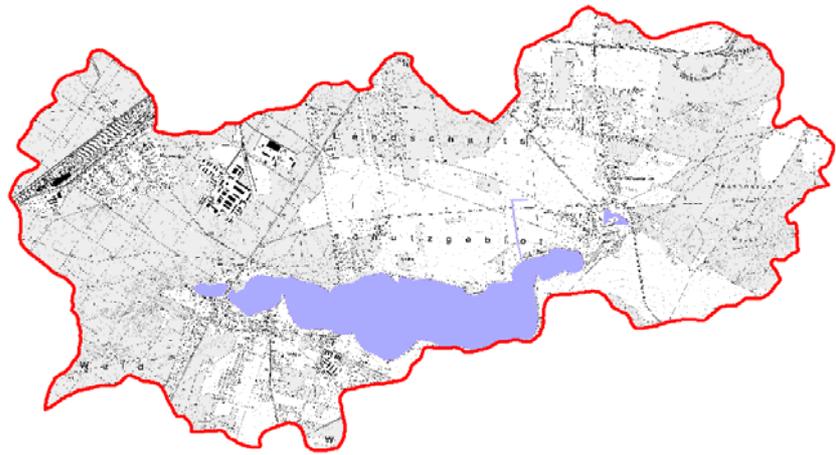


Abb. 8: Chlorophyll-a-Gehalte im Großen Seddiner See von 1988-1995.

#### 4. Wasserhaushaltsbilanz Großer Seddiner See

Im Rahmen der Restaurierung der Seddiner Seen ist aus den beschriebenen Gründen eine Stabilisierung des Wasserhaushalts notwendig. Die DHI-WASY GmbH erstellte diesbezüglich im Jahr 2007 ein Gutachten zu den hydrologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet (DHI-WASY, 2007). Ziel des Gutachtens war es, wasserhaushaltliche Defizite der Seddiner Seen und deren Ursachen zu ermitteln und erste Lösungsvorschläge zu ihrer Behebung zu entwickeln. Folgende Aspekte wurden besonders beachtet: Niederschlag, ggf. Niederschlagstrends; Evapotranspiration; Grundwasserzustrom/-abstrom; Wassernutzungen (OW/GW) im Einzugsgebiet und nutzungsbedingte Veränderungen des Einzugsgebiets- und Oberflächenwasserzuflusses.



**Abb. 9:** Oberirdisches Einzugsgebiet der Seddiner Seen.

Das oberirdische Einzugsgebiet hat eine Fläche von 26,72 km<sup>2</sup>, welches in Relation zur Seefläche von 2,28 km<sup>2</sup> mit einem Umgebungsfaktor von 11,7 (nach OHLE) als klein zu bezeichnen ist (Abb. 9).

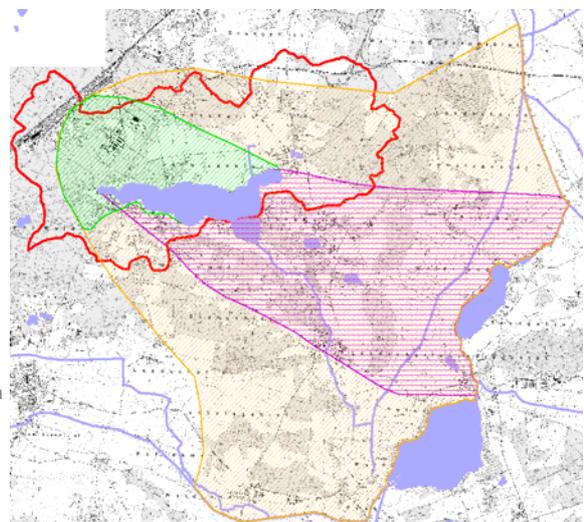
Grundlage der wasserhaushaltlichen Bilanzierung sind meteorologische Größen. Für das Untersuchungsgebiet standen Daten der Klimastation auf dem Golfplatz Seddin als Tageswerte der Zeitreihe vom 05.05.2004 bis 03.11.2006 zur Verfügung. Die Reihe ist für eine gesicherte Bilanzierung jedoch zu kurz, darüber hinaus fehlten häufig einzelne Tageswerte. Deshalb wurde auf die Klimadaten der Station Potsdam zurückgegriffen. Hierfür standen Monatswerte vom Januar 1970 bis Dezember 2006 zur Verfügung. Aus dem Vergleich der Niederschlagsdaten der Stationen Potsdam und Golfplatz Seddin wurde ermittelt, dass der Niederschlag P im Untersuchungsgebiet Seddiner Seen geringer ist als an der Station Potsdam. Es ergab sich folgende Beziehung:  $P_{\text{Seddin}} = 0,75 \times P_{\text{Potsdam}}$ . Ausgehend von der Berechnung der potentiellen Verdunstung nach Turc/Ivanov wurde die Verdunstung der freien Wasserfläche EW ermittelt. Davon ausgehend konnte die klimatische Wasserbilanz ermittelt werden. Deutlich erkennbar ist, dass die Jahresniederschläge seit 1970 etwa gleich bleibend waren, ab

1989 die Verdunstung aber angestiegen ist. Das Resultat sind wachsende Defizite der klimatischen Wasserbilanz.

Auf Grundlage der im Gebiet befindlichen Messstellen ist auch die Situation des Grundwassers untersucht worden. Es zeigt sich ein relevanter Rückgang der Grundwasserstände von 1977 bis 1990 in Neuseddin, Seddin und Fresdorf. Auch im sich anschließenden Zeitraum bis 2006 ist eine signifikante Grundwasserabsenkung erkennbar. Deutlich wird der starke Rückgang der Grundwasserstände insbesondere im Bereich des Zustromgebiets zu den Seddiner Seen.

Um den Einfluss der Grundwasserentnahmen auf den unterirdischen Zu- und Abstrom zu ermitteln, wurde ein Grundwassermodell mit dem Simulationssystem FEFLOW der DHI-WASY GmbH erstellt. Aus den Berechnungen mit dem Grundwassermodell ergaben sich u. a. die ungefähren Grenzen des unterirdischen Zustrom- und Abstromgebietes sowie des Einflussgebietes der Grundwasserentnahmen (Abb. 10).

Die Grenzen wurden aus den Grundwasser-Isolinien abgeleitet. Es hat sich gezeigt, dass trotz Grundwasserstandsänderungen in den vergangenen Jahren die räumliche Ausbreitung der Gebiete in etwa geblieben ist.



**Abb. 10:** Unterirdischer Zu- und Abstrom in den und aus dem Seddiner See.

Die Wasserhaushaltsbilanz für den Großen und Kleinen Seddiner See ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$\text{Volumenänderung} = P - EW - ET_{\text{Schilf}} + RO + RU + N_{\text{OW}}$$

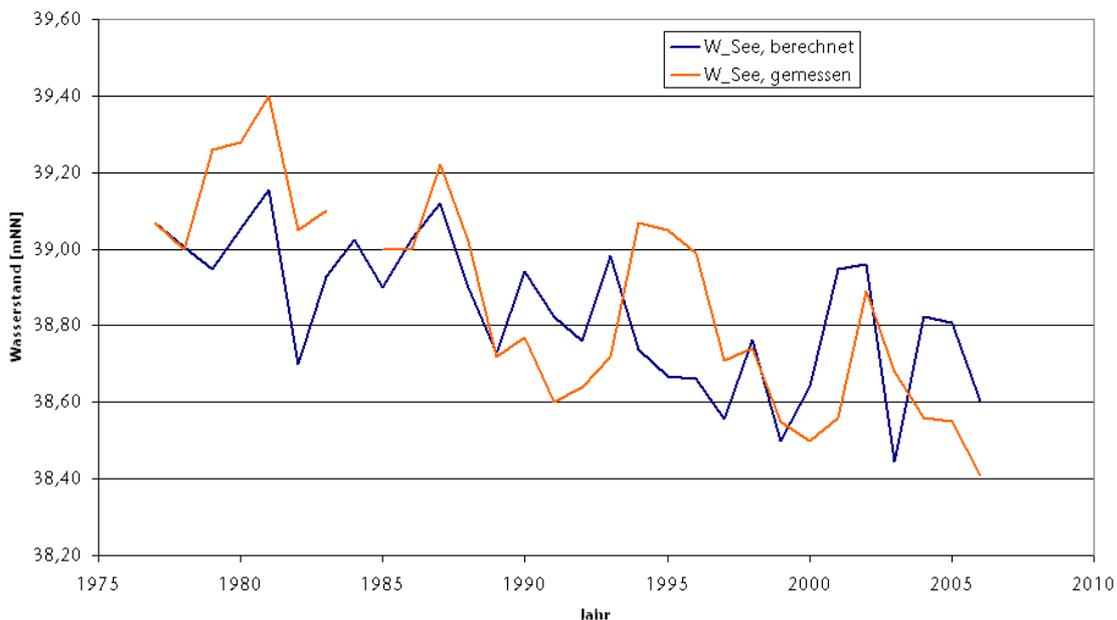
|                      |  |
|----------------------|--|
| EW                   | Verdunstung freier Wasserflächen                               |
| ET <sub>Schilf</sub> | Verdunstung des Schilfgürtels                                  |
| P                    | Niederschlag   |
| RO                   | Summe oberirdischer Zufluss - Abfluss                          |
| RU                   | Summe unterirdischer Zufluss - Abfluss (einschl. GW-Entnahmen) |
| N <sub>OW</sub>      | Summe Entnahme - Einleitungen aus/in Oberflächenwasser         |

Aus der Wasserhaushaltsbilanz konnte die Entwicklung der Wasserstände in den Seddiner Seen zunächst im Ist-Zustand berechnet werden.

In Abbildung 11 werden der gemessene und der mit der Wasserhaushaltsbilanz berechnete Wasserstand der Seddiner Seen gezeigt. Der berechnete und gemessene Wasserstand stimmen gut überein. Abweichungen sind vor allem auf ungenügende Kenntnisse der Nutzungen in der Vergangenheit zurückzuführen.

Im Ergebnis der wasserhaushaltlichen Bilanzierung konnte festgestellt werden, dass es einen Zusammenhang zwischen der Absenkung der Grundwasserstände im Einzugsgebiet und der Seespiegelstände im Großen Seddiner See gibt. Die Absenkung des Grundwasserstandes in den letzten 30 Jahren beträgt etwa 0,85 m.

Das Wasserdefizit des Großen Seddiner Sees ist laut DHI-WASY (2007) zu 70 % klimatisch bedingt und zu 30 % durch übermäßige Nutzung hervorgerufen.



**Abb. 11:** Vergleich berechneter und gemessener Wasserstand des Großen Seddiner Sees (Wasserstand, sofern vorhanden, zum jeweiligen Jahresende, d. h. keine Mittelwerte).

## 5. Ermittlung des Defizits

Um ein weiteres Absinken des Wasserstandes im Großen Seddiner See zu vermeiden, ist die Menge des Defizits auszugleichen. Um das Volumen des Defizits zu bestimmen, erfolgten Tiefenlotungen bei einem Wasserstand von 38,5 m ü. NN (= Wassertiefe 0). Die Volumenbeziehung wurde für Wasserstände von 38,5 bis 39,4 m ü. NN (Wasserstand im See in den 70er Jahren) mit einer Flächenzunahme von 2,5 % pro 10 cm berechnet. Das entspricht der mittleren Flächenzunahme zwischen den Wasserständen von 38,5 und 39,5 m ü. NN. Das tatsächliche Defizit hängt vom Zielwasserstand für den See ab.

Folgende Zielwasserstände werden angestrebt:

- mittelfristig: 38,90 m ü. NN = „Mittel“ 1990er Jahre;

- langfristig: 39,20 m ü. NN = „Mittel“ 1980er Jahre.

Die erforderliche Wasserzuführung zur Erreichung der Zielwasserstände ausgehend von 38,5 m ü NN ergibt sich daraus zu:

- ca. 910.000 m<sup>3</sup> (38,90 m ü. NN);
- ca. 1.660.000 m<sup>3</sup> (39,20 m ü. NN).

Je nach Wasserstand zu Beginn der Auffüllung soll der Zielwasserstand unter maximaler Ausnutzung der technischen Gegebenheiten in ca. 5-7 Jahren erreicht werden. Zum Halten des Wasserstandes nach Erreichen der Zielwasserstände werden dann im langjährigen Mittel etwa 300.000 m<sup>3</sup>/a Wasser gebraucht.

Zur Vermeidung des weiteren Absinkens der Wasserstände im Großen Seddiner See sind folgende Maßnahmen in Betracht zu ziehen:

- Überprüfung der vorhandenen wasserrechtlichen Erlaubnisse und Erteilung keiner weiteren Nutzungsgenehmigungen im Einflussgebiet der Grundwasser-Nutzungen (OGL und UGL) und im oberirdischen Einzugsgebiet;
- Überleitungen z. B. aus der Nieplitz.

Als relativ kurzfristig machbare und darüber hinaus auch technisch realisierbare Maßnahme wurde des weiteren die Überleitung von Nieplitzwasser im Winterhalbjahr geprüft.

## 6. Hydrologische Situation der Nieplitz

Die Gemeinde Seddiner See fördert aus dem Einzugsgebiet des Großen Seddiner Sees ihr Trinkwasser. Nach der Nutzung gelangt das Abwasser nach Beelitz in die kommunale Kläranlage. Die Summe der Abwassermenge beträgt pro Jahr ca. 142.000 m<sup>3</sup>. Somit wird jährlich Wasser aus dem Einzugsgebiet des Großen Seddiner Sees in das südlich angrenzende Einzugsgebiet der Nieplitz bei Beelitz transportiert. Dieser wasserwirtschaftlich gesehene Export soll aus Sicht der Gemeinde Seddin in der Zukunft wieder kompensiert werden, indem Wasser aus der Nieplitz in den Großen Seddiner See geleitet wird. Dieses Wasser muss technisch aufbereitet werden, damit es zu keiner Verschlechterung der Güte des Großen Seddiner Sees kommt. Die Kriterien, die an die Aufbereitung gestellt werden, ergeben sich aus der Qualität des Seewassers im Großen Seddiner See.

Die Nieplitz entspringt im Fläming bei Frohnsdorf, fließt durch Treuenbrietzen, Niebelhorst und Salzbrunn. In ihrem weiteren Verlauf durchquert sie Beelitz und die

hier angrenzenden Spargelfelder, um dann den Blankensee, den Krössinsee und den schlauchartigen Schiaßer See zu verbinden und mündet nach etwa 50 km Fließstrecke zwischen dem Gröbener Kietz und Jütchendorf in die Nuthe. Im Oberlauf, vor Treuenbrietzen, kann man ihren Verlauf noch als relativ naturnah, mäandrierend beschreiben. Ab Treuenbrietzen wurde der Lauf begräbt, vertieft und stellenweise eingedeicht. Vor allem die mittleren Abschnitte stellen sich heute kanalähnlich dar. Wie viele norddeutsche Tieflandflüsse ist sie somit durch Kanalisierung, Stau- und Abflussregulierung geprägt. Diese Regulierungsmaßnahmen sind für die Nieplitz seit dem 13. Jahrhundert nachgewiesen. Die wichtigsten Staustufen im Mittel- und Unterlauf liegen bei Beelitz, Schönefeld und Zauchwitz. Noch vor dem Blankensee nimmt die Nieplitz aus südlicher Richtung das Pfefferfließ auf, das die Überschwemmungsbereiche und Kanalsysteme bei Stangenhagen und Körzin in die Nieplitz entwässert. In nördliche Richtung zweigt von dieser Stelle der Königsgraben von der Nieplitz ab. Dieser wurde im 18. Jahrhundert angelegt, um das damals beträchtliche Wasseraufkommen des Pfefferfließes und der nahe liegenden Feuchtgebiete schneller an der Nieplitz-Seenkette vorbei direkt in die Nuthe zu entwässern. Diese wasserwirtschaftliche Maßnahme hatte die Nutzbarmachung des angrenzenden Landes zum Zweck.

Die hydrologische Situation der Nieplitz wird seit Jahrzehnten erfasst (ehemalige WWD und jetzt LUA Brandenburg; Abb. 12).

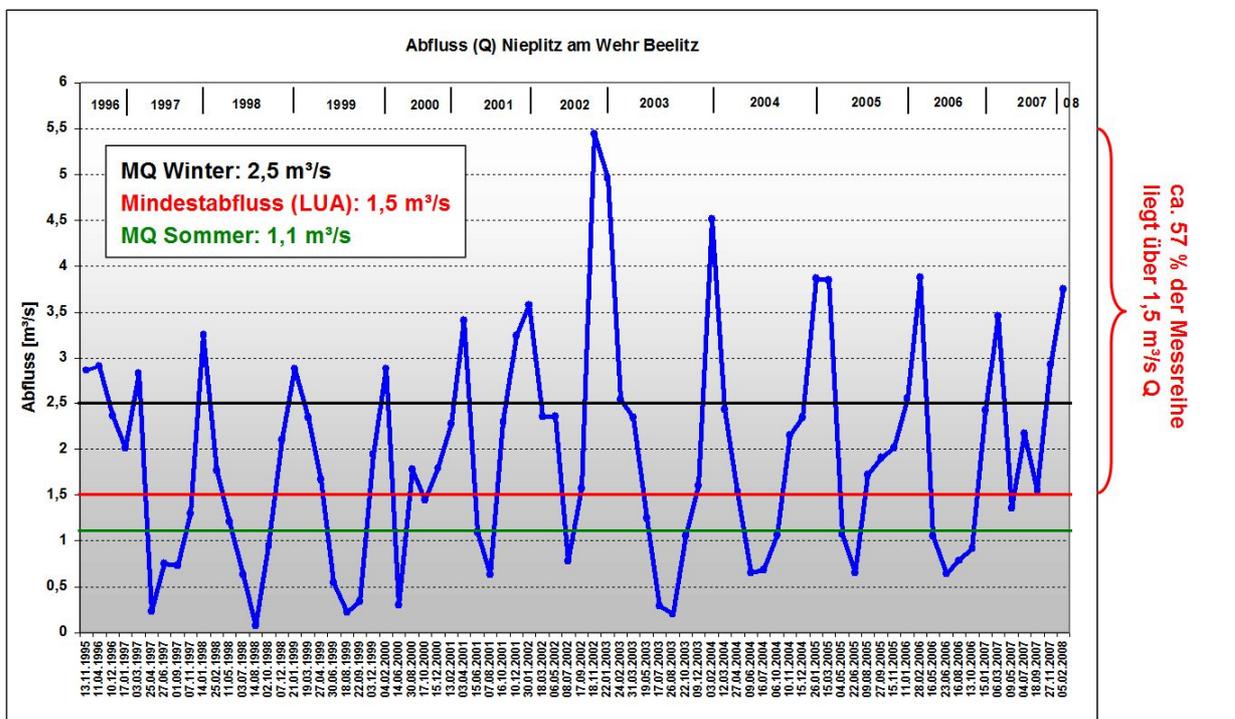


Abb. 12: Abflüsse der Nieplitz am Wehr bei Beelitz von 1977 bis 2008.

Der Abfluss eines Oberflächengewässers ist eine wichtige Größe des Landschaftswasserhaushalts. Abflüsse können im Verlauf eines Jahres zum Teil erheblichen Schwankungen unterworfen sein. Für die Fließgewässer-Lebensgemeinschaften bedeutsame Faktoren, wie Stoffhaushalt, Substrat bzw. Sediment, Benetzung und Strömung, hängen maßgeblich vom Abfluss ab. Wasserentnahmen können daher zu einer Veränderung der Lebensgemeinschaften der Fließgewässer in ihrer Größe und Zusammensetzung führen. Eine natürliche Biozönose ist auf die natürlichen oder naturnahen Verhältnisse und Randbedingungen angewiesen. Daher muss vor einer Entnahme von Wasser ein Mindestwasserabfluss ( $Q_{\min}$ ) festgelegt werden.

## 7. Anforderungen an die Überleitung von Nieplitzwasser und technische Umsetzung

Der  $Q_{\min}$  der Nieplitz wurde durch das LUA auf  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  festgelegt. Diese Abflussmenge kann für die Nieplitz als erniedrigter MQ charakterisiert werden.  $Q_{\min}$  werden häufig vom mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) abgeleitet, da davon ausgegangen wird, dass die Gewässerbiozönosen an Niedrigwasserverhältnisse angepasst sind. Der Abflusswert des  $Q_{\min}$  der Nieplitz liegt zwischen dem sommerlichen und winterlichen MQ. Nach Analyse der vorliegenden Messreihe liegen 57 % der Messwerte über dem vom LUA geforderten  $Q_{\min}$ .

Der Grundsatz der Entnahmeregelung für die Nieplitz ist eine Sicherung des  $Q_{\min}$  in Niedrigwasserzeiten. Daher ist die Entnahme an folgende Komponenten gekoppelt:

- Entnahme hauptsächlich im Winter ab  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- potentiell weitere Entnahme bei Hochwasserabflüssen (HQ) im Sommer;
- maximale Entnahmemengen:  $2000 \text{ m}^3/\text{d}$  und  $300.000 \text{ m}^3/\text{a}$ .

Geplant ist die winterliche Entnahme von  $2.000 \text{ m}^3$  pro Tag. Bei einer kontinuierlichen Überleitmenge entspricht dies einer Entnahme von  $83,3 \text{ m}^3/\text{h}$  bzw.  $1,38 \text{ m}^3/\text{Minute}$  bzw.  $0,023 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der ökologische Mindestwasserabfluss der Nieplitz beträgt  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pro Tag fließen also mindestens  $130.000 \text{ m}^3$  am Standort Brücke Schönefeld ab. Der mittlere winterliche Abfluss beträgt  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Somit errechnet sich die tägliche Abflussmenge in diesem Zeitraum auf  $216.000 \text{ m}^3$ . Setzt man die Abflussmenge zur geplanten Entnahmemenge in ein Verhältnis, so lautet dies für die folgenden Abflussmengen wie folgt: Die geplante Ableitmenge entspricht somit im Maximum 1,54 % der Abflussmenge bei einem Abfluss von  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Für den winterlichen Mittelwert ( $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) sinkt der prozentuale Anteil der Überleitmenge auf 0,93 %. Die geplante Entnahmemenge liegt bei  $0,023 \text{ m}^3/\text{s}$  und ist mit der derzeit zur Verfügung stehenden Abflussmesstechnik nicht zu erfassen bzw. liegt im Bereich des Messfehlers. Die geplante Überleitmenge von Nieplitzwasser in die Seddiner Seenkette entspricht ca. 0,53 % der Jahresabflussmenge der Nieplitz. Diese Menge ist so gering, dass ökologische und hydrologische Auswirkungen auf den Unterlauf der Nieplitz ausgeschlossen werden können.

Im Rahmen des Überleitungsprojektes ist geplant, am Entnahmestandort am Wehr bei Schönefeld eine automatische Messstation einzubauen. Zur Anwendung soll ein Ultraschallmessverfahren kommen. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt in der kontinuierlichen Abflussmessung.

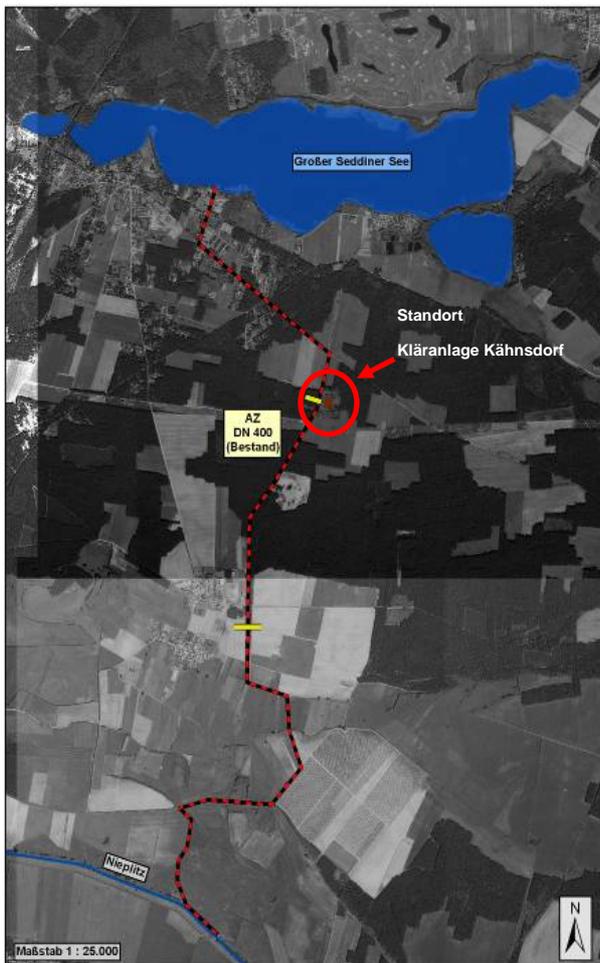
Vom Entnahmestandort an der Nieplitz bei Schönefeld muss das Wasser über eine Distanz von ca. 5 km per Rohrleitung zum Ort der Aufbereitung und anschließend zum Großen Seddiner See transportiert werden.

Eine Besonderheit der lokalen Situation ist das partielle Vorhandensein bestehender Druckrohrleitungen und eine in Seenähe befindliche technische Anlage, die in der Vergangenheit der Aufbereitung der Abprodukte der ehemals in Seddin ansässigen Entenfarm diente. Am Standort dieser sog. „Kläranlage“ Kähnsdorf (Abb. 13) wurde noch bis ca. 1995 die im Rahmen der Entenmast anfallende Entengülle mit Seewasser vermischt und auf den umliegenden landwirtschaftlichen Nutzflächen verrieselt. Dafür wurden vom See zum Kläranlagenstandort und darüber hinaus unterirdische Rohrleitungen verlegt, die hinsichtlich der Trassenführung weitestgehend den Anforderungen der Überleitung von Nieplitzwasser in den Seddiner See entsprechen und somit auch im geplanten Projekt genutzt werden können (Abb. 14).

In der „Kläranlage“ Kähnsdorf sollen die technischen Anlagen installiert werden, die zur Aufbereitung des Nieplitzwassers benötigt werden. Das Kernstück der Anlage bilden zwei trapezförmige Betonbecken mit einem Fassungsvermögen von ca.  $13.600 \text{ m}^3$ . Im östlichen Teil des Grundstückes liegen darüber hinaus sechs ehemalige Teiche, die früher als Sicker- und Überlaufteiche verwendet worden sind. Insgesamt können an dem Standort so ca.  $26.000 \text{ m}^3$  Wasser zwischengespeichert werden.



Abb. 13: Luftbildaufnahme der „Kläranlage“ Kähnsdorf.



**Abb. 14:** Trassenführung der geplanten Rohrleitung.

Durch die Restaurationsmaßnahmen an der Seddiner Seenkette in den letzten Jahren konnte die Gesamtphosphor (TP)-Konzentration im Großen Seddiner See auf etwa 20-25 mg/m<sup>3</sup> reduziert werden. Um diesen Erfolg nicht zu gefährden, ist es notwendig, die TP-Konzentrationen im Überleitungswasser auf das gleiche Niveau abzusenken. Die TP-Gehalte in der Nieplitz betragen im Mittel etwa 87 mg/m<sup>3</sup>. Damit ergibt sich das Erfordernis der Vorbehandlung des einzuleitenden Wassers durch eine Phosphatfällung. Diese wassertechnische Aufbereitung soll in zwei Pelicon-Anlagen (Phosphoreliminationscontainer) durch Zugabe von Fällmittel erfolgen. Damit können pro Stunde ca. 100 m<sup>3</sup> Wasser aufbereitet werden.

## 8. Fazit

Mit der geplanten Überleitung kann der technisch bedingte Wasserexport aus dem Einzugsgebiet der Seddiner Seen kompensiert werden. Es wird erwartet, dass die geplante Einleitmenge von 300.000 m<sup>3</sup>/Jahr dazu führt, die weitere Tendenz des sommerlichen Absinkens der Wasserstände zu dämpfen.

## 9. Literatur

- DHI-WASY, 2007. Gutachten zur Entwicklung der Grundwasserstände zwischen 1977 und 2006. Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag des Institutes für angewandte Gewässerökologie Seddin.
- Jeppesen, E., Syndergaard, M., Christoffersen, K., Teil-Nielsen, J., Jürgens, K., 2002. Cascading trophic interactions in the littoral zone: an enclosure experiment in shallow Lake Stigsholm, Denmark. *Archiv für Hydrobiologie* 153, 533-555.
- LAWA – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 1998. Gewässerbewertung – stehende Gewässer. Vorläufige Richtlinie für eine Erstbewertung von natürlich entstandenen Seen nach trophischen Kriterien. Kulturbuch-Verlag, Berlin.
- Pätzolt, J., Schönfelder, J., 2005. Ergebnisse der Gewässertypisierung in Brandenburg. In: Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.): *Umweltdaten aus Brandenburg Bericht 2005*. S. 72-75. Potsdam.
- Mathes, J., Plambeck, G., Schaumburg, J., 2002. Der Entwurf zur Seetypisierung in Deutschland im Hinblick auf die Anwendung der Wasserrahmenrichtlinie der EU. *Deutsche Gesellschaft für Limnologie, Tagungsbericht 2002*, S. 1-6. Braunschweig.
- Mertens, M., 2007. Makrophytenuntersuchung im Großen Seddiner See und im Kähnsdorfer See 2007. Unveröffentlichtes Gutachten. Institut für angewandte Gewässerökologie Seddin.
- Scheffer, M, Hosper, S.H., Meijer, M.L., Moss, B., Jeppesen, E., 1993. Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology and Evolution* 8, 275-279.
- Schönborn, W., 2003. *Lehrbuch der Limnologie*. Schweizerbart, Stuttgart.
- Walz, N., Ostendorp, W., Brüggemann, R., 2003. Die ökologische Bewertung von Seeuferrn in Deutschland. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 15, 31-38.

## Modellgestützte Analyse der Einflüsse von Veränderungen der Waldwirtschaft und des Klimas auf den Wasserhaushalt von Seen

Marco Natkhin, Jörg Steidl, Ottfried Dietrich, Ralf Dannowski, Gunnar Lischeid

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Institut für Landschaftswasserhaushalt, Eberswalder Straße 84, 15374 Müncheberg, marcom@zalf.de

**Zusammenfassung:** Am Beispiel des ca. 50 ha großen Redernswalder Sees wird analysiert, wie Klimaänderungen und Veränderungen in der Waldwirtschaft die Grundwasserneubildung und den Wasserhaushalt sowie die Wasserstände abflussloser Seen beeinflussen können. Zunächst wird die Entwicklung der Grundwasserneubildung in der Zeit von 1958 bis 2007 mit dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH nachgebildet. Für die Analyse der Wechselwirkungen des Sees mit dem Grundwasser wurde das 3D-Grundwassermodell FEFLOW genutzt. Mögliche zukünftige Veränderungen der Grundwasserneubildung und des Seewasserstandes durch Klimaänderungen und Waldumbau werden mit Szenarienrechnungen bis zum Jahr 2100 analysiert. Die modellgestützte Analyse des Wasserhaushaltes zeigt, dass der Rückgang der Grundwasserneubildung unter den Waldflächen des Modellgebietes um 71 mm/a im Zeitraum 1958-2007 etwa zu gleichen Anteilen auf klimatische Änderungen und Veränderungen im Wald (Altersstruktur und Unterwuchs) zurückzuführen ist. Die zukünftigen Entwicklungen der Grundwasserneubildung und der Wasserstände sind geprägt von sich ändernden hydroklimatischen Randbedingungen und einem sukzessiven Wandel der Kiefernbestände zu Laubwäldern. Dieser Waldumbau hat positive Wirkungen auf die Grundwasserneubildung und damit auf die Wasserstände und kann zumindest zeitweise die hydroklimatischen Wirkungen mehr als kompensieren.

### Model-based analysis of how changes in forest management and climate influence the water budget of lakes

**Abstract:** How climate change and forest conversion influence groundwater recharge and the water budget as well as the water level of lakes without outlet is analysed using the small lake Redernswalder See as an example. Groundwater recharge is simulated for the years 1958 to 2007 with the water balance model WaSiM-ETH. The interaction between the lake and the groundwater is studied with the 3-D groundwater flow model FEFLOW. Potential changes in climate and forestry are considered with scenarios of climate progression and forest conversion till 2100. The analysis shows a decline in ground water recharge by 71 mm/yr between 1958 to 2007 caused by climatic changes and changes in forest stock in equal parts. Future development in groundwater recharge and the water levels is characterised by changing hydro climatic boundary conditions and successive forest conversion from pine to broadleaved forests. Forest conversion has a positive impact on groundwater recharge and, thus, the water levels. It can more than compensate, at least temporarily, the effect of changing hydro climatic boundary conditions.

### 1. Problem- und Zielstellung

In Nordost-Brandenburg gibt es viele Seen und Feuchtgebiete mit kleinen Einzugsgebieten, im Folgenden als grundwasserabhängige Landschaftselemente bezeichnet, deren Wasserstände seit drei Jahrzehnten mit kurzen Unterbrechungen mehr und mehr absinken. Die Ursachen können sehr vielschichtig sein, sind aber vor allem in Veränderungen im Wasserdargebot zu suchen. Analysen müssen folglich die Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der betroffenen Seen und Feuchtgebiete einbeziehen. Besonders in bewaldeten, sonst weitgehend unbeeinflussten Einzugsgebieten sind die absinkenden Wasserstände vieler grundwasserabhängiger Landschaftselemente ein Indiz für einen Rückgang der Grundwasserneubildung. Die Ursachen können Änderungen der Baumartenzusammensetzung und Altersstruktur der Wälder oder aber auch veränderte klimatische Randbedingungen sein. Unklar ist, ob und wie sich dieser Trend

in der Zukunft fortsetzen wird und ob oder wie ggf. gegengesteuert werden kann.

Innerhalb dieser Arbeit sollen zunächst die Ursachen für den Rückgang der Grund- und Seewasserstände quantitativ analysiert werden. Im Anschluss sollen die Wirkungen eines künftigen Waldumbaus und der erwarteten Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung und den Wasserhaushalt der Seen untersucht werden.

### 2. Methodik

#### 2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf der kuppigen Grundmoräne der Angermünder Staffel im UNESCO-Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin, im Nordosten Brandenburgs, und hat eine Fläche von ca. 100 km<sup>2</sup>. Der Wald hat darin einen Flächenanteil von 52 % und besteht vor allem aus Kiefern-Monokulturen. An den zahlreichen

abflusslosen Seen wurden seit den 1980er Jahren Wasserstandsrückgänge um mehr als 3 m beobachtet.

## 2.2 Modellierung des Wasserhaushaltes

Für die Modellierung der Grundwasserneubildung wurde das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH (Schulla und Jasper, 2007) eingesetzt. Dazu wurde das Untersuchungsgebiet räumlich in Rasterelemente mit einer Kantenlänge von 100 m aufgelöst. Die zeitliche Diskretisierung betrug einen Tag.

Die im Modell abgebildeten Vegetationstypen wurden zunächst einzeln in 1D-Säulenmodellen getestet. Zur Prüfung der Parametrisierung wurden die damit berechneten Wasserhaushaltsgrößen der einzelnen Vegetationstypen untereinander und mit vorhandenen Messwerten verglichen. Neben Daten aus der Literatur, zum Beispiel Schulla (1997), Hörmann et al. (2003) und Anders (2002), fanden dabei Bestandesniederschlag/Stammabfluss (M. Jenssen, Waldkunde-Institut Eberswalde), Bodenfeuchtedaten (U. Schindler, ZALF Müncheberg) und Messungen der Tiefensickerung (J. Müller, vTI Eberswalde) Eingang.

## 2.3 Modellierung der Wasserstände

Für die gekoppelte Modellierung der Grund- und Seewasserstände wird das Modell FEFLOW (Diersch, 2009) verwendet. Im Unterschied zum 2D-Grundwassermodell von WaSiM-ETH arbeitet es 3-dimensional, wodurch sich die Informationen aus den Karten mit weniger Generalisierung übertragen lassen. In FEFLOW lassen sich stationäre wie instationäre Lösungen berechnen, weitgehende Möglichkeiten des Postprocessings und der Visualisierung unterstützen das Verständnis des Strömungsprozesses im Grundwasser. Die räumliche Diskretisierung des Grundwasserkörpers erfolgt über schichtweise homogene Prismen mit dreieckiger Grundfläche als finite Elemente. Für die numerische Lösung stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Der Schichtaufbau und die Parametrisierung des Modells beruhen auf den verfügbaren mittelmaßstäbigen hydrogeologischen Kartenwerken (LKQ 50, HyKa 50), ergänzt durch mehr als 20 eigene Grundwasserbohrungen und Sondierungen im Bereich des Redernswalder Sees. Als zeitabhängige Randbedingung 2. Art für die langjährigen Modellläufe (phasenweise von 1951 bis 2100) wird die mit WaSiM-ETH errechnete Grundwasserneubildung, aggregiert zu Monatswerten, verwendet.

## 2.4 Ursachen für die beobachtete Abnahme der Grundwasserneubildung

Für die Modellierung der Grundwasserneubildung mit WaSiM-ETH werden zwischen 1955 bis 2007 beobachtete meteorologische Daten eingesetzt. Der Zeitraum bis 1957 wird zum Einschwingen des Modells genutzt. Um den Einfluss der Veränderungen der hydroklimatischen Randbedingungen analysieren zu können, wird in einem ersten Szenario der aktuelle Zustand des Waldes, den der Datenspeicher Wald – Stand 2006 beschreibt, über den gesamten Zeitraum angesetzt (DSW2006). Zur Abbildung der möglichen Veränderungen der Vegetation des Waldes in diesem Zeitraum wurden zwei weitere Landnutzungsszenarien entwickelt. Im zweiten Szenario wurde das Bestandesalter in 10-Jahresscheiben ausgehend

vom DSW2006 bis 1951 rückwirkend rekonstruiert (Altersstruktur dynamisch). Als drittes Landnutzungsszenario ist zusätzlich zur dynamischen Altersstruktur eine geringere Vergrasung der Nadelwälder vor 1981 angenommen worden (Vergrasungseffekt). Für die Flächen, die nicht im Datenspeicher Wald beschrieben werden, wurde die Biotoptypenkartierung (MUNR, 1995) eingesetzt und über den gesamten Zeitraum als unverändert angenommen.

## 2.5 Zukunftsszenarioanalysen (Klimaprojektionen)

Für die Zukunftsszenarien bis zum Jahr 2100 wurden die meteorologischen Daten der zwei Realisierungen des regionalen Klimamodells REMO A1B und B1 verwendet (Jakob, 2005a, 2005b). Der Vergleich des REMO-Kontrolllaufes (Jakob, 2005c) mit den meteorologischen Größen, die im Zeitraum 1951-2000 in der DWD-Station Angermünde gemessen wurden, ermöglichte eine als dringend angeraten erkannte Biaskorrektur der systematischen Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Größen nach Pianì et al. (2008) für die Zukunftsszenarien.

Zur Analyse des Einflusses der Änderungen der hydroklimatischen Randbedingungen auf die Grundwasserneubildung wird zunächst der aktuelle Zustand des Waldes wiederum zeitlich unverändert nach dem Datenspeicher Wald – Stand 2006 (DSW2006) für die Szenario-rechnungen eingesetzt. Für die zukünftige Waldentwicklung wurden zwei weitere Waldentwicklungsszenarien ausgehend vom DSW2006 innerhalb des NEWAL-NET-Projektes für die Modellregion durch Jenssen (2009) entwickelt. Zum einen wird eine Waldentwicklung simuliert, die sich an aktueller forstpolitischer Ausrichtung orientiert. Dieses Szenario wird im Folgenden als „Fortschreibung DSW“ bezeichnet. Das zweite Szenario entspricht einer Entwicklung nach dem NEWAL-NET-Leitbild und wird im Folgenden mit „klimaplastisch optimiert“ bezeichnet. In beiden Waldentwicklungsszenarien geht der Anteil von kieferndominierten Flächen bis zum Jahr 2100 zurück, beim klimaplastisch optimierten Szenario wesentlich stärker als bei der Fortschreibung DSW. Die Anteile der Laubwälder, vor allem Buchen und Eichen, nehmen zu.

Für die Modellierung der Zukunftsszenarien mit WaSiM-ETH wurden beide Klimaprojektionen mit den drei Landnutzungsszenarien kombiniert. Somit ergaben sich sechs Zukunftsszenarien, bei denen sich die Einflüsse unterschiedlicher klimatischer Randbedingungen und der sich ändernden Waldvegetation auf die Grundwasserneubildung sowie nachfolgend die Wasserstände im Untersuchungsgebiet getrennt voneinander betrachten ließen.

## 3. Ergebnisse

### 3.1 Ursachen für die beobachtete Abnahme der Grundwasserneubildung

Bei Verwendung einer unveränderten Baumartenzusammensetzung und Altersstruktur der Bäume entsprechend DSW2006 ab 1951 ist die berechnete Grundwasserneubildung in der ersten Hälfte des modellierten Zeitraumes im Gebietsdurchschnitt um mehr als 35 mm/a höher als in der zweiten Hälfte (Abb. 1).

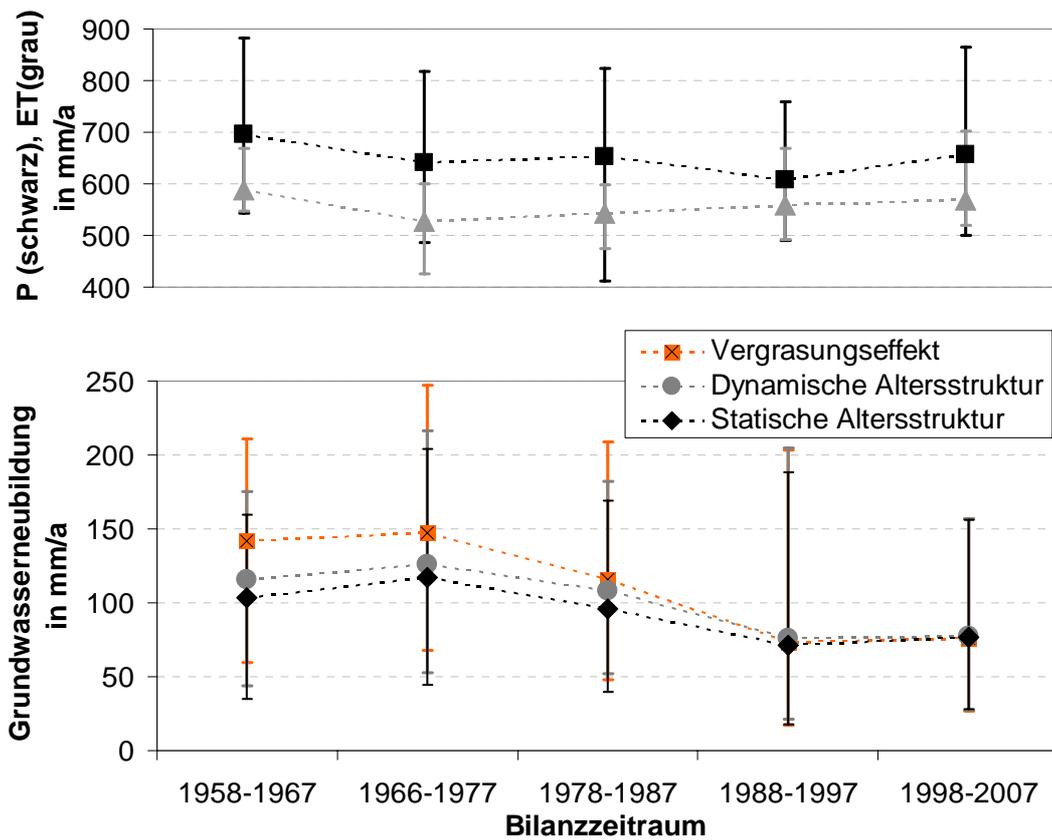


Abb. 1: 10-Jahresmittel und Spannweiten von Niederschlag (P), realer Verdunstung (ET) und Grundwasserneubildung der Waldflächen, berechnet mit DSW2006, dynamischer Altersstruktur und geringerer Vergrasung vor 1981 (Vergrasungseffekt).

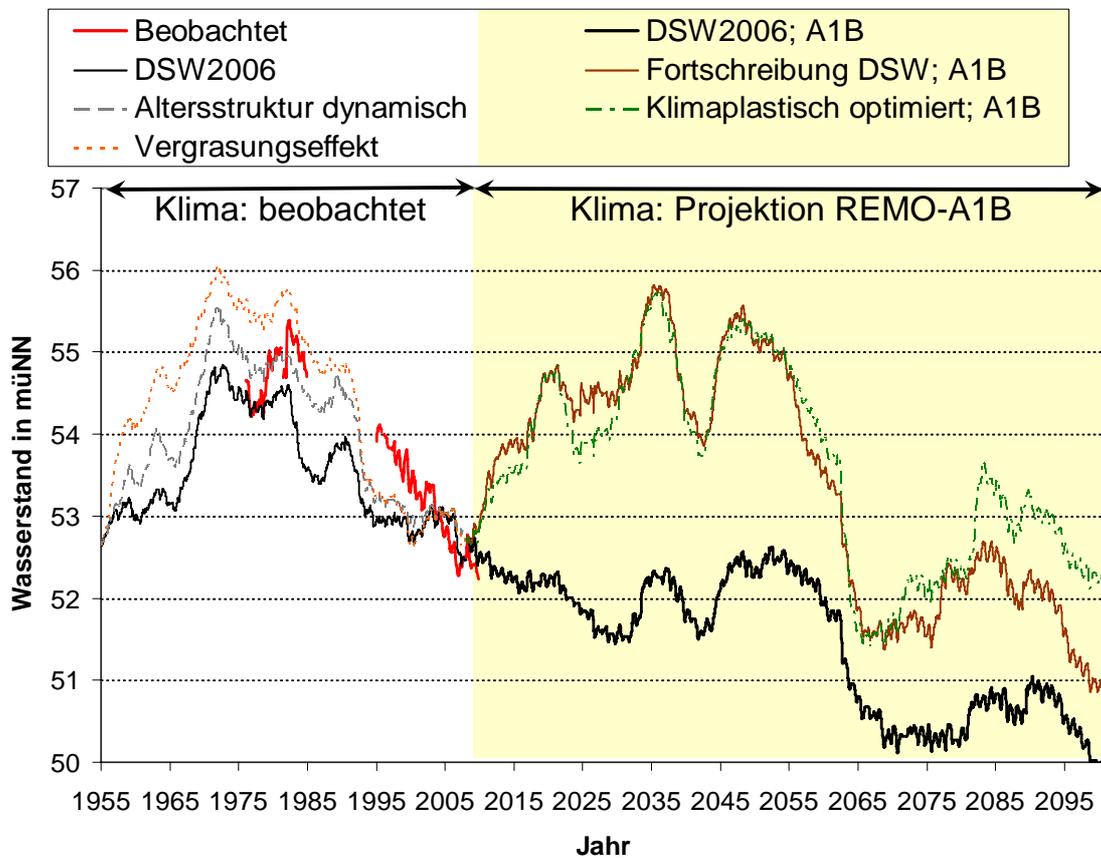


Abb. 2: Zurückliegende und mögliche zukünftige Entwicklungen der Wasserstände im Redernwalder See (Waldentwicklungsszenarien bis 2007: DSW2006, Altersstruktur dynamisch, Vergrasung; Waldumbauszenarien ab 2008: DSW2006, klimaplastisch optimierter Laubmischwald und Fortschreibung DSW; Klimaprojektion A1B).

Ursachen sind sowohl abnehmende Niederschläge als auch eine zunehmende reale Verdunstung.

In den ersten beiden Dekaden ist die Grundwasserneubildung unter Wald bei Verwendung der dynamischen Altersentwicklung im Vergleich zum statischen DSW2006 im Mittel um 11 mm/a höher (Abb. 1). Dieses Plus wird in den 1990er Jahren geringer und geht in den 2000er Jahren verloren, da sich die im Modell abgebildeten Altersstrukturen angleichen. Bei zusätzlicher Berücksichtigung einer geringeren Vergrasung in den Kiefern- und Nadelwäldern vor den 1980er Jahren wird im Mittel eine 24 mm/a höhere Grundwasserneubildung in den ersten Dekaden berechnet.

### 3.2 Rekonstruktion von Grund- und Seewasserständen mit FEFLOW

Die Modellrechnungen mit FEFLOW für den Zeitraum 1955-2007 ergaben für den Redernswalder See und seine weitere Umgebung (bis 2 km) eine ausgeprägte Parallelität im Zeitverlauf von Grund- und Seewasserständen.

Die unter Szenarioannahmen zum Waldzustand berechneten Wasserstandsverläufe des Redernswalder Sees sind in Abbildung 2 gemessenen Wasserständen (ab 1975, mit Unterbrechung) gegenübergestellt. Schon im „statischen“ Nutzungsszenario DSW2006 wird deutlich, dass eine Phase tieferer Wasserstände ab Mitte der 1960er Jahre von einem rapiden, über 7-8 Jahre anhaltenden Wasserstandsanstieg abgelöst wurde. Die erhöhten Seewasserstände hielten sich mit geringer Schwankung bis Mitte der 1980er Jahre. Dann setzte der heute landesweit beobachtete rückläufige Trend der Grund- und Seewasserstände ein, der – mit Unterbrechungen durch einzelne

feuchte Perioden (1994, 2005) – bis in die jüngste Zeit anhält.

Für die untersuchten Auswirkungen der Waldentwicklung (Szenarien Altersstruktur dynamisch/Vergrasung) sind die berechneten Wasserstandsschwankungen noch ausgeprägter. Infolge der etwas höheren Grundwasserneubildung in den früheren Jahrzehnten des modellierten Zeitraums liegen hier die Wasserstände um bis zu 1,5 m über denen des Szenarios DSW2006. Mit zunehmender Annäherung an die aktuellen Verhältnisse verringern sich die Abweichungen sowohl zwischen den Szenarien als auch der errechneten zu den beobachteten Wasserständen.

### 3.3 Zukünftige Entwicklung der Grundwasserneubildung und der Seewasserstände

Bei gleich bleibender Landnutzung (Baumarten und Altersstruktur) ist im moderaten B1-Szenario eine ähnliche Grundwasserneubildung wie in der aktuellen Jahresreihe 1998/2007 zu erwarten. Nur um die Mitte des 21. Jahrhunderts kommt es zu weiteren Reduktionen (vgl. Abb. 3). Die Grundwasserneubildung im A1B-Szenario liegt jedoch auf Grund der geringeren Niederschläge und der höheren potenziellen Verdunstung häufig noch unter der des B1-Szenarios. Die Unterschiede zwischen der mit dem DSW2006 und den Waldentwicklungsszenarien modellierten zukünftigen Grundwasserneubildung sind im A1B-Szenario größer als der Einfluss durch die Veränderungen der hydroklimatischen Randbedingungen (Abb. 4).

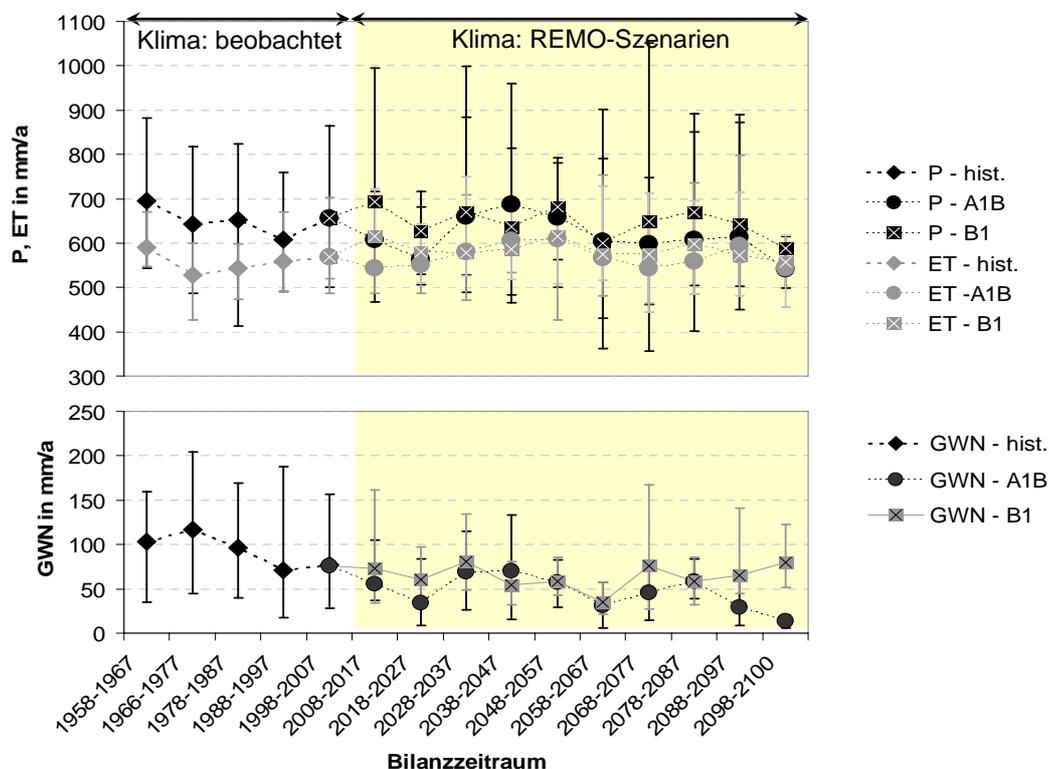
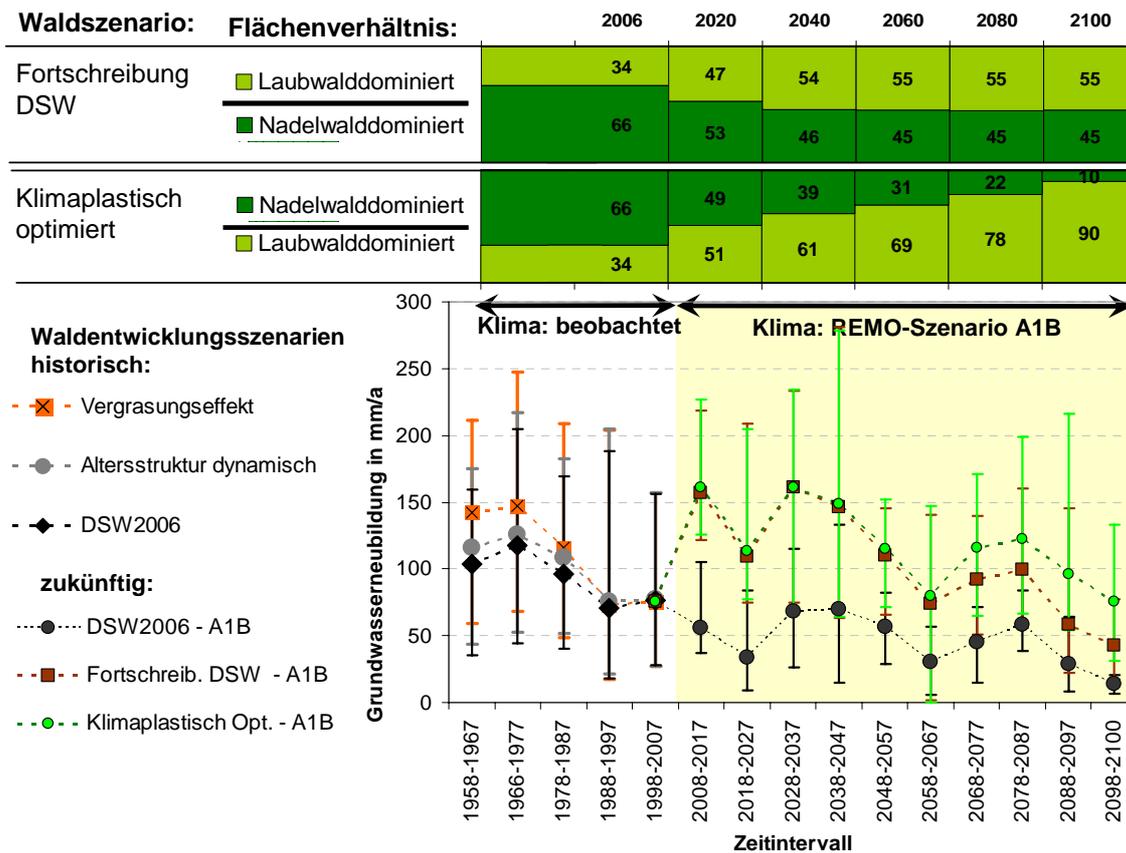


Abb. 3: Einfluss des Klimas auf die mittlere Grundwasserneubildung (GWN) unter Waldflächen im Modellgebiet (unveränderte Landnutzung nach DSW2006 im gesamten Modellzeitraum; Niederschlag (P), reale Verdunstung (ET) und Spannweiten, dargestellt sind die 10-Jahresmittelwerte).



**Abb. 4:** Einfluss der Veränderungen der Waldwirtschaft (DSW2006, Fortschreibung DSW und klimaplastisch optimiert) auf die Grundwasserneubildung unter Waldflächen im Modellgebiet (Klima historisch: beobachtet; Klimaprojektion: REMO A1B; dargestellt sind 10-Jahresmittelwerte).

Während die Grundwasserneubildung beim DSW2006 weiterhin eher abnimmt, steigt sie bei den Waldentwicklungsszenarien über die Werte der 1960er und 1970er Jahre. Unterschiede in der Grundwasserneubildung zwischen den beiden Waldentwicklungsszenarien werden erst ab 2070 deutlich. Dann liefert das klimaplastisch optimierte Szenario bei A1B 20 bis 50 mm/a mehr Grundwasserneubildung unter den Waldflächen. Durch den Umbau werden die niedrigen Grundwasserneubildungswerte der 1990er Jahre bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nicht unterschritten.

Die Wirkungen der Waldentwicklung auf die Grundwasserneubildung bei der B1-Projektion sind mit denen der A1B-Projektion vergleichbar.

Die Folgen künftig möglicher Veränderungen in den Grundwasserneubildungsraten im Einzugsgebiet für die Wasserstände im Redernswalder See veranschaulicht Abbildung 2. Die projizierten Änderungen im Klima führen bei unveränderter Baumartenzusammensetzung und Altersstruktur des Waldes (DSW2006) zu weiter absinkenden Wasserständen im See. Durch Waldumbau, wie er auch jetzt schon praktiziert wird (Fortschreibung DSW), könnte der gegenwärtige Trend des absinkenden Seewasserstandes vorübergehend gestoppt und sogar wieder umgekehrt werden. Jedoch kann der Waldumbau auch das erneute Absinken der Seewasserstände nach 2050 nicht aufhalten. Die dann erwarteten klimatischen Veränderungen würden durch die höheren Temperaturen

insbesondere zu deutlich höheren Verdunstungswerten auf dem See, aber auch im Einzugsgebiet führen. Letzteres verringert – wie schon in den zurückliegenden Jahrzehnten – die Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet des Sees, und damit sinken weiträumig die Grundwasserstände und gleichlaufend die Seewasserstände weiter ab.

#### 4. Diskussion

Die Analyse des Wasserhaushaltes zeigt, dass die Grundwasserneubildung unter den Waldflächen des Modellgebietes im Zeitraum 1958-2008 um 71 mm/a abgenommen hat. Davon lassen sich etwa 37 mm/a auf klimatische Veränderungen, 11 mm/a auf Veränderungen der Altersstruktur und 23 mm/a auf die Vergrasung im Wald zurückführen. Die angewandte modellgestützte Methodik ist somit geeignet, die Wirkungen von Waldumbau und Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt der grundwasserabhängigen Landschaftselemente zu analysieren. Die Veränderungen der hydroklimatischen Randbedingungen und der Waldvegetation und damit der Rückgang der Grundwasserneubildung werden als Ursache für den Rückgang der Grund- und Seewasserstände identifiziert. Der Einsatz des Grundwassermodells FEFLOW ermöglicht eine plausible Erklärung der Seespiegelabsenkung im Redernswalder See aus der mit WaSiM-ETH errechneten Abnahme der Grundwasserneubildung seit etwa 1987. Die ausgeprägte Parallelität im Zeitverlauf von Grund- und Seewasserständen beim Redernswalder See belegt die an anderer Stelle (Natkhin, in Vorbereitung)

vorgenommene gebietshydrologische Einordnung dieses abflusslosen Sees als Grundwasserblänke. Steuernde Größe für den Wasserstand ist die örtlich und zeitlich differenzierte Grundwasserneubildung. Ihre in Abschnitt 3.1 diskutierten Schwankungen wirken auf das unterirdische Abflussgeschehen im Untersuchungsgebiet, in dessen Resultat sich Grund- und Seewasserstände einstellen. Innerjährliche Überschüsse und Defizite der Seewasserbilanz und ihre Wechselwirkung mit dem umgebenden Grundwasser bestimmen die Feinstruktur der modellierten Wasserstandsganglinien.

Es zeigt sich, dass offenbar bereits in den 1950er Jahren zu heute vergleichbare Wasserstände vorlagen. Damit relativiert sich der derzeit beobachtete ebenso wie der aus Klimaprojektionen abgeleitete Rückgang der Seewasserstände; die hohen Wasserstände der 1980er Jahre stellen somit keinen anzustrebenden Normalzustand dar.

Mit den verwendeten Klimaprojektionen wird die Grundwasserneubildung bei gleichbleibender Landnutzung wegen einer höheren potenziellen Verdunstung und zurückgehender Niederschläge eher abnehmen. In den Waldentwicklungsszenarien werden die Veränderungen der hydroklimatischen Randbedingungen durch Veränderungen in der Waldwirtschaft aber mehr als kompensiert, und die Grundwasserneubildung steigt in der 1. Hälfte des 21. Jahrhunderts auf das hohe Niveau der späten 1960er/frühen 1970er Jahre an. Danach sinkt die Grundwasserneubildung aufgrund zurückgehender Niederschläge und steigender potenzieller Verdunstung. Diese Ergebnisse hängen stark von den Klimaprojektionen ab. Diese spiegeln nur mögliche zukünftige Entwicklungen wider. Durch eine Biaskorrektur konnten systematische Fehler der Klimaprojektionen, welche schon im Kontrollzeitraum auftraten, korrigiert werden. Das bedeutet aber nicht, dass die Zukunft dadurch sicherer projiziert werden kann. Besonders die Niederschlagshöhe ist in den Klimamodellen eine unsichere Größe, aber bereits kleine Veränderungen können für den Wasserhaushalt große Wirkungen mit sich bringen. Das gilt besonders in Gebieten wie dem vorliegenden Untersuchungsgebiet, wo die jährliche Niederschlagshöhe relativ gering ist und deutlich unterhalb der potenziellen Verdunstung liegt.

Nach großflächiger Umsetzung des Leitbildes eines klimaplastisch optimierten Waldes im Modellgebiet ist insgesamt gegenüber dem Szenario Fortschreibung DSW eine um 20 bis 50 mm/a höhere Grundwasserneubildung zu erwarten. Mit großflächigem Waldumbau lassen sich somit die Grundwasserneubildung, der Wasserhaushalt und die Wasserstände der grundwasserabhängigen Landschaftselemente langfristig und gezielt beeinflussen.

In dieser Studie wurden die Vegetationsparameter in den Zukunftsszenarien nicht verändert, damit wurden Veränderungen in der Phänologie, Schäden durch Extremereignisse wie Stürme, Waldbrände und Schädlingskalamitäten, die ebenso auf den Wasserhaushalt wirken werden, nicht berücksichtigt. Solche Untersuchungen wie auch Abschätzungen, wie sich die Wirkungen dieser Maßnahmen mit denen der ungewissen Klimaänderungen überlagern, bleiben weiteren Untersuchungen vorbehalten.

## Danksagung

Die Autoren danken dem BMBF für die Finanzierung des NEWAL-NET-Projektes. Dank gilt auch dem Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin und dem Landesumweltamt Brandenburg für die Datenbereitstellung. Dr. Jürgen Müller und Dr. Uwe Schindler sei für die Datenbereitstellung und ihre hilfreiche Hinweise gedankt; weiterhin allen NEWAL-NET Projektpartnern, vor allem Dr. Martin Jenssen für die Bereitstellung der Waldentwicklungsszenarien.

## 5. Literatur

- Anders, S. (Hrsg.), 2002. Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands. Einfluss von Niederschlagsarmut und erhöhtem Stickstoffeintrag auf Kiefern-, Eichen- und Buchen-Wald- und Forstökosysteme des nordostdeutschen Tieflandes. Dr. Kessel, Oberwinter.
- Diersch, H.-J., 2009. FEFLOW® 5.4 User's Manual. DHI-WASY GmbH, Berlin.
- Hörmann, G., Scherzer, J., Suckow, F., Müller, J., Wegehenkel, M., Lukes, M., Hammel, K., Kniess, A., Meesenburg, H., 2003. Wasserhaushalt von Waldökosystemen – Methodenleitfaden zur Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten auf Level II-Flächen. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Berlin.
- Jacob, M., 2005a. REMO A1B Scenario Run. UBA Project, 0.088 Degree Resolution, Run No. 006211, 1H Data. CERA-DB "REMO\_UBA\_A1B\_1\_R006211\_1H", [http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=REMO\\_UBA\\_A1B\\_1\\_R006211\\_1H](http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=REMO_UBA_A1B_1_R006211_1H).
- Jacob, M., 2005b. REMO B1 Scenario Run. UBA Project, 0.088 Degree Resolution, Run No. 006212, 1H Data. CERA-DB [http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=REMO\\_UBA\\_B1\\_1\\_R006212\\_1H](http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=REMO_UBA_B1_1_R006212_1H).
- Jacob, M., 2005c. Climate of the 20th Century Run. Project, 0.088 Degree Resolution, Run No. 006210, 1H Data. CERA-DB "REMO\_UBA\_C20\_1\_R006210\_1H" [http://cerawww.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=REMO\\_UBA\\_C20\\_1\\_R006210\\_1H](http://cerawww.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=REMO_UBA_C20_1_R006210_1H).
- Jenssen, M., 2009. Realization of the model of climate-adaptive forests in forest practice of the Northeast German lowlands. Forst und Holz 64, 18-21.
- MUNR – Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, 1995. Daten zur Umweltsituation im Land Brandenburg, Biotoptypen- und Landnutzungskartierung Brandenburg aus CIR-Luftbildern. Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg. Potsdam.
- Natkhin, M., in Vorbereitung. Modellgestützte Analyse der Einflüsse von Veränderungen der Waldwirtschaft und des Klimas auf den Wasserhaushalt grundwasserabhängiger Landschaftselemente. Dissertation, Universität Potsdam.
- Piani, C., Haerter, J.O., Hagemann, S., Allen, M., Rosier, S., 2008. Practical methodologies to correct biases in climate model output, and to quantify and handle resulting uncertainties in estimates of future components of the global water cycle. WATCH Technical Report 6. Wallingford, Wageningen.
- Schulla, J., 1997. Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Dissertation, ETH Zürich.
- Schulla, J., Jasper, K., 2007. Model Description WaSiM-ETH. Zürich.

## Nährstoffbelastung des Großen Stechlinsees von 1945 bis 2009 – historische Daten, Bilanzierung und Neubewertung

Silke Oldorff, Jens Pätzolt

Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (LUGV) Brandenburg, Referate Großschutzgebiete/Regionalentwicklung (GR1) und Ökologie, Naturschutz, Wasser (Ö4), Seeburger Chaussee 2, 14476 Potsdam, Silke.Oldorff@LUGV.Brandenburg.de

**Zusammenfassung:** Der Beitrag umfasst eine Beschreibung und Analyse historischer anthropogener Belastungsquellen des Großen Stechlinsees (Nord-Brandenburg), dessen Einzugsgebiet überwiegend bewaldet ist. Daten zu ausgewählten stofflichen Belastungen seit Mitte der 1940er bis zum Anfang des 21. Jahrhunderts werden vorgestellt und in Ihrer Wirkung auf den Nährstoffhaushalt des Sees bewertet. Der tatsächliche Umfang einiger dieser Belastungen wird nach dieser Analyse als deutlich schwerwiegender als bislang angenommen eingeschätzt. Mit einem einfachen Modell wird die Wirkung des externen Phosphoreintrags auf die seeinterne Phosphorkonzentration ermittelt. Danach sind die externen Belastungen ein durchaus wesentlicher Bestandteil der aktuellen ökologischen Defizite. Vor dem Hintergrund der Entwicklung von Mitigationsstrategien gegenüber dem Klimawandel sind daher bei negativen Wasserbilanzen anthropogene Faktoren kritischer zu bewerten.

### Nutrient loading of Lake Stechlin from 1945 to 2009 – historical data, balances and re-evaluation

**Abstract:** This contribution includes a description and analysis of historical and recent anthropogenic inputs and their impacts on Lake Stechlin (NE-Germany, Brandenburg), which has mostly forest-covered watersheds. Historical and recent nutrient loads, changes in land use and drainage operations to watersheds since the late 1940s and early 1950s of the 20<sup>th</sup> century were analysed and assessed. The results show that Lake Stechlin is actually subject to considerably more changes in its ecological and hydrological parameters than previously assumed and that the significance of some factors is much higher than formerly thought. A simple model demonstrated that external phosphorous sources impact the lake phosphorous concentrations to a great extent, causing ecological deficits. That's why the role of anthropogenic factors due to negative water balances and development of mitigation strategies to climate change should be assessed more critically. Current water protection decisions are often based on only a general knowledge of effects and assessments of recent developments.

### 1. Einführung

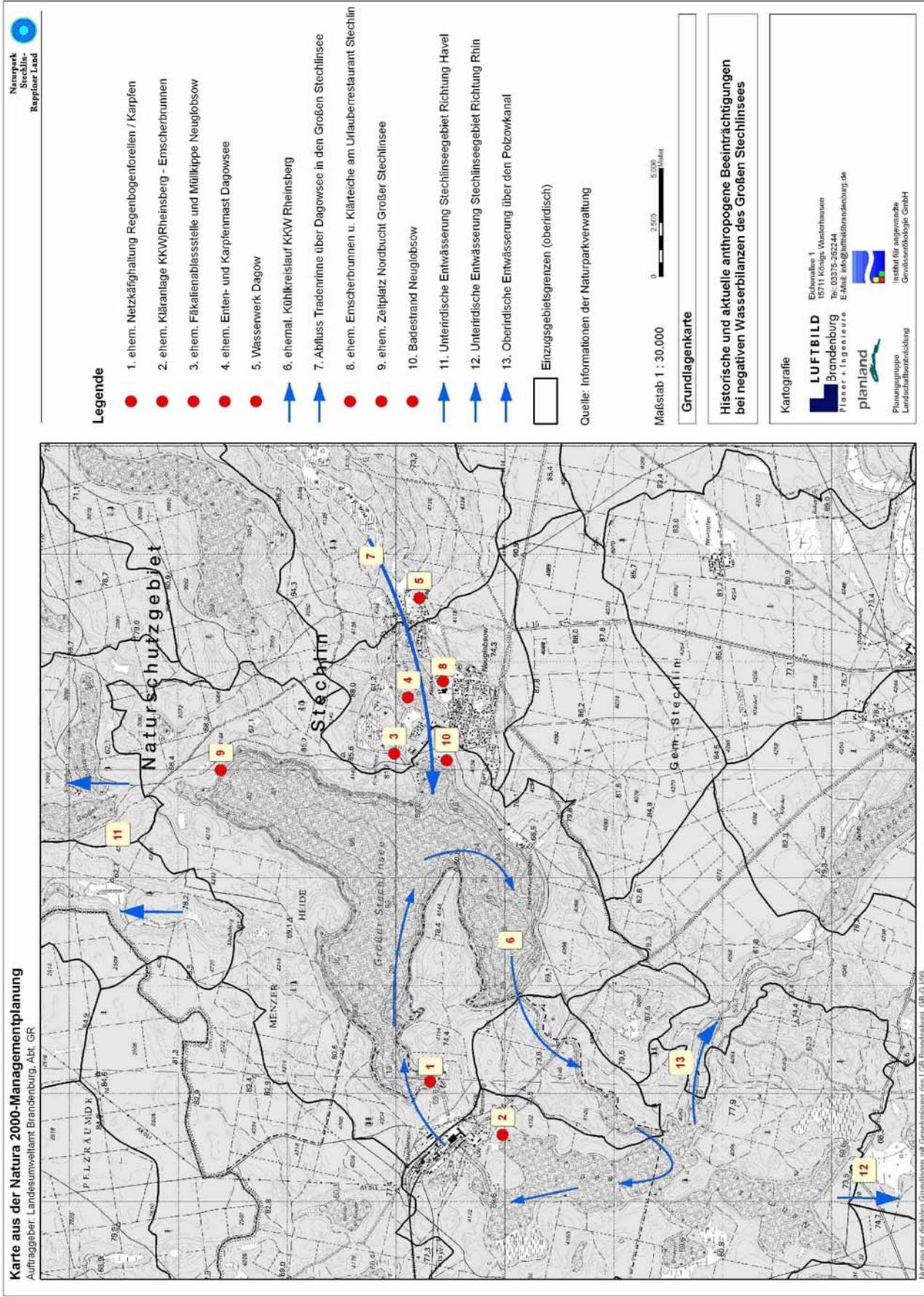
Der Große Stechlinsee ist einer der letzten kalkoligotrophen Klarwasserseen Nordostdeutschlands (Abb. 1). Trotz seines weitgehend bewaldeten Einzugsgebietes, das in Teilen unter Naturschutz steht, hat sich der trophische Zustand des Sees und seine biologische Ausstattung deutlich verändert (Oldorff und Vohland, 2009; van de Weyer et al., 2009; Kasprzak et al., 2010). Eine Reihe möglicher Ursachen und Kausalzusammenhänge wurde in den vergangenen Jahren dokumentiert und diskutiert (Mothes, 1981; Klapper und Koschel, 1985; Koschel und Casper, 1986; Casper und Koschel, 1995; Kasprzak et al., 2010). In diesem Beitrag sollen anthropogene (historische und rezente) Belastungsquellen und ihre Wechselwirkungen dargestellt, neu bewertet und diskutiert werden.

### 2. Methoden

#### 2.1 Datenrecherchen

Um die Belastungen des Großen Stechlinsees der zurückliegenden Jahrzehnte, insbesondere vor 1990, rekon-

struieren und bilanzieren zu können, wurde eine Reihe von Unterlagen ausgewertet. Dazu gehören instruktive Quellen in Form von Akten des damaligen Kreisnaturschutzbeauftragten Hans-Gerhard Böttcher. Daneben wurden Protokolle von Sitzungen des Rates der Gemeinde, des Kreises Gransee und des Bezirkes Potsdam zum Stechlinsee sowie Zeitungsberichte und Schriftwechsel und Eingaben an den Ministerrat der DDR sowie Informationen des Hygieneinstituts in Potsdam ausgewertet. Weitere ausgewertete Archivalien betreffen Unterlagen des Freien Deutschen Gewerkschaftsbundes (FDGB), des Staatlichen Forstwirtschaftsbetriebes (StFB) Gransee und des Kernkraftwerkes (KKW) Rheinsberg. Daneben wurden auch Entscheidungsträger, Zeitzeugen und Experten befragt. Im Fokus der Betrachtung stand eine Erhebung aller historischen und rezenten Nutzungen, aus denen Belastungen für den Großen Stechlinsee resultiert haben könnten, zunächst unabhängig von ihrer Bedeutung. Nur verifizierbare Daten wurden in die Darstellung einbezogen.



**Abb. 1:** Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes aus der Natura 2000-Managementplanung mit Darstellung ausgewählter hydrologischer, hydrogeologischer und anthropogener Funktionsbeziehungen.

## 2.2 Bilanzierung

Die wesentlichsten Belastungen wurden in eine Phosphorfracht umgerechnet. Dazu gehören die Abwasserfracht der Gemeinde Neuglobsow und des Kernkraftwerkes Rheinsberg. Für die Transformation des Abwassers in eine Phosphorfracht wurden je Einwohner, Kurgast und Feriengast (ohne Tagesgast) 2 g Phosphoremission pro Tag angenommen. Da das Abwasser der Ortslage Neuglobsow nie direkt in den Stechlinsee eingeleitet, sondern wahrscheinlich meist ufernah versickert wurde, ist ein verzögerter Eintrag des Hauptteils des Abwassers in den See angenommen worden (gestützt wird diese Annahme durch sehr hohe Nährstoff-Konzentrationen im Grundwasser der Ortslage Neuglobsow; Daten des LUGV Brandenburg). Berücksichtigt wurden dabei die für das Einzugsgebiet des Sees ermittelten Aufenthaltszeiten von 10 bis 30 Jahren (Holzbecher et al., 1999).

Zur Bilanzierung der Auswirkung der Phosphorbelastung auf den See wurde das nach Schauser et al. (2003) erweiterte Einboxmodell von Imboden (1974) verwendet. Dieses Modell wurde um den Term eines variablen, zuflussunabhängigen TP-Eintrags ergänzt. Damit wurde zunächst ein Referenzmodell ohne anthropogene Belastungen berechnet. Berücksichtigt wurden dabei die P-Einträge aus der Deposition, dem Eintrag aus dem Grundwasser, dem Laubfall und einem moderaten Badebetrieb (Casper und Koschel, 1995). Zudem wurden die Parameter seeinterne Konzentration von  $6 \mu\text{g/l}$ , eine mittlere Tiefe von 23,5 m, eine Aufenthaltszeit von 65 Jahren und ein Abflusswert von 0,6 verwendet. Zusätzlich zu der für den Referenzzustand angenommenen P-Fracht wurden für das Belastungsmodell mit den hier recherchierten und zu Gesamtphosphor transformierten anthropogenen Belastungen von 1945 bis 2009 gerechnet und damit die Reaktion der seeinternen Gesamtphosphorkonzentration auf die anthropogene Last bilanziert.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Anthropogene Belastungen

Im Jahr 1970 fand nach den ausgewerteten Archivalien eine Reihe von Beratungen (Balzus, 1970) zum dramatisch verschlechterten Zustand des Stechlinsees statt, ausgelöst durch gesundheitsbedenkliche Konzentrationen von Fäkalbakterien in der Badebucht von Neuglobsow. 1970 wurde erstmalig an der Spitze der Halbinsel zwischen Süd- und Westbucht nur 1 m Sichttiefe gemessen (J. Knaack, mdl. Mitt.). Vermutlich aufgrund politischer Reglementierung von Informationen zum Zustand der Umwelt in der DDR fand abgesehen von Teilbilanzierungen (Koschel und Casper, 1986) keine öffentliche Auseinandersetzung mit den teilweise massiven Stoffeinträgen in den Großen Stechlinsee statt. Einige Belastungen sollen daher nachfolgend beschrieben werden.

Von vor 1945 bis 1969 existierte ein nicht genehmigter Zeltplatz an der Nordbucht ohne Sanitäreanlagen (Abb. 2). 1963 wurden dort durchschnittlich über 300 Zelte und in Spitzenzeiten bis zu 400 Zelte gezählt (P. Scharf, mdl. Mitt.). Es handelte sich überwiegend um Dauercamper und die Saison begann bereits im April jedes Jahres.

Seit 1969 ist die Sonnenbucht ein beliebter Badeplatz ohne sanitäre Anlagen.

Vor und nach 1970 (bis ca. 1985) befand sich eine illegale Fäkalienablassstelle sowie Müllkippe unmittelbar am Ostufer des Großen Stechlinsees in Höhe des Zuflusses vom Dagowsee (Alkewitz und Nagel, 1991). Eine zweite Müllkippe wurde am gleichen Graben zwischen Dagowsee und Gr. Stechlinsee im Bereich der Jugendherberge Neuglobsow genutzt.



**Abb. 2:** „Wilder“ Zeltplatz ohne sanitäre Anlagen am Nordufer des Stechlinsee bis 1969. In Spitzenzeiten wurden bis zu 400 Zelte gezählt (Foto: Archiv Oldorff).

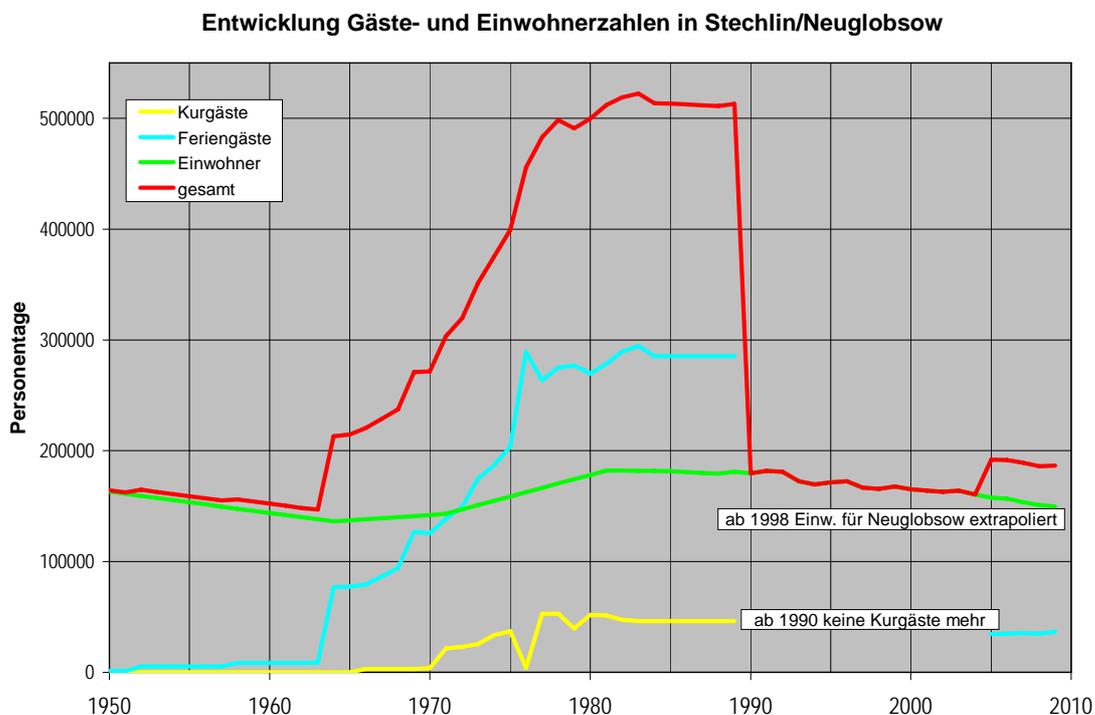


**Abb. 3:** Die Badebucht am Großen Stechlinsee 1982 (Foto: W. Scheffler).

Erst 1976 begann der Bau der zentralen Abwasserentsorgung für den Ort Neuglobsow. Trotzdem gab es zum Teil keine geregelte Abwasserentsorgung. In der Folge wurden die kommunalen und staatlichen Organe tätig (Verfahren beschrieben bei Knaack, 1982). Davor gab es im Ort mehr oder weniger dichte Hausgruben, deren Inhalt traditionell auf dem eigenen Grundstück verrieselt oder illegal in den Dagowsee eingebracht wurde, der zur damaligen Zeit in den Großen Stechlinsee entwässerte (Balzus, 1970). Auch die „ordnungsgemäße“ Verrieselung der Fäkalien geschah im Einzugsgebiet des Stechlinsees. Der Anschluss der letzten Haushalte an die zentrale Abwasserentsorgung erfolgte erst 1985, mit der

Überleitung des Abwassers zu einer außerhalb des Einzugsgebietes des Stechlinsees (zwischen Neuglobsow und Menz) gebauten zweiten Kläranlage (Emscherbrunnen mit Turmtropfkörperkläranlage).

Mitte der 1960er Jahre entwickelte sich Neuglobsow zu einem zentralen Urlauberort (Abb. 3). 1977 zählte man 21.300 Kur- und Feriengäste mit 317.000 Übernachtungen sowie 450 Einwohner. Für Neuglobsow mit dem Ortsteil Dagow wurden von 1947 bis 1984 insgesamt 10.585.406 Personentage (ohne Tagesgäste und Besucher des alten und neuen Zeltplatzes am Gr. Stechlinsee) ermittelt (Abb. 4). Das entspricht einer Freisetzung von insgesamt 21.170 kg Phosphor.



**Abb. 4:** Entwicklung der Einwohner- und Gästezahlen in Neuglobsow inklusive Ortsteil Dagow.

Der Dagowsee wurde häufiger als seit 1976 nicht mehr oberirdisch in den Großen Stechlinsee entwässernd beschrieben. Diese Aussage trifft nicht zu (Balzus, 1970; VEB Projektierung Wasserwirtschaft, 1976), so dass zumindest ein Teil der Stofffrachten aus dem Dagowsee in den Stechlin gelangten. Entscheidend beeinträchtigt wurde der Dagowsees durch das bereits erwähnte häusliche Abwasser der Ortslage Neuglobsow und eine intensive Enten- und Karpfenmast (belegt sind mindestens 32.000 bis 45.000 Enten pro Jahr im Zeitraum von 1965 bis Anfang der 1970er Jahre). Anfang der 1970er Jahre trat im Dagowsee ein massives Fischsterben im Frühsommer auf; allein in der Ostbucht wurden durch Privatpersonen „33 Schubkarren mit totem Fisch aus dem Wasser“ entnommen (H. Rose, mdl. Mitt.). 1981 wurde der Dagowsee mit Silberkarpfen (*Hypophthalmichthys molitrix*) besetzt (zu dieser Zeit gab es bereits Spiegelkarpfen im See). Es waren 13.000 Jungfische mit einem Gesamtgewicht von 1.820 kg (Stückgewicht 140 g). 1985 bis 1988 wurden offiziell 5.534 Fische mit einem Gesamtgewicht von 12.700 kg wieder gefangen (Sidow, 1988). Es sind noch heute einzelne Silberkarpfen im Dagowsee vorhanden. 1976 wurde die Planung einer Orthophosphatfällungsanlage zwischen den beiden Seen und die Ableitung von nährstoffreichem Tiefenwasser aus dem Dagowsee in Auftrag gegeben, um die externe P-Belastung des Stechlinsees aus dem Dagowsee zu unterbinden. Es kam nicht zum Bau dieser Anlage. 1985 erfolgte eine Teilsanierung durch Tiefenwasserableitung. Für sechs bis acht Wochen wurde Tiefenwasser vom Dagowsee über eine Druckleitung in die neue Kläranlage zwischen Neuglobsow und Menz gepumpt. Die Arbeiten wurden dann eingestellt, da die Anlage für das häusliche Abwasser benötigt wurde (A. Gnutzmann, mdl. Mitt.).

1985 bis 1987 wurde eine Entwässerung des Tradenmoores über den Dagowsee in den Stechlinsee durch die Oberförsterei Menz im Rahmen einer Meliorationsmaßnahme durchgeführt.

Die mechanisch geklärten werkseigenen Abwässer des KKW Rheinsberg mit damals bis zu 450 Beschäftigten wurden 1966 bis 1973 direkt in den Nehmitzsee geleitet. Die Nährstofffrachten wurden vom Nehmitzsee über den Kühlkreislauf in den Großen Stechlinsee transportiert (Koschel, 1995). Von 1973 bis 1978 erfolgte die Entsorgung des Abwassers über einen Emscherbrunnen (Abb. 5, 6). Zusätzlich wurde eine provisorische Phosphatfällung mit Eisenspänen direkt in einer zur Verrieselung genutzten Wiese eingerichtet, um die Direkteinleitung abzuschwächen (R. Koschel, mdl. Mitt.). Ab 1978 wurde das Abwasser mittels einer Druckleitung zu einer neuen Tropfkörperanlage auf einen Wildacker zwischen Neuglobsow und Menz außerhalb des Einzugsgebietes des Großen Stechlinsees verbracht. Ab 1983 wurde das gesamte Abwasser des KKW in eine Kläranlage nahe Menz gepumpt.

Die Auswirkungen durch die Inbetriebnahme des KKW Rheinsberg 1964-1990 wurden mehrfach beschrieben (u.a. Koschel et al., 1985; Koschel und Casper, 1986). Gleichzeitig wurde durch den Kühlkreislauf das Einzugsgebiet des Großen Stechlinsees um das des Nehmitzsees künstlich erweitert.



Abb. 5: Abwasserbehandlungsanlage (Emscherbrunnen) des KKW Rheinsberg am Nehmitzsee (in Betrieb von 1973-1978).



Abb. 6: Kläranlagenauslauf am Nehmitzsee (Fotos: W. Scheffler).

Die maximale Pumpleistung lag bei 480.000 m<sup>3</sup> pro Tag, wobei die mittlere Kühlwasserrate von 1973 bis 1982 290.000 m<sup>3</sup> pro Tag betrug. Das enthaltende Plankton starb beim Kühlprozess ab. Durch das Absterben des Planktons entstanden nährstoffreiche Eiweiße, die zum Teil an der Oberfläche schwammen und abgeschöpft oder zu weit größeren Teilen direkt in den Stechlinsee geleitet wurden. Im Zeitraum 1964 bis 1988 waren die installierten Abscheider am Auslaufkanal immer wieder zeitweise funktionsuntüchtig. Jährlich wurden im Sommer für einen Monat Wartungen im KKW durchgeführt. Es kam während der Laufzeit von 1964 bis 1990 zu größeren Wartungsphasen. 1975/76 und 1986/87 wurde das KKW für 9 bzw. 16 Monate abgestellt, 1971 und 1973 für 4 Monate, 1981 und 1984 für 8 Monate und 1982 für 6 Monate. Der Kühlkreislauf wurde unterbrochen und die Austauschrate deutlich verlangsamt.

1966-1974 (ab 1968 genehmigt) erfolgte eine Netzkäfighaltung mit Forellen (z.B. 80.000 Regenbogenforellen, *Oncorhynchus mykiss*, im Jahr 1967) oder Karpfen (*Cyprinus carpio*) in gleicher Menge im Großen Stechlinsee. Besonders Karpfen wuchsen in dem vom Kühl-

kreislauf des KKW erwärmten Wasser und bei je zur Hälfte gekochtem Weißfisch und Pelletfutter besonders schnell. In einem Jahr hatten die Fische eine Massenzunahme von 3 g auf bis zu 2.000 g (J. Knaack, mdl. Mitt.). Große Mengen des Futters fielen durch die Netzkäfige auf den Grund des Stechlinsees. Unter den Netzkäfigen lagerten sich große Mengen Futterreste ab. Auch die Tatsache, dass Cypriniden als Stoffwechselendprodukt unter anderem direkt pflanzenverfügbaren Phosphor ausscheiden (Sternik, 1983), muss in die Bewertung der damit zusammenhängenden Ichthyoeutrophierung einbezogen werden.

Weitere anthropogene Beeinträchtigungen, die Auswirkungen auf den Großen Stechlinsee im Betrachtungszeitraum hatten, beziehen sich auf die Überformung der Ichthyozönose: 1974 war man bemüht, die „kleinwüchsige“ gebietsautochthone Maränenform (*Coregonus albula*) durch wesentlich produktivere Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*) zu ersetzen. Dafür wurden 40.000 Regenbogenforellen eingesetzt (Stückgewicht bei Besatz 150-200 g), direkt finanziert von der SED-Bezirksleitung (J. Knaack, mdl. Mitt.). Vor 1980 wurden für einen Zeitraum von ca. 10 Jahren 16 Netzhälterbatterien (Grundfläche jeweils 16 m<sup>2</sup>) betrieben. Dort wurden geschlüpfte Besatzmaränen (*Coregonus albula*) vor dem Aussetzen in den Großen Stechlinsee vorgestreckt. Gefüttert wurden die Jungfische mit seeeigenem Zooplankton, welches mit Lampen, die nachts über die Container gehängt wurden, angelockt wurde.

Ursprünglich als Maränensee beschrieben, besteht heute neben Hechten (*Esox lucius*) eine individuenstarke Barschpopulation (*Perca fluviatilis*; Knaack und Oldorff, 2006). Die ersten Besatzmaßnahmen mit Kleiner Maräne

(*Coregonus albula*) erfolgten bereits um 1900, „weil die hiesigen Maränen zu klein waren.“ (Bauch, 1950).

Um 1990 veränderte sich die Bewirtschaftung erneut, der Bedarf an Raubfischen wuchs. Durch das selektive Abfischen großer Raubfische wurden Zooplankton fressende Weißfische, wie Plötzen (*Rutilus rutilus*) und Ukelei (*Alburnus alburnus*), gefördert.

Diese massive Veränderung der Nahrungskette im Großen Stechlinsee ist bis heute nicht erschöpfend analysiert worden.

### 3.2 Bilanzierung der Belastungen

Für die Bilanzierung des externen Phosphor-Eintrags wurden das Abwasser der Gemeinde Neuglobsow und des KKW Rheinsberg in einen Phosphoreintrag transformiert und die Wirkung auf die seeinterne Gesamtphosphorkonzentration modelliert (Abb. 7). Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Phosphor-Konzentration im Stechlinsee mit der Zunahme der externen Phosphor-Fracht ansteigt. Der Vergleich mit den seeinternen gemessenen Konzentrationen (Kasprzak et al., 2009) macht deutlich, dass das Maximum der TP-Konzentration im See (1985-1990) durch das Modell gut nachgestellt wird. Auch der nach dem Maximum im See gemessene Abfall der Konzentration seit den 1990ern wird gut modelliert. Das Modell überschätzt allerdings die seeinterne Phosphor-Konzentration zwischen 1950 und 1975 deutlich. Ursache dafür könnte die zu Beginn der Abwasserversickerung noch hohe P-Sorptionskapazität der Böden im Versickerungsbereich sein. Dadurch wird ein bedeutender Teil der anfänglichen TP-Last zurückgehalten und erst später, bei Erschöpfung der Sorptionskapazität, gelangt die TP-Last in den See.

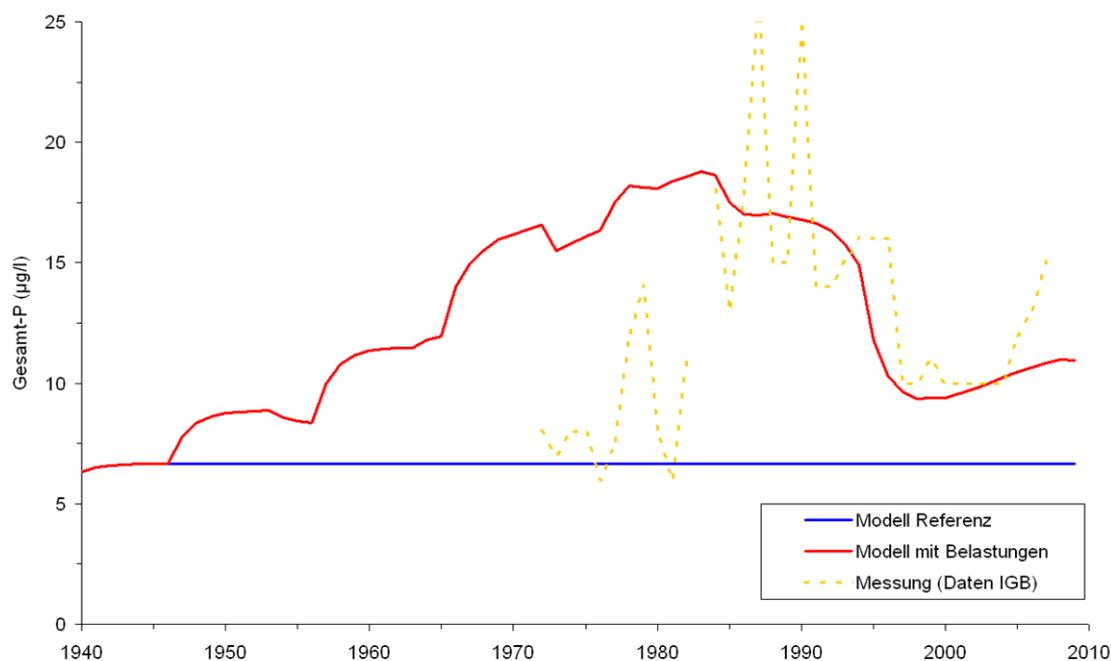


Abb. 7: Modellierte (Referenzzustand und Belastungsmodell) und gemessene (Kasprzak et al., 2009) seeinterne Gesamtphosphorkonzentration des Großen Stechlinsees von 1945 bis 2009.

#### 4. Schlussfolgerungen

Eine Reihe von externen anthropogenen Belastungsquellen, denen bislang eine geringe Bedeutung zugemessen wurde, stellten offenbar in ihrem zeitlichen Zusammenwirken wichtige Initiale der auch aktuell noch festzustellenden Veränderungen im Großen Stechlinsee dar. Diese Belastungen verursachten eine sehr hohe Phosphor-Last für den Stechlinsee und sind maßgeblich für den Anstieg der seeinternen Konzentration verantwortlich, die zwischen 1985 bis 1990 ihr Maximum erreichte. Deutlich wird auch, dass mit dem Rückgang der Belastungen heute wieder geringere seeinterne Konzentrationen vorliegen. Da der See eine Reaktionszeit von nur fünf Jahren hat, ist mit dem Wegfallen des Hauptteils der externen anthropogenen Last ein weiteres Absinken der seeinternen Gesamtposphorkonzentration und damit eine Reolithrophierung des Sees möglich. Allerdings ist durch die langen Aufenthaltszeiten des Grundwassers im Einzugsgebiet auch ein langes Nachwirken der Belastungen der Ortslage Neuglobsow auf den Stechlinsee wahrscheinlich. Das hier aufgestellte Modell berücksichtigt lediglich einen Teil der auf den Stechlinsee einwirkenden äußeren Faktoren. So sind z.B. klimatische Auswirkungen auf die Wasserqualität des Sees (s.a. Kasprzak et al., 2010) nicht berücksichtigt. Inwiefern diese Faktoren in Zukunft eine stärkere Bedeutung für den Stechlinsee bekommen, muss in weiteren Studien gezeigt werden.

#### Danksagung

Eine Reihe von Personen gab Hinweise auf historische anthropogene Belastungen im Stechlinseegebiet: Karl Anwand, Hans-Dietrich Babenzien, Klaus-Dieter Behnke, Peter Casper, Dietrich Flößner, Adolf Gnutzmann, Peter Kasprzak, Joachim Knaack, Rainer Koschel, Heinz-Dieter Krausch, Hans Rose, Jürgen Rütz, Peter Scharf, Wolfram Scheffler, Wilfried Schönborn, Andreas Sidow. Wolfram Scheffler und Martin Redel danken wir für die Bereitstellung von Fotomaterial.

#### 5. Literatur

Alkewitz, I., Nagel, T., 1991. Planungsverband Stechlin. Unveröffentlichte Planungsunterlagen.

Balzus, G., 1970. Einladung zur Beratung am 31.12.1970. Unveröffentlichte Unterlage.

Bauch, G., 1950. Die heimischen Süßwasserfische. Neumann Verlag, Radebeul.

Casper, P., Koschel, R., 1995. Description of Lake Stechlin. *Limnologia* 25, 281-284.

Holzbecher, E., Nützmann, G., Ginzl, G., 1999. Water and component mass balances in the catchment of Lake Stechlin. In: Leibundgut, C., McDonell, J., Schultz, G., (Hrsg.): *Integrated Methods in Catchment Hydrology – Tracer, Remote Sensing and New Hydrometric Techniques*. IAHS Publication Series 258. S. 37-44. Wallingford.

Imboden, D.M., 1974. Phosphorus model of lake eutrophication. *Limnology and Oceanography* 19, 297-304.

Kasprzak, P., Koschel, R., Casper, P., 2009. Ökologische Veränderungen im Stechlinsee: Zeiträume, Ausmaße, Ursachen, Einflussmöglichkeiten. Vortrag auf dem Kleinen Naturschutztag in Menz, 26.2.2009.

Kasprzak, P., Koschel, R., Parparov, A., 2010. Sauerstoffmangel im Tiefenwasser des oligotrophen Stechlinsees: Kann die Klimaerwärmung eine Rolle spielen? In: *Deutsche Gesellschaft für Limnologie* (Hrsg.): *Erweiterte Zusammenfassung*

gen der Jahrestagung 2009 (Oldenburg). S. 131-138. Hardeggen.

Klapper, H., Koschel, R., 1985. Lake Stechlin area and society. In: Casper, S.J. (Hrsg.): *Lake Stechlin – a temperate oligotrophic lake*. S. 455-483. Junk, Dordrecht.

Knaack, J., 1982. Abwasserbehandlung. In: Fiedler, K. (Hrsg.): *Hygienepraxis*. S. 254-281. VEB Volk und Gesundheit, Berlin.

Knaack, J., Oldorf, S., 2006. Zur Ichthyofauna im Naturschutzgebiet Stechlin – Anforderungen an den Schutz der aquatischen Lebensräume und seiner Ichthyozöosen. In: Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (Hrsg.): *Integrierter Gewässerschutz für Binnengewässer: Maßnahmen zum nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser*. 4. Stechlin-Forum. S. 87-96. Neuglobsow.

Koschel, R., 1995. Manipulation of whole-lake ecosystems and long-term limnological observations in the Brandenburg-Mecklenburg lake district, Germany. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie* 80, 507-518.

Koschel, R., Casper, S.J., 1986. Die ökologische Bedeutung des Kernkraftwerkes I der DDR "Rheinsberg" für den Stechlin. *Biologische Rundschau* 24, 179-195.

Koschel, R., Mothes, G., Casper, S.J., 1985. The nuclear power plant and its role in the life of Lake Stechlin. In: Casper, S.J. (Hrsg.): *Lake Stechlin – a temperate oligotrophic lake*. S. 419-431. Junk, Dordrecht.

Mothes, G., 1981. Sedimentation und Stoffbilanzen in Seen des Stechlinseegebietes. *Limnologia* 13, 147-194.

Oldorf, S., 2004. Die Naturschutzgebietsverordnung und die Entwicklung des Naturschutzes – Naturschutzgeschichte des NSG Stechlin. In: Lütkepohl, M., Flade, M. (Hrsg.): *Das Naturschutzgebiet Stechlin*. S. 198-205. Natur & Text, Rangs-dorf.

Oldorf, S., Vohland, K., 2009. Berücksichtigung des Klimawandels im Pflege- und Entwicklungsplan und der „NATURA 2000“-Managementplanung des Naturparks Stechlin-Ruppiner Land. In: Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (Hrsg.): *Ökologische Folgen des Klimawandels*. 5. Stechlin-Forum. S. 63-79. Neuglobsow.

Schauser, I., Lewandowski, J., Hupfer, M., 2003. Seeinterne Maßnahmen zur Beeinflussung des Phosphor-Haushaltes eutrophierter Seen. Leitfaden zur Auswahl eines geeigneten Verfahrens. *Berichte des Institutes für Gewässerökologie und Binnenfischerei* 16. Berlin.

Sidow, A., 1988. Analyse des derzeitigen Standes der Sestonfresserproduktion in der PGB „Rhin“ Neuruppin und Möglichkeiten zu deren Erweiterung. Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, Sektion Tierproduktion und Veterinärmedizin.

Sternik, K.H., 1983. Untersuchungen zur Phosphor-Abgabe und insbesondere zur Orthophosphat-Exkretion junger Karpfen (*Cyprinus carpio* L.). Ein Beitrag zur Phosphor-Remobilisierung in Gewässern. *Archiv für Hydrobiologie Supplement* 66, 1-82.

Toivonen, H., 2000. Botanical aspects in lake monitoring and assessment. In: Heinonen, P., Ziglio, G., Van der Beken, A. (Hrsg.): *Hydrological and limnological aspects of lake monitoring*. S. 119-130. John Wiley & Sons, Chichester.

van de Weyer, K., Pätzold, J., Tigges, P., Raape, C., Oldorf, S., 2009. Flächenbilanzierungen submerser Pflanzenbestände – dargestellt am Beispiel des Großen Stechlinsees im Zeitraum von 1962-2008. *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg* 18, 137-142.

VEB Projektierung Wasserwirtschaft, 1976. *Schutzbauwerk Stechlin-See Reg.-Nr. 5-50480000-33*. Unveröffentlichter Bericht.

## Grundwasserentnahme für Bewässerung und alternierende Wiederauffüllung des Absenkungstrichters durch Infiltration winterlicher Abflussüberschüsse oder von Klarwasser aus Kläranlagenabläufen

Joachim Quast, Hilmar Messal

IAMARIS e.V. – Angewandte Wasserforschung, Hamburg, AG Müncheberg, jquast@zalf.de

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag behandelt Probleme der Wasserverfügbarkeit für die landwirtschaftliche Bewässerung in der Region Brandenburg-Berlin und stellt ein Konzept zur alternierenden Nutzung von Grundwasserleitern für die saisonale Entnahme von Bewässerungswasser und die nachfolgende Wiederauffüllung der Entnahmedepression aus winterlichen Abflussüberschüssen oder durch den Klarlauf aus Kläranlagen vor. Neben dem Kosten-Nutzen-Aspekt ist die sommerliche Wasserverfügbarkeit ein entscheidendes Kriterium für die Notwendigkeit landwirtschaftlicher Bewässerung. Wasserentnahmen aus Fließgewässern bei Niedrigwasserführung und aus Seen sind aus ökologischen Gründen nicht möglich. Die Nutzung von Grundwasserleitern für die Wasserspeicherung wäre hingegen eine Alternative, da in sandig-kiesigen Grundwasserleitern das nutzbare Porenvolumen 25-30% des Gesamtporenvolumens beträgt. Die Entwicklung praktikabler Lösungen erfordert Technologien für den Wassertransport zum Beregnungsgebiet und die Infiltration großer Wassermengen. Erprobte Lösungen, die sich mit Hilfe von Pilotanlagen entwickeln lassen, werden bis spätestens etwa 2020 benötigt.

### Alternating groundwater withdrawal for irrigation and recharge through infiltration of winter surplus run-off or treated wastewater

**Abstract:** This contribution informs about problems in water supply for agricultural irrigation in the Berlin-Brandenburg-Region and presents a concept for using groundwater for irrigation in the summer and alternating with recharging the seasonal cone of depression in the aquifer by infiltrating surplus surface water run-off in the winter or treated wastewater. Besides the cost-benefit aspects, water availability during summer will become the decisive criterion for determining the feasibility of artificial irrigation. Withdrawals from low-water discharges of streams and from lakes are no longer allowed due to ecological restrictions. The concept of groundwater banking would be an appropriate measure – summer deficits in the aquifer would be compensated by artificial infiltration in the winter of surplus runoff or purified wastewater. In sandy-gravel aquifers, the pore volume available for storage is about 25 to 30 % of the overall volume. The development of workable adaptation technologies requires solutions for water transport into the area of need and infiltration technologies with high capacity. This requires trials in pilot installations aimed at achieving practical and economically applicable solutions by 2020.

#### 1. Problem

In Nordostdeutschland kommt es wegen ungünstiger hydroklimatischer und Bodenbedingungen – negative klimatische Wasserbilanz im Sommer, überwiegend Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität – in entscheidenden Phasen der Vegetationsperiode häufig zu Wasserversorgungsdefiziten der Pflanzenbestände und dadurch bedingten Mindererträgen und Qualitätsmängeln der Ernteprodukte, im Extremfall auch zu Totalausfällen. Die potenziell wirksamste Minderung von Trockenheitschäden und Ertragsausfällen ist durch einen Defizitausgleich mittels künstlicher Bewässerung zu erreichen. Wegen hoher Kosten kommen dafür allgemein nur Kulturen in Frage, mit denen sich ein hoher Deckungsbeitrag erzielen lässt. Der Bedarf für die Bewässerung solcher Kulturen wie Veredlungskartoffeln, Gemüse, Obst und auch Zuckerrüben und Mais nimmt zu und wird mit den zu erwartenden Klimaänderungen weiter steigen.

Neben den ökonomischen Kriterien einer Kosten-Nutzen-Analyse ist die in der Vegetationsperiode bereits heute kritische Wasserverfügbarkeit für Bewässerung eine entscheidende Restriktion. Diese Situation wird sich künftig verschärfen, wobei zu beachten ist, dass bei der Bewässerung das zugeführte Wasser fast vollständig über die Evapotranspiration verbraucht, d.h. dem regionalen Wasserkreislauf entzogen wird (im Gegensatz zum Wassergebrauch in der Trinkwasser- und Abwasserwirtschaft). Allein schon aus diesem Grund scheidet in den Wassermangelgebieten Nordostdeutschlands eine Wasserentnahme aus Fließgewässern bei Niedrigwasserführung aus. Dies gilt heute ebenso für eine Entnahme aus Seen und deren Bewirtschaftung als Speicher, wie das im Zuge des ehrgeizigen Bewässerungsprogramms in der DDR seit 1975 üblich war und zu drastischen ökologischen Schädigungen der Flachwasserzonen führte (Quast et al., 2005). Auch Flachlandspeicher für Bewässerungs-

zwecke bieten in Nordost-Deutschland mangels geeigneter Reliefbedingungen nur marginale Speicherpotenziale. Die Wasserentnahme für die landwirtschaftliche Bewässerung erfolgt deshalb heute überwiegend aus dem Grundwasser, wobei durch dessen träge Strömungsdynamik die Rückkopplung der saisonalen lokalen Entnahme auf den regionalen Wasserhaushalt deutlich gedämpft wird. Die Grundwasserverfügbarkeit ist bei einer jährlichen Neubildungsrate in NO-Deutschland von ca. 100 mm und bereits zu beobachtenden sinkenden Grundwasserständen schon heute sehr begrenzt und wird sich künftig weiter verringern.

Der Zusatzwasserbedarf in der Bewässerungssaison beträgt gegenwärtig 100 bis 200 mm. Bei abnehmenden Sommerniederschlägen und steigender Verdunstung infolge Temperaturanstiegs ist künftig mit deutlich höherem Zusatzwasserbedarf im bewässerten Pflanzenbau zu rechnen. Dieser Konfliktsituation kann nur dadurch begegnet werden, dass in Überschussperioden winterliche Abflüsse oder auch gereinigtes Abwasser gespeichert und für die Bewässerungssaison vorgehalten werden.

## 2. Lösungskonzept

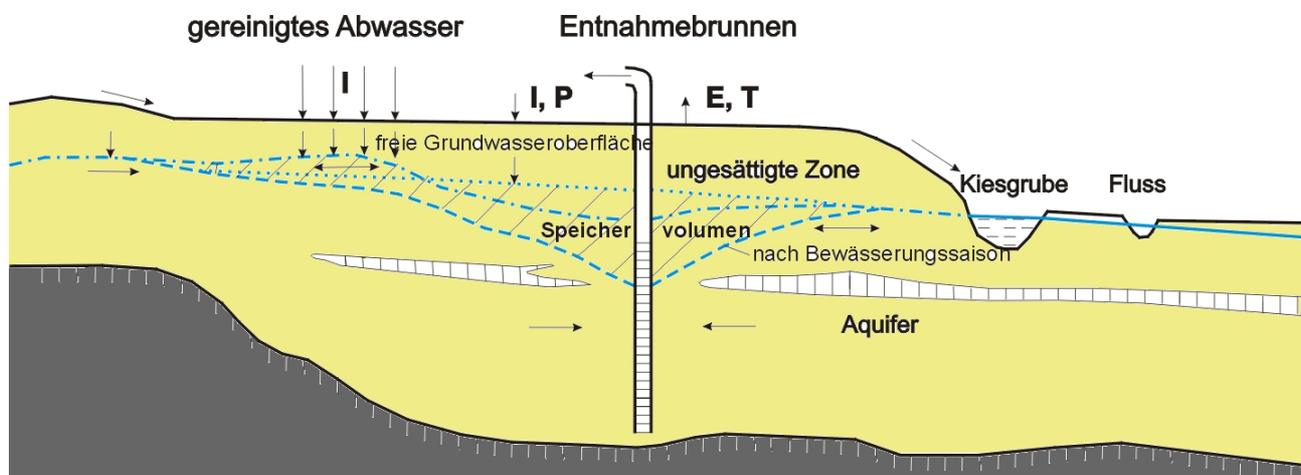
Als Problemlösung bietet sich an, den durch Wasserentnahme in der Bewässerungssaison im Grundwasserleiter entstandenen Absenkungstrichter durch Versickerung von winterlichen Abflussüberschüssen bzw. Klarwasser aus Kläranlagenabläufen wieder aufzufüllen und somit eine ausreichende Speichervorlage für die nächste Bewässerungssaison zu etablieren (Abb. 1).

In pleistozänen sandig-kiesigen Grundwasserleitern beträgt das für die Entnahme und Speicherung nutzbare Porenvolumen 25-30% des Gesamtvolumens. Der Zusatzwasserbedarf für die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen in Höhe von 100 bis 300 mm pro Vegetationsperiode ließe sich also prinzipiell aus einer Speicherlamelle von ca. einem Meter bedienen. Zudem begünstigt die träge Dynamik der Grundwasserströmung eine solche Speichertechnologie (Busch et al., 1993). Wenn der Absenkungstrichter nicht vollständig wieder

aufgefüllt wird, kann eine seitliche Ausbreitung des infiltrierten Wassers vermieden werden. Dadurch und durch eine Standortwahl im Abstrombereich zu Entlastungsgebieten/Niederungen (Abb. 2) lässt sich eine solche Speicherlösung kontaminationssicher hinsichtlich angrenzender regionaler Grundwasserbereiche gestalten. Das ist z.B. wichtig zum Abbau von Vorbehalten gegen die Versickerung von Klarwasser aus Kläranlagenabläufen und zur Nutzung dieser großen Potenziale (z.B. Berliner Klärwerke:  $600.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ; Abb. 3).

Die unterirdische Speicherung von Wasser für Bewässerungszwecke in Porengrundwasserleitern mittels Füllung dieser Speicher durch Versickerung von Überschusswasser aus Abflüssen in niederschlagsreichen Perioden oder von gereinigtem Abwasser wird inzwischen in ariden und semiariden Regionen als eine Vorzugsoption angesehen, für die es technisch-technologische Lösungen zu vervollkommen und zu erproben gilt (Huibers und Terwisscha, 2007). Neben dem Fehlen geeigneter Speicherstellen für Oberflächenspeicher und den hohen Kosten bei solchen Speichern, z.B. auch bei Lagunen für Kläranlagenabläufe, wird ein besonderer Vorteil der Untergrundspeicherung darin gesehen, dass die sonst massiven Verdunstungsverluste ausgeschlossen werden können. Erprobungsvorhaben für derartige Speichertechnologien sind gegenwärtig vor allem aus dem Nahen und Mittleren Osten und aus dem südlichen Afrika bekannt. Hinsichtlich der Nutzung von gereinigtem Abwasser wird die wirtschaftliche Notwendigkeit einer effizienten „Verlängerung der Wassernutzungskette“ betont.

In Nordostdeutschland sind Ansätze zur Erschließung von ausgewählten Grundwasserleitern für die alternierende Entnahme und Speicherung von Bewässerungswasser bereits seit Mitte der 1970er Jahre konzipiert worden (Kluge et al., 1980). Teilweise war dann aber die natürliche Grundwasserverfügbarkeit ausreichend, so dass auf eine künstliche Anreicherung verzichtet werden konnte, wie bei Anlagen zur Grundwasserverregnung in der Elbeniederung bei Magdeburg.



**Abb. 1:** Prinzipskizze für alternierende Grundwasserentnahme für Bewässerung und nachfolgende Wiederauffüllung des Absenkungstrichters als Speichervorlage für die nächste Bewässerungssaison (modifiziert nach Kluge et al., 1980).

In anderen Fällen wurde unzureichend gereinigtes Abwasser ganzjährig verregnet, wobei mehr die Abwasser-  
 verbringung als die Grundwasseranreicherung verfolgt wurde, z.B. im Raum Strausberg, östlich Berlins. Zu  
 einer ernsthaften Erprobung von Untergrundspeicher-  
 technologien ist es nicht gekommen, weil Grundwasser-  
 vorräte in der DDR grundsätzlich unter Nutzungsvorbe-

halt für die Trinkwasserversorgung standen und die Was-  
 serentnahme für die außerordentlich umfangreichen Be-  
 wässerungsvorhaben üblicherweise aus Oberflächenge-  
 wässern, bei Hinnahme der oben bereits angesprochenen  
 ökologischen Negativwirkungen erfolgte.

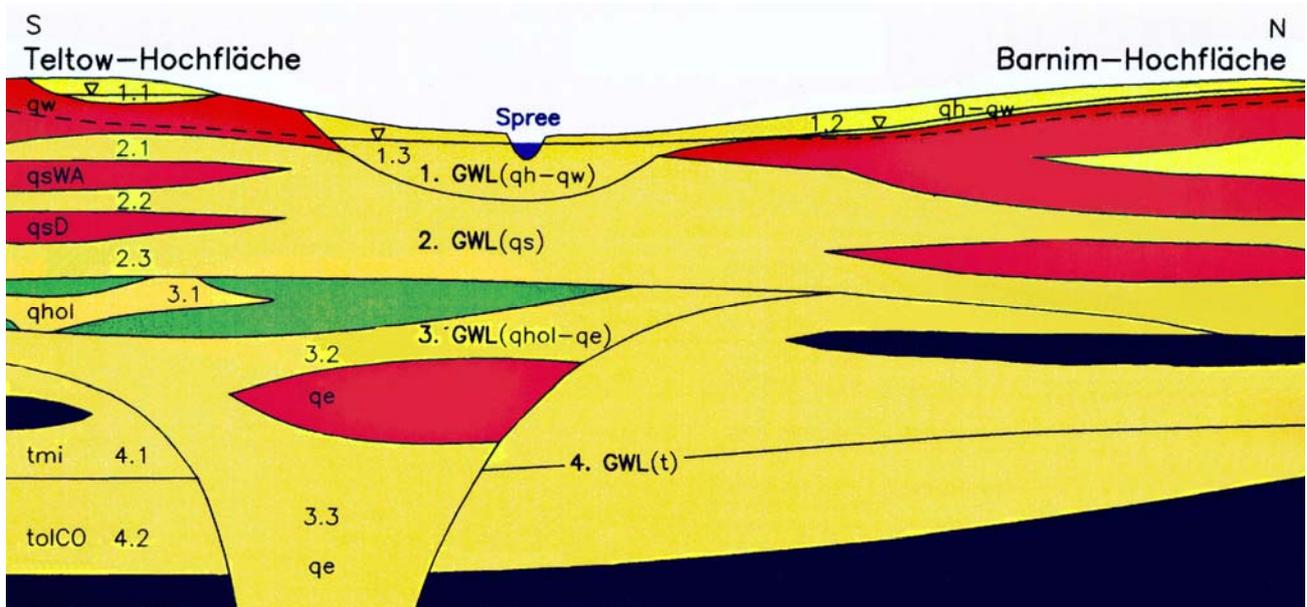


Abb. 2: Hydrogeologischer Schnitt durch einen potenziellen Standort für alternierende Grundwasserentnahme und Speicherung von infiltriertem Wasser für Bewässerung in Randlagen des Berliner Urstromtals (Quelle: Hannemann und Manhenke, 1995).

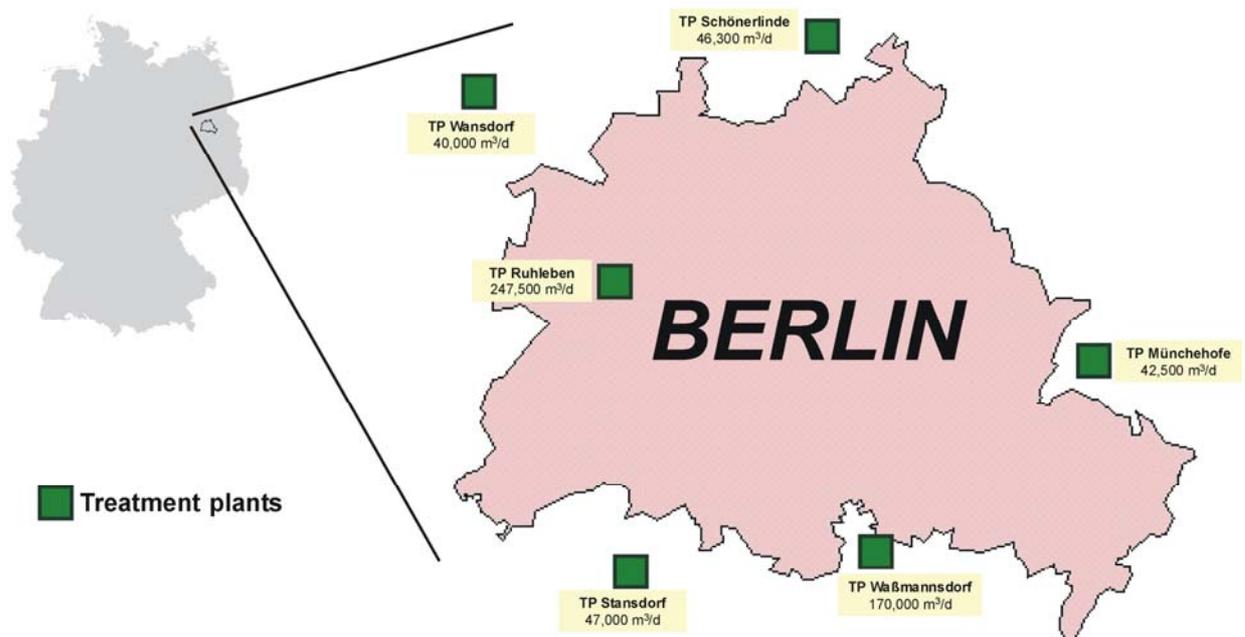


Abb. 3: Lage und Klarwasserkapazität der Berliner Klärwerke (Quelle: Kompetenzzentrum Wasser Berlin).

Die heute in NO-Deutschland bereits angespannte Situation hinsichtlich einer ausreichenden Grundwasserverfügbarkeit für einen zunehmenden Bewässerungsbedarf und die absehbare Verschärfung dieses Versorgungskonflikts, aber auch die internationale Wettbewerbssituation lassen die unverzügliche Inangriffnahme von F.u.E.-Vorhaben in Verbindung mit Pilotanlagen zur „Alternierenden Grundwasserentnahme und -speicherung für Bewässerung“ dringend geboten erscheinen. Die Region Berlin-Brandenburg bietet dafür Vorzugsstandorte.

### 3. Herausforderungen für innovative Lösungen

Die Umsetzung des auf den ersten Blick relativ einfach erscheinenden Lösungskonzepts in die Bewässerungspraxis, eingebettet in ein regionales integriertes Land- und Wasserressourcenmanagement, erweist sich als eine sehr komplexe Aufgabe mit sowohl hydrogeologischen und hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Aspekten als auch technologischen Herausforderungen, insbesondere hinsichtlich geeigneter Infiltrationstechnologien, sowie betriebswirtschaftlichen und rechtlichen Fragestellungen.

Ein besonders sensibler Abschnitt in der Verfahrenskette ist zweifellos die Infiltration des Wassers zur Speicherauffüllung im Grundwasserleiter. Von Vorteil ist, dass der diskontinuierlichen Wasserentnahme in den wenigen Monaten der Bewässerungssaison ein langer verfügbarer Zeitraum von September/Oktober bis April/Mai für die Wiederauffüllung des im Sommer erzeugten Absenkungstrichters gegenübersteht. Unter solchen Bedingungen sollte die erforderliche Infiltrationsleistung auch mit extensiv bewirtschafteten Versickerungsbecken mit Grasbewuchs erreichbar sein. Kiesbecken mit hohem Unterhaltungsaufwand, wie sie bei künstlicher Grundwasseranreicherung zur Trinkwassergewinnung üblich sind, dürften für den dezentralen Betrieb in der Feldflur nur wenig geeignet sein. Dies gilt wahrscheinlich auch für den Einsatz von Infiltrationsbrunnen/Schluckbrunnen oder auch den alternierenden Betrieb der Förderbrunnen als Schluckbrunnen, da bei solchen Brunnen mit erheblicher Kolmationsgefährdung zu rechnen ist.

Bewässerungskomplexe von 500-1000 ha, wie sie in Brandenburg inzwischen durchaus wieder üblich sind, haben einen jährlichen Zusatzwasserbedarf von ein bis zwei Millionen Kubikmetern (Quast et al., 2008).

Bei der Standortwahl müssen der Bewässerungsbedarf aus landwirtschaftlicher Sicht mit der Standorteignung nach hydrogeologischen Kriterien und bei beabsichtigter oder notwendiger künstlicher Wiederauffüllung der Entnahmedepression im Aquifer auch noch der Aufwand für die Wasserzuleitung vom Ort der Verfügbarkeit (Fluss/Gewässer oder Kläranlage) in Übereinstimmung gebracht werden.

Aus landwirtschaftlicher Sicht sind vor allem die Bodenbedingungen eines Standortes und dessen Mikroklima ausschlaggebend (z.B. Beelitzer Spargelanbaugebiet, Havelländisches Obstanbaugebiet, Kartoffelanbaugebiet im Fläming).

Die hydrogeologische Struktur sollte einen möglichst unbedeckten sandig/kiesigen Grundwasserleiter von mindestens 10 m Mächtigkeit aufweisen (Kluge et al.,

1980). In Erweiterung zu den üblichen Kriterien für Vorrats- und Verfügbarkeitsnachweise für eine Nutzungserlaubnis gemäß Wassergesetz sollte die Verfügbarkeitsaufstockung um den durch Infiltration erzeugten Wiederauffüllungsbetrag in Ansatz gebracht werden können.

Die Zuleitung des zur Infiltration kommenden Wassers in (notwendigerweise frostsicher zu verlegenden) Rohrleitungen ist vor allem eine Kostenfrage, die in der Gesamtkalkulation zu berücksichtigen ist. In Wertung internationaler Entwicklungen im Umgang mit der immer knapper werdenden Ressource Wasser dürfte das Prinzip der „Verlängerung der Wassernutzungskette“ aber auch für die Kläranlagenabläufe (Klarwasser) in der Wassermangelregion Nordost-Deutschland zunehmend an Dringlichkeit gewinnen. Das trifft besonders für das Umland von Berlin zu, wo aus den sechs Berliner Klärwerken täglich 600.000 m<sup>3</sup> gereinigte Abläufe direkt in die Vorfluter eingeleitet werden (Abb. 3). Diese Wassermenge würde potenziell für die Bewässerung von 100.000 ha ausreichen. Die Moränenstandorte im Umland von Berlin sind deshalb prädestiniert für Bewässerungsvorhaben unter Nutzung von Grundwasserleitern für die alternierende Wiederauffüllung der Entnahmedepressionen mit Klarwasser aus Berliner Klärwerken, selbstverständlich außerhalb sommerlicher Trockenperioden, in denen diese Klärwerksabläufe zur Niedrigwassererhöhung von Spree und Havel benötigt werden (Abb. 2).

Das Wechselspiel zwischen Grundwasserentnahme in der Bewässerungssaison und nachfolgender Wiederauffüllung des Absenkungstrichters durch Infiltration von verfügbaren Abflussüberschüssen lässt sich so steuern, dass der Grundwasserkörper lediglich im Bereich der vorher erzeugten Entnahmedepression beeinflusst wird und abgemindert allenfalls noch im natürlichen Abstrombereich. Die Beeinflussung des Grundwasserkörpers außerhalb dieser Flächen kann sicher ausgeschlossen werden. Für die Überwachung des Grundwasserkörpers unter bewässerten Flächen sind heute bereits Messnetze und Kontrollberichte im Turnus von fünf Jahren vorgeschrieben (Lüttger, 2005).

Zusätzliche Kosten entstehen durch die Wasserzuleitung in das Bewässerungsgebiet sowie durch die Anlage und den Betrieb der Versickerungsbecken. Es ist betriebswirtschaftlich abzuwägen, ob dieser Mehraufwand durch die erreichbare Produktionssicherheit gedeckt werden kann oder andernfalls Produktionseinschränkungen hingenommen werden sollten. In Anbaugebieten mit hoher Bewässerungswürdigkeit gibt es dazu kaum Alternativen (Hanke, 1991).

Beispielhaft sei die Spargelanbauregion um Beelitz genannt, wo künstliche Zusatzbewässerung unverzichtbar ist, die Wasserverfügbarkeit aus dem Grundwasser aber bereits eine kritische Grenze erreicht hat (Blankennagel, 2010).

#### 4. Schlussfolgerungen

Das vorgestellte Lösungskonzept der alternierenden Nutzung von Grundwasserleitern für die saisonale Entnahme von Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung und die nachfolgende Wiederauffüllung der Entnahmedepression aus Abflussüberschüssen als Speichervorlage für die nächste Bewässerungssaison wird künftig in vielen Wassermangelregionen Nordost-Deutschlands die Vorzugsoption zur Gewährleistung ausreichender Wasserverfügbarkeit für eine bewässerte Pflanzenproduktion sein. Es besteht dringender Bedarf an Pilotanlagen für Systemlösungen mit Infiltrationstechnologien, Zuleitungen und Speichermanagement. Bei solchen Vorhaben sollte unbedingt die Nutzung gereinigter Kläranlagenabläufe als wichtiger, bisher aber völlig unzureichend genutzter regionaler Wasserressource einbezogen werden. Erprobte Lösungen werden in fünf bis spätestens zehn Jahren benötigt.

Solche Lösungen lassen sich gut in Anpassungsstrategien einbinden, die darauf gerichtet sind, die Negativwirkungen der sich ändernden Randbedingungen auf den Landschaftswasserhaushalt und die Gewässer im Einzugsgebietsmaßstab möglichst gering halten, aber auch ökonomisch und energetisch vertretbar sind. Dabei sollten steuernde Eingriffe in Landschaftsstrukturen stets schrittweise, behutsam und reversibel erfolgen. Die Sinnfälligkeit erforderlich werdender Einwirkungen auf das Funktionieren des gesamten Landschaftshaushaltes muss in Lernprozessen erprobt werden (Quast, 2008).

#### 5. Literatur

- Blankennagel, J., 2010. Rettung für den Spargel – Brandenburg wird immer trockener – nun sollen Felder unterirdisch bewässert werden. Berliner Zeitung vom 30. Juni 2010.
- Busch, K.-F., Luckner, L., Tiemer, K., 1993. Geohydraulik. Borntraeger, Berlin/Stuttgart.
- Hanke, B. (Hrsg.), 1991. Wasser für die Pflanze. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- Hannemann, M., Manhenke, V., 1995. Hydrogeologische Schnitttafeln für das Lockergesteinsstockwerk des Landes Brandenburg. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 2, 89-95.
- Huibers, F., Terwisscha, C., 2007. Municipal waste water use for irrigation. ERWG Letter – Land and Water Management in Europe 17, 8-9.
- Kluge, W., Quast, J., Kröll, D., 1980. Geohydrologische Besonderheiten bei der Vorbereitung von Grundwasserberegnungsanlagen. Zeitschrift für angewandte Geologie, Berlin 26, 623-627.
- Lüttger, A. (Hrsg.), 2005. Pilotprojekt Beregnung des Landes Brandenburg. Zusammenfassung der Versuchsberichte 1999-2004. Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, Potsdam.
- Quast, J., 2008. Wie können wir besser mit dem knappen Landschaftswasser haushalten? In: Leibnitz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (Hrsg.): Ökologische Folgen des Klimawandels. 5. Stechliner Forum, S. 31-42. Stechlin-Neuglobsow.
- Quast, J., Ehlert, V., Lübke, E., Sourell, H., Wenkel, K.-Ö., 2005. German Report. In: Dirksen, W., Huppert, W. (Hrsg.): Irrigation Sector Reform in Central and Eastern European Countries. S. 119-159. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn.

## Maßnahmen und Methoden für ein nachhaltiges Wassermanagement zur Stabilisierung des Wasserhaushaltes kleiner Einzugsgebiete vor dem Hintergrund des Klimawandels am Beispiel des Fredersdorfer Mühlenfließes (Brandenburg)

Mike Ramelow<sup>1</sup>, Stefan Kaden<sup>1</sup>, Christoph Merz<sup>2</sup>, Ralf Dannowski<sup>2</sup>, Timothy Moss<sup>3</sup>, Frank Sondershaus<sup>3</sup>

<sup>1</sup>DHI-WASY GmbH, Waltersdorfer Straße 105, 12526 Berlin, M.Ramelow@dhi-wasy.de; <sup>2</sup>Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Eberswalder Straße 84, 15374 Müncheberg; <sup>3</sup>Leibniz-Institut für Regionalentwicklung und Strukturplanung e.V. (IRS), Flakenstraße 28-31, 15537 Erkner

**Zusammenfassung:** Im Rahmen des Projektes werden Wassermanagementsysteme für kleine Einzugsgebiete entwickelt, die methodische Lösungen für den Wasserrückhalt, ggf. inkl. der Abwasserwiederverwendung, zum Inhalt haben und die den wachsenden Anforderungen des Hochwasserschutzes, des Naturschutzes sowie von Naherholung und Tourismus Rechnung tragen. Diese technischen Lösungen und Bewirtschaftungsverfahren müssen adaptiv hinsichtlich zunehmender innerjähriger Klimaschwankungen einerseits und potenzieller Klimatrends andererseits sein. Die Entwicklung und praktische Beurteilung von an die Herausforderungen des Klimawandels angepassten technischen Lösungen (GW-Anreicherung, Wasserrückhalt, Wasserwiederverwendung) sowie von Managementkonzepten inkl. ökonomischer Instrumente zur Erhaltung / Verbesserung des Landschaftswasserhaushalts wird exemplarisch für kleine und mittlere Einzugsgebiete in der jungglazialen Landschaft durchgeführt. Für die Verbesserung der Wasserverfügbarkeit werden im Einzugsgebiet des Fredersdorfer Mühlenfließes folgende Maßnahmen des Wasserrückhalts angepasst und detailliert hinsichtlich ihrer hydraulisch-hydrochemischen Wirksamkeit untersucht: 1) konsequenter Wasserrückhalt und gezielte Grundwasseranreicherung im Oberlauf (Speicherung im Fließgewässer, in gewässernahen Speichern, Flächenversickerung); 2) Nutzung zusätzlicher Wasserreserven durch Wasserrückhalt/-bereitstellung bzw. durch flächenhafte Versickerung von Klarwasser (gereinigtes Abwasser); 3) Nutzung kleinerer Speicherelemente, wie abflusslose Senken und künstliche Feuchtgebiete sowie Regenwasserrückhaltebecken. In der Praxis fehlen die Grundlagen für eine Beurteilung der Wirkung derartiger Maßnahmen auf den Wasser- und Stoffhaushalt kleiner Einzugsgebiete. Wichtig sind Erkenntnisse zur Beurteilung der Zwischenspeicherung von Abflussspitzen und Abgabe in Niedrigwasserperioden, die Aufhöhung des Basisabflusses durch Versickerung sowie die Beurteilung stofflicher Umsatzprozesse im Aquifer.

### Measures and methods for a sustainable water management of small catchments aiming at a stabilisation of the water budget – example stream “Fredersdorfer Mühlenfließ” (Brandenburg)

**Abstract:** Water management systems for small catchments are being developed in this project. These systems include methodical solutions for water retention or, where applicable, also re-use of waste water. These solutions have to meet the growing requirements of flood protection, as well as of nature protection and local recreation and tourism. These technical solutions and management procedures have to be adaptive to increasing seasonal climate oscillations on the one hand and potential climate trends on the other hand. Both the technical solutions (artificial groundwater recharge, water retention, re-use of waste water), which are adapted to climate change challenges, and the management concepts (including economic instruments for the conservation/improvement of the regional water balance) are developed and evaluated exemplarily for small and medium catchments in young glacial landscapes. To improve the availability of water of the Fredersdorfer Mühlenfließ catchment, the following measures are planned: 1) consistent water retention and selective groundwater recharge in the headwaters region (storage in the flowing water body or in reservoirs close to the river, infiltration); 2) using additional water reserves from water retention/-supply or infiltration of purified waste water in certain areas; 3) using small storage elements, e.g. endorheic basins, artificial wetlands or retention basins. These measures will be evaluated with regard to their hydraulic-hydrochemical effectiveness.

#### 1. Einführung

Im Rahmen des Verbundprojektes „Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin“ (INKA BB) finden Untersuchungen zu Methoden und Instrumentarien für eine angepasste Wasserbewirtschaftung am Fredersdorfer Mühlenfließ (im nordöstlichen Berliner Umland)

statt. Hintergrund der Arbeiten sind die problematischen Abflussverhältnisse in diesem kleinen Einzugsgebiet vor allem während der Sommermonate. So kommt es seit den 1980er Jahren wiederholt zum Trockenfallen des Gewässers in seinem Mittel- und Unterlauf, wobei sich dieses Phänomen insbesondere in den letzten zwanzig Jahren deutlich verstärkte (Abb. 1, 2).



**Abb. 1:** Fredersdorfer Mühlenfließ im Oberlauf (25.07.2009).



**Abb. 2:** Fredersdorfer Mühlenfließ im Unterlauf (25.07.2009).

Bisherige hydrologische Untersuchungen betrachteten die Abflussverhältnisse nur ab dem Auslass des Bötzsees im Oberlauf und beschränkten sich auf das im vorliegenden Landschaftsraum nicht sehr maßgebliche oberirdische Einzugsgebiet (z. B. Mey, 2003; Rustler, 2008). Die hierbei erzielten Erkenntnisse ließen viele Fragen offen. Hier möchte das Teilprojekt 19 des Gesamtverbundes INKA BB ansetzen, anhand einer gekoppelten Oberflächen-/Grundwassermodellierung das gesamte wirksame Einzugsgebiet zu erfassen und auch die Rinnenstruktur des Gamengrunds einschließlich der beiden im Oberlauf gelegenen, weitgehend von Grundwasser gespeisten Seen in die hydrologische Betrachtung des Fredersdorfer Mühlenfließes einzubeziehen.

INKA BB nahm vor gut einem Jahr seine Arbeit auf, und im abgelaufenen ersten Projektjahr stand zunächst eine intensive Bestandserfassung sowie Konfliktanalyse im Vordergrund. Für eine ausführlichere Bewertung der verschiedenen Konfliktpotenziale wurde unter Federführung des Leibniz-Instituts für Regionalentwicklung und Strukturplanung Erkner (IRS) eine Akteursanalyse durchgeführt. Aus wasserwirtschaftlicher Sicht war die Erstellung eines Konzeptpapiers zum Wasserrückhalt im Oberlauf des Fredersdorfer Mühlenfließ ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit im ersten Jahr der Projektlaufzeit.

Ziel des Teilprojektes ist es, unter Einbeziehung innovativer – auch technischer – Verfahren zur Stabilisierung der Abflussverhältnisse im Sommerhalbjahr ein Konzept für ein nachhaltiges Wassermanagement zu entwickeln. Dabei sollen die unterschiedlichen Nutzungsanforderungen aber auch die antizipierten Anpassungserfordernisse auf Grund potenzieller Klimaänderungen Berücksichtigung finden.

## 2. Untersuchungsgebiet

Der im Rahmen der Projektarbeit betrachtete Raum ist das aktive hydrologische Einzugsgebiet des Fredersdorfer Mühlenfließes im nordöstlichen Berliner Umland. Er umfasst eine Fläche von 230 km<sup>2</sup>. Seinen Ursprung hat das Fredersdorfer Mühlenfließ auf der Barnimhochfläche, auf welcher es im Wesentlichen in südsüdwestlicher Richtung dem Berliner Urstromtal zuströmt und dort nach rd. 33 km in den Großen Müggelsee entwässert.

In seinem Oberlauf nutzt das Fredersdorfer Mühlenfließ die eiszeitliche Schmelzwasserrinne des Gamengrunds, welche die Hochfläche des Barnim durchschneidet. Der Untergrund ist aus Sanden und Geschiebemergel der Grundmoräne aufgebaut; besonders in den eingelagerten Seen, aber auch unter den ausgedehnten moorigen und quelligen Senkenbereichen, besteht inniger Grundwasserkontakt. Die langjährige mittlere Grundwasserneubildung (LUA, 2000, 2009) liegt mit 90-115 mm/a unter Wald und 130-155 mm/a unter Acker etwas über den Durchschnittswerten für Brandenburg. Die Abflussbildung wird durch den grundwassergespeisten Basisabfluss des bis Mitte Bötzsee ca. 130 km<sup>2</sup> umfassenden unterirdischen Einzugsgebietes dominiert. Im Mittel- und Unterlauf finden sich dagegen Versickerungsstrecken, in denen die Gewässersohle bis zu einige Meter über der Grundwasseroberfläche liegt. Gut durchlässige Braunerden und podsolierte Braunerden kennzeichnen die Pedo-

logie des Einzugsgebietes bis zur Mündung des Fließes in den Großen Müggelsee. Auch oberflächennahe Stauwasserabflüsse über stauenden Horizonten speisen das Fredersdorfer Mühlenfließ, doch versiegen diese regelmäßig in sommerlichen Trockenphasen. Flächen forstwirtschaftlicher (40 %) und landwirtschaftlicher (rd. 34 %) Nutzungen dominieren die Landnutzung. Weitere 18 % der Fläche, besonders am Mittellauf (Raum Petershagen-Eggersdorf / Fredersdorf-Vogelsdorf / Schöneiche), aber auch Rahnsdorf und Erkner am Unterlauf, sind durch eine intensive Siedlungstätigkeit geprägt.

Der gesamte Fließverlauf des Gewässers unterliegt den FFH-Richtlinien, zudem sind große Teile des Gewässers als Naturschutzgebiet ausgewiesen.

### 3. Daten und Methoden

Um die Problematik am Fredersdorfer Mühlenfließ genauer erfassen zu können, wurden unter Federführung des IRS eine Konfliktanalyse und darauf aufbauend eine Akteursanalyse durchgeführt. Die Erarbeitung der Konfliktanalyse diente einer ersten differenzierten Betrachtung der Interessen der Anlieger bzw. Akteure am Fredersdorfer Mühlenfließ (Abb. 3).

Die Ergebnisse der Konfliktanalyse bildeten anschließend die Grundlage der Akteursanalyse. Für die Konfliktanalyse wurden im August und September 2009 vier explorative Interviews mit Akteuren aus dem Einzugsgebiet geführt. Inhaltlich gliederten sich die Interviews in einen einführenden Part v.a. allgemeiner Feststellungen zu relevanten Themenbereichen im Untersuchungsgebiet. Daran anschließend erfolgte eine differenzierte Betrachtung der Interessen der Anlieger bzw. Akteure bezüglich ihrer Lage am Fredersdorfer Mühlenfließ.

Die auf der Konfliktanalyse aufbauende Akteursanalyse fokussiert räumlich auf das stärker besiedelte untere Einzugsgebiet des Fredersdorfer Mühlenfließes. Methodisch gliederte sich die Forschungsarbeit in drei Abschnitte: Eine explorative, eine vertiefende und eine auswertende Phase. In den ersten beiden Phasen wurden neben Literatur-, Dokumenten- und Internetrecherchen eine Reihe qualitativer, halbstandardisierter, vertraulicher Akteursinterviews geführt. Zudem wurden relevante Akteure in Projekttreffen einbezogen und ein regionaler Akteursworkshop veranstaltet. Die Ergebnisse wurden qualitativ ausgewertet und ein interner Forschungsbericht verfasst.

Zur Beurteilung der Wirkung der vorzuschlagenden Maßnahmen zum Wasserrückhalt, wird ein gekoppeltes geohydrologisch-hydraulisches Modell für das Fredersdorfer Mühlenfließ aufgebaut. Verwendung findet hierbei das Einzugsgebietsmodell *MIKE SHE*® (Produkt der DHI-Software). Es handelt sich dabei um ein gridbasiertes Einzugsgebietsmodell, mit welchem die verschiedenen Wasserhaushaltskomponenten in unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung berechnet werden können. *MIKE SHE* bildet die wichtigsten Prozesse des

Wasserkreislaufes unter Einbeziehung der Grundwasserzone ab und beinhaltet Teilmodelle u.a. zur Evapotranspiration, zum Grund- und Oberflächenwasser sowie zur Hydrogeologie (gesättigte Bodenzone) und Pedologie (ungesättigte Bodenzone). Bei der Abflussbildung am Fredersdorfer Mühlenfließ, wie auch in Flusseinzugsgebieten im Tiefland insgesamt, sind der Basisabfluss und das Grundwasser die wesentlichen Komponenten. Hierin begründet sich die Wahl dieses Modells für die Einzugsgebietsmodellierung, da hier die Verknüpfung von Grund- und Oberflächenwasser sehr gut realisierbar ist. Um auch die hydraulischen Verhältnisse im Fließgewässer modellieren zu können, wird *MIKE SHE* zusätzlich mit dem hydraulischen Modell *MIKE 11*® (Produkt der DHI-Software) gekoppelt.

### 4. Bisherige Ergebnisse und Diskussion

Im Ergebnis der Konfliktanalyse bestätigte sich, dass das bestehende Konfliktpotenzial aus der deutlich verringerten Wasserführung im Fredersdorfer Mühlenfließ resultiert, insbesondere während der Sommermonate (hydrologisches Sommerhalbjahr). Dies führt zu Wasserknappheit bis hin zu zeitweiligem Trockenfallen v.a. im Mittel- und Unterlauf des Gewässers. Unterschiedliche naturschutzfachliche, aber auch wasserwirtschaftliche und touristische bzw. Naherholungsinteressen erschweren eine gemeinsame und gemeindeübergreifende hydrologische Bewirtschaftung des Fredersdorfer Mühlenfließes. Das fehlende Konzept für eine solche nachhaltige Wasserbewirtschaftung des Gewässers führt dazu, dass einzelne Akteure (NABU-Ortsgruppen) eigene Konzepte entwickeln, um der lokalen Wasserproblematik entgegenzuwirken. In der Vergangenheit wurden solche bereits in Zusammenarbeit zwischen NABU und dem Wasser- und Bodenverband (WBV) Stöbber-Erpe erfolgreich umgesetzt (Bsp. Wiesenteich Fredersdorf-Bahnhofstraße). Jedoch folgt aus dem lokalen Fokus der Interessengruppen, dass diesen Konzepten z.T. nur eine sehr begrenzte räumliche Betrachtung des Problems zu Grunde liegt. Trotzdem ist es notwendig und sinnvoll, diese Konzepte im Rahmen der Projektarbeit auf ihre Umsetzbarkeit und Wirksamkeit zu prüfen und gegebenenfalls in das Strategiepapier zum Wasserrückhalt zu integrieren.

Zentrale Forschungsfragen der Akteursanalyse zielten auf relevante Akteurskonstellationen, Problemwahrnehmungen, Handlungspotenziale sowie die Rezeption im Projekt konzipierter Ideen und Maßnahmen. Zusammen mit der daran anschließenden Institutionenanalyse bildet die Akteursanalyse die sozialwissenschaftliche Basis für die Entwicklung eines nachhaltigen Wassermanagements für das Fredersdorfer Mühlenfließ.

Das Trockenfallen des Fließes ist seit Anfang des 20. Jhs. belegt und somit kein historisch neues Phänomen. Für den bestehenden Wassermangel ist der anthropogene Klimawandel damit kein ursächlicher, sondern ein problemverschärfender Faktor.

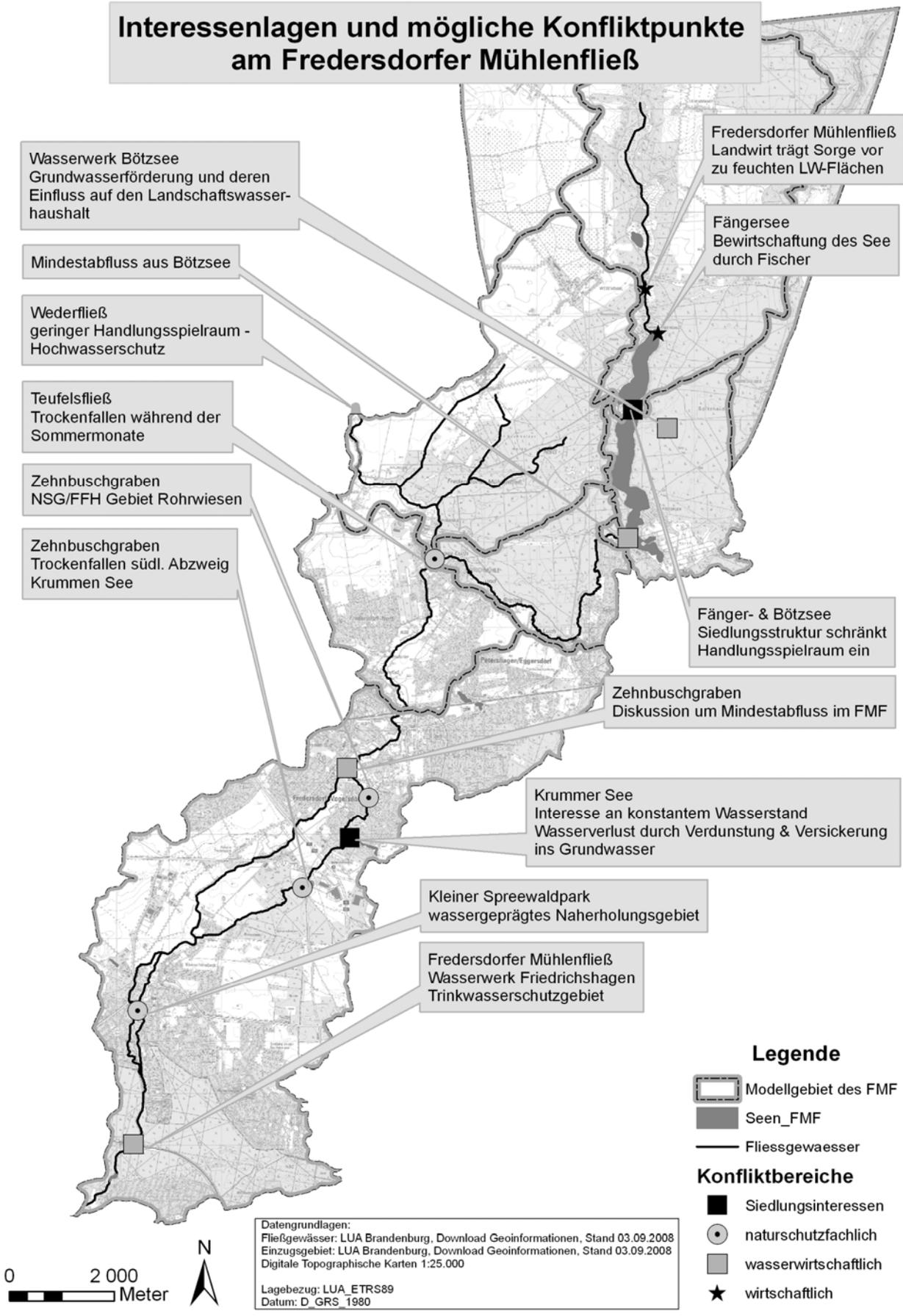


Abb. 3: Ergebnis der Konfliktanalyse.

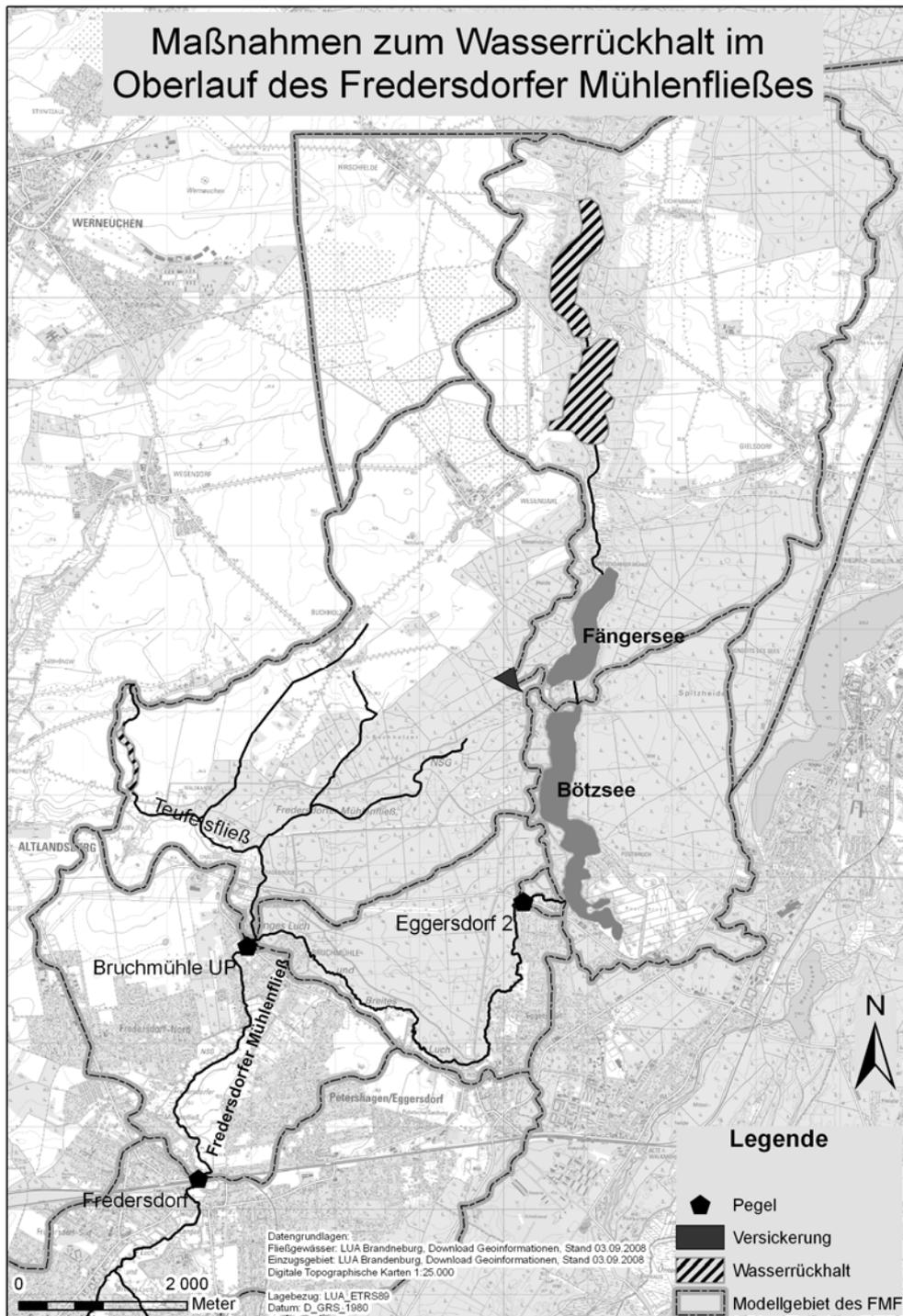


Abb. 4: Maßnahmenstandorte im Oberlauf des Fredersdorfer Mühlenfließes.

Eine gesellschaftliche Folge des Wassermangels im Einzugsgebiet sind wachsende Nutzungskonflikte zwischen lokalen Akteuren. Diese Spannungen wurden bislang weitgehend sich selbst überlassen; Instrumente zum Umgang mit den Konflikten existieren bislang nicht. Die Konfliktsituation ist ein Nullsummenspiel – das zu verteilende Wasser ist knapp und begrenzt – und “Win-Win“-Lösungen damit ausgeschlossen. Zudem ist das untere Einzugsgebiet administrativ stark zergliedert (zwei Brandenburger Landkreise, ein Berliner Bezirk). Daraus resultiert eine relativ hohe Komplexität der Ak-

teurslandschaft, die den Umgang mit dem Wassermangel zusätzlich erschwert.

Da die bestehenden Nutzungsinteressen vermutlich auch in Zukunft nicht befriedigt werden können, gewinnen der gesellschaftliche Umgang mit der Mangelsituation sowie entsprechende Lücken im institutionellen Gefüge an Bedeutung. Um Manipulationen vorzubeugen, ist die Akzeptanz der lokalen Akteure notwendig. Durch die Einbindung lokaler Akteure in die Entwicklung entsprechender Konzepte sowie die Nutzung von Trockenjahren

als „Zeitfenster“ können die bestehenden Handlungsspielräume erheblich erweitert werden.

Ein weiteres zentrales Ergebnis der bisherigen Projektarbeit ist ein Konzept zur Wasserbevorratung am Fredersdorfer Mühlenfließ. Soll das angestrebte Managementkonzept über die „Verwaltung des Mangels“ hinausreichen, so ist vordringlich auch nach wasserwirtschaftlichen Möglichkeiten zur Erhöhung der sommerlichen Abflüsse zu suchen. Als Lösungsansatz dafür wird die Verbesserung des Landschaftswasserrückhalts durch eine – bedarfsweise technisch unterstützte – Umverteilung winterlicher Abflussüberschüsse auf das Sommerhalbjahr vorgeschlagen. Bei der Entwicklung von Strategien für einen solchen nachhaltigen Wasserrückhalt lag die Konzentration zum einen auf einer Grundwasseranreicherung und einer daraus resultierenden Erhöhung des Basisabflusses und zum anderen auf einer temporären Staubewirtschaftung möglicher Wasserrückhaltegebiete während der abflussreichen Zeit im hydrologischen Winterhalbjahr. Dabei lag der Fokus möglicher Maßnahmen und Maßnahmenstandorte im Verlauf der ersten Projektphase zunächst – und systembedingt – auf dem Oberlauf des Gewässers. Hintergrund hierfür ist, dass nur eine erfolgreiche Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes und der Wasserbilanz im Oberlauf des Fredersdorfer Mühlenfließes ein sinnvolles Wassermanagement im Mittel- und Unterlauf ermöglicht. Durch mehrmalige Begehungen des Fredersdorfer Mühlenfließes wurden verschiedene Standorte für die Umsetzung zu diskutierender Maßnahmen besichtigt und abschließend bewertet. Ergebnis dieses Prozesses sind vier Standorte, die auf einem Ende Februar 2010 am IRS in Erkner durchgeführten Akteursworkshop den handelnden Akteuren vorgestellt und gemeinsam diskutiert wurden. Im Folgenden sollen die wichtigsten vorgeschlagenen Maßnahmen kurz dargestellt werden.

In der Niederung des Gamengrunds oberhalb des Fängersees soll an zwei Standorten während des hydrologischen Winterhalbjahres Wasserrückhalt direkt am Gewässer realisiert werden. Das Fredersdorfer Mühlenfließ durchfließt hier ein recht breites Tal mit einer sehr ebenen Sohle. Durch einen das Tal querenden Damm wird ein künstlicher Speicher angelegt, in welchem das Wasser gestaut wird. Das so zurückgehaltene Wasser kann zum einen versickern und zum anderen mit Beginn des hydrologischen Sommerhalbjahres kontinuierlich aus dem Speicher gelassen werden. Somit trägt diese Maßnahme zu einem geringen Anteil zur Grundwasserneubildung bei und des Weiteren zur direkten Erhöhung des Abflusses im Fredersdorfer Mühlenfließ mit Beginn der Vegetationsperiode. Hierdurch wird zunächst der Wasserhaushalt der beiden unterhalb gelegenen Seen Fänger- und Bötzees begünstigt, während unterhalb des Bötzees, auf Grund der Speicherwirkung desselben, keine merkliche Wirkung erwartet wird.

Als eine zweite Maßnahme soll westlich des Fängersees eine Grundwasseranreicherung (GWA) vorgenommen werden. Hierbei soll Wasser aus dem Fängersee über eine Pumpstation auf eine ca. 7 m höher und etwa 450 m entfernt gelegene Versickerungsfläche geleitet werden. Auch hier beschränkt sich die Entnahme von Seewasser

auf Phasen des Wasserüberschusses, um den Wasserhaushalt während trockener Perioden nicht zusätzlich zu belasten. Das übergeleitete Wasser kommt auf der Versickerungsfläche – evtl. über zusätzliche Versickerungsschlitze – schnell und damit verlustarm zur Versickerung. Hierdurch wird eine Erhöhung der Grundwasserneubildung erreicht, welche dem Teufelsfließ zufließt und somit zur Erhöhung des Basisabflusses im Fredersdorfer Mühlenfließ beiträgt. Die erstgenannten Maßnahmen oberhalb der beiden Seen wirken sich zudem unterstützend auf dieses Vorhaben aus. Durch den erhöhten Abfluss ergibt sich die Möglichkeit, Wasser auch noch im Frühjahr (Frostfreiheit!) aus dem Fängersee zu entnehmen, ohne den Wasserhaushalt des Sees insgesamt zu beeinträchtigen.

Am Mittellauf des Teufelsfließes soll ein weiterer Standort zum Wasserrückhalt realisiert werden. Hier existiert ein nicht mehr betriebenes Rückhaltebecken (RHB) für Beregnungszwecke. Dieses soll nach dem Willen der Projektpartner sowie des WBV Stöbber-Erpe wieder in Betrieb genommen werden. Dabei soll in diesem Becken, durch Nutzung einer definierten Staulamelle, ebenfalls Wasser in wasserreichen Zeiten zwischengespeichert werden (Vorrat ca. 30.000 m<sup>3</sup>). Dieses wird entsprechend in Trockenperioden kontinuierlich über das Teufelsfließ in das Fredersdorfer Mühlenfließ geleitet und trägt somit ebenfalls zu einer Abflusstabilisierung bei.

Entscheidend bei der Betrachtung der verschiedenen Maßnahmen ist, dass diese in ihrer Wirkung nicht einzeln, sondern in ihrer Gesamtheit bewertet werden. Ihre größte Wirkung erzielen die Maßnahmen erst unterhalb der Mündung des Teufelsfließes in das Fredersdorfer Mühlenfließ in der Ortslage Bruchmühle, da sich hier die Wirkungen aller Einzelmaßnahmen im Oberlauf von Fredersdorfer Mühlenfließ und am Teufelsfließ überlagern.

Neben dem entwickelten Konzeptpapier zur Wasserbevorratung am Fredersdorfer Mühlenfließ sind die Ergebnisse der Akteursanalyse ein wesentlicher Bestandteil des ersten Projektjahres.

## 5. Literatur

- LUA – Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.), 2000. Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg. Studien und Tagungsberichte, Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg 27. Potsdam.
- LUA – Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.), 2009. Mittlere Abflusspende für die Zeitreihe 1976-2005 mit dem Programm ABIMO 2.1 [wh\_abimo.shp]. Online-Datensatz, LUIS-BB, [http://www.mugv.brandenburg.de/lu/gis/wh\\_abimo\\_76\\_05.zip](http://www.mugv.brandenburg.de/lu/gis/wh_abimo_76_05.zip). Potsdam.
- Mey, S., 2003. Modellgestützte Untersuchung der Abflussbildungsprozesse im Einzugsgebiet des Fredersdorfer Mühlenfließes. Diplomarbeit, Freie Universität Berlin.
- Rustler, M., 2008. Modellierung der Interaktion zwischen Oberflächen- und Grundwasser in einem Flachlandinzugsgebiet mit dem gekoppelten Modell ArcEGMO-ASM. Diplomarbeit, Universität Bayreuth.

## Modellgestützte Analysen des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet Potsdamer Wasserwerke und Ableitung von Bewirtschaftungsempfehlungen unter Berücksichtigung standortbezogener Klimaprojektionen

Dietmar Schäfer<sup>1</sup>, Benedict Miles<sup>1</sup>, Karsten Zühlke<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GCI GmbH Grundwasser Consulting Ingenieurgesellschaft, Bahnhofstraße 19, 15711 Königs Wusterhausen, mail@gci-kw.de;

<sup>2</sup>Energie und Wasser Potsdam GmbH, Steinstraße 101, 14480 Potsdam

**Zusammenfassung:** Die Energie und Wasser Potsdam GmbH (EWP) lässt für die von ihr betriebenen Wasserwerke Untersuchungen durchführen, deren Ziel eine nachhaltige und effiziente Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen zur Sicherung der Bereitstellung von Trinkwasser in guter Qualität ist. Veranlasst werden diese Untersuchungen durch eine bei der Grundwasserförderung zu berücksichtigende geogene und anthropogene Beeinflussung des den Brunnen zuströmenden Grundwassers. Seit Längerem auch durch die Grundwasserüberwachung in den Einzugsgebieten belegt ist der Einfluss des Klimawandels. Die vorgestellten Untersuchungen zeigen die Methodik und die Ergebnisse bei der Auswertung von Daten der hydrogeologischen Erkundung und der Grundwasserüberwachung sowie beim Einsatz darauf aufbauender Modelle. Hierbei handelt es sich um dreidimensionale Grundwasserströmungs- und Transportmodelle, die über ein lokales Bodenwasserhaushaltsmodell mit regionalen Klimamodellen gekoppelt sind. Im Ergebnis der Untersuchungen konnten wasserwerksspezifisch fachlich fundierte Bewirtschaftungsempfehlungen erarbeitet werden, die sich sowohl auf die Verteilung der Rohwasserförderung auf die Fassungsanlagen als auch auf die Gestaltung der Grundwasserüberwachung beziehen. Durch Modelluntersuchungen, die auf Projektionen zum Klimawandel aufsetzen, konnten Orientierungen zur zukünftigen Entwicklung des Grundwasserangebotes und dessen Fassungsbedingungen bis 2055 gewonnen werden.

### Model-based analysis of the water budget in the catchment areas of Potsdam waterworks and recommendations for management options considering climate change

**Abstract:** The water supply company “Energie und Wasser Potsdam GmbH” (EWP) has commissioned research studies on the sustainable and efficient management of groundwater resources at EWP’s waterworks to secure the supply of high quality drinking water. The motivation for the research was the geogenic and anthropogenic influences affecting groundwater in the catchments which have to be considered in the operational planning for the waterworks. Long term groundwater monitoring data shows that climate change also affects the catchments. The study approach and results of the analysis of data from hydrogeological investigations and groundwater monitoring are presented here, as well as the numerical groundwater models used in the studies. 3D flow and transport models were coupled to regional climate models via a local soil water balance model. The results enabled the development of technically sound management recommendations, which include optimization of the distribution of pumping between the wells and the design of groundwater monitoring programs for EWP’s waterworks. The use of groundwater modelling based on climate change projections has provided an indication of the potential future sustainable groundwater yield and conditions for its management up to 2055.

#### 1. Einführung

Die Energie und Wasser Potsdam GmbH (EWP) versorgt die Landeshauptstadt Potsdam sowie Gemeinden und Zweckverbände im Umland mit Trinkwasser. Fünf Grundwasserwerke liefern derzeit im Jahresdurchschnitt ca. 8,9 Mio. m<sup>3</sup> Reinwasser.

Den sich hieraus ableitenden Anforderungen an die Versorgungssicherheit nach Menge und Beschaffenheit des bereitzustellenden Trinkwassers steht eine deutliche geogene und anthropogene Beeinflussung des den Brunnen zuströmenden Grundwassers gegenüber. Zur nachhaltigen Sicherung der Wasserversorgung ist daher nicht

nur die Kenntnis der Ursachen dieser Beeinflussungen, sondern auch eine Abschätzung der zu erwartenden Entwicklungen erforderlich. Die Beeinflussungen des Grundwassers erfordern eine Bewirtschaftung der Ressourcen, die, ausgehend von den Erfahrungen der Vergangenheit, sowohl die gegenwärtige Situation als auch die zukünftig zu erwartenden Entwicklungen berücksichtigen muss. Hierzu lässt die EWP GmbH für die einzelnen Wasserwerke seit Längerem Bewirtschaftungsuntersuchungen durchführen. Vorgehensweise und Ergebnisse hierzu werden nachfolgend exemplarisch für drei Wasserwerke vorgestellt.

## 2. Untersuchungsgebiet und -gegenstand

Im Fokus der hier vorgestellten Untersuchungen stehen die drei Potsdamer Grundwasserwerke Wildpark, Leipziger Straße und Rehbrücke mit ihren unterirdischen Einzugsgebieten (Abb. 1).

Das Wasserwerk Wildpark fördert aus zwei am westlichen Stadtrand von Potsdam gelegenen Hebergalerien mit insgesamt 23 Brunnen. Der Fassungsstandort befindet sich in der Brandenburg-Potsdamer Havelniederung. Das Einzugsgebiet erstreckt sich im Osten und Süden bis an die Havel bzw. an den Templiner See als Teil der Havelseenkette.

Das Wasserwerk Leipziger Straße liegt unweit des Stadtkerns am südöstlichen Havelufer. Es werden insgesamt 21 eigenbewirtschaftete Brunnen in zwei Brunnengalerien betrieben. Eine dieser Fassungen verläuft direkt am Havelufer entlang, die zweite erstreckt sich ausgehend von der Havel südlich der Halbinsel Hermannswerder in südöstlicher Richtung in den Randbereich der Havelniederung. Das Einzugsgebiet des Wasserwerkes orientiert sich vornehmlich nach Süden, erreicht aber auch den Templiner See im Westen.

Die 24 Brunnen der vier Wasserfassungen des Wasserwerkes Rehbrücke liegen in der Nuthe-Nieplitz-Niederung am östlichen Stadtrand von Potsdam. Das Einzugsgebiet des Wasserwerkes erstreckt sich hauptsächlich in südwestlich-nordöstlicher Richtung und erfasst neben dem Urstromtal der Nutheniederung auch die Hochflächen des Beelitzer Sanders und des Teltows.

Alle Wasserwerksstandorte liegen in Niederungsbereichen, die entlang von Rinnenstrukturen in den tieferen tertiären Schichten verlaufen. Diese Strukturen sind durch die erosive Wirkung eiszeitlicher Prozesse entstanden und in der Abbildung 1 anhand der dort dargestellten Quartärbasis ersichtlich. In einigen Bereichen ist es zur vollständigen Ausräumung der tertiären Schichten – einschließlich Rupelton – gekommen. Da dieser geräumig den Aufstieg hochsalinärer prätertiärer Tiefenwässer in die Süßwasser führenden tertiären und pleistozänen Grundwasserleiter verhindert, besteht im Falle seiner Ausräumung die Möglichkeit des Aufstieges des Salzwassers (Abb. 1). Dieses entlastet dann gewöhnlich in die den Erosionsrinnen folgenden Gewässer. Gelangen die aufsteigenden Salzwässer dabei in die Einzugsbereiche von Wasserfassungen, kann der Aufstieg des Tiefenwassers beschleunigt werden und zu einer massiven Versalzung des Rohwassers der Wasserwerke führen. Diese Effekte sind an den Wasserwerken Wildpark und Leipziger Straße in der Vergangenheit bereits beobachtet worden, was am letztgenannten Wasserwerk in den frühen 1980er Jahren zur Stilllegung bzw. Förderreduzierung mehrerer Fassungsgebiete führte (Nillert et al., 2008). Hieraus lässt sich ein dringender Bedarf nach der Entwicklung von Bewirtschaftungskonzepten ableiten, die den Zutritt salinaren Tiefenwassers minimieren.

Während das Wasserwerk Wildpark aufgrund seiner relativ großen Entfernung zu Oberflächengewässern und

das Wasserwerk Leipziger Straße bedingt durch die standortkonkreten hydrogeologischen Bedingungen nur zu einem geringen Anteil Uferfiltrat fördern, liegt dieser beim Wasserwerk Rehbrücke deutlich höher. Dies betrifft vor allem dessen zwei südliche Fassungen, die entlang der Flüsse Nuthe und Stöcker verlaufen. Der in der Nuthe seit mehr als einem Jahrzehnt beobachtete Anstieg der DOC-Konzentrationen ist inzwischen auch im Rohwasser des Wasserwerkes nachvollziehbar. Eine Fortschreibung dieser beobachteten Tendenz kann mittelfristig zu Beeinträchtigungen der derzeit praktizierten naturnahen Wasseraufbereitung führen. Hieraus leitet sich u. a. der Bedarf eines Bewirtschaftungskonzeptes ab, dessen Umsetzung eine Begrenzung des Uferfiltratanteils im Rohwasser erwarten lässt. Dieses Bewirtschaftungskonzept muss dabei auch den hier in geringerem Umfang beobachteten Salzwasseraufstieg sowie den Zustrom von Grundwasser aus dem ehemaligen Rieselfeldareal im östlichen Einzugsgebiet berücksichtigen.

Alle Wasserwerke sind in ähnlicher Weise betroffen von den Folgen des Klimawandels, wobei diesbezügliche Prospektionen u. a. von einem Rückgang der Grundwasserneubildung bis zum Jahr 2055 um bis zu 40 % ausgehen (Gerstengarbe et al., 2003).

Die Abbildung 1 fasst die beschriebenen, den Grundwasserhaushalt potenziell beeinflussenden bzw. das nutzbare Grundwasserdargebot begrenzenden Größen für die drei Wasserwerke zusammen.

Ausgehend hiervon leiten sich folgende wesentliche Zielstellungen der hier vorgestellten Untersuchungen ab:

- Ermittlung von limitierenden Faktoren für die Rohwasserförderung der Potsdamer Wasserwerke durch Menge und Beschaffenheit des Grundwassers;
- Analyse ihrer Wirkmechanismen als Grundlage für Abschätzungen zukünftiger Entwicklungen und von angepassten Bewirtschaftungsstrategien;
- Entwicklung von Bewirtschaftungsstrategien unter Berücksichtigung gegenwärtiger Verhältnisse und abzuschätzender zukünftiger Systementwicklungen.

## 3. Methodik

Die Untersuchungen werden einzeln für jedes Wasserwerk im räumlichen Maßstab ihrer unterirdischen Einzugsgebiete durchgeführt. Die Bearbeitung gliedert sich methodisch in drei Leistungsphasen.

In der ersten Phase erfolgt eine Aufarbeitung, Strukturierung, Archivierung und Analyse aller relevanten Primärdaten sowie ihre Zusammenfassung im konzeptionellen Modell. Die Abbildung 2 zeigt das dabei erarbeitete hydrogeologische Strukturmodell für das Wasserwerk Rehbrücke in seiner dreidimensionalen Ausprägung. Ziel dieser Bearbeitungsphase ist neben der Schaffung von Grundlagen für die anschließende numerische Modellierung vor allem die Entwicklung eines Systemverständnisses, aus dem sich bereits erste Situationsbewertungen und Bewirtschaftungsempfehlungen ableiten lassen.

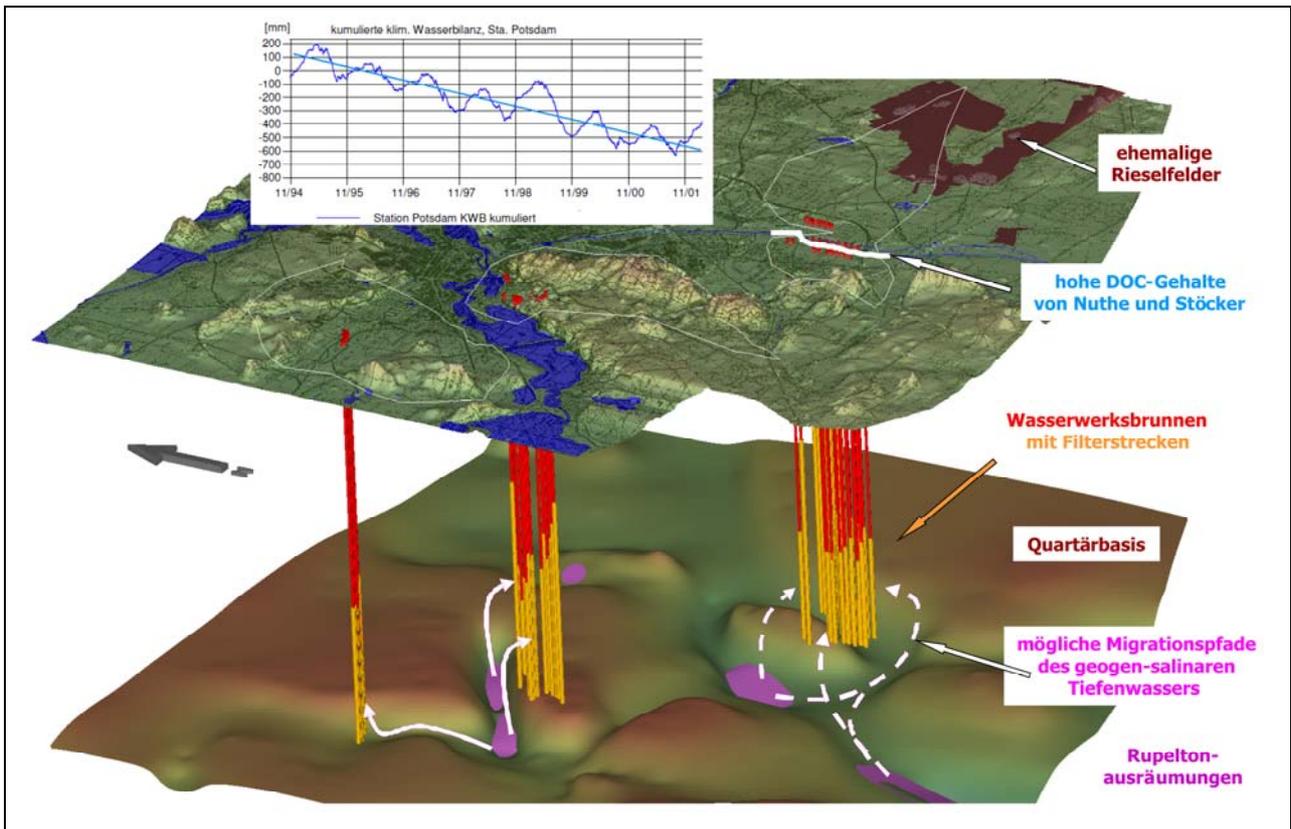


Abb. 1: Konzeptionell zu berücksichtigende Dargebotsbeschränkungen.

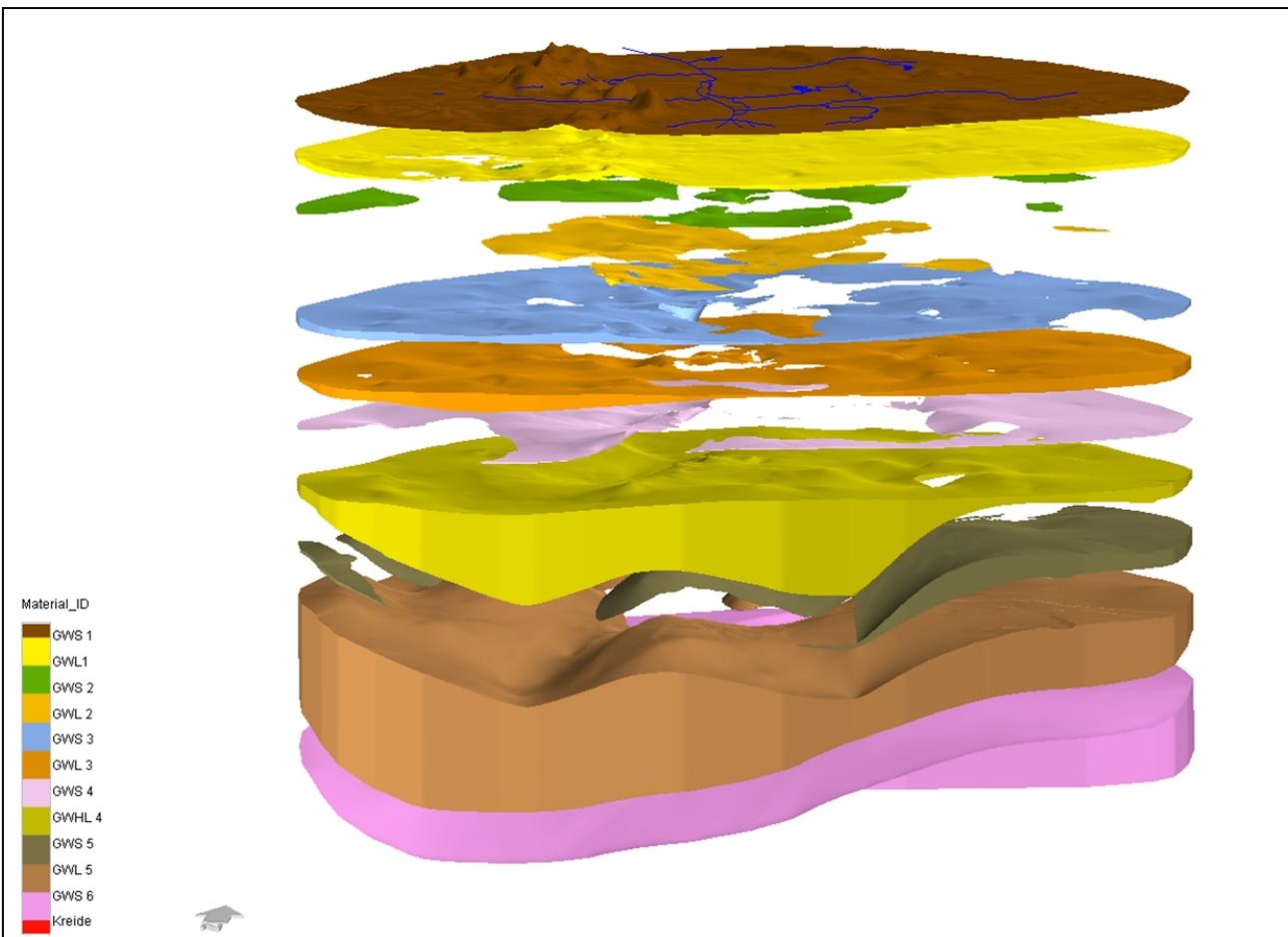


Abb. 2: Räumliche Darstellung des hydrogeologischen Strukturmodells für das Wasserwerk Potsdam-Rehbrücke.

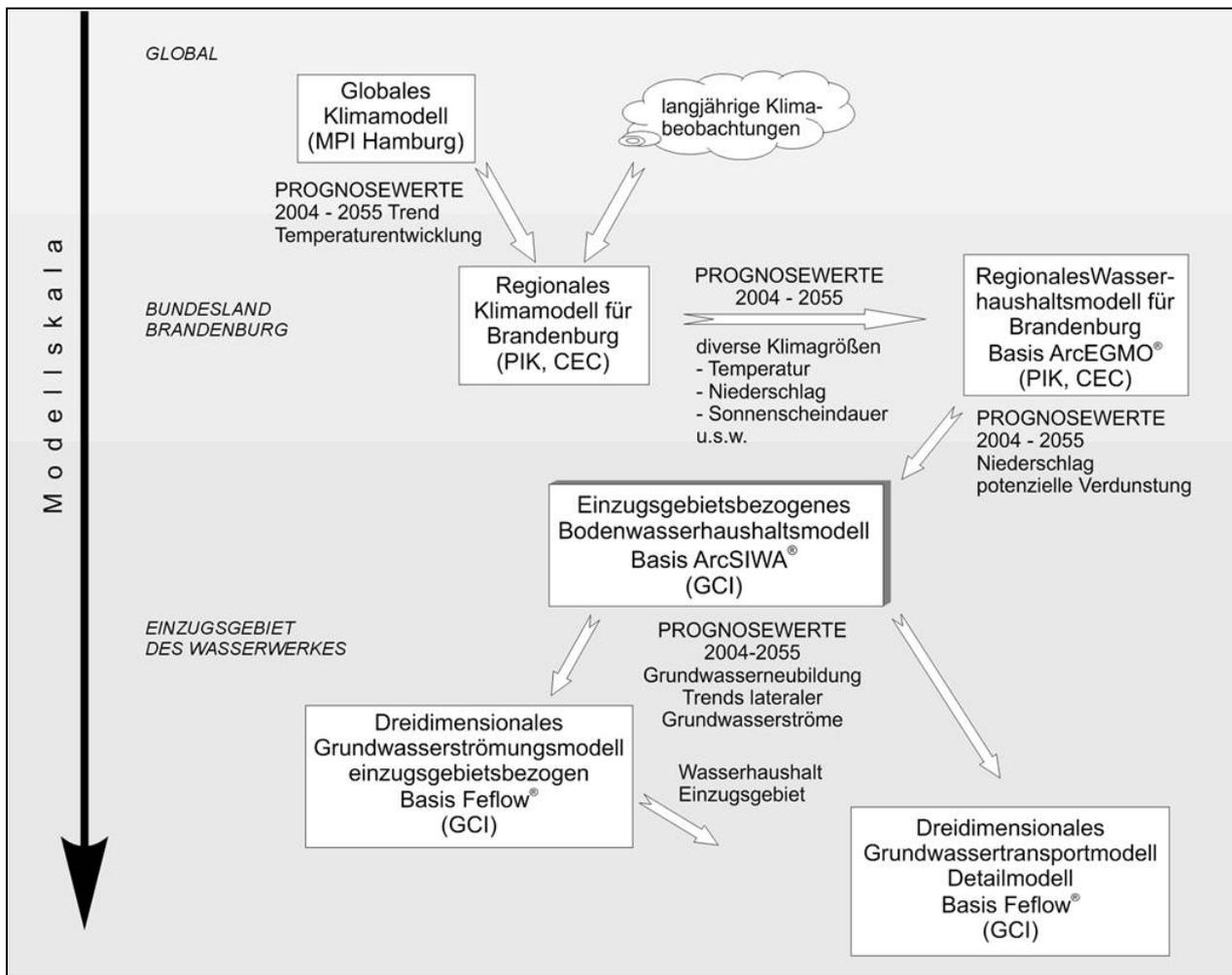


Abb. 3: Verwendetes Modellsystem für Prospektionen zur Entwicklung des Wasserhaushaltes unter dem Einfluss des Klimawandels.

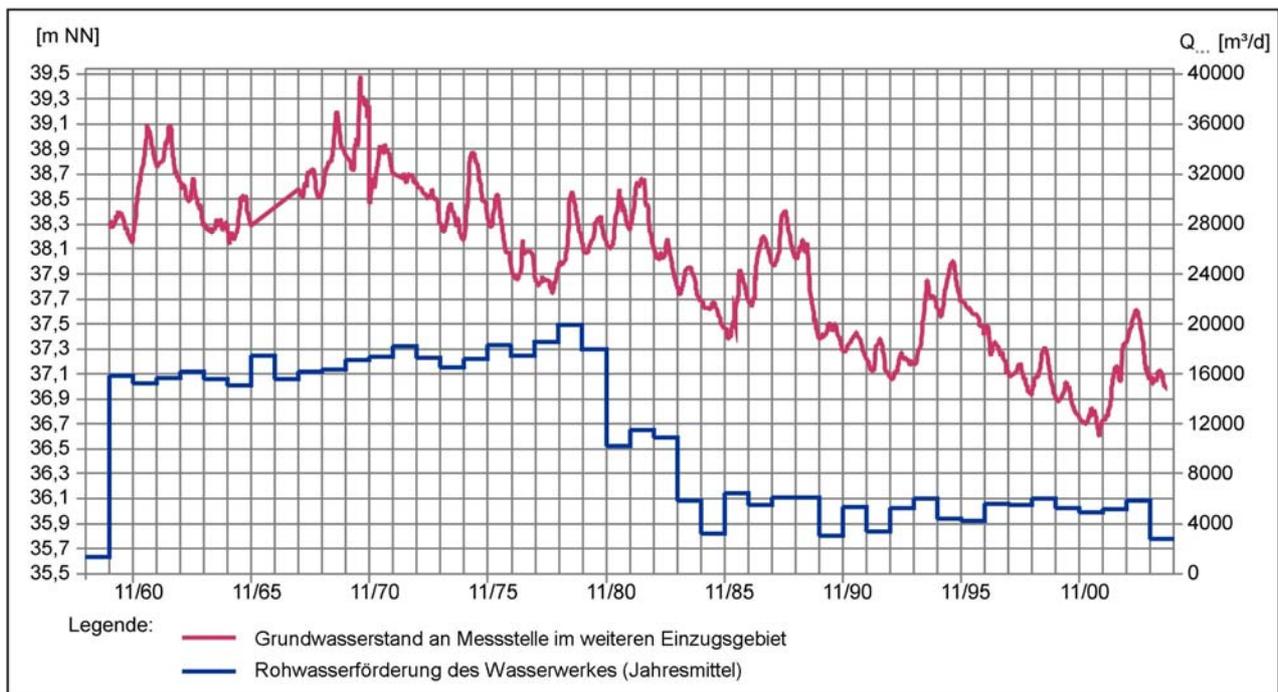
In einer zweiten Bearbeitungsphase werden die dreidimensionalen numerischen Grundwasserströmungsmodelle unter Verwendung der Simulationssoftware FEFLOW® (Diersch, 2009) aufgebaut und instationär kalibriert. Diese können für die Beantwortung spezieller Fragestellungen zu Transportmodellen ausgebaut werden. Da die Grundwasserneubildung eine wesentliche Randbedingung für die numerische Strömungsmodellierung bildet, ist diese vorab mit einem instationären Grundwasserneubildungsmodell in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung zu berechnen. Hierzu wurde das Bodenwasserhaushaltsmodell ArcSIWA® (Monnikhoff, 2001) eingesetzt. Die zeitliche Veränderlichkeit der berechneten Grundwasserneubildung leitet sich dabei aus der Berücksichtigung von auf Beobachtungen beruhenden Zeitreihen des Niederschlags und der potenziellen Verdunstung ab. Für in die Zukunft gerichtete Prospektionen zur Entwicklung des Wasserhaushaltes unter den Bedingungen des Klimawandels stehen derartige Datengrundlagen selbstredend nicht zu Verfügung. Hier musste die bei diesen Modellrechnungen anzunehmende Entwicklung der bestimmenden Klimagrößen Niederschlag und Verdunstung aus den Prospektionen globaler und regionaler Klimamodelle abgeleitet werden. Die Abbildung 3 zeigt das hierzu verwendete Modellsystem, mit dessen Hilfe in einem Downscaling aus im globalen Maßstab ermittelten Szenarien des globalen Temperatur-

anstiegs Untersuchungsergebnisse und Aussagen zur Entwicklung der Grundwasserdruckhöhen und der Versalzung im lokalen Maßstab ableitbar waren.

Die klimatologische Grundlage der Arbeiten zum Wasserwerk Leipziger Straße bildete der mit dem globalen Klimamodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie Hamburg (MPIMET) durchgeführte Berechnungslauf ECHAM4-OPYC3. Dieses Szenario war auch Grundlage der Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt des Landes Brandenburg durch das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) im Jahr 2003 (Gerstengarbe et al., 2003).

Mit dem regionalen Klimamodell STAR wurden in Verbindung mit dem für das Land Brandenburg auf Basis der Software ArcEGMO® (Pfützner, 2009) betriebenen Wasserhaushaltsmodell ausgehend von Temperaturprospektionen die Werte der relevanten Klimagrößen in Szenarien ihrer möglichen zeitlichen Entwicklung abgeleitet (Lahmer, 2005). Diese Daten fanden Eingang in das im Maßstab des Einzugsgebietes betriebene Grundwasserneubildungsmodell.

Beim Aufbau und der Kalibrierung der Modelle wurde das aus dem konzeptionellen Modell entwickelte Systemverständnis überprüft und weiterentwickelt.



**Abb. 4:** Entwicklung der Förderung des Wasserwerkes Leipziger Straße und des Grundwasserspiegels im südlich auf der Hochfläche gelegenen Einzugsgebiet.

Die dritte Bearbeitungsphase beinhaltet die Anwendung der Modelle für Szenarioanalysen, mit deren Hilfe unterschiedliche Bewirtschaftungsvarianten vergleichend untersucht werden können. Weiterhin lassen sich hiermit Spannweiten für die Wirkungen von nur unscharf prognostizierbaren externen Einflussgrößen wie Klimawandel und Entwicklung der DOC-Konzentration in der Nuthe ermitteln. Hierdurch wird der Rahmen für mittel- und langfristige Bewirtschaftungsplanungen gesteckt.

#### 4. Ergebnisse

Das in der Vergangenheit und Gegenwart verfügbare Grundwasserdargebot wurde unter Anwendung des instationären Grundwasserneubildungsmodells ermittelt. Zu dessen Plausibilitätsprüfung wurden Ganglinien gemessener Grundwasserstände herangezogen. Zur Ermittlung möglicher weiterer Beeinflussungen der Grundwasserstände wurden diese Ganglinien denen potenzieller Einflussgrößen gegenübergestellt. Die Abbildung 4 zeigt beispielsweise, dass der deutlich fallende Trend der Grundwasserstände im südlichen Einzugsgebiet des Wasserwerkes Leipziger Straße in keinem Zusammenhang steht mit der Entwicklung der Grundwasserförderung dieses Wasserwerkes.

Dagegen zeigte eine Gegenüberstellung der Grundwasserstandsganglinien mit dem Gang der kumulierten klimatischen Wasserbilanz ein hohes Korrelationsmaß. Generell sind im Untersuchungszeitraum 1975-2008 durchgängig tendenziell sinkende Wasserstände festzustellen, was für die Wirkung einer großräumig wirksamen Einflussgröße, wie Klimaveränderungen, spricht.

Diese Trends sind in den Hochflächen deutlich stärker ausgebildet (ca. 5 cm/a) als in den Flussniederungen (0-2 cm/a). Überdurchschnittlich sinkende Trends wurden mit ca. 15 cm/a für den östlichen Randbereich des Einzugsgebietes des Wasserwerkes Rehbrücke in der Teltow-Hochfläche festgestellt. Hier wirkt sich der Einfluss der Stilllegung der Rieselfelder südlich Berlins in der ersten Hälfte der 1990er Jahre aus. Dieser Einfluss auf den Trend konnte mit dem mathematischen Verfahren des Wiener Filters separiert werden, so dass danach auch hier der klimatisch verursachte Trend bestätigt werden konnte.

Zur Projektion der weiteren Entwicklung der Grundwasserstände wurden mit dem Grundwasserströmungsmodell Szenariountersuchungen durchgeführt. Berücksichtigt wurden mit dem in Abbildung 3 vorgestellten Modellsystem berechnete Szenarien zur Entwicklung der Grundwasserneubildung. Aus dem Szenarioensemble wurden ein die im Mittel zu erwartenden Verhältnisse repräsentierendes und ein sehr trockene Verhältnisse beschreibendes Szenario untersucht. Die Abbildung 5 zeigt für diese beiden Szenarien die durch die Modellierung als Projektion fortgeschriebene Entwicklung der Grundwasserstände an der schon Abbildung 4 zugrunde liegenden Grundwassermessstelle. Danach werden die Grundwasserstände dort bis zum Jahr 2055 je nach Szenario im Durchschnitt um weitere 1,3 m bis 1,6 m absinken. Die Modellrechnungen bestätigen auch deutlich den beobachteten Trend, wonach das Absinken des Grundwasserspiegels in den Hochflächenbereichen deutlicher ausgeprägt zu erwarten ist als in den Niederungsgebieten.

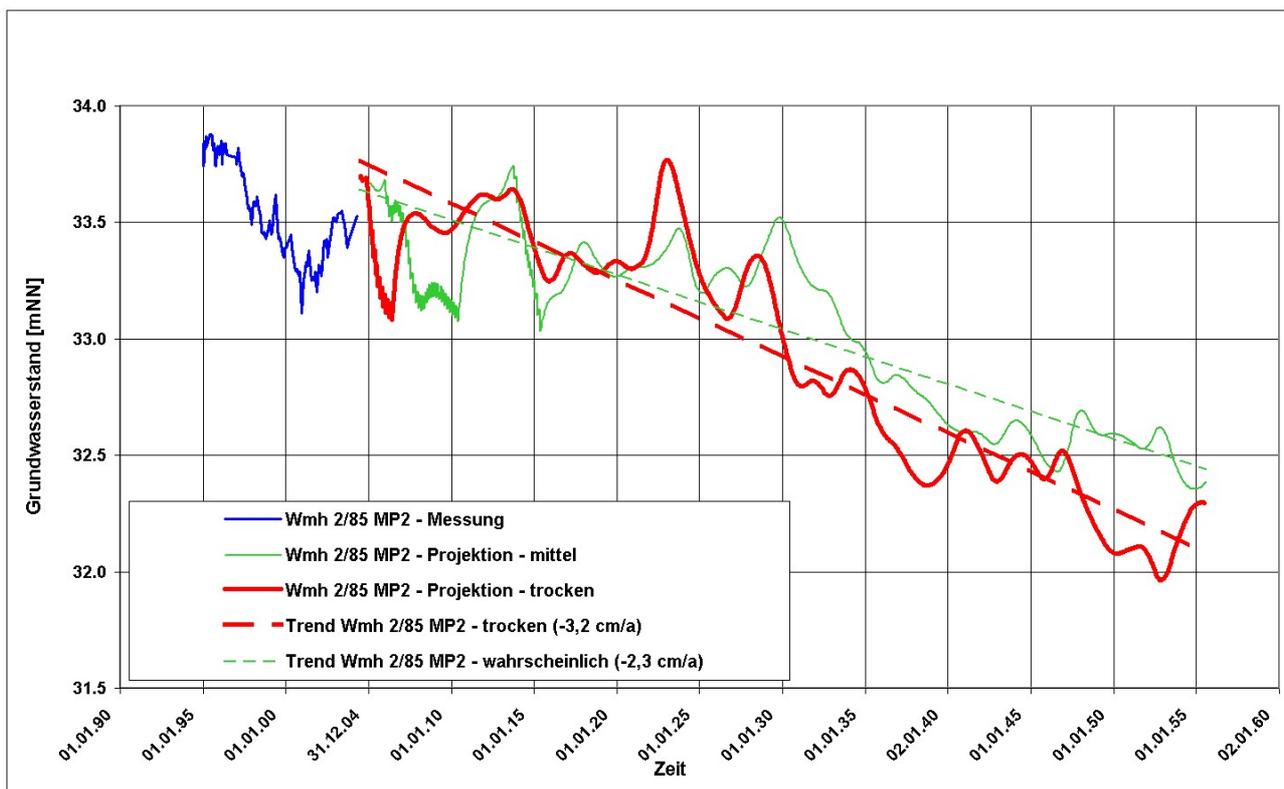


Abb. 5: Für verschiedenen Klimaszenarien an einer Messstelle im Hochflächenbereich projizierter Gang der Grundwasserstände.

Diese Entwicklungen werden nach derzeitiger Bewertung das nutzbare Dargebot des Wasserwerks Leipziger Straße nicht beschränken. Das Absinken der Grundwasserstände im fassungsnahen Bereich beeinträchtigt die technische Fassbarkeit des Grundwassers durch die Brunnen nicht. Die Modelluntersuchungen zeigen weiterhin, dass die Brunnen unter den beschriebenen Verhältnissen verstärkt Wasser aus tieferen Grundwasserleitern fördern können, das bisher über die Havelrinne in die Havel abströmt.

Die Bewirtschaftung der Wasserwerke unter notwendiger Berücksichtigung des realen oder potenziellen Salzwasserzutritts setzt die Kenntnis der Zutrittspfade des Salzwassers und deren Beeinflussbarkeit durch die Steuerung der Grundwasserentnahme voraus. Hierzu können Beobachtungen der Druckverhältnisse und Beschaffenheiten im Grundwasser an Grundwassermessstellen und im Förderstrom der Brunnen wertvolle Hinweise geben. Allerdings verbleibt hier aufgrund der Engräumigkeit der Salzwasseraufstiegsbahnen im Vergleich zur wirtschaftlich realisierbaren Messstellendichte eine erhebliche Unschärfe.

Die eher diffus ausgeprägten Salzwasserindikationen im Wasserwerk Rehbrücke erfordern eine Validierung der Interpretationen anhand von Beobachtungen möglichst unabhängiger Parameter. Hier wurden gute Ergebnisse erzielt, indem die Salinitätsbefunde an den Messstellen mit den Ergebnissen großflächiger Widerstandskartierungen aus den 1980er Jahren im Zusammenhang ausgewertet wurden.

Unverzichtbare Grundlage dieser Untersuchungen ist ein hochauflösendes und plausibles hydrogeologisches Strukturmodell, das die möglichen Migrationspfade auf-

zeichnet. Dies ist in gleichem Maße als Grundlage für die numerische Modellierung erforderlich. Der Einsatz der Grundwassermodelle zielt hier auf eine Überprüfung der Plausibilität der anhand der Beobachtungen entwickelten Vorstellungen zur Ausbildung der Migrationspfade des Tiefenwassers. Wird hier eine hinreichende Übereinstimmung festgestellt, kann unter Zuhilfenahme der Modelle die grundsätzliche Wirkung unterschiedlicher Bewirtschaftungsvarianten oder anderer Einflussgrößen auf den Salzwasserzutritt untersucht werden.

Bei diesen Untersuchungen werden die Grundwassermodelle in unterschiedlicher Komplexität eingesetzt. Im Bereich niedriger Salinität konnten im Vorfeld der Fassungen des Wasserwerks Rehbrücke bereits mit dreidimensionalen Bahnlinienberechnungen für verschiedene Bewirtschaftungsuntersuchungen wertvolle Ergebnisse erzielen. Die Modellierung der massiven Salzwasserzutritte zu den Wasserfassungen Wildpark und Leipziger Straße ist nur dichtegekoppelt in dreidimensionalen Transportmodellen möglich. Diese wurden zuvor für beide Wasserwerke anhand der Ganglinien der Rohwasserkonzentrationen von Chlorid über mehr als fünf Jahrzehnte Betriebszeit kalibriert.

Die mit diesen Modellen durchgeführten Variantenuntersuchungen konnten praxisverwertbare Hinweise geben, so dass derzeit durch eine geeignete Steuerung der Brunnen der Salzwasseranteil im Rohwasser in einem für die Wasseraufbereitung und Trinkwasserabgabe akzeptablen Rahmen gehalten wird.

Für das Wasserwerk Leipziger Straße wurden mit dem Transportmodell Untersuchungen im Sinne von Projektionen durchgeführt, die einen möglichen Einfluss des

Klimawandels auf den Salzwasserzutritt zu den Brunnen aufzeigen. Hintergrund ist der potenziell steigende Druckgradient, der sich zwischen prätertiären salzwasserspeisenden Horizonten und den von absinkenden Druckpotenzialen charakterisierten bewirtschafteten Grundwasserleitern ausbilden kann. Die Abbildung 6 zeigt Projektionen zu den Entwicklungen der Chloridkonzentrationen im Rohwasser der Fassung Werkgelände für zwei betrachtete Klimaszenarien.

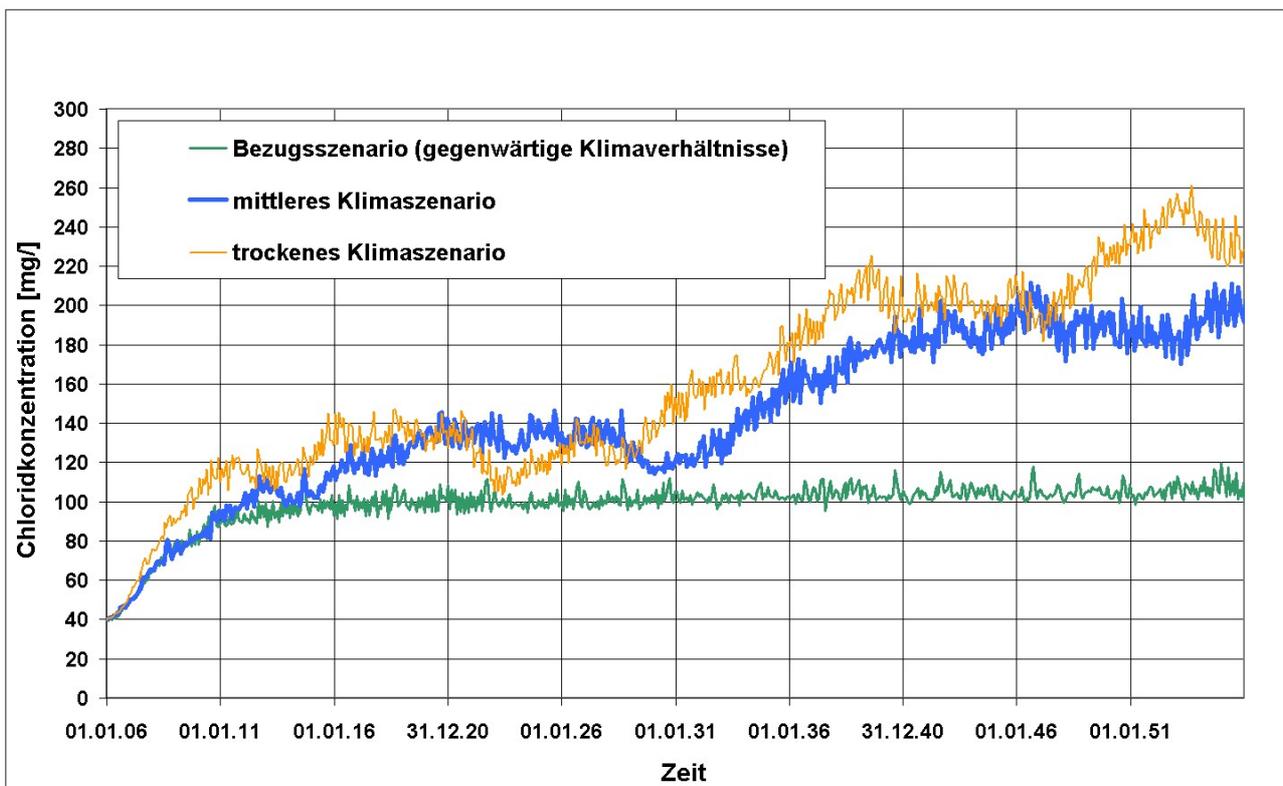
Gut erkennbar ist, dass in Abhängigkeit vom jeweils betrachteten Klimaszenario ein Anstieg der Chloridkonzentrationen um 80-150 % gegenüber dem Referenzszenario möglich ist. Obwohl die absoluten Werte nur gering belastbar sind, zeigen sie doch eindeutig eine Relevanz des Problems auf. Die Abbildung 7 zeigt die Ausbildung des Salzwasserzutritts aus der Havelrinne zu den Brunnen des Wasserwerks Leipziger Straße anhand der Isokonzentrationsfläche 500 mg/l Chlorid im Jahr 2055 für das Referenzszenario und die Abbildung 8 für das mittlere Klimaszenario.

Die in aufbereitungsrelevanten Größenordnungen ansteigenden DOC-Gehalte im Rohwasser des Wasserwerks Rehbrücke können ihre Ursache sowohl in den hohen DOC-Gehalten des Uferfiltrat liefernden Wassers von Nuthe und Stöcker als auch im Tiefenwasseraufstieg oder in der DOC-Speisung aus den verbreitet anstehenden Niedermooren haben. Die Untersuchungen zeigen für unterschiedliche Brunnengruppen auch die Dominanz

unterschiedlicher Quellen. Letztlich wird der DOC-Anstieg im Rohwasser jedoch hauptsächlich durch den Uferfiltratanteil bestimmt. Allerdings war eine Analyse des Beitrags der Niedermoore und einer benachbarten Maßnahme zur Regenerierung des Niedermoors anhand der vorhandenen Daten kaum möglich.

Durch Modellierungen konnte mit Bahnlinienuntersuchungen die Herkunft der an Messstellen und Brunnen beobachteten DOC-Konzentrationen besser beurteilt werden. Ebenfalls durch Bahnlinienuntersuchungen, aber auch durch Anwendung von Transportmodellierungen zur Markierung des Uferfiltrats konnten Bewirtschaftungsempfehlungen gegeben werden, die zu einer Verringerung des DOC-Gehaltes im Rohwasser führen können. Berücksichtigung in diesen Empfehlungen findet neben den Fördermengenverteilungen auch der jahreszeitliche Gang des Wasserstandes in den Oberflächengewässern.

Über Bahnlinien- und Fließzeitberechnungen wurden für unterschiedliche strategische Bewirtschaftungsszenarien des Wasserwerks Rehbrücke die Fassungen ermittelt, die von einem Zustrom rieselfeldbürtigen Wassers betroffen sein können. Weiterhin wurden die Fließzeiten ausgehend von den Rieselfeldern zu diesen Fassungen abgeschätzt. Diese liegen im Bereich zwischen 50 und mehr als 200 Jahren mit einem Median der Fließzeiten von ca. 100 Jahren.



**Abb. 6:** Unter den Bedingungen des Klimawandels abgeschätzte mögliche Entwicklungen der Chloridkonzentrationen im Rohwasser der Fassung Werkgelände (Wasserwerk Leipziger Straße).

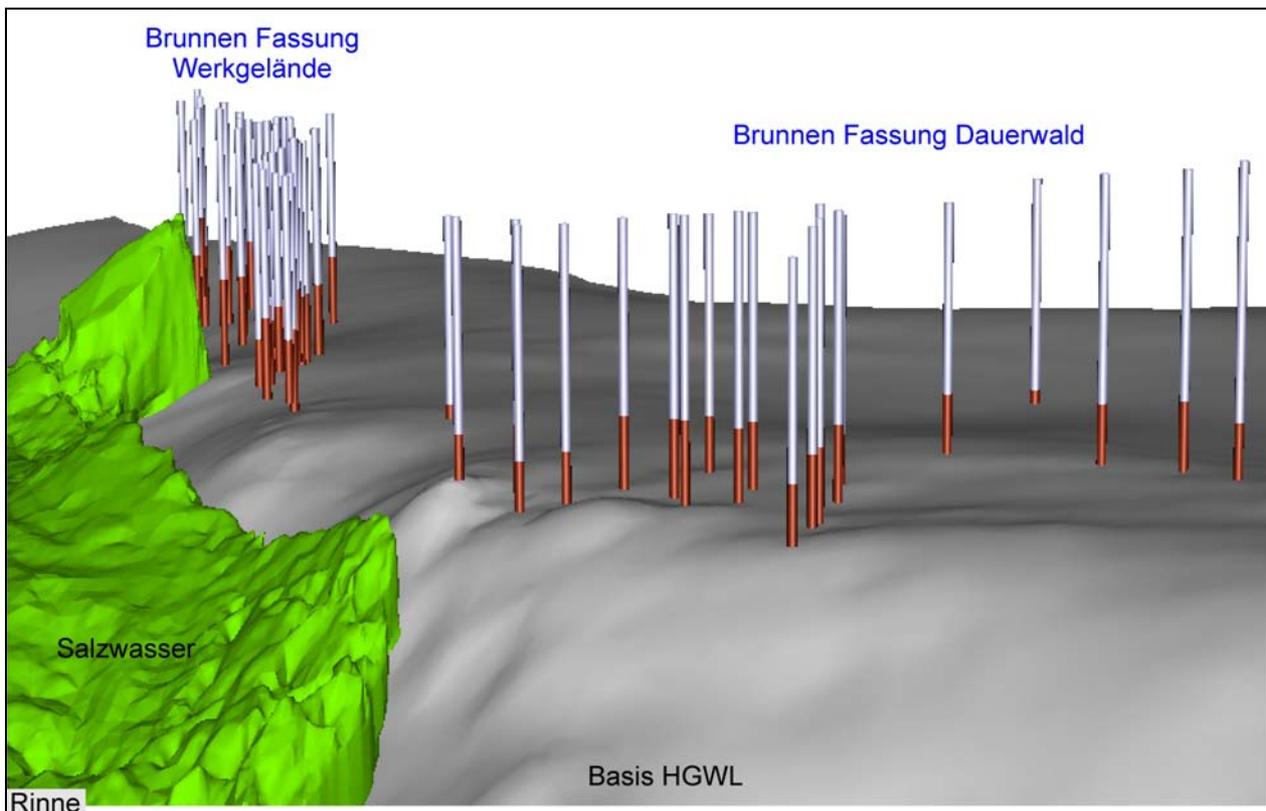


Abb. 7: 3D-Darstellung des Salzwasserzutritts zu den Brunnen im Jahr 2055 für das Referenzszenario.

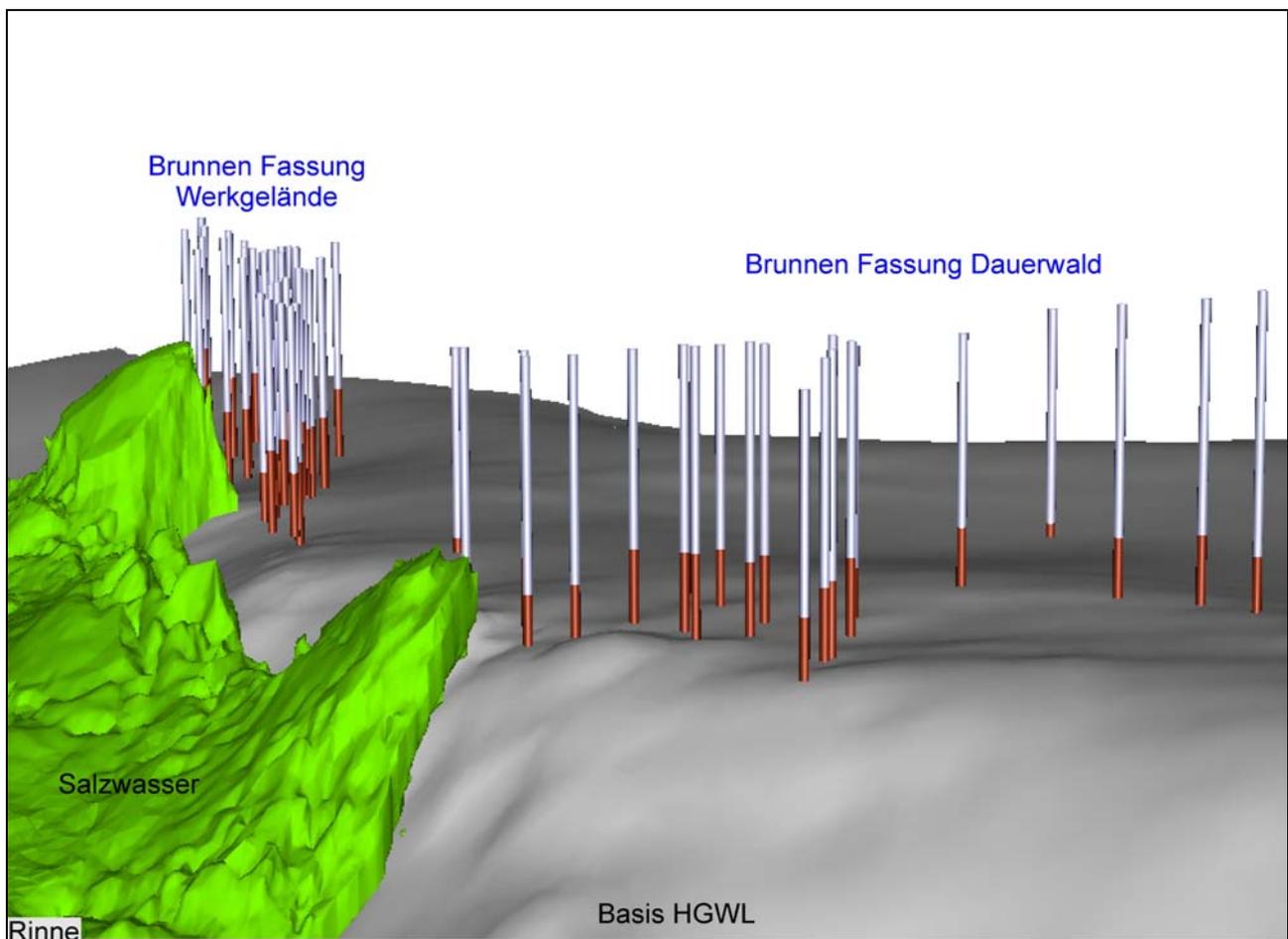


Abb. 8: 3D-Darstellung des Salzwasserzutritts zu den Brunnen im Jahr 2055 für das mittlere Klimaszenario.

## 5. Handlungsempfehlungen und Ausblick

Die wesentlichen Ergebnisse der Projekte bestehen in den durch diese Untersuchungen fundierten Handlungsempfehlungen für die EWP GmbH als Betreiberin der Wasserwerke.

Diese Empfehlungen wurden spezifisch für jedes Wasserwerk gegeben und beziehen sich zunächst auf die Verteilung der Rohwasserförderung auf einzelne Brunnengruppen. Hierdurch wird nachhaltig eine Begrenzung des Aufwandes für eine weiterhin naturnahe Aufbereitung und Sicherstellung der guten Trinkwasserqualität angestrebt.

An dieser Zielstellung orientieren sich auch die Empfehlungen zur weiteren Entwicklung des Grundwassermonitorings. Zum Mengenmonitoring wird insbesondere am Standort Rehbrücke empfohlen, neben einer erweiterten Überwachung der Oberflächenwasserstände auf die Sicherstellung einer angemessenen Überwachung der grundwasserseitigen Wirkungen von Renaturierungsmaßnahmen hinzuwirken.

Die Empfehlungen zum Beschaffenheitsmonitoring betreffen ausgehend von den beschriebenen Untersuchungen zu den Grundwasserströmungsverhältnissen im Wesentlichen das zur Überwachung der Salinitäts- und DOC-Entwicklung zu verwendende Messstellenensemble sowie die Häufigkeit der Beprobung dieser Messstellen.

Eine abschließende Empfehlung betrifft die Fortführung der Untersuchungen zu den möglichen Folgen des Klimawandels, wobei die Dynamik bei der Entwicklung der globalen und regionalen Klimamodelle zu berücksichtigen ist.

## 6. Literatur

- Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P.C., 2003. Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report 83. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.
- Diersch, H.-J., 2009. WASY Software Feflow® 5.4 User's Manual. DHI-WASY GmbH, Berlin.
- Monninkhoff, B., 2001. WASY Software ArcSIWA® 1.1 Benutzerhandbuch. WASY GmbH, Berlin.
- Nilfert, P., Schäfer, D., Zühlke, K., 2008. Auswirkungen der regionalen Klimaentwicklung auf die Wasserversorgung am Beispiel Wasserwerk Potsdam Leipziger Straße. GWF – Wasser/Abwasser 149, 948-955.
- Pfützner, B., 2009. ArcEGMO – Das hydrologische Modellierungssystem. <http://www.arcegmo.de/>. Zugriff: 29.06.2010.
- Lahmer, W., 2005. Bereitstellung von Klimazeitreihen zur Untersuchung der Grundwasser- und Salzwasserproblematik im Einzugsbereich des Wasserwerkes Potsdam – Leipziger Straße. Unveröffentlichte Unterlagen, BRUECKE-Potsdam GbR im Auftrag der GCI GmbH. Potsdam.

## Auswirkungen von Klimaänderungen und Energiepflanzenanbau auf den Wasser- und Stickstoffhaushalt im Parthe-Einzugsgebiet – Modellierung mit SWAT

Michael Strauch<sup>1</sup>, Antje Ullrich<sup>2</sup>, Carsten Lorz<sup>1</sup>, Martin Volk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Piener Straße 19, 01737 Tharandt, michael.strauch@tu-dresden.de; <sup>2</sup>UFZ – Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Department Landschaftsökologie, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

**Zusammenfassung:** Klima- und Bewirtschaftungsänderungen können den Wasser- und Stoffhaushalt von Flusseinzugsgebieten signifikant beeinflussen. Mithilfe des integrierten Modellsystems SWAT sollten für das landwirtschaftlich intensiv genutzte Einzugsgebiet der Parthe wichtige Wasserhaushaltskomponenten und Nitrat-N-Konzentrationen im Gewässer unter veränderten Rahmenbedingungen bilanziert werden. Zunächst wurde das Modell anhand von Zeitreihen gemessener Durchflüsse und Stoffkonzentrationen innerhalb der Referenzperiode von 1992 bis 2007 kalibriert. Für die Klimafolgenanalyse standen dann hochaufgelöste regionale Klimaszenarien aus dem Projekt WEREX IV zur Verfügung. Die Szenarien prognostizieren für das Parthegebiet im 21. Jh. einen mittleren Erwärmungstrend von 1,8-2,2 °C und in einzelnen Dekaden Niederschlagsrückgänge um bis zu 10 %. Den Ergebnissen der SWAT-Simulationen zufolge ist ab Mitte dieses Jahrhunderts mit einer langfristigen und starken Abnahme der Abflüsse zu rechnen (20-35 %). Die Simulationen mit veränderter Bewirtschaftung fanden getrennt von der Klimauntersuchung statt. Verschiedene Bioenergieoptionen – verstärkter Rapsanbau zur Biodieselerstellung und ein Zweikultur-Anbau zur Produktion von Biogas – wurden einem „Food-Szenario“ ohne Energiepflanzenanbau und der Ist-Simulation (aktuelle Bewirtschaftung) gegenübergestellt. Während die Ausweitung des Rapsanbaus zu deutlich höheren Nitrat-N-Konzentrationen im Fließgewässer führte, waren unter Zweikultur-Anbau geringere Nitrat-Austräge zu verzeichnen. Trotz erheblicher Unsicherheiten (z.B. Modellkette in der Klimafolgenanalyse) kann diese Studie anhand tendenzieller Aussagen einen Beitrag zu einem nachhaltigen Flussgebietsmanagement leisten.

### Impacts of climate change and energy crop production on the water and nitrogen balance of the River Parthe catchment – modelling with SWAT

**Abstract:** Changes in climatic conditions and agricultural management can significantly affect hydrology and nutrient dynamics in river basins. In order to predict the impact of such changes on the water balance and water quality in the intensively cropped Parthe catchment in Central Germany, regional climate scenarios obtained from the project WEREX IV, and scenarios for different options of energy crop production were implemented into the SWAT model. Given the scenario-based warming trend of up to 2.2 °C until the year 2100 and reductions in precipitation of up to 10 %, the model simulated significant decreases in average annual runoff (up to 35 %) for future decades compared to the reference period 1992-2007. The model results for the energy crop scenarios differ significantly for nitrate N concentrations in stream flow. While expanded cultivation of oilseed rape (scenario “Biodiesel”) caused very high concentrations in stream flow, the chosen two-culture system (scenario “Biogas”) resulted in lower nitrate outputs. Despite the uncertainties associated with the chain of models (GCM-RCM-SWAT) and the representation of energy crop systems, tendencies relevant to future watershed management can be derived from the results.

#### 1. Einführung

Regionale Klimaszenarien bilden eine grundlegende Voraussetzung für die Abschätzung von Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt (Jha et al., 2004; Diaz-Nieto und Wilby, 2005). Im Rahmen des Projektes WEREX IV wurden für das Einzugsgebiet der Parthe (Nordsachsen) hochaufgelöste regionale Klimaszenarien auf Basis des Globalmodells ECHAM5 generiert (Spekat et al., 2006). Die Szenarien prognostizieren für Nordsachsen bis zum Jahre 2100 einen mittleren Erwärmungstrend von bis zu 2,2 °C und für einzelne Dekaden Niederschlagsrückgänge um bis zu

10 % (Referenzzeitraum: 1992-2007). Mithilfe des integrierten hydrologischen Modellsystems SWAT (Arnold et al., 1998) sollen die Auswirkungen dieser Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt des Parthe-Einzugsgebietes (Gebietsverdunstung und -abfluss) abgeschätzt werden.

Im zweiten Teil der Studie wurden Simulationen mit verschiedenen Optionen und Intensitäten des Energiepflanzenanbaus durchgeführt und ausgewertet. In Deutschland stammen momentan (Stand 2009) rund 7 % des Endenergieverbrauchs aus Biomasse (BMU, 2010), wobei Energiepflanzen aus landwirtschaftlicher Produk-

tion den größten Beitrag liefern (FNR, 2008). Im Jahr 2009 wurden Rohstoffpflanzen auf annähernd 2 Mio. ha (17 Prozent der Ackerfläche) überwiegend für die energetische Nutzung angebaut – fünfmal mehr als im Jahr 1997 als die Anbaufläche noch 400.000 ha betrug (FNR, 2010).

Der aus klima- und energiepolitischen Gründen geförderte Anbau von Energiepflanzen wird allerdings auch kritisch diskutiert. Die Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion, die teilweise geringe Klimateffizienz (z.B. der Biokraftstoffe) sowie erhöhtes Nährstoff-Auswaschungspotenzial (z.B. unter Rapsanbau) sind oft genannte negative Effekte im Zusammenhang mit Energiepflanzenanbau (Sieling und Kage, 2006; UN, 2007; WBA, 2007; Crutzen et al., 2008).

Anhand von „fiktiven“ Szenarien sollen die Effekte von verschiedenen Bioenergie-Anbausystemen auf den Stoff- und Wasserhaushalt über Einzugsgebietsbilanzen am Beispiel der Parthe analysiert werden. Der aktuellen Anbausituation wurden folgende Szenarien gegenübergestellt: (1) ein Szenario „Biodiesel“ mit Ausdehnung der Raps-Anbaufläche, (2) ein Szenario „Biogas“ mit einer reinen Energiepflanzenfruchtfolge im Zweikultur-System zur Biogasproduktion (u.a. mit Mais) und (3) ein Szenario „Food“ mit Fruchtarten, die ausschließlich zur Nahrungsmittelproduktion genutzt werden.

## 2. Untersuchungsgebiet

Das Parthegebiet (Abb. 1) ist Teil des Einzugsgebietes der Weißen Elster im Flusssystem Elbe. Bis zum Pegel in Thekla umfasst es eine Fläche von ca. 305 km<sup>2</sup>. Als repräsentativer Ausschnitt aus der nordsächsischen Altpleistozänlandschaft ist es eher reliefarm mit Höhen zwischen 106 und 228 m NN (Keese, 1996). Es dominieren sandig-lehmige Böden aus Sandlöss über Geschiebemergel (teilweise über Kiesen, Sanden) mit mittlerem Wasserspeichervermögen (Haferkorn, 2000). Durchschnittlich fallen rund 670 mm Niederschlag im Jahr (Station Brandis 1982-2007, korrigiert).

Das Abflussregime der Parthe ist gekennzeichnet durch ausgeprägte Frühjahrs-hochwässer und sommerlichen Niedrigwasserstand, der aber regelmäßig durch Starkregenereignisse unterbrochen wird. Im Mittel beträgt der Durchfluss am Pegel Thekla 0,9 m<sup>3</sup>/s.

Das Parthegebiet wird überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Es dominiert der Anbau von Wintergetreide, Winterraps und Mais, der weitgehend intensiv betrieben wird. Über die Wasserwerke I und II in Naunhof werden außerdem die Grundwasservorräte des Gebietes stark in Anspruch genommen. Sie tragen maßgeblich zur Trinkwasserversorgung des Großraumes Leipzig bei.

## 3. Daten und Methoden

### 3.1 SWAT

Zur Bewertung der Effekte von Klimaänderungen und unterschiedlichen Bewirtschaftungsoptionen auf den Wasser- und Stickstoffhaushalt erfolgte die Anwendung des integrierten Modellsystems SWAT für das Einzugsgebiet der Parthe. Das prozessbasierte „Soil and Water Assessment Tool“ (SWAT) ermöglicht die Kopplung hydrologischer, biogeochemischer und ökologischer Prozesse auf Flusseinzugsgebietsebene (Arnold et al., 1998). Als Stärken von SWAT sind insbesondere die Möglichkeit einer diskreten Implementierung umfassender zeitlich variabler landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsdaten (Fruchtfolgen, Bodenbearbeitung, Düngung usw.) und dessen Anwendbarkeit im meso- bis makroskaligen Bereich hervorzuheben, wodurch es für die Untersuchung der Wirkung von Managementmaßnahmen auf Abflussgeschehen und Stoffaustrag gut geeignet ist (Wenk et al., 2008). Abbildung 2 zeigt schematisch alle wesentlichen Schritte der Modellanwendung in dieser Studie einschließlich der Quellen der verwendeten Daten.

Nach Implementierung der Eingangsdaten – u.a. zu Klima, Boden, Landnutzung, Topografie – wurde das Modell anhand gemessener Durchflüsse am Auslasspegel Thekla kalibriert (Simulationszeitraum 1992-1999) und anschließend validiert (Simulationszeitraum 2000-2007). Mit täglichen Messungen zur NO<sub>3</sub>-N-Konzentration am Pegel Thekla für den Zeitraum November 1999 bis August 2002 war auch für den Austrag von Nitrat-Stickstoff eine solide Kalibrierungsgrundlage gegeben, jedoch wurde hier auf die Validierung aufgrund der Kürze der Messreihe verzichtet. Die Vorhersagekraft des Modells ist nach erfolgter Kalibrierung anhand der statistischen Gütemaße Nash-Sutcliffe-Modelleffizienz NSE und Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> als gut bis akzeptabel einzustufen (Abb. 3).

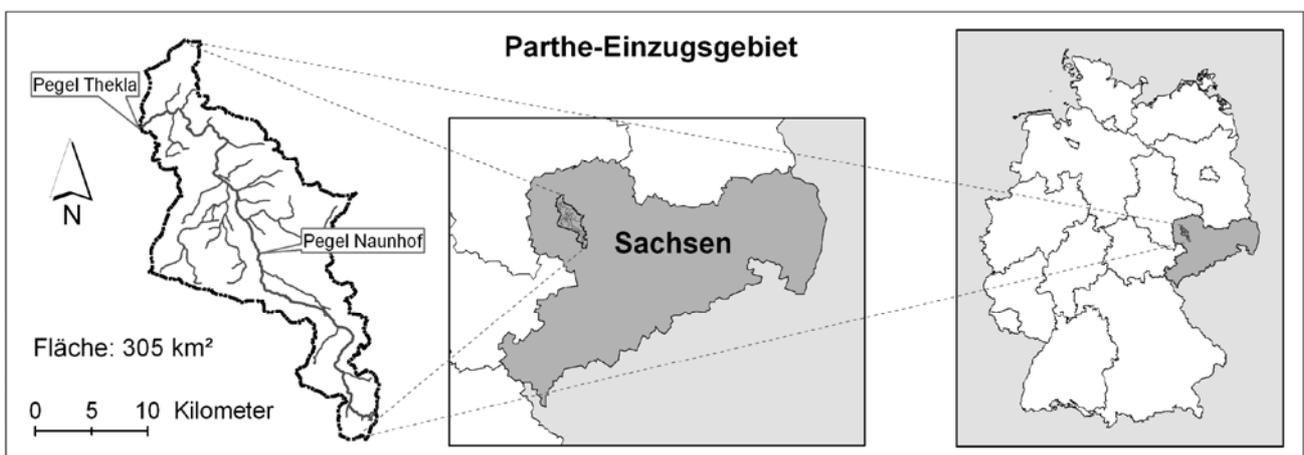


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes.

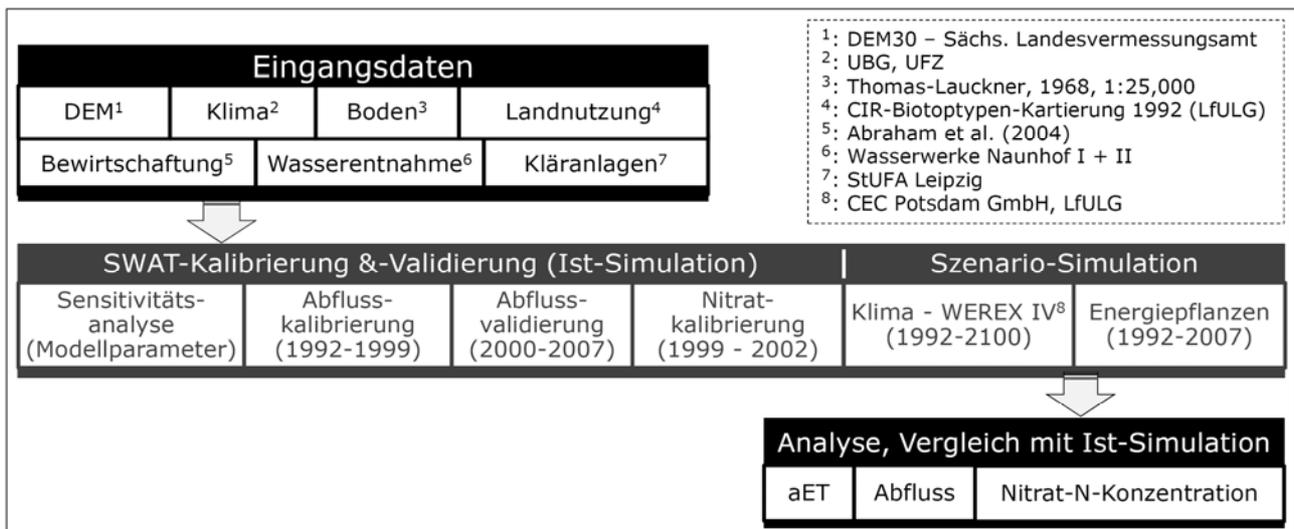


Abb. 2: Vorgehensweise und verwendete Daten für die Modellierung mit SWAT.

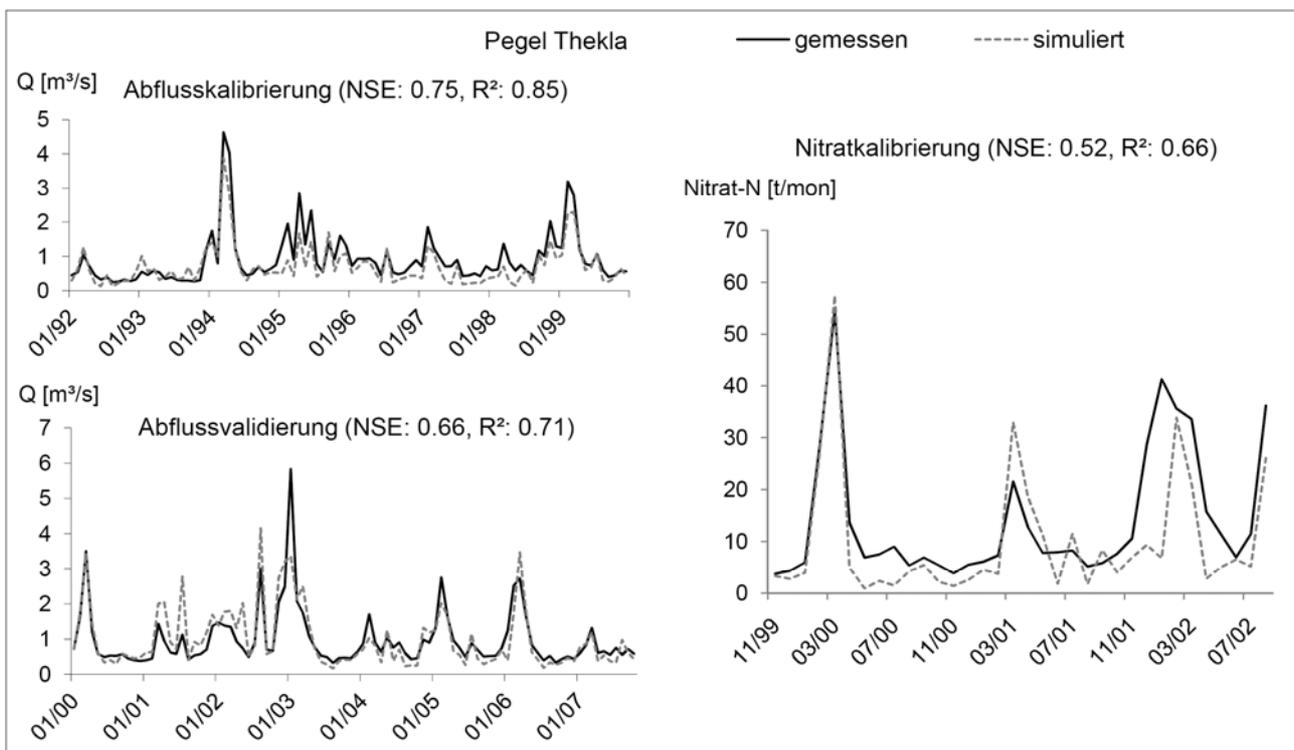


Abb. 3: Vergleich Modellsimulation und Messung (Pegel Thekla) nach Kalibrierung.

### 3.2 Klimaszenarien

Das kalibrierte und validierte Modell wurde schließlich als Prognosewerkzeug genutzt. Zur Abschätzung des Klimaimpakts sind hochaufgelöste regionale Klimaszenarien (Emissionsszenario-Grundlage A1B und B1) bis zum Jahr 2100 als meteorologischer Antrieb in SWAT genutzt worden. Die Szenarien sind Produkt eines statistischen Downscalings (WETTREG), welches auf das Globalmodell ECHAM 5 angewendet wurde (Projekt WEREX IV; vgl. Spekat et al., 2006). Bis auf den Klima-Input blieben alle Modellparameter (auch Landnutzung und Bewirtschaftung) in den Szenario-Simulationen unverändert. Die Szenario-Ergebnisse für die aktuelle Evapotranspiration und den Gebietsabfluss wurden je-

weils für die Perioden 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 und 2081-2100 gemittelt und mit den Mittelwerten der Referenzperiode 1992-2007 verglichen.

### 3.3 Energiepflanzen-Szenarien

Die Untersuchung zu den Effekten des Energiepflanzenanbaus erfolgte unabhängig von möglichen Klimaänderungen. Es wurde ebenso wenig das Ziel verfolgt, wahrscheinliche und konsistente Zukünfte für die Landnutzung und Bewirtschaftung abzubilden, bei der generell von einer weiteren Zunahme des Energiepflanzenanbaus auszugehen wäre (FNR, 2010). Vielmehr sollten spezifische Wirkungen ("impact analysis") von unterschiedlichen Optionen der landwirtschaftlichen Bioenergiepro-

duktion auf der Ebene von Einzugsgebieten ermittelt werden. Die dafür entwickelten Management-Szenarien sind der gegenwärtigen Anbausituation (Ist-Szenario) im Simulationszeitraum 1992-2007 gegenübergestellt worden. Tabelle 1 stellt die Szenarien kurz vor. Für eine detaillierte Beschreibung der Szenarien wird auf Strauch (2008) verwiesen.

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

##### 4.1 Klimaimpakt

Die Ergebnisse der Simulationen mit den WEREX-IV-Klimaszenarien A1B und B1 sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Tatsache, dass die Klimaszenarien bereits in der Referenzperiode 1992-2007 signifikante Abweichungen zum beobachteten Klima aufweisen, unterstreicht den Grad an Unsicherheit, der mit dieser Analyse verbunden ist. Sowohl die Jahrestemperatur als auch die jährliche Niederschlagssumme werden von den WEREX-Zeitreihen im Bezugszeitraum unterschätzt – im Mittel um ca. 0,5 °C bzw. 35 mm (entspricht ca. 5 % der gemessenen, korrigierten Niederschlagssumme). Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird dann ein Temperaturanstieg um ca. 1,8 °C (B1) bzw. 2,2 °C (A1B) vorausgesagt. Damit einhergehende steigende Verdunstungsverluste werden von SWAT jedoch nur für die Wintermonate berechnet. Für die Sommermonate ist eher ein gegenläufiger Trend zu verzeichnen. Neben einem ausgeprägten saisonalen Erwärmungstrend (Winter stärker betroffen als Sommer) liegt dies v.a. an den rückläufigen Niederschlagsmitteln, insbesondere im Sommer, so dass sich die sommerlichen Bodenwasserdefizite zunehmend verschärfen würden. Die Wasserverfügbarkeit im Parthegebiet wird sich nach den Modellsimulationen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts deutlich verringern, d.h. es ergeben sich Abflussrückgänge um bis zu 35 % gegenüber der Referenzperiode. Diese Tendenz wird auch

durch die Ergebnisse des vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Auftrag gegebenen Projektes KliWEP (Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Parthe-Einzugsgebiet) bestätigt, bei dem Wasserhaushalts-Simulationen ebenfalls mit den WEREX IV-Klimaszenarien jedoch innerhalb des gekoppelten Modellsystems WaSiM-ETH/PCGEOFIM (ohne Phänologiemodul) durchgeführt wurden (Pöhler et al., 2008). Dort beträgt der simulierte mittlere Abflussrückgang am Pegel Thekla (bis 2100) zwar nur 10 %, jedoch 50 % am Quelleinzugsgebiets-Pegel Großbardau.

##### 4.2 Effekte des Energiepflanzenanbaus

Die Resultate der Energiepflanzen-Szenarien sind in Abbildung 5 zusammengefasst. Hinsichtlich des mittleren Gebietsabflusses unterscheiden sich die Szenario-Ergebnisse nur schwach. Erst mit den Radikalszenarien (ausschließlich Raps bzw. ausschließlich Energiepflanzen-Fruchtfolge) sind deutlichere Abflussrückgänge bedingt durch höhere Verdunstungsverluste zu verzeichnen.

Vergleicht man dagegen die Simulationsergebnisse für die mittlere Nitrat-N-Konzentration (Pegel Thekla), sind signifikante Unterschiede zwischen den Szenarien feststellbar. So reagiert das Modell sehr sensibel auf die Ausweitung des Rapsanbaus. Die Steigerung von 20 % Raps (Ist-Simulation) auf 30 % (Biodiesel-a) hat eine Erhöhung der Konzentration von durchschnittlich 4,9 mg/l auf 5,8 mg/l zur Folge. Das Radikalszenario (Biodiesel-b) bestätigt den „Raps-Effekt“ sehr deutlich – mit durchschnittlich 18,9 mg Nitrat-N/l bei ausschließlichem Rapsanbau auf der verfügbaren Ackerfläche des Parthegebiets. Alle „rapsfreien“ Szenarien führen hingegen zu verringerten Nitrat-N-Konzentrationen.

**Tab. 1:** Beschreibung der Management-Szenarien.

| Szenario  | Erläuterung der Bewirtschaftung  |
|---|--|
| <i>Ist</i><br>(Abraham, 2004)                     | - 32 % Winterweizen, 20 % Raps, 20 % Wintergerste, 7 % Mais, ...<br>- fruchtartenspezifische Düngung und Bodenbearbeitung<br>- mittlere N-Düngung: 177,8 kg/ha/a   |
| <i>Food</i><br>(keine Energiepflanzen)            | - Raps aus Fruchtfolgen entfernt und teilweise ersetzt durch Nahrungsmittelkulturen unter Einhaltung von Fruchtfolgeregeln (Freyer, 2003)<br>- mittlere N-Düngung: 170.1 kg/ha/a   |
| <i>Biodiesel (a,b)</i><br>(Ausdehnung Raps-Anbau) | - a) Raps zu Fruchtfolgen hinzugefügt, so dass Rapsanteil 30 % beträgt<br>- b) ausschließlicher Rapsanbau (100 %)<br>- mittlere N-Düngung: a) 184.1 kg/ha/a bzw. b) 190 kg/ha/a  |
| <i>Biogas (a,b)</i><br>(Zweikultur-anbau)         | - reine Energie-Fruchtfolge (Karpenstein-Machan, 2005) mit 2 Ernten pro Jahr auf a) 30 % bzw. b) 100 % der Ackerfläche<br>- Winterkulturen: Winterroggen, Wintergerste, Triticale<br>- Sommerkulturen: Mais, Sonnenblume, Sorghum<br>- kein Raps (um Interferenzen in Impaktstudie zu vermeiden)<br>- Bodenbearbeitung vor Winterfrucht, Direktsaat der Sommerfrucht<br>- Gärrest als Dünger (in SWAT entsprechend parametrisiert)<br>- mittlere N-Düngung: a) 213.5 kg/ha/a bzw. b) 300 kg/ha/a |

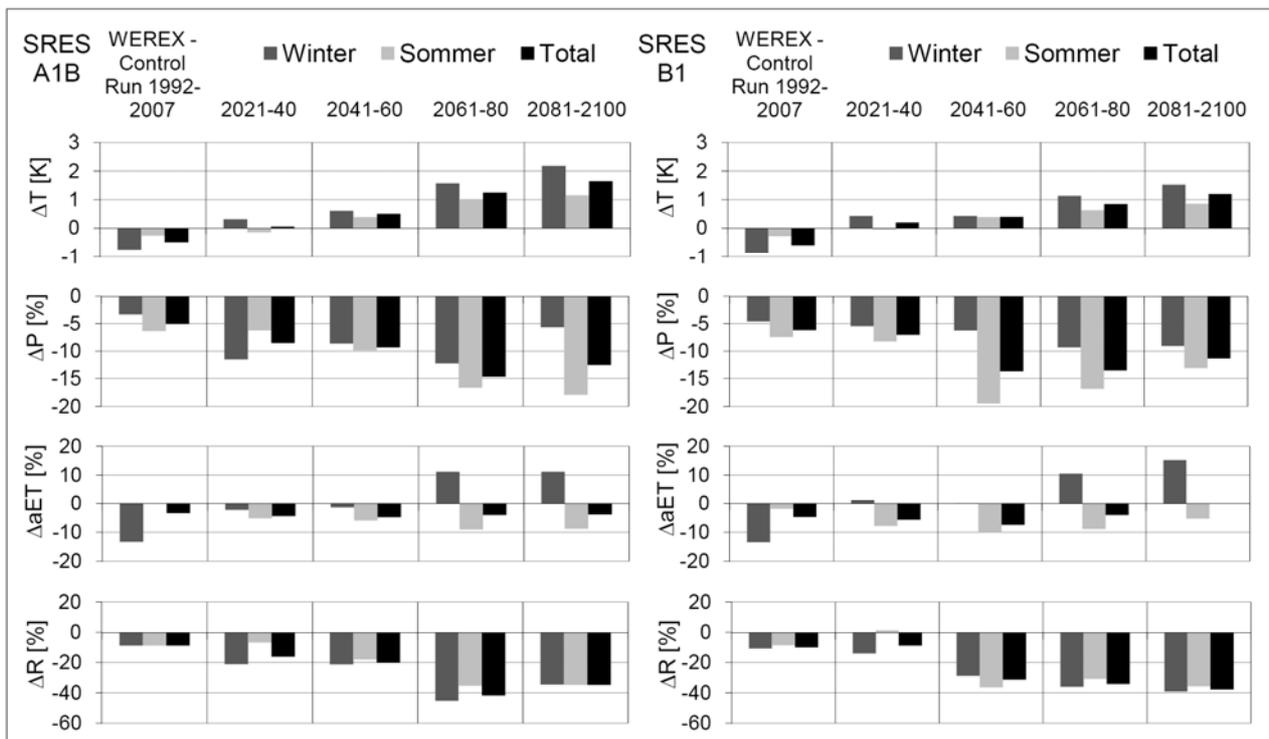


Abb. 4: Ergebnisse der Klimaszenarien und Szenario-Simulationen (T = Temperatur, P = Niederschlag; aET = aktuelle Evapotranspiration; R = Abfluss; Winter und Sommer entsprechen den hydrologischen Halbjahren, Nov.-Apr. und Mai-Okt.).

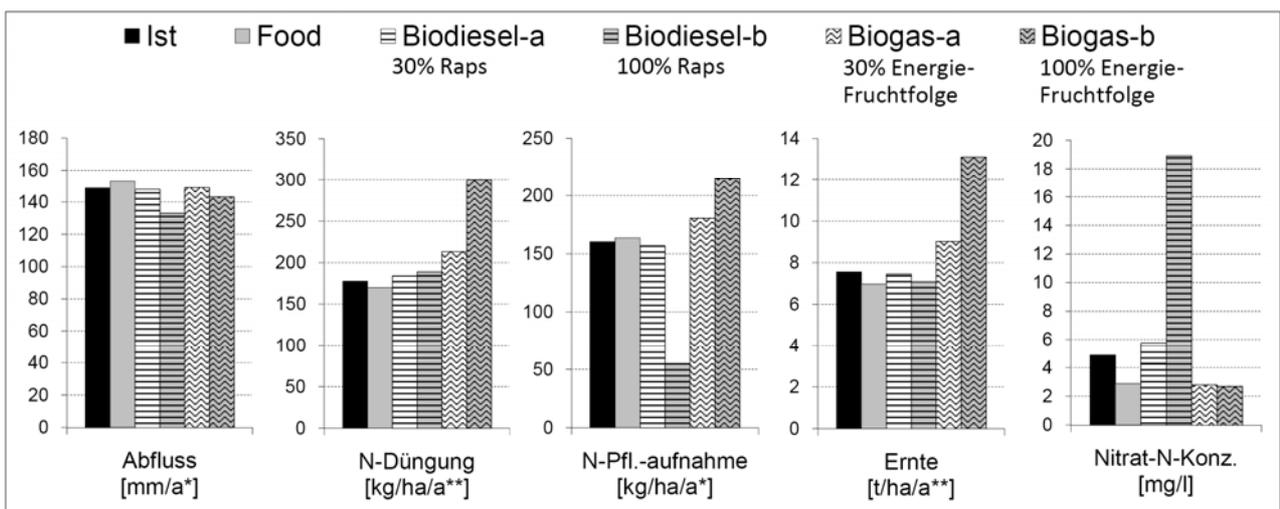


Abb. 5: Ergebnisse der Energiepflanzenzenarien (Mittelwerte für Simulationsperiode 1992–2007, \*bezogen auf Gesamt-Einzugsgebiet, \*\*bezogen auf Ackerfläche, die Nitrat-N-Konzentration beziehen sich auf den Pegel Thekla).

Der „Raps-Effekt“ im Modell ist nicht durch eine erhöhte Düngergabe zu erklären (vgl. N-Düngung in Abb. 5), sondern fast vollständig durch die Stickstoffaufnahme der Pflanze, welche in SWAT – durch den pflanzenspezifischen Parameter „N\_UPTAKE“ gesteuert – für Raps vergleichsweise gering simuliert wird. Raps stellt zum einen hohe Anforderungen an die Stickstoffdüngung, ist zum anderen jedoch eine relativ ineffiziente Kulturpflanze, da ein ungünstiges Verhältnis der Stickstoffaufnahme des Samens im Verhältnis zur gesamten Pflanze vorliegt. Dies kann zu hohen N-Verlusten durch Auswaschung während des Winters und folglich zu Grundwasserbelastungen führen (Müller et al., 2006; Sieling und Kage, 2006; Henke et al., 2009). Die Modellsimulationen sind daher plausibel. Die intensiv gedüngte Energiepflanzen-

Fruchtfolge im Biogas-Szenario (300 kg N/ha/a) nimmt dagegen im Mittel viel größere Mengen an Stickstoff auf, die dann mit dem ebenso höheren Ernteertrag wieder abgeführt werden. Den Modellergebnissen zufolge verringern sich bei dieser Form der Biogasproduktion die Nitrat-N-Konzentrationen im Fließgewässer sogar, wie auch im Szenario ohne Energiepflanzen (Szenario Food).

## 5. Schlussfolgerung

Das integrierte Modellsystem SWAT konnte zur Quantifizierung der Effekte von Klima- und Bewirtschaftungsänderungen auf den Wasser- und Stickstoffhaushalt eingesetzt werden. Jedoch sind mit den Modellergebnissen auch erhebliche Unsicherheiten verbunden. Dies trifft vor

allein auf die Klimaimpaktstudie zu, bei der sich Unsicherheiten innerhalb der verwendeten Modellkette fort-pflanzen – ausgehend von den IPCC-Emissions-Szenarien (A1B und B1) über das Globale Klimamodell (ECHAM5) und den davon abgeleiteten regionalen Klimamaszenarien (WEREX IV) bis hin zum mesoskaligen hydrologischen Modell (SWAT). Aber auch die Untersuchung von bewirtschaftungsbedingten Effekten basiert auf einer Reihe nicht zu vernachlässigender Unsicherheitsquellen im Zusammenhang mit Eingangsdaten, Modellparametern und schließlich der generellen Modellstruktur.

Laut den Modellsimulationen wird sich der Druck auf die Wasserressourcen des Parthegebietes im Laufe des 21. Jahrhunderts aufgrund von Klimaänderungen (höhere Verdunstung, geringere Niederschlagssummen) verstärken – mit Abflussrückgängen am Pegel Thekla um über 30 %. Zukünftige Flussgebietsmanagement-Konzepte sollten diese Prognosen berücksichtigen, um langfristig die Wasserverfügbarkeit im Parthegebiet zu sichern.

Die Analyse verschiedener Bewirtschaftungsoptionen zum Energiepflanzenanbau zeigte, dass der simulierte Stickstoffhaushalt sehr sensitiv auf Veränderungen des Rapsanteils in der Landwirtschaft reagiert. Die Modell-ergebnisse unterstreichen daher die aktuelle Kritik an der Nutzung von Raps als Energiepflanze auch aus gewässerökologischen Gesichtspunkten. Die Einhaltung bzw. das Erreichen der von der EG-Wasserrahmenrichtlinie geforderten Qualitätsnormen (wie z. B. der Richtwert für Nitrat-N in Gewässerkörpern) könnte in vielen Regionen durch die politisch geförderte Ausweitung des Rapsanbaus zur Biodieselherstellung stark erschwert werden. Dagegen ist den Modellrechnungen zufolge ein Energiepflanzenanbau in Form des Zweikultur-Systems zur Biogasproduktion – wie es von Scheffer (1998) vorgeschlagen wird – bezüglich potenzieller stickstoffbedingter Gewässerbelastungen positiv zu bewerten.

## 6. Literatur

Abraham, J., 2004. Ableitung naturraumtypischer Fruchtfolgen aus agrarstatistischen Eckdaten im Einzugsgebiet der Weißen Elster. Unveröffentlichter Bericht im Rahmen des Projektes „Entscheidungshilfen für ein integriertes Flussgebietsmanagement – Konfliktbewertung und Lösungsansätze am Beispiel der Weißen Elster“.

Arnold, J.G., Srinivasan, R.S., Muttiah, J.R., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment, Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34, 73-89.

BMU – Bundesministerium für Umwelt, 2010. Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2009: Grafiken und Tabellen: Stand März 2010. [http://erneuerbar.info/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee\\_in\\_deutschland\\_graf\\_tab\\_2009.pdf](http://erneuerbar.info/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_deutschland_graf_tab_2009.pdf). Zugriff: 16.03.2010.

Crutzen P.J., Mosier, A.R., Smith, K.A., Winiwarter W., 2008. N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8, 389-395.

Diaz-Nieto, J., Wilby, R.L., 2005. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Climate Change* 69, 245-268.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2008. Wege zum Bioenergiedorf: Leitfaden für eine eigenständige

Wärme- und Stromversorgung auf Basis von Biomasse im ländlichen Raum. <http://www.fnr.de>. Zugriff: 18.7.2008.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2010. Entwicklung der Anbaufläche nachwachsender Rohstoffe. <http://www.nachwachsenderohstoffe.de/service/daten-und-fakten/anbau.html>. Zugriff: 16.3.2010.

Freyer, B., 2003. Fruchtfolgen. Ulmer, Stuttgart.

Haferkorn, U., 2000. Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebietes – Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis. Dissertation, Universität Göttingen.

Henke, J., Sieling, K., Sauer mann, W., Kage, H., 2009. Analysing soil and canopy factors affecting optimum nitrogen fertilization rates of oilseed rape (*Brassica napus*). *Journal of Agricultural Science* 147, 1-8.

Jha, M., Pan, Z., Takle, E.S., Gu, R., 2004. Impacts of climate change on streamflow in the upper Mississippi River basin: A regional climate model perspective. *Journal of Geophysical Research* 109, D09105.

Karpenstein-Machan, M., 2005. Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber. DLG, Frankfurt/M.

Keese, U., 1996. Charakteristik des Einzugsgebietes der Parthe. In: Meißner, R., Guhr, H., Krönert, R. (Hrsg.): Zusammenstellung der vom UFZ sowie Partnereinrichtungen durchgeführten Untersuchungen in repräsentativen Kleineinzugsgebieten der Elbe. UFZ-Bericht 21, 19-25. Leipzig.

Müller, K., Böttcher, U., Kage, H., 2006. Modellierung von Wachstum und Entwicklung von Winterraps. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 18, 246-247.

Pöhler, H., Müller, M., Jasper, K., Scherzer, J., 2008. KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Parthe-Einzugsgebiet – Abschlussbericht. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Nr. 13-0345.42/312.

Scheffer, K., 1998. Ein produktives, umweltschonendes Acker-nutzungskonzept zur Bereitstellung von Energie und Wertstoffen aus der Vielfalt der Kulturpflanzen – Ansätze für neue Wege. *Beiträge der Akademie für Natur- und Umweltschutz Baden-Württemberg*, 27, 65-80.

Sieling, K., Kage, H., 2006. N balance as an indicator of N leaching in an oilseed rape-winter wheat-winter barley rotation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 115, 261-269.

Spekat, A., Enke, W., Kreienkamp, F., 2006. Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für den Freistaat Sachsen und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die Szenarios B1, A1B und A2 (WEREX IV). Endbericht: Szenarios für das Einzugsgebiet der Parthe. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.

Strauch, M., 2008. Auswirkungen von Klimaänderungen und Energiepflanzenanbau auf den Wasser- und Stickstoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.

UN – United Nations, 2007. Sustainable Bioenergy – A Framework for Decision Makers. <http://esa.un.org/un-energy/pdf/susdev.Biofuels.FAO.pdf>. Zugriff: 18.7.2008.

WBA – Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2007. Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik. <http://www.bmelv.de/cae/servlet/contentblob/382594/publicationFile/23149/GutachtenWBA.pdf>. Zugriff: 18.3.2010.

Wenk, G., Rode, M., Volk, M., Schmidt, G., Liersch, S., 2008. Modellierung von Wasserhaushalt und Stickstofftransport mit dem integrierten Modell SWAT. In: Klauer, B., Rode, M., Petry, D. (Hrsg.): Flussgebietsmanagement nach EG-Wasserrahmenrichtlinie. S. 17-42. Metropolis, Marburg.

## Die Wasserhaushaltssituation der letzten 40 Jahre im Raum der Neustrelitzer Kleinseenplatte (Süd-Mecklenburg)

Peter Stüve

Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Neubrandenburg (StALU), Gewässerkundlicher Landesmessdienst, Helmut-Just-Straße 2-3, 17036 Neubrandenburg, peter.stueve@stalums.mv-regierung.de

**Zusammenfassung:** Die Neustrelitzer Kleinseenplatte liegt im Bereich der glazialen Serie des Pommerschen Stadiums. Untersucht wurden Wasserstände von Grund- und Oberflächengewässern östlich von Neustrelitz und im Ostteil des Müritz-Nationalparks bis nahe der Feldberger Seenlandschaft. Das grundwasserbeeinflusste Gebiet ist von Binneneinzugsgebieten und glazialen Seen geprägt. In zunehmender Weise werden besonders seit 20 Jahren Wasserspiegelrückgänge im Untersuchungsraum beobachtet. Da eine größere Anzahl von Messstellen vorhanden ist, können genaue Aussagen über Wasserhaushaltsänderungen mit Hilfe der bis zu 50-jährigen Zeitreihen getätigt werden. Im südmecklenburgischen Raum gibt es seit mehr als 100 Jahren Niederschlags- und Temperaturreihen, deren Werte in die Untersuchung aufgenommen wurden. Die Entwicklung der Lufttemperaturen von Neustrelitz seit 1900 ergibt eine Zunahme von 0,8 K. Die langjährige Niederschlagsentwicklung zeigt kein einheitliches Bild, neigt aber zu trockeneren Sommern. Neben nassen und trockenen Jahren gibt es in asymmetrischer Folge warme und kühle Jahre. Dabei ist der Wasserspiegel von Oberflächen- und Grundwasser überwiegend rückläufig. Ein genaueres Bild ergibt die Betrachtung von Winter- und Sommerhalbjahren. Allein der Niederschlag liefert allerdings noch keinen schlüssigen Hinweis auf die Ursache der Abnahme der Wasserspiegel. Legt man die Berechnung der klimatischen Wasserbilanz zugrunde, so korrelieren die Grund- und Oberflächenwasserspiegel mit der kumulativen klimatischen Wasserbilanz sehr gut.

### The water budget situation of the last 40 years in the „Neustrelitzer Kleinseenplatte“, southern Mecklenburg

**Abstract:** The “Neustrelitzer Kleinseenplatte” comprises different glacial landscapes of the Weichselian Pomeranian stage (till plains, terminal moraines, outwash plains). The study focused on water levels of ground and surface water to the east of Neustrelitz and in the eastern part of the Müritz National Park up to the vicinity of the Feldberg Lakeland. The area that is influenced by groundwater is characterised by inland drainage areas and glacial lakes. For 20 years, declines in water levels have been increasingly observed in the study area. Based on data from a large number of monitoring stations and the time series that cover a 50-year period, precise statements about the water budget situation can be made. In southern Mecklenburg, precipitation and temperature series have been recorded for more than a century and these values have also been included in this study. The development of Neustrelitz’s air temperatures since 1900 shows an increase of 0.8 K. The long-term precipitation development does not show a uniform picture, but has a tendency to drier summers. In addition to wet and dry years, there are warm and cool years in asymmetric order. The water level of surface and ground water is mainly declining. A more precise picture is shown by observing winter and summer half-years. Yet the decrease in water levels cannot be explained by changes in precipitation alone. Calculations based on the climatic water balance show there is a very close correlation between the ground and surface water levels and the cumulative water balance.

### 1. Untersuchungsgebiet

Das Gebiet der Mecklenburger Kleinseenplatte wird hydrologisch vom Gewässerkundlichen Landesmessdienst des StALU Neubrandenburg betreut. Untersucht wurden Oberflächen- und Grundwasserbeobachtungsstellen im Bereich der glazialen Serie des Pommerschen Stadiums, hauptsächlich östlich von Neustrelitz und im Ostteil des Müritz Nationalparks bis nahe der Feldberger Seenlandschaft (Abb. 1). Das grundwasserbeeinflusste Gebiet ist von Binneneinzugsgebieten und glazialen Seen geprägt. Das Gebiet wird zum größten Teil von den oberirdischen Einzugsgebieten der Tollense nach Norden und der Havel nach Süden hin entwässert.

Erste hydrologische Einrichtungen und damit Messreihen des oberirdischen Gewässernetzes entstanden um 1955. Der Großteil des Messnetzes wurde dann zwischen 1960 und 1970 in Betrieb genommen. Der älteste Fließgewässerpegel befindet sich seit 1955 in Klempenow an der Tollense, deren Einzugsgebiet sich über 1403 km<sup>2</sup> von Möllenhagen im Westen bis nördlich der Feldberger Seen erstreckt.

Um den hydrologischen Zustand der Gewässer auch als Grundlage für die Betrachtung von Ökosystemen heranzuziehen, wurden Sondermessstellen eingerichtet, von denen einige als See- und Grundwasserpegel in und um den Müritz-Nationalpark liegen. Diese Notwendigkeit

entstand einerseits durch die Etablierung des Nationalparks, andererseits wegen der ungewöhnlichen Wasserspiegelabnahmen seit 1989/90.

## 2. Daten, Methoden und Ergebnisse

Besonders während der letzten 20 Jahre werden in zunehmender Weise Wasserspiegelnrückgänge im Raum der Neustrelitzer Kleinseenplatte beobachtet (StALU, ohne Jahr). Die längste Datenreihe liegt mit 49 Jahren am Pegel Klempenow / Tollense, vor. In Abbildung 2 ist unschwer zu ersehen, dass die mittleren Durchflüsse eine abnehmende Tendenz haben. Besonders die letzten Sommerhalbjahre ab 1989, mit Ausnahme von 2007, liegen bereits fast ausschließlich unter dem berechneten Grenzwert von  $MQ = 4,33 \text{ m}^3/\text{s}$  (graue Linie). Somit kann zumindest für die letzten 20 Jahre über eine geringere Wasserführung während der Sommermonate diskutiert werden.

Abgesehen von den nassen Perioden zwischen 1966 und 1971, 1979 und 1982, gab es später nur noch 1994 und

2002 zwei nasse Einzeljahre. Die Vermutung, dass eine höhere Wasserführung auf hohen Niederschlag zurückzuführen ist, bestätigt sich nur in den Jahren 1968, 1981 und in den Winterhalbjahren 2002 und 2008. Alle anderen Halbjahre mit überdurchschnittlichen Niederschlägen haben nur geringen oder keinen Einfluss auf das Abflussgeschehen (So. 1978, So. 1993, Wi. 2000, So. 2001, So. 2007). Zwischen trockenen Halbjahren und geringen Abflüssen findet allerdings eine viel höhere Übereinstimmung statt.

Im südmecklenburgischen Raum existieren seit mehr als 100 Jahren Niederschlagsstationen, deren Werte zur weiteren Vertiefung und Ursachenfindung der Wasserhaushaltssituation in die Untersuchung aufgenommen wurden (Abb. 3). Die Niederschlagsreihen von Neustrelitz, Rehberg, Carpin und Neubrandenburg werden den internationalen Anforderungen gerecht, wurden allerdings untereinander auf Ihre Plausibilität geprüft.

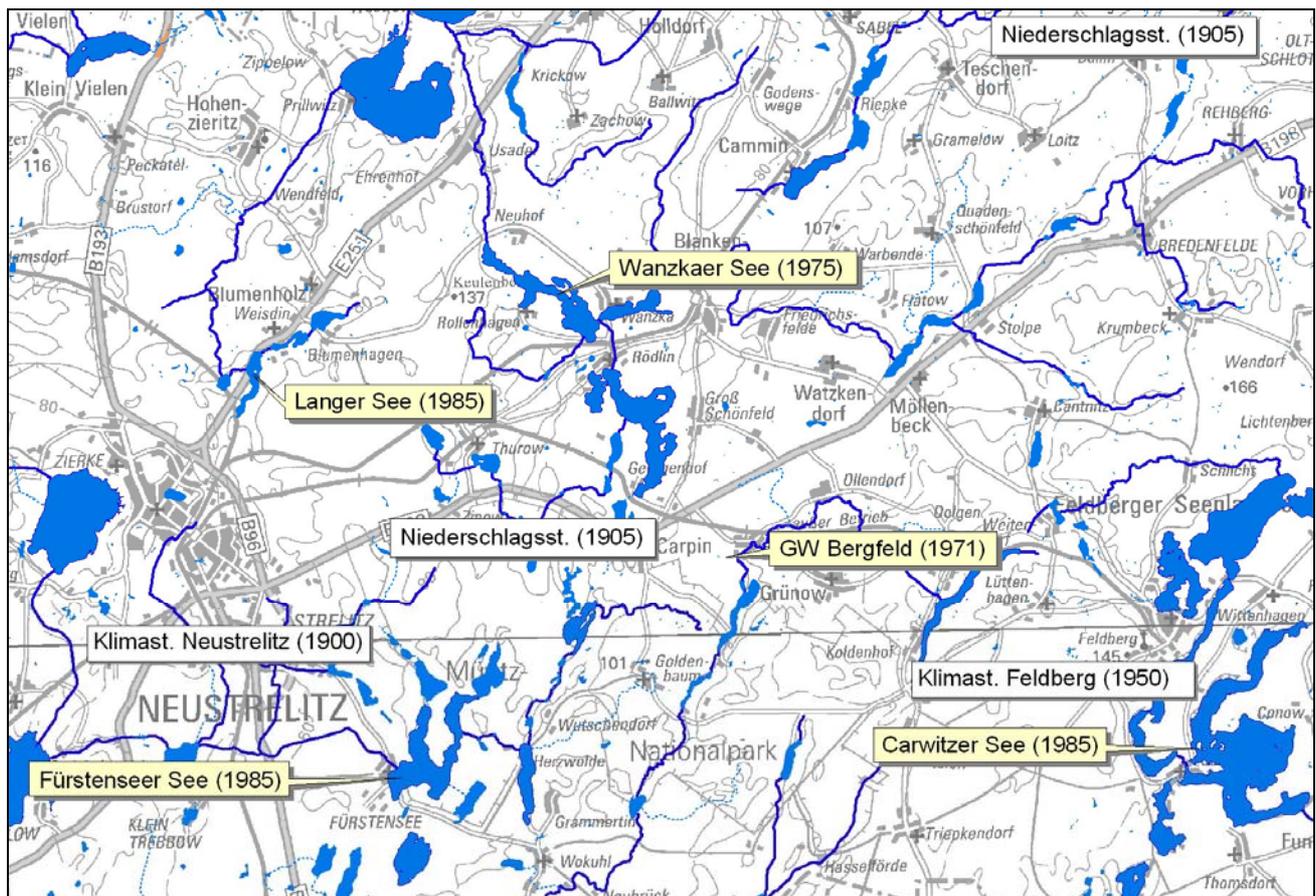
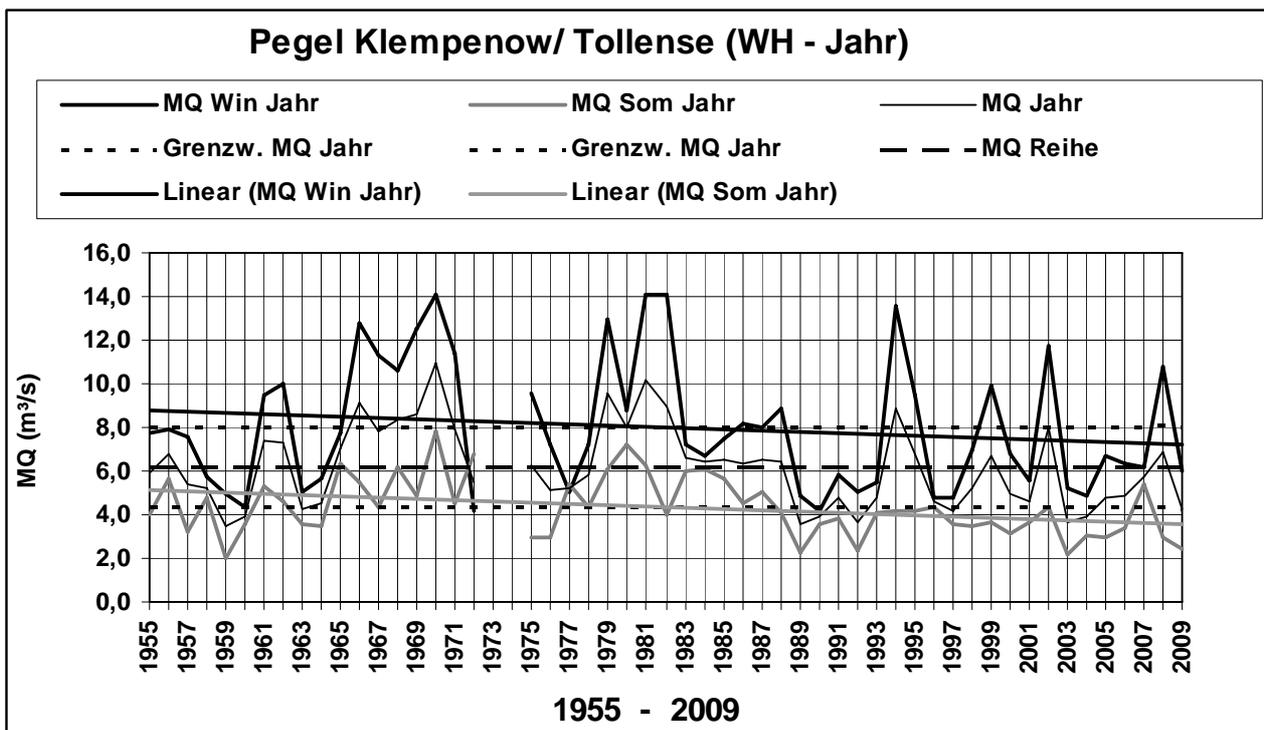
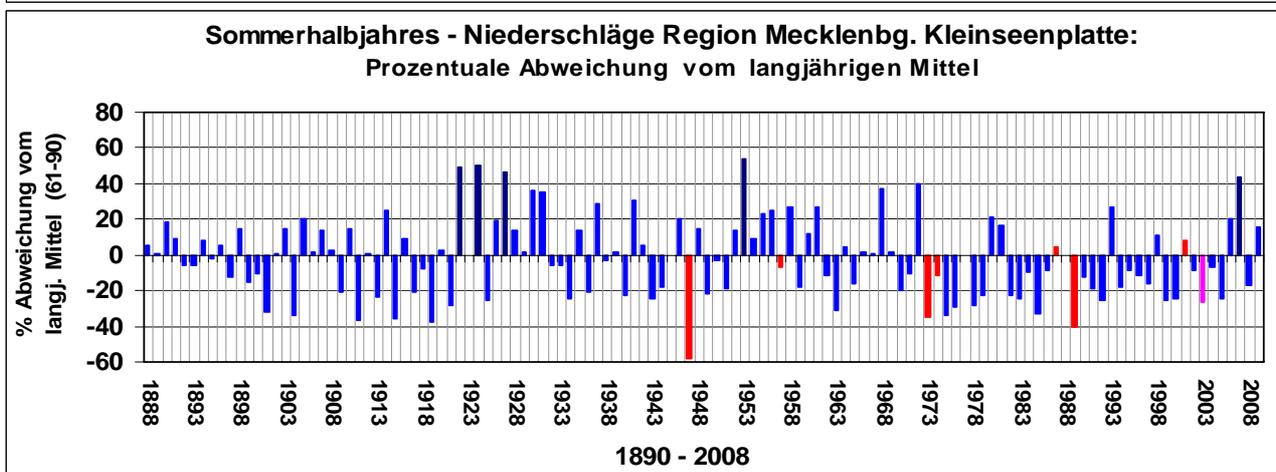
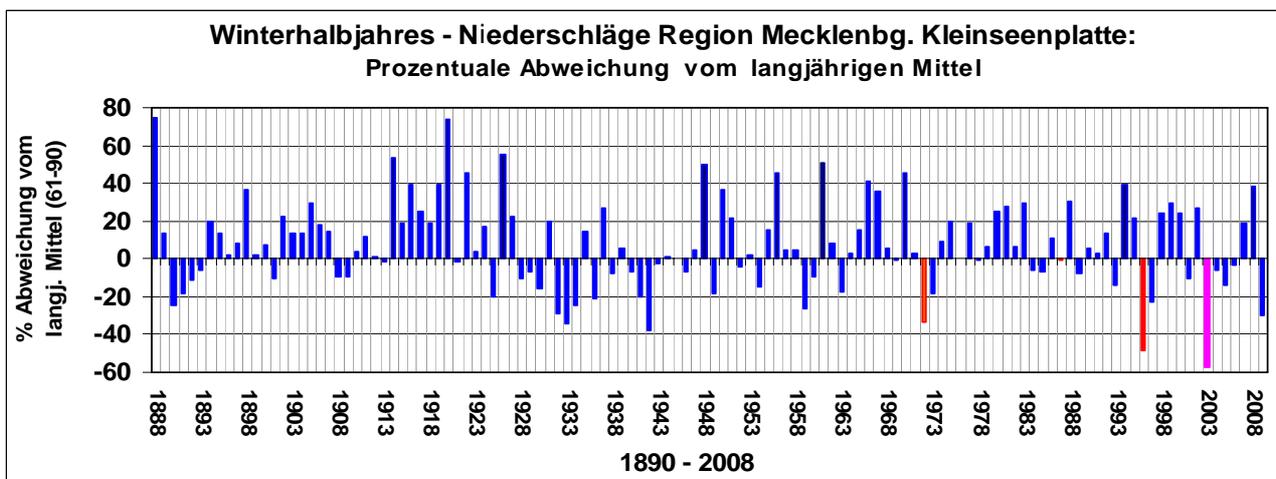


Abb. 1: Verfügbares Datenmaterial im Bereich der Kleinseenplatte zwischen Neustrelitz und Feldberg.



**Abb. 2:** Entwicklung der mittleren Durchflüsse (MQ) nach Winter- und Sommerhalbjahren im Wasserhaushaltsjahr (WH) am Pegel Klempenow/Tollense.



**Abb. 3:** Abweichungen der Winter und Sommerniederschläge der Neustrelitzer Kleinseenplatte (Wasserhaushaltsjahre).

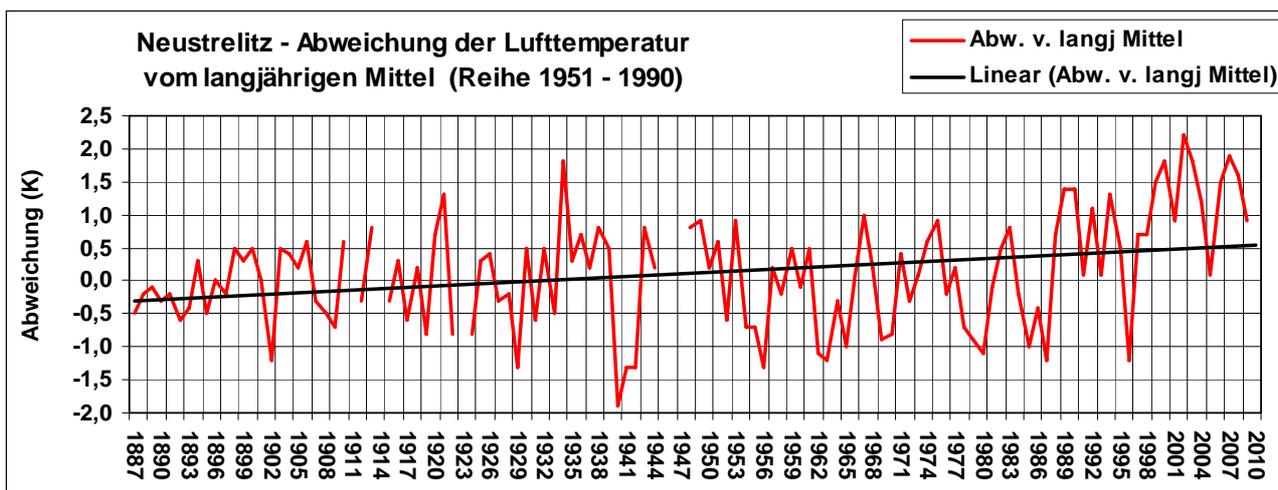


Abb. 4: Abweichung der mittleren monatlichen Lufttemperatur an der Station Neustrelitz.

An der prozentualen Abweichung der Niederschläge vom langjährigen Mittel (Reihe 1961-90) und der Aufteilung in Winter- und Sommerhalbjahre lassen sich Unterschiede zwischen Feucht- und Trockenperioden leichter erkennen. Überdurchschnittliche Niederschläge ereigneten sich in den Zeiträumen 1914 bis 1927, wobei noch die Jahre 1928, 1930 und 1931 mit hohen Sommerniederschlägen folgten. Der sich anschließende Zeitraum bis zum Ende des 2. Weltkrieges war eher durch Trockenheit, besonders während der Wintermonate gekennzeichnet. Die Jahre 1953 bis 1968 waren wiederum durch übernormale Winterniederschläge und vereinzelt auch nasse Sommer (1953, 1958, 1963, 1968) geprägt. Ab dem Jahre 1973 entwickeln sich tendenziell die Winterniederschläge hin zu einem feuchteren und die Sommerniederschläge zu einem trockeneren Stadium. Trockene Winter finden allerdings auch statt, so die Halbjahre 1996, 1997, 2003, 2008 und 2009. Zu nasse Sommer sind seltener und als solche können nur die Halbjahre 1993 und 2007 herangezogen werden.

Zusammenfassend gab es in der Vergangenheit einen stetigen Wechsel zwischen trockenen und nassen Wasserhaushaltsjahren, auch noch nach dem Trockenjahr 1947. Zwischen den Trockenjahren 1973, 1989 und 2003 fehlten die ausgleichenden nassen Jahre, insbesondere, wenn ein trockenes Winterhalbjahr stattfand. Somit entstand von Jahr zu Jahr ein leichtes Niederschlagsdefizit.

Allein der Niederschlag liefert allerdings noch keinen schlüssigen Hinweis auf die Ursache der Abnahme der Wasserspiegel. Zusammen mit den Niederschlagsdaten ist die Lufttemperatur die einheitlichste und längste Datenreihe in der Region. Weitere meteorologische Parameter sind lückenhaft oder müssen noch einer Prüfung unterzogen werden. Die Lufttemperaturen der Wetterstationen Neustrelitz und Neubrandenburg seit der Aufzeichnung im Jahre 1900 ergeben eine Zunahme um 0,8 K

(Abb. 4). Die Zunahme der Zahl der Jahre mit einer positiven Abweichung von über 1,2 K hat seit den letzten 10 Jahren überdurchschnittlich zugenommen.

Die Abbildung 5 zeigt die mittleren monatlichen Niedrigwasserstände (NW) des Langen Sees bei Weisdin und des Großen Fürstenseer Sees. NW bezieht sich auf die Reihe von 1985 bis 2004. Diese unregulierten glazialen Rinnenseen liegen hauptsächlich in Sanderflächen. Sie sind in hohem Maße vom Grundwasserhaushalt abhängig. Diese beiden Seen stehen beispielhaft für viele Seen in der weiteren Region, so zeigt z.B. der Drewitzer See bei Alt Schwerin ein ähnliches Verhalten.

Das extreme Trockenjahr 1989 bewirkte eine rapide Abnahme der Wasserspiegel bis 1992, am Langen See um 60 cm und am Fürstenseer See um 150 cm. Eine weitere kontinuierliche Abnahme der Wasserspiegel fand ab Sommer 2002 bis Frühjahr 2007 statt. Der April 2007, hier war über 6 Wochen in der Region kein Niederschlag zu verzeichnen, kennzeichnet den aktuellen Pegel-Tiefpunkt nahezu aller Seen. Auch die Niederschlagsdefizite von 2008 und 2009 bewirkten wiederum ein Absinken der Wasserstände.

Die Abbildung 5 zeigt außerdem, dass sich diese Seen bereits im niedrigen Bereich bewegen und ab August 2004 sogar NW unterschreiten. Als möglicher Einflussparameter wurde in der Grafik die prozentuale Abweichung vom langjährigen Niederschlagsmittel der Stationen Neustrelitz abgebildet. Der Faktor Niederschlag ist nicht allein verantwortlich für die Wasserspiegelschwankungen, da einzelne Monate in der Regel noch keine Änderungen verursachen. Zusammenfassend lässt sich auch ohne Berücksichtigung von Grundwasserständen ein gewisser Zusammenhang zwischen Niederschlag und Wasserständen dieser unregulierten Rinnenseen herstellen.

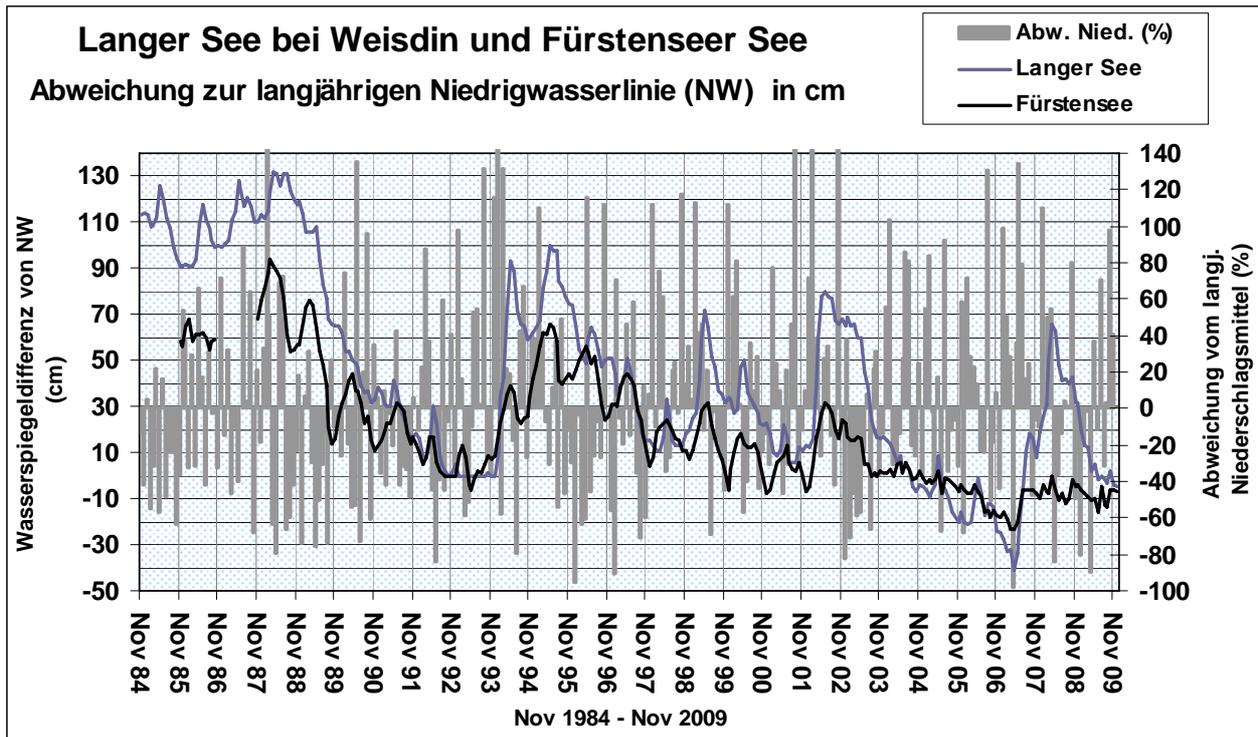


Abb. 5: Entwicklung der monatlichen Niedrigwasserstände von Fürstenseer See und Langer See bei Weisdin.

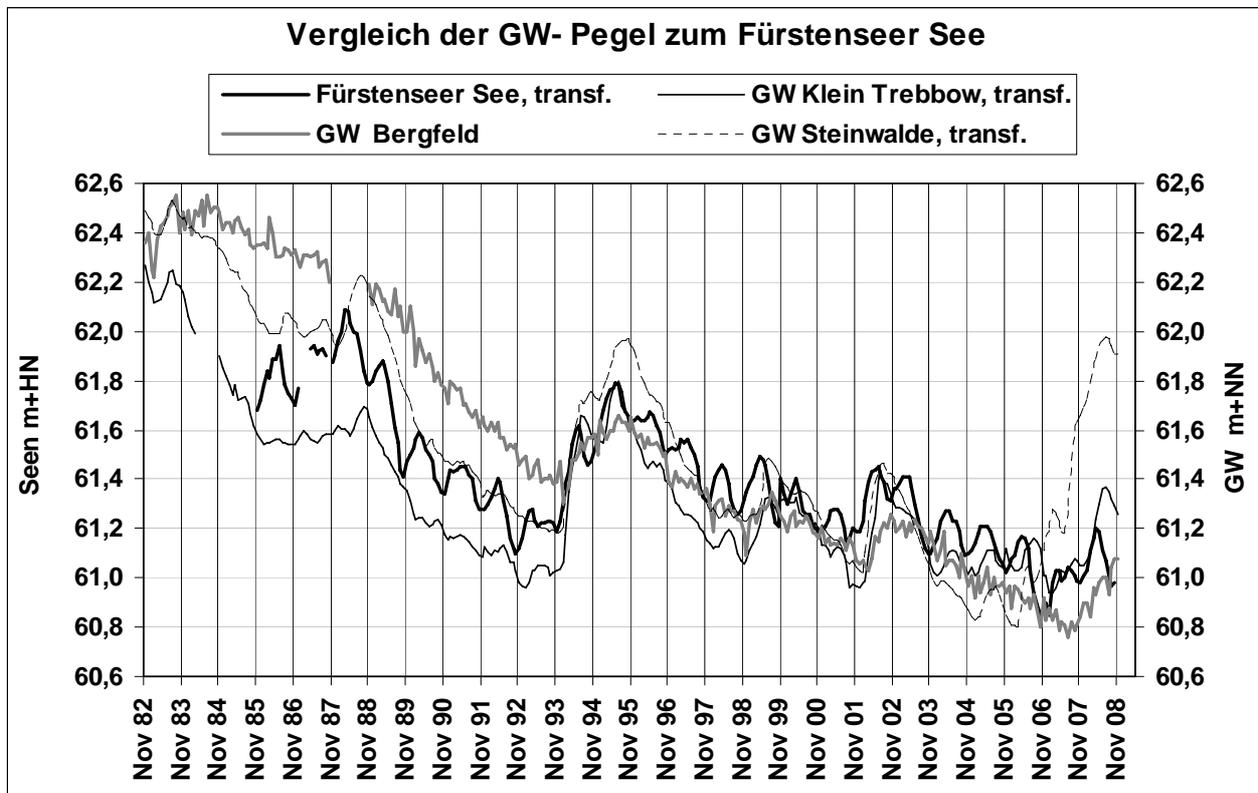


Abb. 6: See- und Grundwasserspiegelabnahme im Bereich Fürstenseer See.

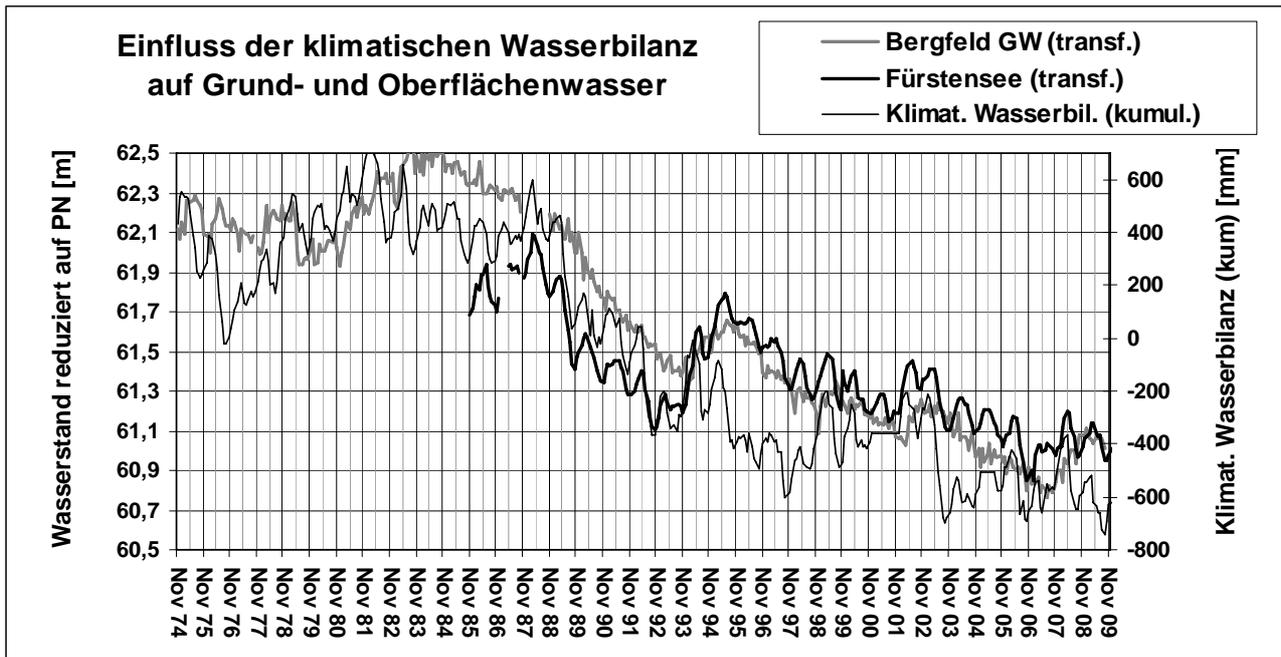


Abb. 7: Einfluss der klimatischen Wasserbilanz auf Grund- und Oberflächenwasser.

Der direkte Zusammenhang der Pegel zwischen Grundwasserleiter und glazialen Rinnenseen ist exemplarisch in Abbildung 6 nachzuvollziehen. Richter (1997) untersuchte das Langzeitverhalten über einen 38-jährigen Messzeitraum an Grundwassermessstellen in den Sandergebieten im Bereich des Stechlinsees. Bei diesen Untersuchungen wurde zunächst kein Trend festgestellt. Wie bei Richter (1997) bestätigt sich auch im behandelten Untersuchungsgebiet, dass die Ganglinien der Seewasserstände mit denen der Grundwasserstände übereinstimmen. Eine Modellierung der Pegelentwicklung wurde hier noch nicht durchgeführt. Anders als bei Richter (1997), dessen Untersuchung 1995 endet, entwickeln sich die Wasserstände der Neustrelitzer Kleinseenplatte in den negativen Bereich. Es zeigt sich somit für die letzten 15 Jahre ein negativer Trend, der nach den Daten des letzten Jahrhunderts am Stechlinsee nicht in dieser Form beobachtet wurde.

Für weitere Ausführungen im Langzeitverhalten fehlen noch genauere Klimaparameter, so dass ein erster Ansatz über eine zeitliche Variabilität der Wasserspiegelschwankungen der letzten 35 Jahre nur mit Hilfe des Niederschlags und den mittleren monatlichen Verdunstungswerten der Reihe 1951-80 (Gebiet II, Mecklenburger Seenplatte) nach Richter (1997) gerechnet wurde (Abb. 7). Der negative Trend, unter Einbeziehung der Verdunstung, bestätigt sich somit. Gemessene Verdunstungswerte der letzten fünf Jahre zeigen, dass diese noch unter den Mittelwerten von Richter (1997) liegen. Somit würde die klimatische Wasserbilanz zumindest für die letzten Jahre noch negativer ausfallen. Die Zunahme der Lufttemperaturen bestätigt diesen Trend.

### 3. Schlussfolgerungen

Bei einer Ursachensuche ist es notwendig, auch Kenntnis über historische Veränderungen des Wasserhaushalts zu erhalten. Anthropogene Veränderungen und Eingriffe auf Gewässer, Boden und Vegetation müssen gegenüber klimatischen Änderungen gesondert betrachtet werden – obwohl zwischen beiden Wechselbeziehungen bestehen. Die Tendenz einer klimatischen Änderung, die durch steigende Lufttemperaturen und trockenere Sommer belegt ist, wird noch weitere Änderungen des Wasserhaushalts bewirken. Diese Arbeit stellt den derzeitigen Arbeitsstand dar und ist noch nicht abgeschlossen.

### 4. Literatur

- DVWK-Merkblätter, 1996. Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Heft 238/1996. Bonn
- Richter, D., 1997. Das Langzeitverhalten von Niederschlag und Verdunstung und dessen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt des Stechlinseegebietes. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 201. Offenbach.
- StALU – Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt ohne Jahr. Datenerfassung des Gewässerkundlichen Landesmessdienstes für Oberflächen- und Grundwasser, langjährige Zeitreihen. Neubrandenburg.

## Quantifizierung der Wirkung wasserwirtschaftlicher Anpassungsoptionen zur Minderung kritischer Niedrigwasserabflüsse in kleinen Einzugsgebieten

Björn Thomas, Jörg Steidl, Ottfried Dietrich, Gunnar Lischeid

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V. Müncheberg, Institut für Landschaftswasserhaushalt, Eberswalder Straße 84, 15374 Müncheberg, bjoern.thomas@zalf.de

**Zusammenfassung:** Die aktuellen Ergebnisse regionaler Klimamodelle projizieren eine Umverteilung der Niederschläge aus den Sommer- in die Wintermonate und ganzjährig erhöhte Monatsmitteltemperaturen im 21. Jahrhundert für den Nordosten Deutschlands. Als Folge der geringeren Niederschläge und höheren potentiellen Evapotranspiration in den Sommermonaten wird mit einer Verknappung der zur Verfügung stehenden Wassermengen gerechnet. Oberflächengewässer und Feuchtgebiete mit kleinen Wassereinzugsgebieten sind infolge des verringerten Wasserdargebots schon jetzt davon betroffen. Wasserverfügbarkeitsprobleme und zunehmend stärkere Wassernutzungskonflikte in den Sommermonaten sind absehbar. Exemplarisch werden am Einzugsgebiet Greifenhainer Fließ in Südost-Brandenburg Methoden und Instrumentarien eines nachhaltigen Wassermanagements in kleinen Einzugsgebieten analysiert. Dazu wird ein Monitoring der Wasserbilanz von nicht bewirtschafteten Speicherelementen (ein renaturierter Fließgewässerabschnitt, zwei Teiche unterschiedlicher Größe und ein Tagebaurestsee) durchgeführt. Die gemessenen Größen dienen der Entwicklung, Kalibrierung und Validierung eines Niederschlags-Abfluss-Modells des gesamten Einzugsgebietes, mit welchem Klima- und Wasserbewirtschaftungsszenarien analysiert werden. Eine anschließende Verallgemeinerung der Ergebnisse soll zur Entwicklung von Methoden und Planungsgrundlagen zur Niedrigwasseraufhöhung führen.

### Quantifying the effects of water management options for reducing critical low flow in small watersheds

**Abstract:** Recent results of regional climate models project a redistribution of precipitation from summer to winter months and higher monthly mean temperatures for northeast Germany. As a consequence of less precipitation and higher potential evapotranspiration during summer, less availability of water is expected. Already surface waters and wetlands have been experiencing decreasing water levels over the last decade. Without any adaptation or mitigation measures, water availability is likely to decrease even further, resulting in severe water use conflicts. At the watershed Greifenhainer Fließ, southeast Brandenburg, methods and tools for the sustainable water management of small watersheds are investigated. The water balance in two ponds of different size, a lake and a restored river segment are being monitored. These data will be used to calibrate and validate a precipitation-runoff model of the whole watershed to investigate effects of decentralised measures on low flow stabilisation. Subsequent generalisation of all results helps developing methods for low flow stabilisation.

### 1. Einführung

Ergebnisse verschiedener globaler und regionaler Klimamodelle weisen für Deutschland eine Umverteilung der Niederschläge aus den Sommer- in die Wintermonate mit ganzjährig erhöhten Monatsmitteltemperaturen aus (z.B. Gerstengarbe et al., 2003; IPCC, 2007; Jacob et al., 2008). Der Nordosten Deutschlands wird wegen seiner bereits jetzt schon geringen Niederschläge besonders von diesen Klimaänderungen betroffen sein. Im Nordosten Brandenburgs wurden bereits in den vergangenen Jahrzehnten vorwiegend klimabedingte Rückgänge der Grundwasserstände beobachtet (MUGV, 2009). Oberflächengewässer und Feuchtgebiete mit kleinen Wassereinzugsgebieten sind infolge des verringerten Wasserdargebots schon jetzt besonders davon betroffen (z.B. Mey et al., 2008), da die Wasserflüsse oft gering und weniger gepuffert sind und somit die Gefahr von extremen Niedrigwasserabflüssen größer ist. Eine Verschärfung dieser

Problemsituationen ist gerade durch die steigende Evapotranspiration zu erwarten.

In vielen kleineren Einzugsgebieten (< 500 km<sup>2</sup>) sind mit den daraus resultierenden Wasserverfügbarkeitsproblemen in den Sommermonaten zunehmende signifikante Wassernutzungskonflikte absehbar. Die Verschärfung der Niedrigwasserproblematik hat Folgen für die Trinkwassergewinnung, die Bereitstellung von Nutzwasser für die Industrie, Agrar- und Fischwirtschaft und auch ökologische Konsequenzen. Nach wiederkehrenden Wasserverfügbarkeitsproblemen in der Spree, wie z.B. im Sommer 2003 und 2006, werden vom Landesumweltamt Brandenburg Mindestabflüsse der untergeordneten Einzugsgebiete gefordert (Materne, 2007). Um das Konfliktpotential zu verringern, ist daher die Entwicklung und Testung von Wasserrückhaltmaßnahmen zur Niedrigwasseraufhöhung in Sommermonaten unumgänglich.

Bisherige Analysen zu Anpassungsstrategien konzentrierten sich oft auf die Folgen von Landnutzungsänderungen sowie Anpassungen des momentanen Wassermanagements, wie z.B. der Pumpraten von Wasserwerken (Wechsung et al., 2000; Armbruster et al., 2004; Wattenbach et al., 2007; Mey et al., 2008). Oft wird deutlich, dass solche Anpassungsstrategien nur einen Teilbeitrag zur Niedrigwasseraufhöhung während Trockenperioden liefern können. In vielen Einzugsgebieten sind bereits potentielle Speicherelemente vorhanden, die für eine Wasserzischenspeicherung genutzt werden könnten. Deren Möglichkeiten und notwendige Steuerung ist bislang wenig erforscht und muss weiter voran getrieben werden.

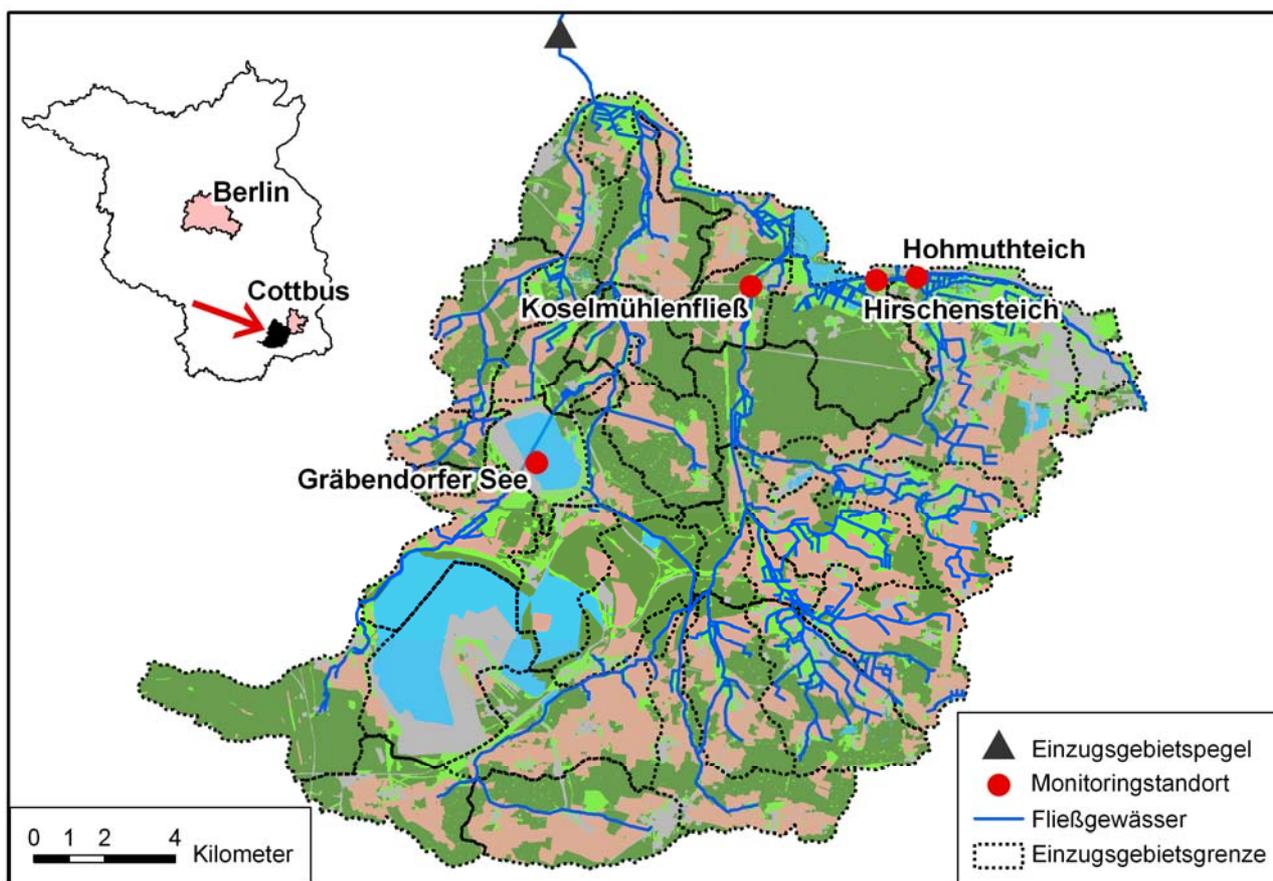
Das "Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg-Berlin" (INKA BB) ist eines der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten KLIMZUG-Projekte (INKA BB, 2010). Innerhalb des Verbundprojektes werden exemplarisch am Einzugsgebiet Greifenhainer Fließ in Südost-Brandenburg dezentrale Methoden und Instrumentarien eines nachhaltigen Wassermanagements in kleinen Einzugsgebieten analysiert. Ergebnisse aus Monitoring und Modellierung sollen genutzt werden, um exemplarisch ein Wassermanagementkonzept für das Einzugsgebiet Greifenhainer Fließ

zu entwickeln, sowie Planungsgrundlagen für dezentrale Wasserrückhaltemaßnahmen in kleinen Einzugsgebieten zur Niedrigwasseraufhöhung zu entwickeln, und ein Entscheidungsunterstützungstool für die zukünftige Planung ähnlicher Speicherelemente aufzubauen.

In diesem Beitrag wird das Forschungskonzept vorgestellt. Zusätzlich zur Vorstellung des Untersuchungsgebietes, einer Beschreibung der Methodik, der Vorgehensweise und einer abschließenden Diskussion wird auch ein Ausblick über das weitere Vorgehen gegeben und die geplante Ergebnisbereitstellung dargestellt.

## 2. Untersuchungsgebiet und Monitoringstandorte

Das Untersuchungsgebiet mit einer Fläche von 337 km<sup>2</sup> liegt westlich von Cottbus und entspricht dem Einzugsgebiet des Greifenhainer Fließ (Abb. 1). Wald- und Ackerflächen sind die maßgeblichen Landnutzungsgruppen, die im Gebiet auftreten. Die geomorphologische Übersichtskarte zeigt, dass der Norden des Gebietes vorwiegend glaziofluviatil geprägt ist. Das Gebiet liegt zwischen 50 und 160 m ü. NN, wobei die höchsten Lagen im Süden auftreten. Aufgrund der Landnutzung und Topographie kann das Untersuchungsgebiet als charakteristisch für Einzugsgebiete in Südost-Brandenburg angesehen werden.



**Abb.1:** Lage des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstandorte im Einzugsgebiet Greifenhainer Fließ. Die Landnutzungsgruppen der Biotopkartierung Wald (dunkelgrün), Grasland (grün), Ackerfläche (braun), See (blau) und Siedlungs- bzw. Entwicklungsfläche (grau) sind unterlegt.

Der Pegel „Paulicks Mühle“ liegt in der Nähe Vetschau am Greifenhainer Fließ. Der Eichower Graben, das Buchholzer Fließ, das Koselmühlenfließ und der Priorgraben, der abzweigend von der Spree durch das Gebiet geleitet wird, münden oberhalb dieses Pegels in das Greifenhainer Fließ. Eine hydrologische Besonderheit stellen die beiden Tagebaurestseen und ihr durch den Bergbau verändertes Umland im Südwesten des Untersuchungsgebietes dar. Die Flutung des Gräbendorfer Sees wurde in 2007 abgeschlossen, dauert aber für den Greifenhainer See noch an. Dazu leitet die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) Wasser in den Greifenhainer und Gräbendorfer See. Das Buchholzer Fließ wird aus noch im Betrieb stehenden Brunnen gestützt und ein Teil seines Wassers in das Koselmühlenfließ übergeleitet. Die Wasserstände in den Fließten sind somit teilweise von den Pumpraten der LMBV abhängig. Außerdem stammt ein Teil des Wassers im Koselmühlenfließ von den noch aktiven Tagebauen südöstlich des Untersuchungsgebietes. Der Wasserhaushalt des Gebietes und seiner Gewässer ist durch die noch laufende Sanierung des Bergbaugesbietes immer noch stark beeinflusst.

Langjährige Wetterdaten liegen von der DWD-Station Cottbus vor. Für den Zeitraum 1961-1990 betrug der mittlere jährliche Niederschlag 563 mm, wobei die meisten Niederschläge in den Sommermonaten fallen. Die mittlere jährliche Temperatur betrug 8,9 °C (DWD, 2010).

An den Monitoringstandorten werden während der Projektlaufzeit die Wasserbilanzgrößen erfasst. Im Hinblick auf die unterschiedlichen Methoden des Wasserrückhalts und die Speichergröße wurden der Gräbendorfer See,

zwei unbewirtschaftete Alteiche der Fischwirtschaft und ein renaturierter Flussabschnitt am Koselmühlenfließ als Monitoringstandorte ausgewählt (Abb. 1). Diese werden bislang nicht als Wasserspeicher bewirtschaftet bzw. staureguliert, könnten aber aufgrund ihrer baulichen Ausstattung hinreichend Stauraum zur Verfügung stellen und sind somit für unsere Untersuchungen geeignet.

### 3. Methodik und Vorgehensweise

Die Untersuchungen gliedern sich in ein hydrologisches Monitoring existierender Speicherelemente und eine Modellierung des Wasserhaushalts des Einzugsgebietes und einzelner Speicherelemente (Abb. 2). Die durch das Monitoring erhobenen Daten lassen eine Quantifizierung der Wasserbilanzen zu und helfen bei der genauen Definition der Speicherelemente in den Modellen. Für die Kalibrierung eines konzeptionellen Niederschlags-Abfluss-Modells des Einzugsgebietes werden zusätzlich zu den Monitoring-Daten meteorologische Zeitreihen, Abflüsse am Einzugsgebietsauslass, Landnutzungs- und Bodenkarten, sowie Informationen über das Gewässernetz und die Hydrogeologie herangezogen. Falls notwendig können zusätzlich einzelne Speicherelemente mit physikalisch basierten Modellen abgebildet werden, um ihr Verhalten genauer zu verstehen. Die Basis der Modellierung bilden die Klimaszenarien (STAR II 0 K und +2 K). Abschließend sollen die Ergebnisse des Monitorings und der Modellierung für eine Verallgemeinerung mit modernen statistischen Verfahren analysiert und zusammengefasst werden. Hierbei ist es essentiell, die Unsicherheiten aus den vorhergegangenen Schritten zu quantifizieren und Randbedingungen, wie z.B. die Besonderheiten des Gebietes oder Zielgrößen der Abflüsse, mit einzubeziehen.

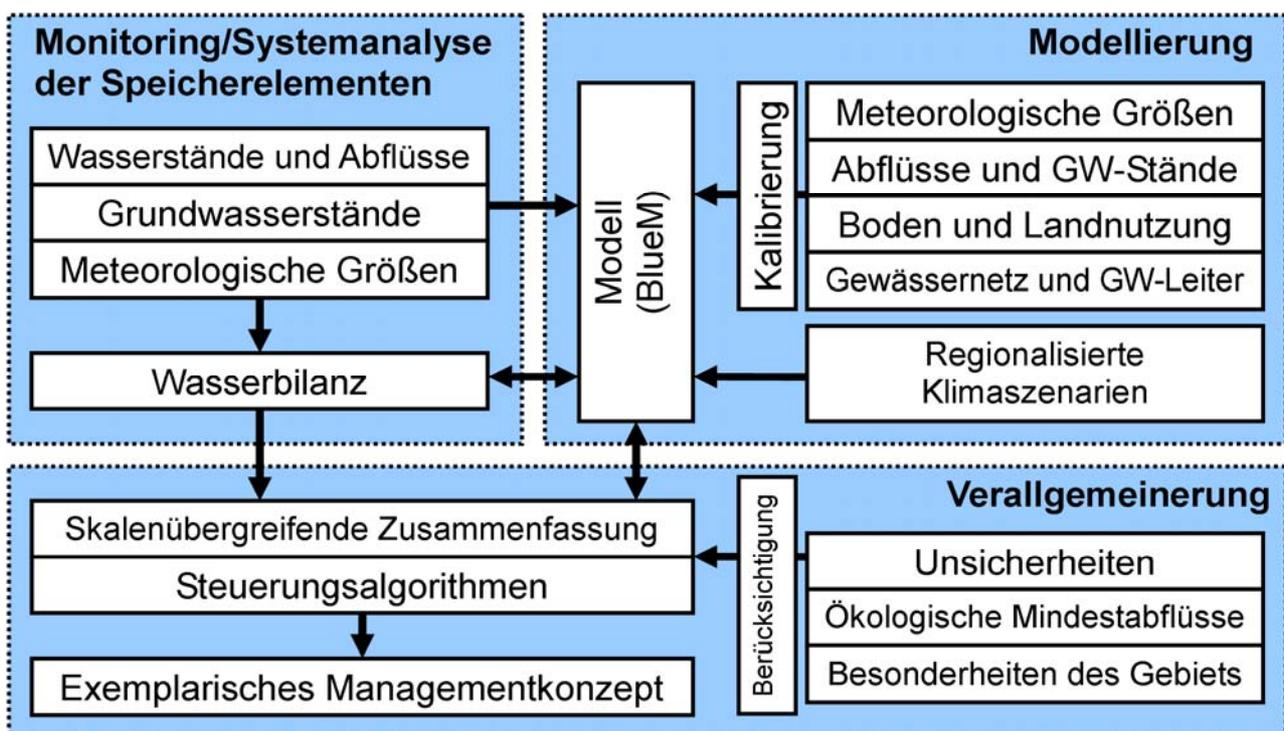


Abb. 2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise.

Das Ziel des Monitorings ist es, alle Wasserbilanzgrößen an den Speicherelementen zu erfassen und somit zu einer Abschätzung des tatsächlich möglichen Beitrags zur Niedrigwasseraufhöhung zu gelangen. Hierzu wird zusätzlich zur Wetterstation in Cottbus am Gräbendorfer See eine Wetterstation mit allen für die Verdunstungsberechnung notwendigen Parametern betrieben. Zusätzlich wurde am Koselmühlenfließ und Priorgraben jeweils ein Regensammler installiert.

Die Alteiche der Fischwirtschaft sind in den letzten Jahren saniert worden. Zu- und Abflüsse lassen sich über Bohlenstauwehre regulieren. Anhand von Wasserstandsmessungen können mit der Poleni-Formel und dem Überfallbeiwert für solche Bauwerke die Durchflüsse berechnet werden (Preißler und Bollrich, 1996). Zusätzlich zu den Zu- und Abflüssen werden die Abflüsse im Gewässer vor und nach den Teichen überwacht. Nach einer ersten Phase, in der das Verhalten der Elemente ohne Steuerung der Wehre ermittelt wird, sollen Stauversuche die Möglichkeiten dieser Speicherelemente aufzeigen und die gewonnenen Daten zur Kalibrierung bzw. Validierung der Modelle herangezogen werden.

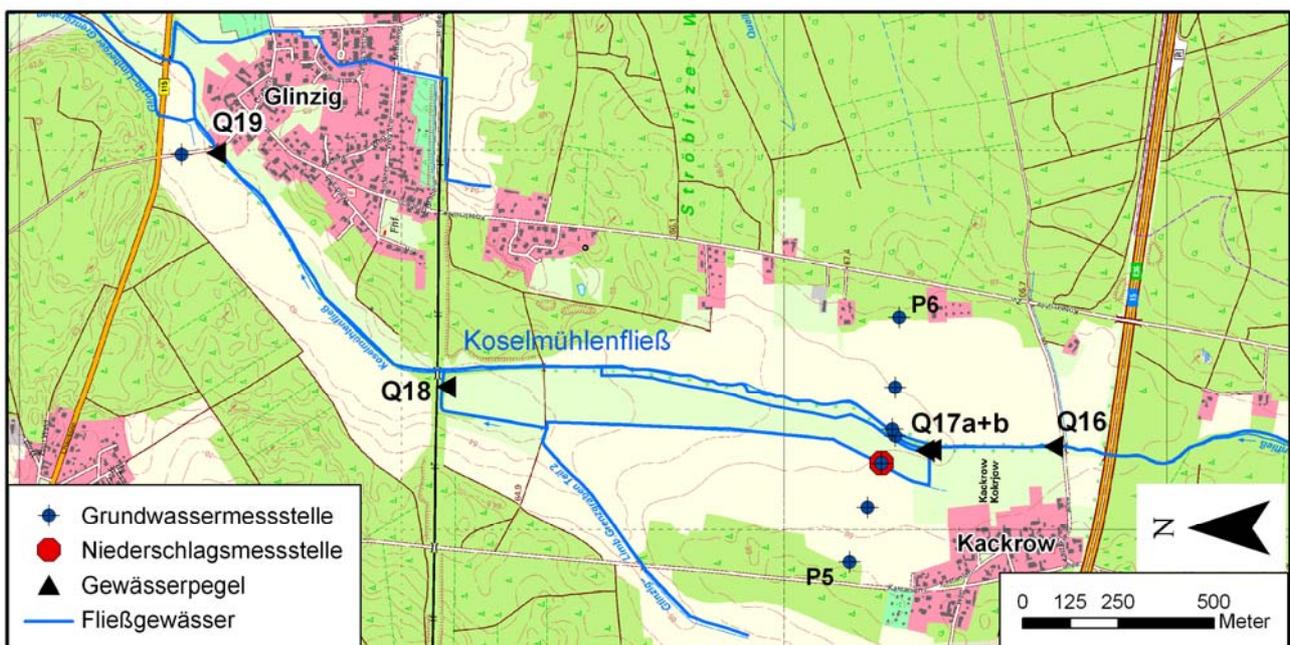
Um auch größere Speicherelemente in die Untersuchungen mit einzubeziehen, wurde der Gräbendorfer See für das Monitoring ausgewählt. Hier werden Grundwasserstände, Zu- und Abflüsse, wie auch die Zuleitung von Wässern aus der Spree von der LMBV und dem Landesumweltamt Brandenburg gemessen. Vereinbarungen über den Austausch der Daten wurden bereits initiiert und ab Mitte 2010 sollen alle notwendigen Messungen eingerichtet und erste Daten verfügbar sein.

Das Koselmühlenfließ stellt eine andere Art von Speicherelement dar. Hier wird das Wasser an einem Wehr nahe Kackrow über zwei Seitengräben entlang der Felder geleitet, um die Grundwasserstände zu erhöhen (Abb. 3). Die Speicherung soll somit oberflächen- und ufernah im

Grundwasserleiter stattfinden. Zusätzlich zu den Niederschlags- und Abflussmessungen werden hier auch die Grundwasserstände innerhalb eines Transektes aufgezeichnet. Der Transekt deckt sowohl den linksseitigen Talbereich ab, an dem die Grundwasserstände angehoben werden, als auch den rechtsseitigen, wo keine Maßnahmen durchgeführt wurden. Ähnlich wie bei den Alteichen ist nach einer ersten Messphase geplant, über Regulierungen des Wehres in Kackrow Stauversuche durchzuführen und die Beeinflussung auf die Wasserspeicherung zu untersuchen.

Die Wasserflüsse im Gebiet werden mit dem konzeptionellen Niederschlags-Abfluss-Modell BlueM unter Einbeziehung der wasserwirtschaftlichen Eingriffe abgebildet (BlueM, 2009). Die Kalibrierung konzentriert sich hauptsächlich auf den Einzugsgebietspegel „Paulicks Mühle“. Da keine Großverbraucher im Gebiet ansässig sind, ist die Wasserabgabe des Einzugsgebietes an den Vorfluter, die Spree, die für die Wasserwirtschaft interessanteste Größe. In der an die Kalibrierung und Validierung anschließenden Analyse verschiedener Szenarien des Klimas und der Wasserwirtschaft wird der Abfluss des Gebietes eine zentrale Zielgröße darstellen. Die Ergebnisse der Modellierung werden weiterhin in die Planung möglicher Stauversuche an den Speicherelementen einfließen.

Da die Klimaprojektionen große Unsicherheiten aufweisen, die wahrscheinlich durch die hydrologische Modellierung noch verstärkt werden, muss die Analyse von Unsicherheiten eine zentrale Rolle spielen. Der Vorteil eines konzeptionellen Modells ist, dass anhand des geringeren Rechenaufwandes eine Vielzahl von Realisationen der einzelnen STAR II Klimaszenarien gerechnet werden können. Monte-Carlo Analysen und andere Verfahren können somit die Unsicherheiten in den Modellen quantifizieren.



**Abb. 3:** Lage der Niederschlags-, Grundwasser- und Oberflächenwassermessstellen am renaturierten Teil des Koselmühlenfließ. Bei Messstelle Q17 wird das Wasser vor einem Wehr über zwei Seitengräben entlang der landwirtschaftlichen Flächen geleitet.

Die Herausforderung des Projektes besteht in der Zusammenfassung von Modellierungs- und Monitoring-ergebnissen zur Entwicklung eines exemplarischen Wassermanagementkonzeptes im Einzugsgebiet Greifenhainer Fließ und Erarbeitung von Grundlagen für die Planung von Wasserrückhaltungsmethoden zur Niedrigwasseraufhöhung in Gebieten mit vergleichbarem Klima. Das exemplarische Wassermanagementkonzept soll aufzeigen, welche Maßnahmen mit dem Stand der Technik im Untersuchungsgebiet möglich wären und zu welchen Verbesserungen diese führen können. Die Ergebnisse sollen so aufbereitet werden, dass sie bei der zukünftigen Planung von Maßnahmen zur Niedrigwasseraufhöhung in Trockenperioden herangezogen werden können. In einem weiteren Schritt sollen Effekte verschiedener Bewirtschaftungsoptionen auf den Wasserrückhalt in der Fläche mit Hilfe moderner statistischer Verfahren, wie z.B. der Hauptkomponentenanalyse der Wasserstände im Grund- und Oberflächenwasser (siehe z.B. Lewandowski et al., 2009), analysiert werden.

#### 4. Erste Ergebnisse und Diskussion

Zum Mai 2010 wurde mit dem Monitoring begonnen. An den meisten Messstellen werden die Wasserstände mit Loggern aufgezeichnet. Erste Daten zeigen bereits die starke Beeinflussung der Wasserstände durch menschliche Steuerung. Beim Priorgraben wird die Wassermenge maßgeblich durch das Abschlagsbauwerk an der Spree bestimmt und die Wasserstände in den Fließen über Wassereinleitungen der LMBV beeinflusst.

Die Volumina und Art unserer Speicherelemente unterscheiden sich. Folglich erstrecken sich die potentiellen Möglichkeiten der einzelnen Elemente zur Niedrigwasseraufhöhung auch über mehrere Größenordnungen. Der Gräbendorfer See ist sicherlich das einzige Speicherelement, das Wasser während der gesamten Niedrigwasserperiode bereitstellen kann, sofern die Wasserbilanz eine Wiederbefüllung über die Wintermonate erlaubt. Die kleineren Teiche haben hingegen vermutlich ausschließlich das Potential, kurzzeitig zu wirken. Unsere Untersuchungsstandorte sollen als Beispiel für eine Vielzahl potentieller dezentraler Speicherelemente untersucht werden. Die Modellbildung wird Aufschluss über den Einfluss weiterer Speicherelemente auf die Niedrigwasserabflüsse geben. Inwiefern eine ufernahe Grundwasseranreicherung, wie am Koselmühlenfließ, einen Einfluss auf Niedrigwasserabflüsse hat, ist Gegenstand der Forschung. Wegen der hohen Verdunstung der landwirtschaftlich genutzten Graslandflächen bei geringen Grundwasserflurabständen bleibt abzuwarten, wie viel Wasser im Sommer zurück in das Fließ gelangen kann (Querner und van Lanen, 2001; Anderson et al., 2009). Jedoch ist diese Methode des Wasserrückhalts für die Landwirte, deren Felder auf diese Weise länger genügende Bodenfeuchtigkeit aufweisen, von Interesse.

Wegen der zahlreichen wasserbaulichen Eingriffe des Menschen (Fließregulierung, Wasserum- und -einleitung, sowie Drainage) ist die Verwendung eines Modells mit wasserwirtschaftlichem Schwerpunkt unerlässlich. Außerdem sind Annahmen der zukünftigen Bewirtschaftung notwendig, da von einer weiteren Bewirtschaftung aus-

zugehen ist. Eine besondere Herausforderung stellt die Abbildung der Bergbausanierung dar.

Modellergebnisse auf globaler Skala zeigen deutlich, dass es auch andere Regionen gibt, in denen unsere Ergebnisse von Interesse sein könnten (Milly et al., 2005; Wang, 2005; Nohara et al., 2006). Hier sind insbesondere Teile Nordamerikas zu nennen, da das Klima dort relativ vergleichbar mit dem in Nordost-Deutschland ist. Andererseits können uns aber auch Ergebnisse aus Regionen, die bereits jetzt schon stärkeren Klimaveränderungen ausgesetzt sind, einen Eindruck geben, wie die wasserwirtschaftliche Situation in unseren Breiten aussehen wird. Globale Modelle und bisherige Modellierungsergebnisse sind jedoch noch zu ungenau und nicht ausreichend für die Entwicklung von Planungsgrundlagen für den nordost-deutschen Raum.

Da sowohl das Messnetz erfolgreich installiert wurde und die meisten Daten für eine Modellierung vorliegen, gehen wir davon aus, unsere Ziele im Rahmen der Projektlaufzeit erreichen zu können:

- Kalibrierung und Szenarienberechnung mit einem Niederschlags-Abfluss-Modell zur Abschätzung der Klimafolgen;
- Erstellung eines exemplarischen Wassermanagementkonzept für das Wassereinzugsgebiet Greifenhainer Fließ;
- Entwicklung allgemeiner Planungsgrundlagen für den Wasserrückhalt in kleinen Einzugsgebieten zur Niedrigwasseraufhöhung mit dem Schwerpunkt dezentraler Maßnahmen;
- Einbettung der Ergebnisse in ein Entscheidungsunterstützungstool für die Planung entsprechender Maßnahmen in kleinen Einzugsgebieten.

#### 5. Ausblick

Als nächster Arbeitsschritt steht der Aufbau des hydrologischen Modells im Vordergrund. Bis Dezember 2010 sollen ein Modellierungskonzept und eine erste Version des Modells kalibriert sein. Mit wachsender Datengrundlage können die Speicherelemente in einem iterativen Prozess immer besser integriert werden, so dass die Modellierung das Verhalten der Speicherelemente in der Zukunft und unter verschiedenen Managementoptionen hinreichend abbilden kann. Unter Berücksichtigung der Modellergebnisse werden Stauversuche geplant, die in 2011 beginnen sollen. Ab 2012 soll ein exemplarisches Wassermanagementkonzept für das Einzugsgebiet Greifenhainer Fließ entwickelt werden, um daraus Grundlagen für die Planung von ähnlichen Wasserrückhaltmaßnahmen zur Niedrigwasseraufhöhung in kleinen Einzugsgebieten ableiten zu können. Diese Ergebnisse sollen in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern bis zum Ende des Projektes in 2014 verstetigt sein.

#### Danksagung

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung dieses Projektes im Rahmen der Fördermaßnahme KLIMZUG. Dank der regionalen Kompetenz des Wasser- und Bodenverband „Oberland Calau“ konnten die Speicherelemente ausgewählt und mit seiner Hilfe die Messtechnik installiert und Messun-

gen durchgeführt werden. Weiterhin bedanken wir uns beim Landesumweltamt Brandenburg und der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH für die Kooperation und Bereitstellung von Daten.

## 6. Literatur

- Anderson, S.H., Udawatta, R.P., Seobi, T., Garrett, H.E., 2009. Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry Systems* 75, 5-16.
- Armbruster, M., Seegert, J., Feger, K.H., 2004. Effects of changes in tree species composition on water flow dynamics – Model applications and their limitations. *Plant and Soil* 264, 13-24.
- BlueM, 2009. BlueM. <http://www.bluemodel.org>. Zugriff: 01.12.2009.
- DWD, 2010. Deutscher Wetterdienst. <http://www.dwd.de>. Zugriff: 19.02.2010.
- Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P.C., 2003. Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report 83. Potsdam.
- INKA BB, 2010. Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Berlin Brandenburg. <http://www.inka-bb.de>. Zugriff: 19.02.2010.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Genf.
- Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P., Siek, K., 2008. Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Forschungsbericht, Umweltbundesamt Dessau-Roßlau.
- Lewandowski, J., Lischeid, G., Nützmann, G., 2009. Drivers of water level fluctuations and hydrological exchange between groundwater and surface water at the lowland River Spree (Germany): field study and statistical analyses. *Hydrological Processes* 23, 2117-2128.
- Materne, K., 2007. Entwurf: Konzept zur Wasserbewirtschaftung im mittleren Spreengebiet unter extremen Niedrigwasserverhältnissen. Landesumweltamt Brandenburg, Cottbus.
- Mey, S., Albert, H., Hildebrand, C., Pfützner, B., 2008. Modellgestützte Analysen zur Stabilisierung des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet des Moores „Luchsee“. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 52, 310-318.
- Milly, P.C.D., Dunne, K.A., Vecchia, A.V., 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature* 438, 347-350.
- MUGV – Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg, 2009. Wasserversorgungsplan 2009 für das Land Brandenburg. Potsdam.
- Nohara, D., Kitoh, A., Hosaka, M., Oki, T., 2006. Impact of climate change on river discharge projected by multimodel ensemble. *Journal of Hydrometeorology* 7, 1076-1089.
- Preißler, G., Bollrich, G., 1996. Technische Hydromechanik 1. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Querner, E.P., van Lanen, H.A.J., 2001. Impact assessment of drought mitigation measures in two adjacent Dutch basins using simulation modelling. *Journal of Hydrology* 252, 51-64.
- Wang, G.L., 2005. Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment. *Climate Dynamics* 25, 739-753.
- Wattenbach, M., Zebisch, M., Hattermann, F., Gottschalk, P., Goemann, H., Kreins, P., Badeck, F., Lasch, P., Suckow, F., Wechsung, F., 2007. Hydrological impact assessment of afforestation and change in tree-species composition – A regional case study for the Federal State of Brandenburg (Germany). *Journal of Hydrology* 346, 1-17.
- Wechsung, F., Krysanova, V., Flechsig, M., Schaphoff, S., 2000. May land use change reduce the water deficiency problem caused by reduced brown coal mining in the state of Brandenburg? *Landscape and Urban Planning* 51, 177-189.

## Wasserstandsschwankungen und Vegetationsdynamik in Kesselmooren: interne und externe Faktoren

Tiemo Timmermann

Institut für Botanik und Landschaftsökologie, Universität Greifswald, Grimmer Straße 88, 17487 Greifswald,  
tiemo@uni-greifswald.de

**Zusammenfassung:** Die Auswirkungen von Witterungsschwankungen auf den Moorwasserhaushalt und ihre Folgen für das Ökosystem sind stark von der konkreten Ausbildung eines Moores und seiner Umgebung abhängig. Dies verdeutlichen die Ergebnisse landschaftsökologischer Untersuchungen an 20 Kesselmooren in Nordostbrandenburg. Die ursächlichen Faktoren lassen sich nach ihren naturräumlichen Dimensionen gliedern in (1) regionale externe Faktoren auf der Landschaftsebene, (2) lokale externe Faktoren, insbesondere Eigenschaften des Einzugsgebiets sowie (3) interne Faktoren als Eigenschaften des Moores selbst. Die Ermittlung des hydrodynamischen Typs anhand der Moorstratigraphie und -vegetation gestattet bei Kesselmooren eine differenzierte Bewertung von beobachteten Änderungen der Vegetation und des Wasserhaushalts, z.B. im Hinblick auf die Notwendigkeit von Restaurierungsmaßnahmen.

### Water level fluctuations and vegetation changes in kettle hole mires: internal and external factors

**Abstract:** The consequences of climate change for the hydrology of kettle hole mires and subsequent ecosystem changes depend strongly on the specific quality of a certain mire and its catchment. This is indicated by ecological investigations of 20 kettle hole mires in NE Brandenburg (Germany). The responsible factors can be classified regarding their related landscape dimension in (1) regional external factors at the landscape level, (2) local external factors, mainly catchments characteristics, and (3) internal factors, i.e. characteristics of the mire ecosystem. Determination of the peatland stratigraphy and vegetation allow an individual evaluation of observed hydrological as well as vegetation changes, e.g. estimating the necessity of restoration measures.

#### 1. Einführung

Feuchtgebiete, die über keine oberirdischen Zuläufe verfügen, reagieren besonders empfindlich auf Trockenphasen. In Nordost-Deutschland sind sie durch die rückläufigen Niederschläge und die stärkere Verdunstung seit den 1990er Jahren stark betroffen (Timmermann, 1999; Luthardt et al., 2010). Zu den Ökosystemen mit den stärksten Wasserstandsabsenkungen zählen Himmels- und Kesselseen sowie die meisten Moortypen. Insbesondere Kesselmoore sind betroffen, denn sie sind abhängig von ausreichender Speisung durch Zulaufwasser (v.a. "interflow") aus ihrem kesselförmigen, abflusslosen Einzugsgebiet (Abb. 1). Typisch für Kesselmoore ist ein spezifischer Mechanismus des Wasserspiegelanstiegs: Organische Ablagerungen im Bereich der Randsümpfe dichten die Poren in den Mineralböden allmählich ab (Kolmation), reduzieren dadurch die Infiltration aus dem Moor in den Untergrund und lassen so die Mooroberfläche allmählich in die Höhe und das Moor in die Breite wachsen (Timmermann, 1999; Gaudig et al., 2006). Im Folgenden werden Untersuchungen an 20 Kesselmooren Nordostbrandenburgs aus den 1990er Jahren dargestellt und die Ergebnisse vor dem Hintergrund der aktuellen Trockenheitsproblematik diskutiert (s. ausführlich dazu: Timmermann, 1999, 2003).

#### 2. Untersuchungsgebiet

Die untersuchten Moore liegen im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin, einer typischen Jungmoränenlandschaft im Nordosten Brandenburgs. Charakteristisch sind stark reliefierte und meist bewaldete Endmoränen (Höhe bis 139 m NN) mit tausenden Toteis-Hohlformen ohne natürlichen oberirdischen Abfluss. In vielen von ihnen haben sich Kesselmoore entwickelt. Der Geschiebemergel in den Moränenengebieten enthält oft hohe Sandanteile und ist häufig geklüftet. Er ist nicht vollständig wassersatt und besitzt eine geringe Wasserdurchlässigkeit (Hannemann, 1994). Im Allgemeinen liegt der Grundwasserspiegel mehr als 10 m unter der Oberfläche (Schindler, 1996) und spielt daher für die Wasserspeisung, wie bei typischen Kesselmooren üblich, keine Rolle.

Das Klima ist subkontinental geprägt mit mittleren Jahresniederschlägen von 500-600 mm (Wetterstation Angermünde, Daten: Deutscher Wetterdienst). Gegenüber dem langjährigen Mittel von 547 mm (Angermünde, 1951-1980) zeichneten sich die Untersuchungsjahre 1993-1995 durch hohe Niederschlagssummen und überdurchschnittlich hohe Temperaturen aus (Landesumweltamt Brandenburg, 1995).



**Abb. 1:** Schwimmendes Kesselmoor, das nach der Rodung des Einzugsgebiets infolge höherer Zuflüsse breite, wassergefüllte Randsümpfe sowie Reste abgestorbener Moorgehölzen zeigt. Quelle: Postkarte aus den 1930er Jahren, Region Walcz (Deutsch Krone), Polen.

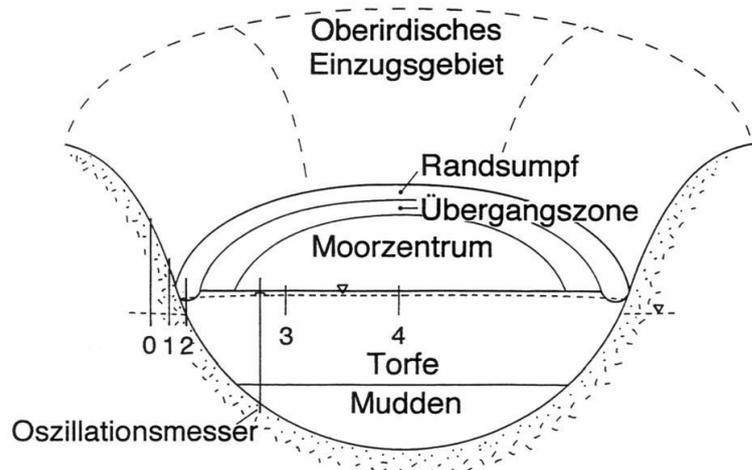
### 3. Methoden

Für die Untersuchungen wurden 20 in Wäldern liegende, nicht entwässerte Kesselmoore von 0,3 bis 5,5 ha Moorfläche ausgewählt (zur genauen Lage s. Timmermann, 1999). In den verschiedenen Vegetationszonen und in angrenzenden Mineralböden wurden jeweils 3 bis 5 Wasserstandsmessrohre gesetzt, um die Höhenbeziehungen zwischen den Wasserständen im Moorzentrum, im so genannten Randsumpf und am Mineralrand zu messen und Aussagen über Zu- und Abflüsse treffen zu können. Daneben wurde die Oszillation der Mooroberfläche mittels eines im mineralischen Untergrund versenkten Metallrohrs und eines im Torfkörper fixierten, die Mooroberfläche markierenden Eimers bestimmt (Abb. 2). Die Oberkanten der Messrohre und des Oszillationsmessers wurden im Winter 1994/1995 einnivelliert. Dabei zeigte sich, dass sämtliche Mooroberflächen nahezu eben und

nicht geneigt waren. Die Wasserstandsmessungen erfolgten zweimal monatlich während der Vegetationsperiode und einmal monatlich im Winterhalbjahr. Die Moorstratigraphie wurde mit einer Klappsonde als Quer- oder Längsprofil aufgenommen. Die Vegetation wurde mithilfe von Vegetationsaufnahmen (Pfadenhauer, 1997) erfasst und nach Succow und Joosten (2001) nach dem Vegetationsformenkonzept klassifiziert.

### 4. Ergebnisse und Diskussion

Anhand der Oszillation und Überstauhöhe der Mooroberfläche ließen sich 3 hydrodynamische Typen von Kesselmooren beschreiben (Abb. 3, 4). Diese Typen weisen außerdem eine charakteristische Stratigraphie, Moormächtigkeit, Moorgröße, Oberflächenstruktur, Vegetation und Vegetationsdynamik auf (Tab. 1, Abb. 5).



**Abb. 2:** Aufbau eines Kesselmoores mit Lage der Wasserstandsmessrohre. 0, 1: mineralischer Randbereich, 2: Moorrand (Randsumpf), 3, 4: Moorzentrum.

Die vergleichenden Untersuchungen zum Wasserhaushalt zeigten unter anderem, dass die Beschaffenheit des Moores und seines Einzugsgebiets korreliert ist mit dem Schwankungsmuster der Moorwasserstände und mit der Vegetationsdynamik im Moor. Die steuernden Faktoren wirken nicht nur von außerhalb auf das Moorökosystem (externe Faktoren), sondern sind auch im Moor selbst zu finden (interne Faktoren). Die wesentlichen Faktoren für den Wasserhaushalt von Kesselmooren lassen sich nach ihren naturräumlichen Dimensionen wie folgt ordnen:

(1) Regionale externe Faktoren auf Landschaftsebene: Klima und Witterung (Thienemann, 1932, 1933a, 1933b), Nährstoffimmissionen, Grundwasserregulierung

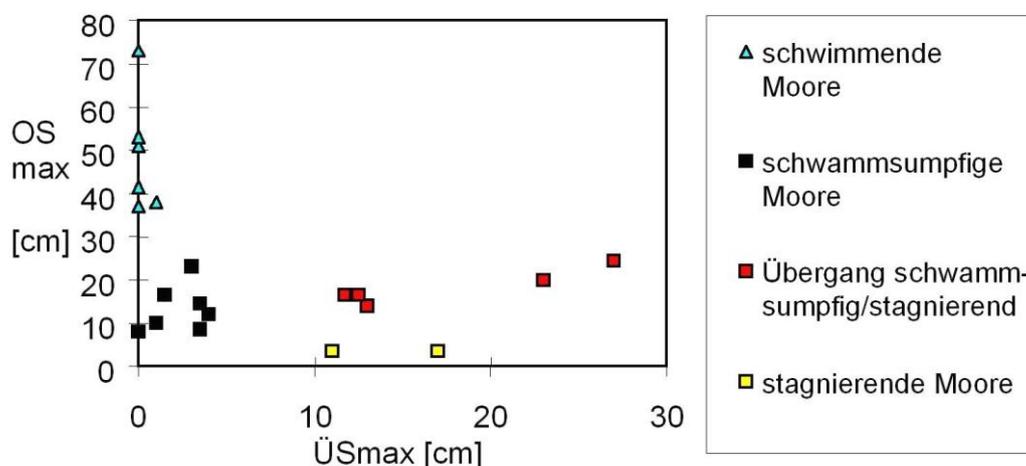
gen und -entnahmen sowie andere Eingriffe in den Grundwasserhaushalt.

(2) Lokale externe Faktoren, insbesondere Eigenschaften des Einzugsgebiets: Neigung, Form, Größe, Böden, Vegetation, Lokalklima, Zulaufwassermengen und Grundwasserbildungsvermögen sowie die Flächenrelation von Moor und Einzugsgebiet (Kloss, 1994; Timmermann, 1999; Van der Linden et al., 2008).

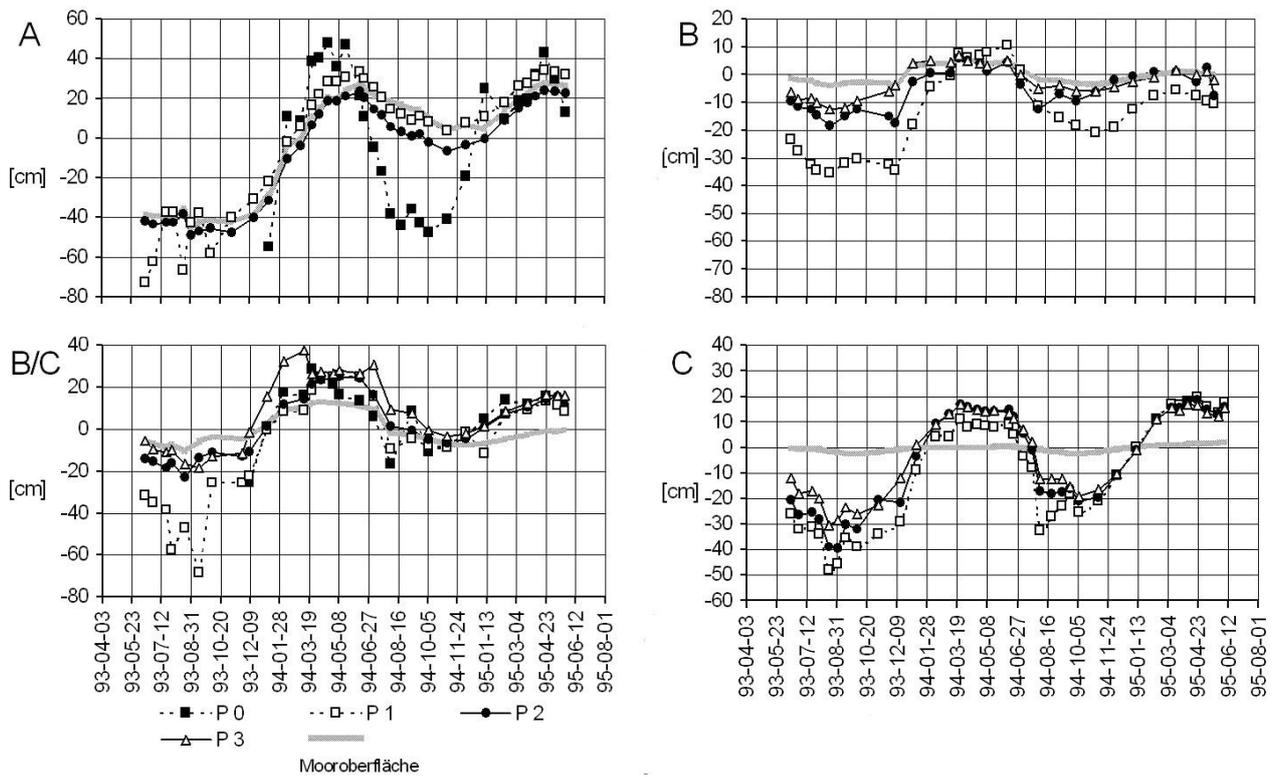
(3) Interne Faktoren, insbesondere Eigenschaften des Moores, die die Oszillation der Torfe und die Schwankungen der Flurabstände lenken: Mächtigkeit, Abfolge, Struktur und Zersetzungsgrad der Torf- und Muddelagen, Vegetation.

**Tab. 1:** Landschaftsökologische Kennzeichnung hydrodynamischer Typen bei Kesselmooren (nach Timmermann, 1999, 2003).

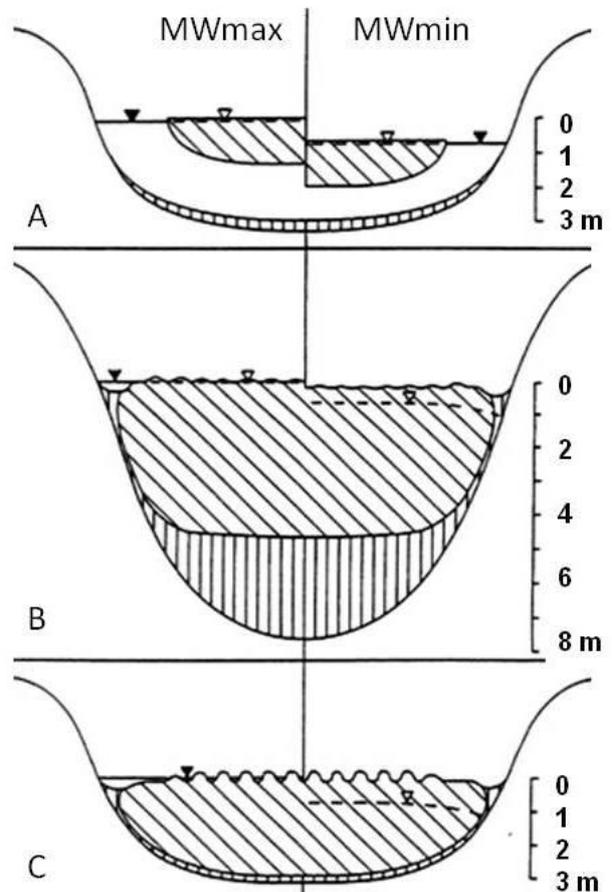
|                              | Schwimmendes Kesselmoor  | Schwammsumpfiges Kesselmoor  | Stagnierendes Kesselmoor  |
|------------------------------|--|--|---|
| Trophie                      | Mesotroph  | Oligotroph   | Oligo- bis mesotroph  |
| Moormächtigkeit              | Gering bis mittel (3-6,5 m)  | Mittel bis hoch (5,5-12,5 m)   | Gering bis mittel   |
| Moorgröße                    | Klein (meist < 1ha)  | Variabel   | Klein (meist < 1ha)   |
| Wasserstände                 | Stark schwankend, Maximum 1993-94: 73 cm), Wasserkörper („Wasserkissen“) mit schwimmender <i>Sphagnum</i> -Decke | Weitgehend stabil, Oberfläche folgt durch „Mooratmung“ den Schwankungen                              | Schwankend, Oberfläche oszilliert nicht und wird daher regelmäßig überstaut (Maximum 1993-95: 23 cm)            |
| Kennzeichnende Pflanzenarten | <i>Sphagnum fallax</i> , <i>Carex rostrata</i> , <i>Betula pubescens et pendula</i> , <i>Alnus glutinosa</i>     | <i>Sph. magellanicum</i> , <i>Ledum palustre</i> , <i>Betula pubescens</i> , <i>Pinus sylvestris</i> | <i>Sph. fallax</i> , <i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Betula pubescens et pendula</i> , <i>Pinus sylvestris</i> |
| Oberflächenstrukturen        | Flache Toorfmoosteppiche und -rasen  | Schwach bultige Torfmoosrasen  | Ausgeprägte Bult-Schlenkensysteme   |
| Wuchsform der Moorgehölze    | Normal bzw. baumfrei   | Krüppelwuchs (Form turfosa)  | Normal (Form uliginosa)   |
| Absterben der Moorgehölze    | Allmählich mit Zunahme von Gewicht und Höhe  | Sehr langsam infolge Stress (Nährstoff- und Sauerstoffmangel)  | Abrupt infolge Sauerstoffdefizits   |



**Abb. 3:** Relation zwischen Oszillation und Überstau der Mooroberfläche (Moorzentrum) bei 20 Kesselmooren (Timmermann, 2003). A: schwimmendes Moor (Moosbruch/Moor 1), B: schwammsumpfiges Moor (Barschpfehl/Moor 4), B/C: Übergang schwammsumpfig/stagnierend (Moor ohne Namen/Moor 2), C: stagnierendes Moor (Moosbruch/Moor 10).



**Abb. 4:** Moorwasserstände sowie Oszillation und Überstau der Mooroberfläche bei vier ausgewählten Kesselmooren. A: schwimmendes Moor, B: schwammumpfiges Moor, B/C: Übergang schwammumpfig/stagnierend, C: stagnierendes Moor. Lage der Pegel: P0, P1: mineralische Randzone (Einzugsgebiet), P2: Moor-Randzone (Randsumpf), P3: Moorzentrum.



**Abb. 5:** Schematische Darstellung von Morphologie, Wasserstandsschwankungen und Oszillation der hydrodynamischen Kesselmoor-Typen. MWmax: maximaler Moorwasserstand, MWmin: minimaler Moorwasserstand, senkrechte Schraffur: hochzersetzte Torfe und Mudden, schräge Schraffur: mäßig bis schwach zersetzte Torfe.

## 5. Schlussfolgerungen

Wasserspiegelabsenkungen und zunehmende Bewaldung sind in Kesselmooren Nordostdeutschlands seit etwa 70 Jahren nachgewiesene Trends, die sich in den letzten Jahrzehnten beschleunigt haben (Timmermann, 1993, 1999; Luthardt et al., 2010). Die Bewertung dieser Prozesse hinsichtlich ihrer natürlichen oder anthropogenen Ursachen und Konsequenzen ist schwierig und wird für verschiedene Moore unterschiedlich ausfallen. Bei Kesselmooren kann anhand von Stratigraphie, Moorvegetation und Charakteristika des Einzugsgebiets (s. Tab. 1) der hydrodynamische Typ ermittelt werden. So lassen sich bei Kesselmooren Änderungen der Vegetation und des Wasserhaushalts sowie die Notwendigkeit von Restaurierungsmaßnahmen (Timmermann et al., 2009) differenziert bewerten.

## Danksagung

Die Untersuchungen wurden gefördert vom Land Berlin (Nachwuchsförderung) und dem Landesumweltamt Brandenburg.

## 6. Literatur

- Gaudig, G., Couwenberg, J., Joosten, H., 2006. Peat accumulation in kettle holes: bottom up or top down? *Mires and Peat* 1, 1-16.
- Hannemann, M., 1994. Hydrogeologie und Wasserversorgung. In: Schroeder, J. H. (Hrsg.): *Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg*, Nr. 2: Bad Freienwalde – Parsteiner See. S. 42-43. Berlin.
- Kloss, M., 1993. Differentiation and development of peatlands in hollows without run-off on young glacial terrains. *Polish Ecological Studies* 19 (3-4), 115-219.
- Landesumweltamt Brandenburg, 1995. *Luftqualität in Brandenburg – Jahresbericht 1994*. Potsdam.
- Luthardt, V., Meier, R., Schulz, C., 2010. Moore unter Wassermangel? Entwicklungstrends ausgewählter naturnaher Moore in den Wäldern des Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin unter besonderer Berücksichtigung ihrer naturräumlichen Einbettung und des Witterungsverlaufs der letzten 16 Jahre. *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg* 19 (3/4), 146-157.
- Pfadenhauer, J., 1997. *Vegetationsökologie*. IHW-Verlag, Eching.
- Schindler, U., 1996. Untersuchungen zum Wasserhaushalt kleiner Binneneinzugsgebiete mit Söllen im Nordostdeutschen Jungmoränengebiet. *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg, Sonderheft Niedermoore*. S. 39-43.
- Succow, M., Joosten, H. (Hrsg.), 2001. *Landschaftsökologische Moorkunde*. Schweizerbart, Stuttgart.
- Thienemann, A., 1932. Schwankungen des Grundwasserstandes in Norddeutschland während der letzten Jahrzehnte. *Archiv für Hydrobiologie* 24, 345-428.
- Thienemann, A. 1933a. Schwankungen des Grundwasserstandes in Norddeutschland. Ein Nachtrag. *Archiv für Hydrobiologie* 25, 335-345.
- Thienemann, A., 1933b. Ertrinkende Wälder. *Natur und Museum* 63, 41-49.
- Timmermann, T., 1993. Die Meelake – Vegetation und Genese eines Verlandungsmoores in NO-Brandenburg. *Verhandlungen des Botanischen Vereins für Berlin und Brandenburg* 126, 25-62.
- Timmermann, T., 1999. Sphagnum-Moore in Nordostbrandenburg: Stratigraphisch-hydrodynamische Typisierung und Vegetationswandel seit 1923. *Dissertationes Botanicae* 305. Cramer, Berlin/Stuttgart.
- Timmermann, T., 2003. Hydrologische Dynamik von Kesselmooren und ihre Bedeutung für die Gehölzentwicklung. *Telma* 33, 85-107.
- Timmermann, T., Joosten, H., Succow, M., 2009. Restaurierung von Mooren. In: Zerbe, S., Wiegand, G. (Hrsg.): *Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa*. S. 55-93. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Van der Linden, M., Vickery, E., Charman, D.J., Broeckens, P., van Geel, B., 2008. Vegetation history and human impact during the last 300 years recorded in a German peat deposit. *Review of Palaeobotany and Palynology* 152, 158-175.

## **Analyse und Bewertung von Einflüssen auf den Wasserhaushalt von Seen auf eiszeitlichen Hochflächen des Ostbrandenburger Heide- und Seengebietes**

Jannike Wichern, Detlef Biemelt, Uwe Grünewald

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Postfach 101344, 03013 Cottbus, jannikewichern@aol.com

**Zusammenfassung:** In den meisten grundwassergespeisten Seen der eiszeitlichen Hochflächen im Ostbrandenburger Heide- und Seengebiet wurde während der vergangenen Jahrzehnte eine starke Wasserstandsabnahme beobachtet. Grundwasserneubildung und Seeoberflächenverdunstung sind maßgebliche Quellen und Senken in der Wasserbilanz der Seen. Die Grundwasserneubildung wurde nach dem Bagrov-Glugla-Verfahren ermittelt. Die Seeoberflächenverdunstung wurde in Abhängigkeit der mittleren Seetiefe aus der Lufttemperatur und dem Sättigungsdefizit der Luft in Monatsschritten berechnet. Die Seewasserstände nahmen seit Mitte der 1990er Jahre um ca. 1 m ab. Verringerte Grundwasserneubildung und erhöhte Seeoberflächenverdunstung werden als wahrscheinliche Ursachen angesehen. Für die mittleren Grundwasserneubildungsraten wurde eine stetige Verringerung von 16 bis 18 mm a<sup>-1</sup> zwischen dem Zeitraum 1971-80 und 2001-08 ermittelt. Für die Wasseroberflächenverdunstung ist ab Mitte der 1990er Jahre ein Anstieg um 50 bis 100 mm a<sup>-1</sup> zu verzeichnen. Insgesamt konnte das Ausmaß der Klima- und Landnutzungsänderungen auf die Wasserstandsentwicklung noch nicht eindeutig quantifiziert werden. Zur Erlangung genauerer Kenntnisse sind detailliertere Informationen hinsichtlich Geologie, Einzugsgebietsgrenzen, Wasser- und Landnutzung, sowie, darauf aufbauend, eine verbesserte Modellbeschreibung der Wechselbeziehungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre erforderlich.

### **Analysis and evaluation of influences on the water balance of lakes located on glacial plateaus of east Brandenburg**

**Abstract:** Most of the groundwater-fed lakes in the Pleistocene landscape of southeast Brandenburg have shown a strong decline in water levels during the past decades. Groundwater recharge and evaporation above the lakes are expected to be the major factors determining the water balances of the lakes. The groundwater recharge rates were determined by applying the Bagrov-Glugla approach. Lake levels were declining by about 1 m since the mid 1990s. Reduced groundwater recharge rates and elevated evaporation above the lakes are considered as potential causes for the decline. The mean groundwater recharge rates were steadily declining by 16 to 18 mm a<sup>-1</sup> during the time periods 1971-80 to 2001-08. Evaporation above the lake has increased by about 50 to 100 mm a<sup>-1</sup> since the mid 1990s. In total the impact of climate and land use changes on the water levels could not be clearly quantified. In order to get better results, detailed information on geology, water divides and land use is necessary. Additionally, the model has to include a better description of the interrelations between biosphere and atmosphere.

#### **1. Einführung**

Die mehrheitlich während der letzten Eiszeit entstandenen Seen in Brandenburg sind den kontinental beeinflussten trockenen klimatischen Bedingungen mit einem langjährigen Niederschlagsmittel von 400 bis 600 mm a<sup>-1</sup> und einer potenziellen Verdunstung von durchschnittlich 575 bis 650 mm a<sup>-1</sup> ausgesetzt (Wendling et al., 2000). Die klimatische Wasserbilanz der Region ist demzufolge negativ und es bedarf weiterer Zuflussquellen, um langfristig stabile Wasserstände zu erlangen.

Da an verschiedenen Seen Brandenburgs in den vergangenen Jahrzehnten eine starke Abnahme der Seewasserstände beobachtet wurde (Müller et al., 2007), werden in dieser Arbeit potenzielle Ursachen für die Wasserstandsabnahmen der drei Seen Pinnower See, Kleinsee und Großsee (Spree-Neiße-Kreis), die repräsentativ für viele Seen auf Hochflächen der Ostbrandenburgischen Seen-

und Heidelandschaft sind, untersucht. Im Vordergrund dieser Studie stehen die Einflüsse durch Klima- und Landnutzungsveränderungen. Die Untersuchungen wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus angefertigt (Wichern, 2009).

#### **2. Untersuchungsgebiet**

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Südosten Brandenburgs und umfasst mehrere Seen, die seit Jahren dramatische Wasserstandsabnahmen aufweisen. Die Oberflächenstruktur des Untersuchungsgebietes ist durch die letzte Eiszeit geprägt (Nowel et al., 1994) und von einem kontinentalen Klima mit einer mittleren jährlichen Niederschlagshöhe von 564 mm (Station Cottbus, 1961-2008) und einer jährlichen potenziellen Verdunstung von

600 bis 650 mm (Wendling et al., 2000) beeinflusst. Für die vergangenen 50 Jahre wurden in der Region ein Anstieg der Durchschnittstemperatur (Gerstengarbe et al., 2003) sowie eine verlängerte Vegetationsperiode von durchschnittlich 10 Tagen während der vergangenen 15 bis 30 Jahren beobachtet (MLUV, 2002; Miegel et al., 2007).

Das Untersuchungsgebiet ist überwiegend durch Laub- und Nadelwälder bedeckt, wobei Nadelwälder dominieren (Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, 2003). Es überwiegen Gemeine Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Traubeneiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) mit unterschiedlicher Bodenvegetation (Anonym a, 1999; Anonym b, 2003). Das durchschnittliche Umtriebsalter der Gemeinen Kiefer beträgt 120 bis 130 Jahre, das der Traubeneiche 180 Jahre (K. Arnold, Tauer, mdl. Mitt.).

### 3. Daten und Methoden

Als potenzielle Einflussgrößen für eine Wasserstandsabnahme wurden Klima- und Landnutzungsveränderungen untersucht. Es wurden die Klimaelemente Lufttemperatur (°C), Niederschlag (mm), potenzielle Verdunstung nach Turc-Wendling (mm), Klimatische Wasserbilanz (mm) sowie Vegetations- und Wachstumsstadien der Station Cottbus des Deutschen Wetterdienstes für den Zeitraum 1961-2008 analysiert.

Die untersuchten Seen besitzen keinen oberirdischen Abfluss. Sie werden als Speicher angesehen, die im Grundwasserstrom eingebettet sind. Dies konnte durch die See- und Grundwasserstandsdaten bestätigt werden. Die Speisung der Seen ergibt sich neben dem direkt auftreffenden Niederschlag maßgeblich durch die Grundwasserneubildung im unterirdischen Einzugsgebiet der Seen. Als wesentliche, sich potenziell ändernde Verlustgrößen werden die Verdunstung von der Wasseroberfläche und die Transpiration der Wasserpflanzen angesehen.

Wegen der überregional zu beobachtenden Tendenz der Wasserstandsabnahmen werden Veränderungen des unterirdischen Abflusses und Wasserentnahmen aus den Seen nicht betrachtet. Die Seen verfügen nicht über relevante oberirdische Zu- und Abflüsse. Oberflächenabfluss, der den Seen im Ergebnis von Niederschlagsereignissen höherer Intensität direkt zufließt, tritt wahrscheinlich sporadisch auf. Durch den Kontakt der Seen zum Grundwasser dürften sich Wasserstandserhöhungen, die aus Oberflächenabfluss resultieren, im See kurzfristig durch einen Ausgleich mit dem umgebenden Grundwasserniveau abbauen. Demnach wird diese Größe nicht als relevant für langfristige Trends der Seewasserstände angesehen. Somit sind die Wasseroberflächenverdunstung und die Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Seen zu bestimmen.

Die Seeoberflächenverdunstung wurde auf Basis der vereinfachten Kombinationsmethode nach Richter (1984) bestimmt.

Für die Bestimmung der Evapotranspiration bzw. der Grundwasserneubildung wurde das Verfahren nach Bagrov-Glugla (BAGLUVA; ATV-DVWK, 2002; Glugla et al., 2003) ausgewählt, welches auf fundamenta-

len Annahmen zur Kopplung von Energie und Wasserhaushalt basiert. Die tatsächliche Evapotranspiration ist ( $ET_a$ ) durch die Energie- und Wasserverfügbarkeit limitiert.

$$Et_a \rightarrow Et_p, \text{ wenn } P \rightarrow \infty$$

$$Et_a \rightarrow P, \text{ wenn } ET_p \rightarrow \infty$$

Die Energieverfügbarkeit wird durch die potentielle Evapotranspiration ( $ET_p$ ) ausgedrückt. Die Wasserverfügbarkeit ist durch die Niederschlagshöhe (P) gegeben.

Bagrov formulierte den Zusammenhang zwischen Energie und Wasserverfügbarkeit in der Form (vgl. Glugla et al., 2003):

$$\frac{dEt_a}{dP} = 1 - \left( \frac{Et_a}{Et_p} \right)^n$$

$\overline{P}$ : Langjähriges Mittel des Niederschlags [mm/a]

$\overline{Et_p}$ : Langjähriges Mittel der potentiellen Evapotranspiration [mm/a]

$\overline{Et_a}$ : Langjähriges Mittel der tatsächlichen Verdunstung [mm/a]

$n$ : Effektivitätsparameter [-]

Die Berücksichtigung der Standortbedingungen wie Boden und Vegetation erfolgt mit dem Effektivitätsparameter  $n$  (Glugla et al., 1997).

Für vieljährige Zeiträume kann die Zwischenspeicherung des Wassers auf Oberflächen oder in der ungesättigten bzw. gesättigten Bodenzone vernachlässigt werden. Somit ergibt sich die Grundwasserneubildung im langjährigen Mittel ( $\overline{GWNB}$ ) aus der Differenz von korrigiertem Niederschlag und Evapotranspiration.

$$\overline{GWNB} = \overline{P_{korr}} - \overline{ET_a}$$

Dementsprechend werden bei den hier angestellten Untersuchungen Zehnjahresmittel für den Zeitraum 1961-2008 betrachtet.

Die Landnutzung im Modell bestand aus Mischwald mit einem Nadel- : Laubbaumverhältnis von 70 : 30 % bzw. 80 : 20 % auf sandigen Böden mit einer nutzbaren Feldkapazität von unter 16 vol%. Um das Verhältnis zwischen Landnutzungs- bzw. Klimaänderungen und der Grundwasserneubildung zu bestimmen, erfolgte die Berechnung in drei Szenarien. Szenario 1 bildet die reale zeitliche Entwicklung von Klima und Landnutzung ab, in dem die Zehnjahresmittel der Klimaeingangsgrößen verwendet wurden und das durchschnittliche Umtriebsalter der Bäume in Zehnjahresschritten variierte. Im Szenario 2 blieb das Umtriebsalter konstant, um den Einfluss klimatischer Veränderungen auf die Grundwasserneubildung zu analysieren. Im Szenario 3 wurden die klimatischen Einflussgrößen konstant gehalten, um den Einfluss der Baumalterung auf die Grundwasserneubildung zu bestimmen.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1. Wasserstände

Die Analyse der Seewasserstände über einen Zehnjahreszeitraum ergab eine durchschnittliche Wasserstandsabnahme von 8 bis 10 cm a<sup>-1</sup> (Abb. 1).

Grundwasserstände nahegelegener Beobachtungsrohre aus demselben Zeitraum nahmen mit vergleichbarer zeitlicher Dynamik um 9 bis 11 cm a<sup>-1</sup> ab, sodass ein Zusammenhang zwischen See- und Grundwasserständen bestätigt werden kann. Die Grundwasserstände schwanken zwischen den Jahren deutlich. Seit Mitte der 1990er Jahre ist ein negativer Trend vorhanden, der sich bis 2008 fortsetzt (Abb. 2).

Ähnliche Wasserstandsabnahmen traten in anderen Regionen Brandenburgs auf. So sank der Wasserspiegel des

Redernswalder Sees im Nordosten Brandenburgs um mehr als 3 m in 25 Jahren, was eine durchschnittliche Abnahme von 12 cm a<sup>-1</sup> ergibt (Natkhin et al., 2009). In Teilregionen Brandenburgs wurden seit den 1970er Jahren sinkende Grundwasserspiegel beobachtet (Lahmer und Pfützner, 2003).

### 4.2. Klimaentwicklung

Die Niederschlagsverteilung zwischen den Jahren wies große Schwankungen auf. Dabei sind an den Daten der Station Cottbus jedoch weder Zu- noch Abnahmetrends im Jahr oder Halbjahr erkennbar. Das Mittel der Jahresniederschläge für den Zeitraum 1991-2008 (Zeitraum mit deutlicher Abnahme der Grund- und Seewasserstände) weicht nur unbedeutend vom Mittel des Zeitraumes 1961-90 ab. Gleiches gilt bei gesonderter Betrachtung der Niederschläge des Sommer- und Winterhalbjahres.

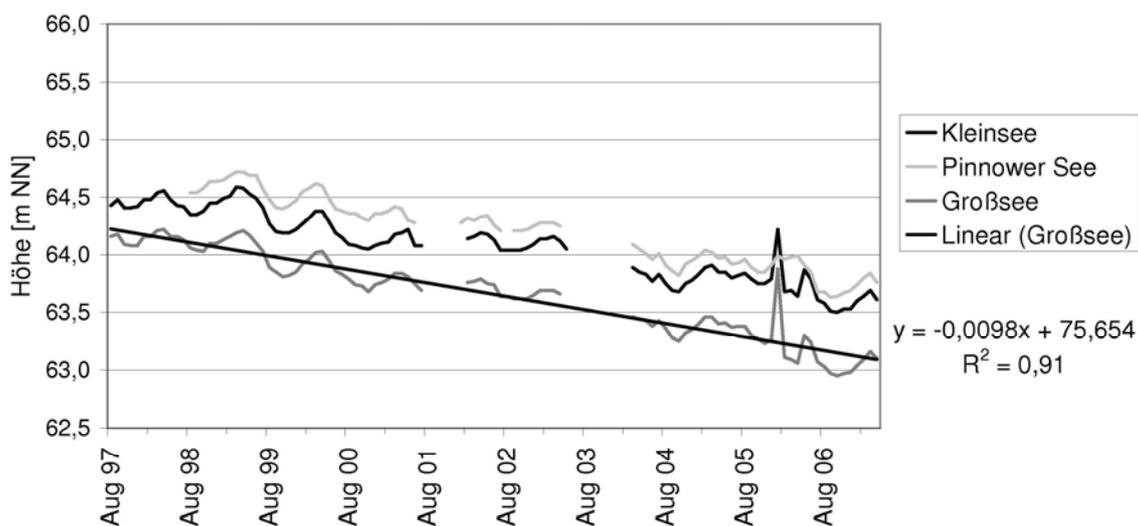


Abb. 1: Wasserstände der drei untersuchten Seen (monatliche Mittel).

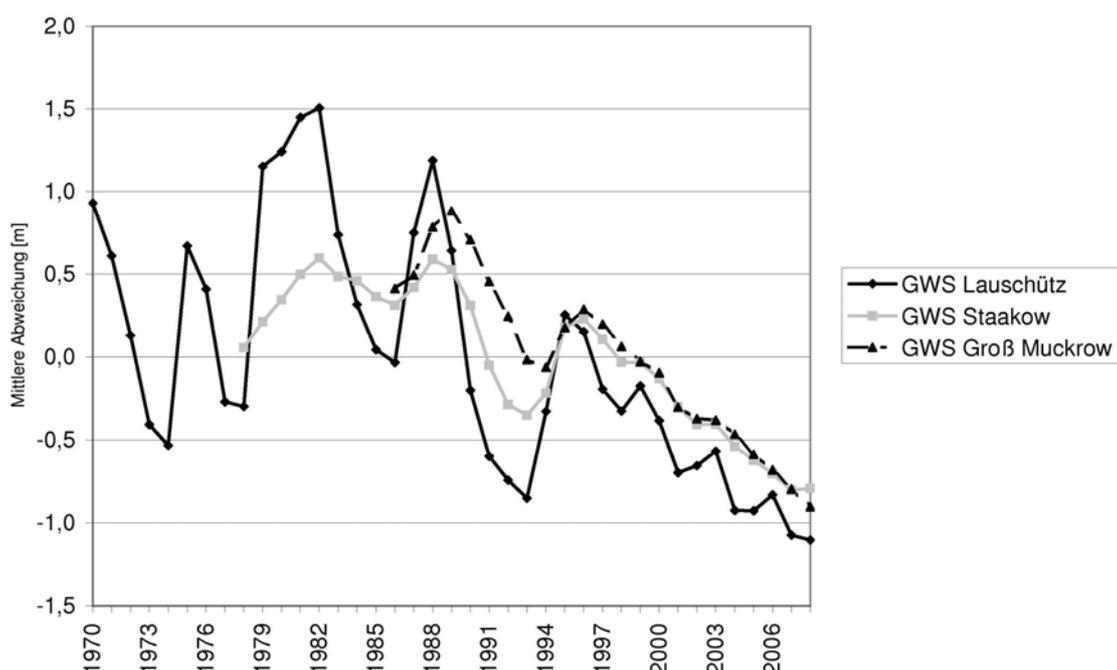
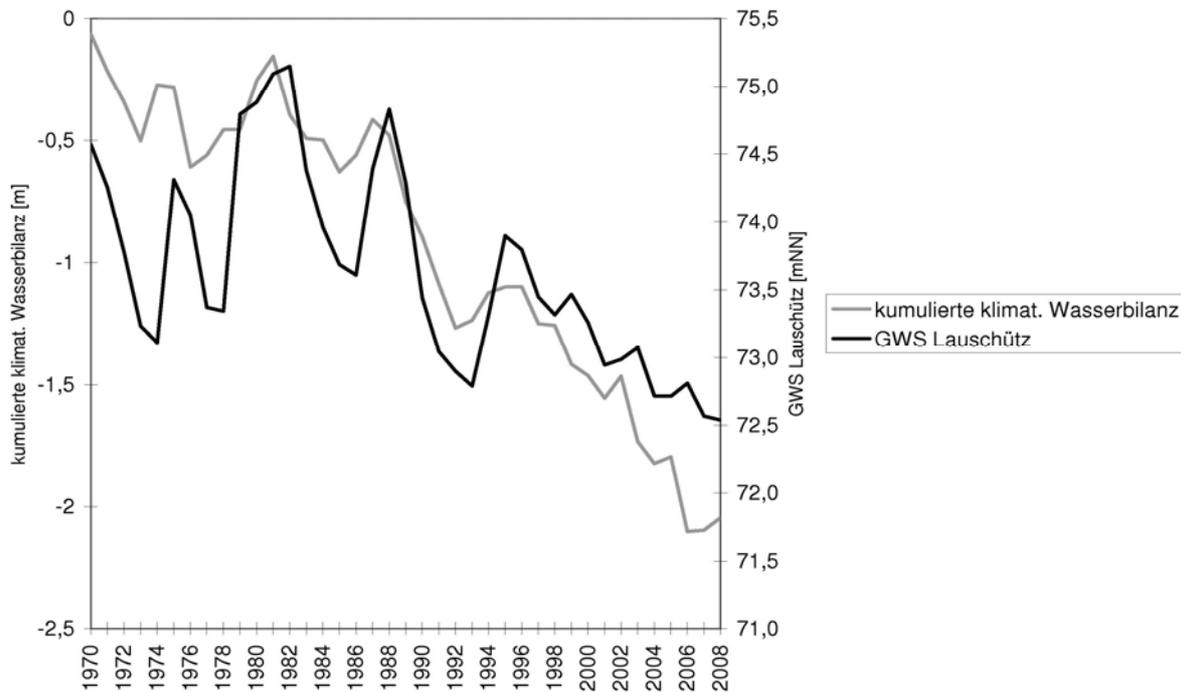


Abb. 2: Jahresmittel der Grundwasserstandsschwankungen (GWS: Grundwasserstand).



**Abb. 3:** Vergleich zwischen der kumulierten klimatischen Wasserbilanz und Grundwasserstand (GWS) Lauschwitz.

Für die Station Cottbus ergibt sich zwischen 1961 und 2008 eine durchschnittliche Zunahme der Temperatur von 1,0 bis 1,5 °C. Demzufolge nahmen auch die potenzielle Verdunstung sowie die jährliche Anzahl der Vegetations- und Wachstumstage zu. Wahrscheinlich werden höhere Verdunstungsraten sowohl durch einen Temperaturanstieg als auch durch damit verbundene höhere Pflanzenaktivitäten verursacht. Ähnlichkeiten im zeitlichen Verlauf von Klima- und Wasserstandsänderungen lassen auf einen engen Zusammenhang schließen.

Lahmer und Pfützner (2003) fanden für Temperatur und Niederschlag in Brandenburg ähnliche Tendenzen: Während für die mittlere Jahres- und Wintertemperatur ein deutlicher Trend für den Zeitraum 1961-1998 zu beobachten war, konnten keine Trends für Niederschlagsänderungen nachgewiesen werden.

Zur Bewertung der Zusammenhänge zwischen Klimaänderungen und einer Wasserstandsabnahme wurde ein Vergleich der Hydrographen der See- und Grundwasserstände mit der kumulierten klimatischen Wasserbilanz herangezogen, welche den langjährigen Trend des regionalen Klimas in Richtung trockenerer oder nasserer Zustände beschreibt und auf potenzielle Entwicklungen der Grundwasserneubildungsrate unter Vernachlässigung von Landnutzungs- und Bodencharakteristika deutet. Abbildung 3 stellt dies für den Zeitraum 1970-2008 dar. Die ähnlich verlaufenden Kurven verdeutlichen eine enge Beziehung zueinander und somit den Einfluss, den das Klima in der Region offenbar auf die Grundwasserstände hat.

Dies betätigen auch Untersuchungen von Lahmer und Pfützner (2003) für den gesamtbrandenburgischen Raum bei einem Vergleich der Grundwasserneubildungsrate

mit der klimatischen Wasserbilanz und dem Niederschlag. Es kann also davon ausgegangen werden, dass diese Entwicklungen auf regionaler Ebene stattfinden und Hauptursachen nicht in lokalen Veränderungen zu suchen sind. Die Intensität der Auswirkungen fiel jedoch in der Studie von Lahmer und Pfützner (2003) sehr unterschiedlich aus.

#### 4.3. Gewässerverdunstung

Ein deutlicher Anstieg der Seeoberflächenverdunstung Ende der 1980er Jahre und erneut ab 2003 weist ebenfalls auf einen Beitrag klimatischer Veränderungen zu den sinkenden Wasserständen. Der tatsächliche Einfluss der Verdunstungsraten von den Seeoberflächen auf die Wasserstandsänderungen ist stark von der Größe der Einzugsgebiete der Seen abhängig. Die Größe der unterirdischen Einzugsgebiete ist allerdings weitgehend unbekannt.

#### 4.4. Grundwasserneubildung

Die großen Ähnlichkeiten der See- und Grundwasserhydrographen bestätigen, dass Grundwasser die Hauptzufuhrquelle der Seen ist. Eine modellhafte Bestimmung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf die Grundwasserneubildung sollte daher weitere Hinweise auf die Ursachen der Wasserstandsabnahmen geben. Der Einfluss der Landnutzungsänderungen auf die Grundwasserneubildung wurde unter Nutzung des Bagrov-Glugla-Verfahrens in drei Szenarien untersucht.

Im Szenario 1 ließ sich für den gesamten Zeitraum eine Zunahme der durchschnittlichen tatsächlichen Jahresverdunstung von 20 bis 22 mm bei gleichzeitiger Abnahme der Grundwasserneubildungsrate von 16 bis 18 mm a<sup>-1</sup> feststellen. Im Szenario 2 verhielt sich die Kurve ähnlich

wie im Szenario 1 bei wesentlich geringerem Ausmaß mit einem Anstieg der durchschnittlichen tatsächlichen Jahresverdunstung von 9 mm für den gesamten Zeitraum. Mit einer Standardabweichung von  $9,5 \text{ mm a}^{-1}$  konnte kein Trend festgestellt werden. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich für die Grundwasserneubildung. Im Szenario 3 verliefen sowohl die Kurve der Verdunstung als auch die der Grundwasserneubildung nahezu konstant. Es ist somit davon auszugehen, dass Landnutzungsänderungen in Form von Baumalterung bei ausgewachsenen Bäumen und bei konstantem Klima kaum Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung haben. Währenddessen treten die Effekte unter Einwirkung beider Größen, des Klimas und der Landnutzung, stärker auf als bei separater Betrachtung.

In einem vergleichbaren Modell von Lahmer und Pfützner (2003) für den gesamtbrandenburgischen Raum wurde der Hauptfokus auf klimatische Veränderungen gelegt. Es wurden sehr ähnliche Ergebnisse ermittelt, die darauf hinweisen, dass die veränderten klimatischen Bedingungen der vergangenen Jahrzehnte Einfluss auf die Grundwasserneubildung und somit auf die Wasserstände genommen haben.

Bei einem Vergleich der durchschnittlichen Grundwasserneubildungsraten mit den Zehnjahresmitteln der Grundwasserstände in Lauschwitz (Abb. 4) wird deutlich, dass die Wasserstandsabnahmen in einem wesentlich höheren Umfang stattfinden als die ausgewiesenen Veränderungen der Grundwasserneubildung. Somit bestehen große Unterschiede zwischen der Grundwasserstandsabnahme und der ermittelten Abnahme der Grundwasserneubildung.

Da reale Grundwasserstände mit auf Modellrechnung basierenden Grundwasserneubildungsraten verglichen werden, sind die Unsicherheiten zum Prozessverständnis

und dessen modellhafter Abbildung in den Betrachtungen verstärkt zu berücksichtigen. Die Wahl des BAGLUVA-Verfahrens wurde wegen der vergleichsweise einfachen Anwendbarkeit und der breiten Akzeptanz getroffen. Zwischenjährliche Schwankungen der Grundwasserneubildungsraten können mit diesem Modell nicht identifiziert werden. Bei Anwendung von anderen Modellen, die dies unter Berücksichtigung von Speicheränderungen in realen Zeitschritten ermöglichen, verbessert sich zwar die Detailtreue. Es ist jedoch abzuwägen, ob auf Grund der für das Untersuchungsgebiet vorhandenen geringen Strukturkenntnisse, aber des hohen Bedarfs an Eingangsdaten und Modellparametern, dennoch die Unwägbarkeiten steigen (Plate und Zehe, 2008). Die Nachbildung von Beobachtungen mit detaillierteren Modellen funktioniert kaum ohne Kalibrierung an gemessenen Daten (Holländer et al., 2009). Sie liefert deshalb zwar Hinweise auf mögliche Ursachen, jedoch keinen objektiven Nachweis im Sinne von Ursache-Wirkungsketten (Natkhin et al., 2009).

Weiterhin werden Interaktionen und Wechselwirkungen z.B. zur Atmosphäre und Vegetation bisher nicht ausreichend verstanden bzw. in Modellen abgebildet. Im Untersuchungsgebiet bestehen beispielsweise Hinweise auf tendenzielle Veränderungen der Vegetation (z.B. in Form einer Zunahme der Krautschicht bzw. einem Wandel der Zusammensetzung der Vegetation) und somit auf Rückkopplungen der Vegetationsentwicklung mit Umweltveränderungen. Neben der Verbesserung der Gebietskenntnis ist deshalb die Erkennung und Berücksichtigung von Prozessen und Wechselwirkungen eine zunehmende Herausforderung für die hydrologische Forschung (Bronstert et al., 2009; Wegehenkel und Kersebaum, 2009).

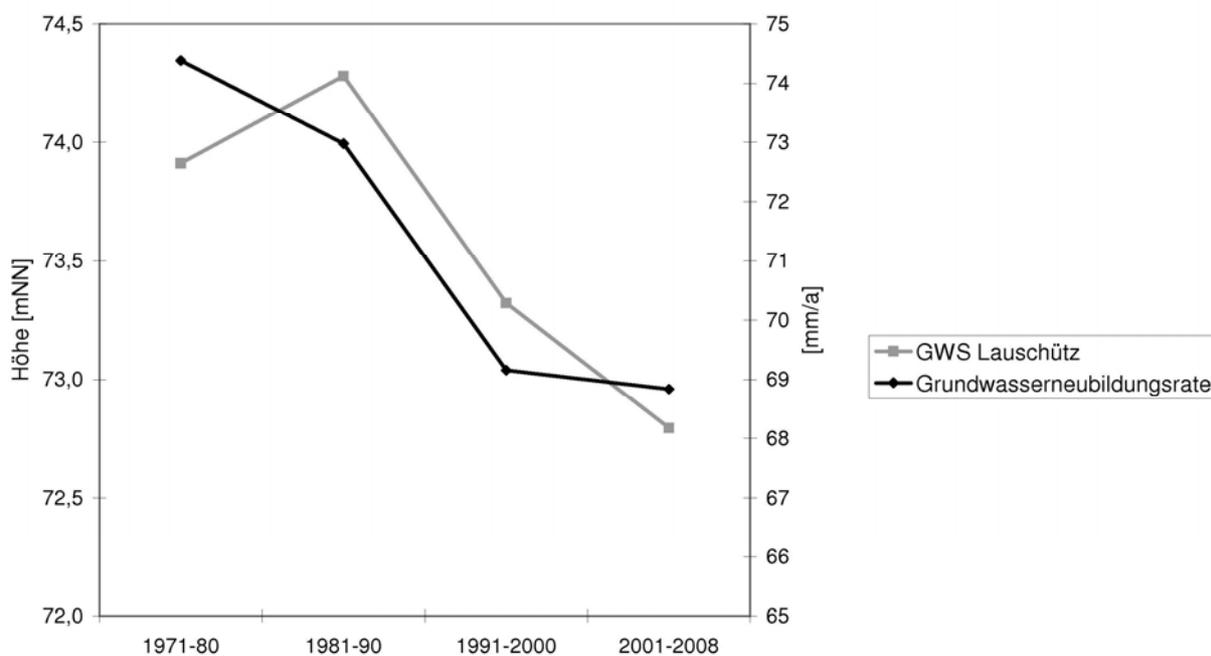


Abb. 4: Vergleich der Grundwasserneubildung aus Szenario 1 mit dem Grundwasserstand Lauschwitz (Zehnjahresmittel).

## 5. Schlussfolgerungen

Die beobachteten Abnahmen der Seewasserstände in der Ostbrandenburgischen Heide- und Seenlandschaft sind stark durch die absinkenden Grundwasserstände geprägt und deuten darauf hin, dass See- und Grundwasserstände in engem Kontakt zueinander stehen. Eine verringerte Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet und eine erhöhte Seeoberflächenverdunstung werden als wahrscheinliche Ursachen für diese Abnahmen angesehen. Eine eindeutige Begründung der Wasserstandsabnahmen ist auf Grund der Vielfalt der Unsicherheiten bezüglich der Gebietseigenschaften und der Modelle gegenwärtig jedoch noch nicht möglich. Des Weiteren sind die komplexen Wechselbeziehungen, die zwischen klimatischen Faktoren, der Landnutzung und dem Wasserhaushalt bestehen, noch unzureichend bekannt. Es wird z.B. vermutet, dass sich durch Rückkopplungseffekte zwischen Temperatur und Pflanzenwachstum die Evapotranspiration erhöht oder mit der Abnahme der Wasserstände Teile der unterirdischen Einzugsgebiete von der hydraulischen Kommunikation mit den Seen entkoppelt werden.

Um genaue Kenntnisse zu erlangen, sind verbesserte regionale Gebietskenntnisse hinsichtlich Geologie, Einzugsgebietsgrenzen, Wasser- und Landnutzung sowie eine verbesserte Berücksichtigung der Wechselbeziehungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre und der Fließprozesse in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone erforderlich.

## Danksagung

Für die Bereitstellung entsprechender Daten, Literatur und Informationen danken wir dem Landesumweltamt Brandenburg, Regionalabteilung Süd sowie dem Landesbetrieb Forst Brandenburg, Betriebsteil Peitz.

## 6. Literatur

Anonym a, 1999. Verordnung zur Ausweisung des Waldgebietes "Kleinsee" als Schutzwald, 04.26.1999. Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Brandenburg II (14) Verordnungen. S. 323f.

Anonym b, 2003. Verordnung über das Naturschutzgebiet „Pinnower Läufe und Tauersehe Eichen“, 12.06.2002. Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Brandenburg II (1) Verordnungen. S. 7-12.

ATV-DVWK – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2002. Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Merkblatt ATV-DVWK M 504.

Bronstert, A., Kneis, D., Bogena, H., 2009. Interaktion und Rückkopplung beim hydrologischen Wandel: Relevanz und Möglichkeiten der Modellierung. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 53, 289-304.

Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P. C., 2003. Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report Nr. 83. Potsdam.

Glugla, G., Jankiewicz, P., Rachimow, C., Lojek, K., 1997. Entwicklung von Verfahren zur Berechnung langjähriger Mittelwerte der flächendifferenzierten Abflußbildung. Zwischenbericht zum DFG-Projekt GL 242/1-1. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin.

Glugla, G., Jankiewicz, P., Rachimow, C., Lojek, K., Richter, K., Fürtig, G., Krahe, P., 2003. Wasserhaushaltverfahren BAGLUVa zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. BfG-Bericht 1342. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

Holländer, H. M., Blume, T., Bormann, H., Buytaert, W., Chirico, G.B., Exbrayat, J.-F., Gustafsson, D., Hölzel, H., Kraft, P., Stamm, C., Stoll, S., Blöschl, G., Flüher, H., 2009. Comparative predictions of discharge from an artificial catchment (Chicken Creek) using sparse data. *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 2069-2094.

Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, 2003. Top50 Brandenburg/Berlin – Amtliche Topographische Karten, Version 4.0. Potsdam.

Lahmer, W., Pfützner, B., 2003. Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg auf der Basis flächendeckender Wasserhaushaltsberechnungen. PIK Report Nr. 85. Potsdam.

Miegel, K., Seidler, C., Frahm, E., Zachow, B., 2007. Verdunstungsprozess und Einflussgrößen. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 21, 5-36.

MLUV – Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, 2002. Waldzustandsbericht 2002 der Länder Brandenburg und Berlin. Potsdam, Berlin.

Müller, M., Brust, K., Steidl, J., Dietrich, O., 2007. Quantifizierung der Einflüsse von Klima und Waldwirtschaft auf den Wasserhaushalt von Seen und Feuchtgebieten. In: Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern: Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007, 22/23. März 2007 an der Universität Rostock, Bd. 2, S. 83-86. DWA, Hennef.

Natkhin, M., Steidl, J., Dietrich, O., Dannowski, R., Hoffmann, D., 2009. Der Einfluss von Waldumbau auf den Wasserhaushalt eines Sees in einem niederschlagsarmen Tieflandeneinzugsgebiet. In: *Hydrologische Systeme im Wandel: Beiträge zum Tag der Hydrologie am 26./27. März 2009 an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel*, S. 59-64. DWA, Hennef.

Nowel, W., Bönisch, R., Schneider, W., Schulze, H., 1994. Geologie des Lausitzer Braunkohlereviere. Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft, Senftenberg.

Plate E. J., Zehe, E. (Hrsg.), 2008. *Hydrologie und Stoffdynamik kleiner Einzugsgebiete. Prozesse und Modelle*. Schweizerbart, Stuttgart.

Wegehenkel, M., Kersebaum, K.-C., 2009. An assessment to the impact of climate change on evapotranspiration, groundwater recharge, and low-flow conditions in a mesoscale catchment in Northeast Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172, 737-744.

Wendling, U., Fuchs, P., Müller-Westermeier, G., 2000. Mittlere jährliche Niederschlagshöhe und mittlere jährliche potentielle Verdunstungshöhe als Gras-Referenzverdunstung. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): *Hydrologischer Atlas von Deutschland*. Berlin, Bonn.

Wichern, J., 2009: Analysis and evaluation of influences on the water balance of lakes located on the glacial plateaus in the heath and lake area of east Brandenburg. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Hydrologie und Wasserwirtschaft, BTU Cottbus.

## Klimawandel und Grundwasserneubildung in Niedersachsen

Tina Wixwat

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Stilleweg 2, 30655 Hannover, tina.wixwat@lbeg.niedersachsen.de

**Zusammenfassung:** Im Rahmen des Verbundprojektes „Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen(-Wolfsburg)“ werden im Teilprojekt „Wasserwirtschaft“ die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt untersucht. Die Höhe der Grundwasserneubildungsrate ist von wesentlichem Interesse, da in Niedersachsen 86 % des Trinkwassers aus dem Grundwasser gewonnen werden. Aus diesem Grunde ist es für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung von elementarer Wichtigkeit, ob und wie sich der Klimawandel auf die Grundwasserneubildung auswirken könnte. Durch den Klimawandel soll es zu einer Verschiebung der höchsten Niederschlagsmengen von den Sommer- in die Wintermonate kommen. Im Laufe des Projektes wird der Einfluss dieser Verschiebung auf die Grundwasserneubildung erarbeitet. Grundlage der Prognoserechnungen sind die Simulationen des regionalen Klimamodells „CLM“. Diese dienen als Eingangsdaten für die Methode „GROWA06v2“ zur Bestimmung der Grundwasserneubildung für die Szenariozeiträume 2011-2100 und den Referenzzeitraum 1961-1990 für 30-jährige Mittel. Außerdem sollen die innerjährlichen Schwankungen des Grundwasserflurabstandes abgeschätzt werden.

### Climate change and groundwater recharge in Lower Saxony

**Abstract:** One aspect of the project „Management of climate change effects in the Metropolitan Region Hannover-Braunschweig-Göttingen(-Wolfsburg)“ is looking at the effect of possible climate change on groundwater recharge in this particular area. In Lower Saxony 86 % of the drinking water comes from groundwater. Therefore it is important for a sustainable groundwater management to know whether groundwater recharge will change in the future or not. The identification of vulnerable areas is an aim of the project. Due to climate change, precipitation will decrease during summer months and increase during winter months. This shifting of the precipitation rate will also have an impact on groundwater recharge and on fluctuations in the groundwater level over the year. Based on the data from the regional climate Model „CLM“, groundwater recharge is modelled with „GROWA06v2“ for scenario periods 2011 to 2100 (30 year averages) and a reference time (1961-1990). Furthermore the fluctuations of groundwater surface within a year will be estimated.

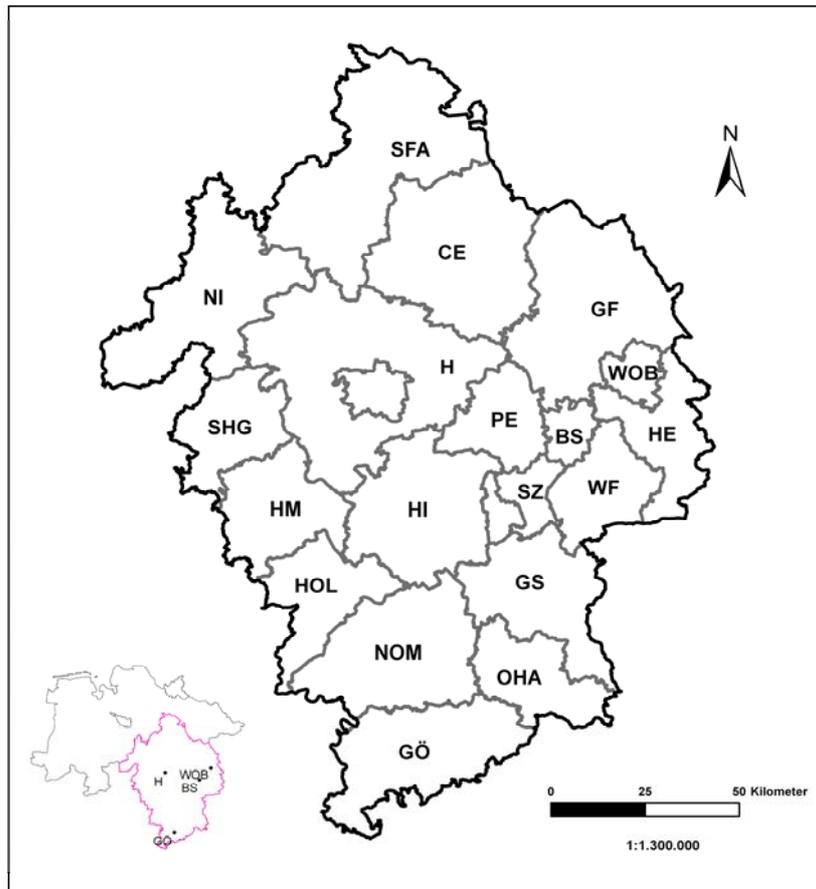
### 1. Einführung

Im Rahmen des Verbundprojektes „Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen(-Wolfsburg)“ (Abb. 1) werden derzeit in sieben Teilprojekten mögliche Auswirkungen des Klimawandels in dieser Region bearbeitet. Im Teilprojekt „Klimawandel“ werden Daten eines Klimamodells regionalisiert. Auf Grundlage dieser Daten werden Modellierungen in den Bereichen „Energiepflanzenanbau“, „Feldberegung“, „Naturschutz“ und „Wasserwirtschaft“ durchgeführt. Ziel des Projektes ist es, für das Gebiet der Metropolregion eine „Informations- und Kommunikationsplattform“ zu erstellen, in der die möglichen Folgen des Klimawandels dargestellt und bewertet werden. Außerdem soll es möglich sein, interaktiv Maßnahmen durchzuführen und sich deren Auswirkungen anzeigen zu lassen. Das Teilprojekt „Wasserwirtschaft“ gliedert sich in die Bereiche „Methodische Entwicklungen“ (Grundwasser) und „Integratives Management von Grundwasserkörpern“.

### 2. Untersuchungsgebiet

Das Gebiet der Metropolregion beträgt ca. ein Drittel der Fläche des Bundeslandes Niedersachsen (Abb. 1). Die Höhe der Grundwasserneubildungsrate ist in Niedersachsen von besonderem Interesse, da 86 % des Trinkwassers aus dem Grundwasser gewonnen werden (Reutter, 2005).

Die Metropolregion kann grob in zwei Bereiche geteilt werden: in einen Lockergesteinsbereich nördlich von Hannover und in einen Festgesteinsbereich südlich von Hannover. Die gesamte Metropolregion wurde in „Hydrogeologische Typstandorte“ unterteilt, in denen Gebiete mit gleichen oder ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften zusammengefasst wurden. Der Lockergesteinsbereich setzt sich aus den Standorten „Geest“, „Niederung“ und „Lockergestein Bergland/Bergvorland“ zusammen. Im Festgesteinsbereich befinden sich die Standorte „Festgestein, karbonatisch“, „Festgestein, silikatisch“, „Festgestein, ungegliedert“ und „Harz“.



**Abb.1:** Übersicht der an der Metropolregion „Hannover-Braunschweig-Göttingen(-Wolfsburg)“ beteiligten Landkreise.

### 3. Daten und Methoden

Auf Basis von Klimadaten aus dem regionalen Klimamodell „CLM“ (Hollweg et al., 2008) soll mit der Methode „GROWA06v2“ (Lemke und Elbracht, 2008) die Grundwasserneubildung unter Einfluss des Klimawandels berechnet werden. Die CLM-Daten stehen für die Jahre 2001 bis 2100 zur Verfügung und für den Zeitraum 1961-1990 als Kontrolllauf (C20-Daten) des Modells, und zwar basierend auf dem A1B und B1-Szenario des IPCC. Verwendet werden im Projekt nur die Daten für das A1B-Szenario.

Die Klimadaten des CLM-Modells liegen ursprünglich im Abstand von  $0,2^\circ$  (ca. 20 x 20 km) vor. Da dieses Raster jedoch sehr grob ist, wurden die Daten für das Gebiet der Metropolregion auf einen Maßstab von 1 x 1 km unter Berücksichtigung von Landnutzung und Orographie regionalisiert, um regional variierende Niederschlagsmengen und Temperaturverteilungen besser abschätzen zu können (Gross, 2009).

Diese Klimamodelldaten dienen unter anderem als Eingangsparameter für die Methode GROWA06v2 zur Berechnung der Grundwasserneubildung. Als Eingangsdaten für diese Methode werden folgende Parameter benötigt:

- mittlerer Jahresniederschlag;
- mittlerer Niederschlag im Winterhalbjahr/Sommerhalbjahr;
- mittlere jährliche FAO-Grasreferenzverdunstung;

- pflanzenverfügbares Bodenwasser (berechnet aus der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraums und dem mittleren kapillaren Aufstieg);
- Nutzungsart;
- Versiegelungsgrad;
- Hangneigung;
- Exposition;
- A/A<sub>n</sub>-Verhältnis (aus Grundwasserstufe, Staunässestufe und Hangneigung);
- hydrogeologische Gesteinseinheit.

Im Rahmen des Projektes werden lediglich die Parameter Niederschlag und Verdunstung verändert. Als Verdunstung wird die FAO-Grasreferenzverdunstung (ET<sub>0</sub>; Wendling, 1997) verwendet. Die Grundwasserneubildung wird auf Basis der Landnutzungsdaten der BÜK50 (1:50.000) berechnet (Müller, 2004).

Die Grundwasserneubildung wird dekadengleitend in 30-jährigen Mitteln von 2011 bis 2100 berechnet, um die mögliche Veränderung der Grundwasserneubildungshöhe darstellen zu können. Außerdem wird die Grundwasserneubildungshöhe für den Referenzzeitraum 1961-1990 berechnet. Die Daten für diese Periode sind dem „C20-Lauf“ des CLM-Modells entnommen. Mit Hilfe dieser Daten kann auch ein Vergleich der mit modellierten Klimadaten berechneten Grundwasserneubildung und derjenigen, die auf gemessenen Werten des Deutschen Wetterdienstes beruht, durchgeführt werden. Nach Berechnung der Grundwasserneubildung wird das Grundwasserangebot der Grundwasserkörper, die sich ganz

oder teilweise in der Metropolregion befinden, berechnet. Liegt ein Grundwasserkörper nur teilweise in der Metropolregion, so wird das Grundwasserdargebot nur für die Fläche des Grundwasserkörpers berechnet, die sich auch in der Metropolregion befindet. Da die Methode GRO-WA06v2 lediglich die Grundwasserneubildung als 30-jähriges Mittel liefert, soll außerdem der innerjährliche Gang der Grundwasserneubildung abgeschätzt werden.

Für jeden Hydrogeologischen Typstandort im Lockergesteinsgebiet werden charakteristische Grundwasserganglinien hergeleitet. Leider ist die Datenlage für Wasserstandsmessungen im Festgesteinsbereich sehr gering, so dass die Auswertungen sich derzeit auf den Lockergesteinsbereich konzentrieren müssen. Voraussetzungen für die Verwendung von Messdaten sind unter anderem die Lage der Messstellen. Hierbei können Messstellen nicht berücksichtigt werden, die sich zu nah an einem Vorfluter oder an einem Brunnen befinden. Ein weiterer Punkt ist die Lage des Filters; sitzt dieser in tieferen Aquiferen, kommt es in Lockergesteinsgebieten zu einer sehr langen Verzögerung bei der Antwort des Aquifers auf Niederschlagsereignisse. Derartige Messstellen sind zum Vergleich mit den weiteren Messstellen für diese Fragestellung nicht geeignet. Weitere Bedingung war, dass die Wasserstandsdaten mindestens fünfzehn Jahre lang einmal im Monat gemessen wurden.

Nach Auswertung der Wasserstandsdaten liegen nun charakteristische Grundwasserganglinien für die Hydrogeologischen Typstandorte „Geest“, „Niederungen“ und „Lockergestein Bergland/Bergvorland“ vor. Alle Messwerte wurden auf ein Referenzniveau gebracht, so dass gemittelte Ganglinien, unabhängig von der geographischen Lage, entstehen konnten. Zurzeit wird an einer Korrelation zwischen Niederschlägen und Ganglinien gearbeitet, um den Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserstände ermitteln zu können.

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

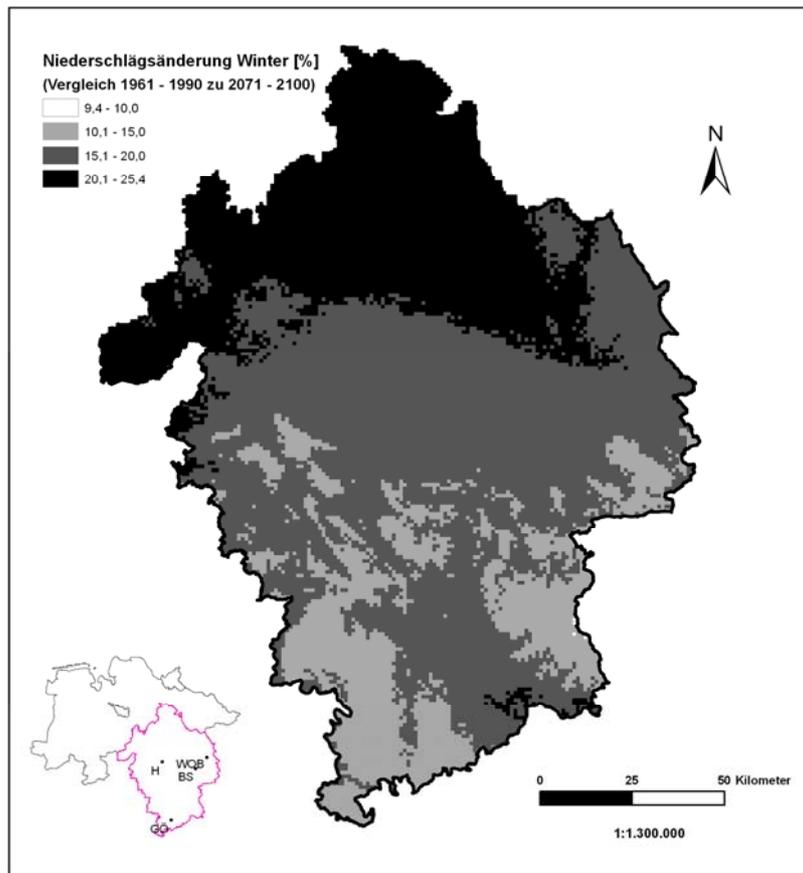
Nach genauerer Betrachtung der Klimadaten durch das Teilprojekt „Klimawandel“ für den Szenario-Zeitraum 2071-2100 soll es zu einer Erwärmung der Jahresmitteltemperatur um ca. 2-3°C kommen (Krause, ohne Jahr). Der Anstieg der Jahresmitteltemperatur wird auch bei der Betrachtung der Monatsmitteltemperaturen deutlich; vor allem in den Wintermonaten kommt es zu Durchschnittstemperaturen von ca. 5 °C im Bereich Hannover. Somit sind die Böden in dieser Region nicht mehr dauerhaft gefroren. Der fallende Niederschlag kann auch im Winter versickern und fließt nicht oberflächlich ab. Die Jahressummen des Niederschlags in der Metropolregion sollen sich im 30-jährigen Jahresmittel nicht verändern. Es soll jedoch zu einer Verschiebung der höchsten Niederschlagsmengen von den Sommer- in die Wintermonate kommen (Krause, ohne Jahr). Diese Verschiebung der höchsten monatlichen Niederschlagsmengen, einhergehend mit der Erhöhung der Monatsmitteltemperatur, wird

einen entscheidenden Einfluss auf die Grundwasserneubildung haben. Im Nordosten der Metropolregion nimmt der Niederschlag in den Wintermonaten um 20-25 % zu, im Südosten um 10-15 %. Einhergehend mit der Temperaturerhöhung wird sich auch die Evapotranspiration erhöhen (Abb. 2).

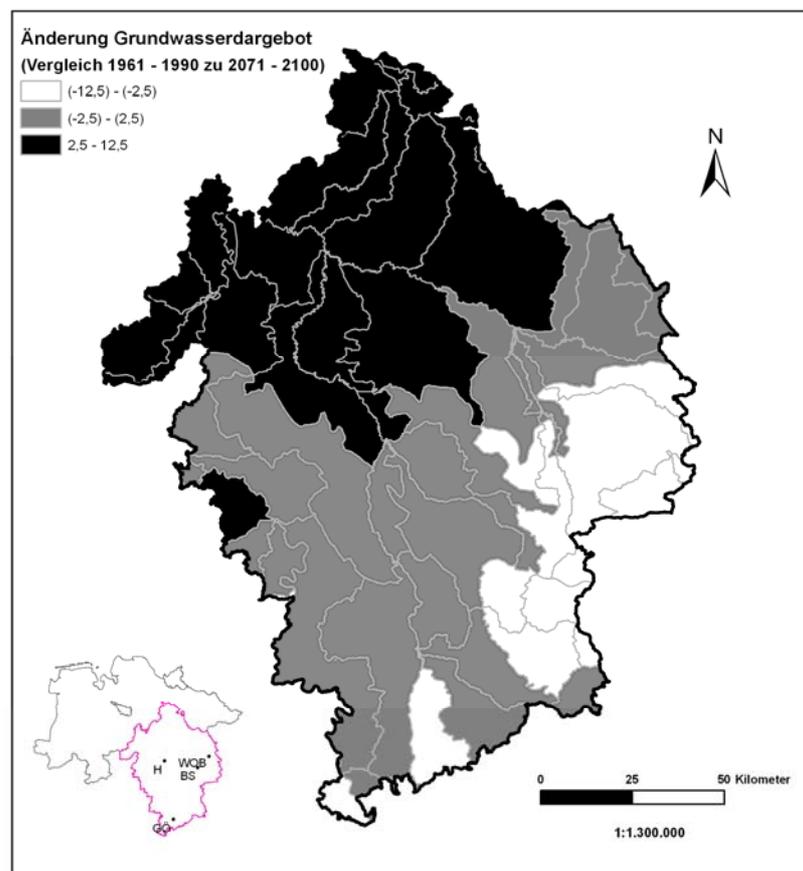
Bei einer flächenhaften Betrachtung der Grundwasserneubildung auf Basis der BÜK 50-Flächen zeigt sich eine Erhöhung der Grundwasserneubildung von 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990 (C20) im nördlichen Bereich der Metropolregion. Im östlichen Bereich der Metropolregion soll die Grundwasserneubildung im selben Zeitraum abnehmen.

Sind es für den Referenzzeitraum 35 % der Flächen, die eine Grundwasserneubildung von bis zu 100 mm/a oder gar Grundwasserzehrung aufweisen, so steigt die Anzahl der Flächen für den Zeitraum 2071-2100 auf 36,2 %. In der Zeit von 1961-1990 wiesen ca. 55,4 % der Flächen eine Grundwasserneubildung zwischen 100 und 300 mm/a auf. Nach den Modellrechnungen soll sich diese Anzahl der Flächen um 1,4 % in der gesamten Metropolregion reduzieren. Bei höheren Grundwasserneubildungsraten (> 300 mm/a) bleibt die Anzahl der Flächen im Vergleich zwischen 1961-1990 und 2071-2100 nahezu konstant. Auffallend ist, dass es in der Mitte des Jahrhunderts zu einer Zunahme der Flächenanteile bei Grundwasserneubildungen > 300 mm/a kommen soll. Innerhalb dieser Grundwasserneubildungsklassen erscheinen die Veränderungen als nicht signifikant.

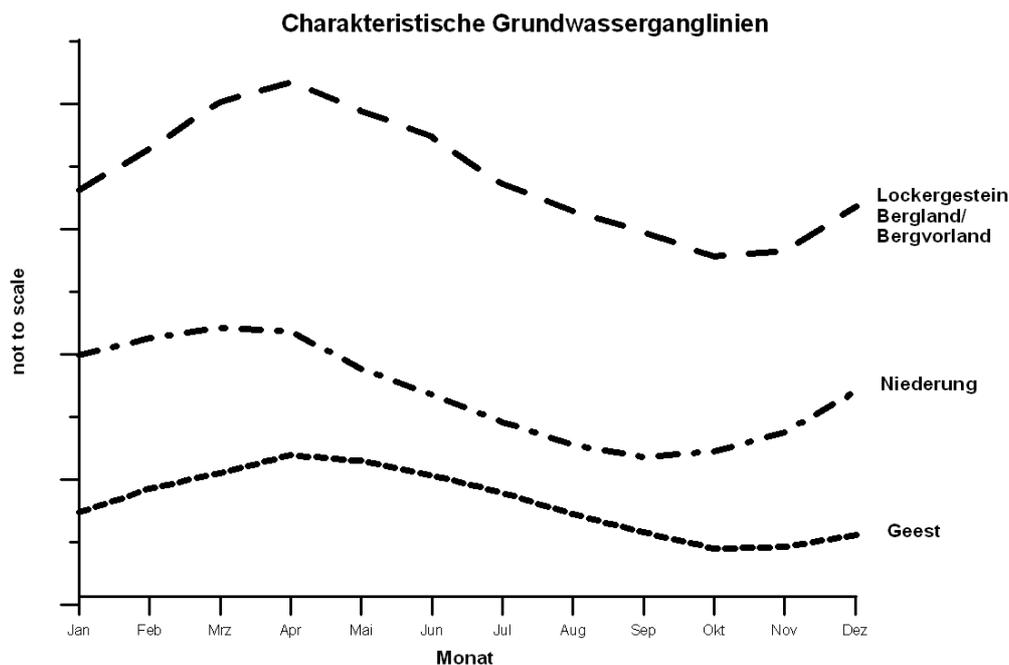
Bei einer näheren Betrachtung der Einzelwerte der Flächen ist es jedoch auffällig, dass es im nördlichen Bereich der Metropolregion zu Zunahmen und im östlichen Bereich zu Abnahmen der Grundwasserneubildung kommt. Die Grundwasserneubildung im „Festgesteinsbereich“ bleibt nahezu unverändert. Um eine bessere räumliche Darstellung der Ergebnisse zu bekommen, wird das Grundwasserdargebot für die Grundwasserkörper, die komplett oder nur teilweise in der Metropolregion liegen, berechnet (Abb. 3). Hierbei zeigt sich, dass sich die Grundwasserkörper mit den höchsten Dargebotsmengen pro km<sup>2</sup> im nordwestlichen Bereich der Metropolregion (Böhme Lockergestein links/rechts, Wümme Lockergestein links) und im Harz (Ruhme, Innerste, Oker Harzpaläozoikum) befinden. In diesen Bereichen kommt es zu einem Grundwasserdargebot von 200.000 bis 300.000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> im Zeitraum 1961-1990. Im zentralen Bereich der Metropolregion befinden sich Grundwasserkörper, die für den Referenzzeitraum ein Grundwasserdargebot von 100.000 bis 200.000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> aufweisen. Im südlichen und östlichen Bereich der Metropolregion befinden sich Grundwasserkörper, die teilweise in der Metropolregion liegen und deren Grundwasserdargebot lediglich 50.000 bis 100.000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> beträgt.



**Abb. 2:** Mögliche Veränderung des Winterniederschlags (in Prozent) von 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990 nach CLM.



**Abb. 3:** Mögliche Änderung des Grundwasserdargebots (in Prozent) von 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990 bezogen auf Grundwasserkörpergrenzen.



**Abb. 4:** Charakteristische Grundwasserganglinien für die Hydrogeologischen Typstandorte „Geest“, „Niederung“ und „Lockergestein Bergland/Bergvorland“ beruhend auf gemessenen Wasserstandsdaten.

Die Veränderung des Grundwasserdargebotes von 1961-1990 zu 2071-2100 zeigt einen NW-SE gerichteten Trend an. Im Nordwesten der Metropolregion soll es zu Zunahmen des Grundwasserdargebotes zwischen 2,5 und 7,5 % kommen. Im zentralen Bereich der Metropolregion soll sich das Grundwasserdargebot nicht verändern ( $\pm 2,5$  %). Die südöstlichen Grundwasserkörper (Bode, Fulda, Rhume mesozoisches Festgestein; alle anteilig in der Metropolregion) werden von den Klimaänderungen stärker betroffen sein. Hier soll das Grundwasserdargebot um 7,5-12,5 % abnehmen. Bis jetzt liegen die charakteristischen Grundwasserganglinien für den Referenzzeitraum 1961-1990, basierend auf realen Messwerten, vor (Abb. 4). Der Typstandort „Geest“ weist die geringste Amplitude auf. Die Amplitude des Standortes „Niederung“ ist ca. 1,5-mal, die des Typs „Lockergestein Bergland/Bergvorland“ sogar doppelt so hoch wie die des Standortes „Geest“.

Die Maxima der Ganglinien liegen bei den Standorten „Lockergestein Bergland/Bergvorland“ und „Geest“ Anfang April, bei dem Standort „Niederung“ bereits Anfang März. Die Minima dieser Ganglinien liegen für „Geest“ und „Lockergestein Bergland/Bergvorland“ Anfang Oktober und für „Niederung“ Anfang September.

## 5. Schlussfolgerungen

Die Schlussfolgerungen stellen den aktuellen Arbeitsstand dar.

Die Änderungen der Grundwasserneubildung bzw. des Grundwasserdargebotes sind anhängig von Standortvoraussetzungen, zu diesen zählen unter anderem Niederschlag, Geologie/Bodentyp und Grundwasserflurabstand. Die Verschiebung der höchsten monatlichen Niederschlagsmengen von den Sommer- in die Wintermonate

hat einen entscheidenden Einfluss auf die Grundwasserneubildung. Dort, wo der Niederschlag in den Wintermonaten stärker zunehmen soll, soll auch eine Zunahme der Grundwasserneubildung stattfinden. Dadurch kann auch eine Zunahme der Evapotranspiration im Bereich der nordwestlichen Grundwasserkörper kompensiert werden. Die möglichen Abnahmen der Grundwasserneubildung im südöstlichen Gebiet der Metropolregion gehen auch einher mit einer geringen Zunahme der Winterniederschlagsmengen, möglicherweise bedingt durch das schon dort beginnende kontinentalere Klima. Die Teilflächen dieser Grundwasserkörper befinden sich fast ausschließlich auf Hydrogeologischen Typstandorten des Festgesteins. In den sich um Braunschweig befindlichen Grundwasserkörpern kommt zudem noch der Typ „Lockergestein Bergland/Bergvorland“ vor. Einen weiteren Einfluss auf die Grundwasserneubildung hat die Temperaturerhöhung in den Wintermonaten. Bei einer Monatsdurchschnittstemperatur von 5°C kommt es nicht zu dauerhaft gefrorenen Böden, auf denen der Niederschlag nicht versickern kann oder ggf. oberflächlich abfließt.

Durch die stärkere Trockenheit während der Sommermonate und zunehmenden Niederschlägen in den Wintermonaten wird es zu einer Zunahme der Amplitude der Grundwasserganglinien kommen. Möglicherweise kommt es auch zu Änderungen des jahreszeitlichen Verlaufs der Grundwasserganglinien. Dieses könnte durch die Herleitung von monatlichen Grundwasserganglinien, die noch in Bearbeitung sind, gezeigt werden, da für die Messwerte bereits eine deutliche Reaktion des Grundwasserleiters auf unterschiedlichen Standorten in den Grundwasserganglinien zu erkennen ist.

Derzeit wird im Projekt an Berechnungen der Grundwasserneubildung gearbeitet, die auf Minimum- und Maxi-

mum-Klimaszenarien beruhen, um eine Spannbreitenbestimmung für die Veränderung der Grundwasserneubildung zu bekommen. Des Weiteren wird daran gearbeitet, eine mögliche Veränderung der Landnutzung in der Menge der gebildeten Grundwasserneubildung zu berücksichtigen.

### **Danksagung**

Das Projekt „Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen(-Wolfsburg)“ mit der Fördernummer 01LS05038A wird finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung.

### **6. Literatur**

Gross, G., 2009. Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover Braunschweig Göttingen. Bericht, Hannover.

Hollweg, H.-D., Böhm, U., Fast, I., Hennemuth, B., Keuler, K., Keup-Thiel, E., Lautenschlager, M., Legutke, S., Radtke, K., Rockel, B., Schubert, M., Will, A., Woldt, M., Wunram, C., 2008. Ensemble Simulations over Europe with the Regional

Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. Technical Report No. 3. Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg.

Krause, A., ohne Jahr. Zwischenergebnisse Teilprojekt FE1 „Klimawandel“ des Verbundprojektes „Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen(-Wolfsburg)“.

Lemke, D., Elbracht, J., 2008. Grundwasserneubildung in Niedersachsen. Ein Vergleich der Methoden Dörhöfer & Josophait und GROWA06V2. Geoberichte 10. Hannover.

Müller, U., 2004. Auswertungsmethoden im Bodenschutz – Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). Arbeitshefte Boden 2004/2. Hannover.

Reutter, E., 2005. Hydrostratigrafische Gliederung Niedersachsens. Geofakten 21. Hannover.

Wendling, U., 1997. Bilanzierung der hydrometeorologischen Grundgrößen korrigierter Niederschlag und Gras-Referenzverdunstung sowie ihre Rückkopplung zu Abfluß und Grundwasserneubildung. In: Leibundgut, C., Demuth, S. (Hrsg.): Grundwasserneubildung. Freiburger Schriften zur Hydrologie 5, 60-70. Freiburg.

## Wasserhaushalt landwirtschaftlich genutzter Böden in Mecklenburg-Vorpommern

Birgit Zachow, Konrad Miegel

Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Institut für Umweltingenieurwesen, Satower Straße 48, 18051 Rostock, konrad.miegel@uni-rostock.de

**Zusammenfassung:** Klimaänderungen werden aller Voraussicht nach gravierende Veränderungen des Landschaftswasserhaushalts zur Folge haben. Dabei sind der Boden und die Landnutzung für die Aufteilung des Niederschlags in Abfluss und Verdunstung von zentraler Bedeutung. Da in Deutschland neben den forstlichen vor allem landwirtschaftliche Nutzungsformen dominieren, zielten erste Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaänderungen in Mecklenburg-Vorpommern (Förderung durch das Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus M-V) u. a. auf die Veränderung des Wasserhaushaltes landwirtschaftlich genutzter Böden. Grundlage entsprechender Auswertungen an ausgewählten Standorten mit dominierendem vertikalen Wasseraustausch bildeten WETTREG-Daten des mittleren Szenarios A1B, die als Eingangsgrößen in ein Wasserhaushaltsmodell mit integriertem Pflanzenwachstumsmodell dienten. Aus den Veränderungen der Klimagrößen Niederschlag (überwiegend Zunahme im Winter- und Abnahme im Sommerhalbjahr) und Temperatur (unterschiedlich starke Zunahme) wurden innerjährliche Veränderungen bei den Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung und Versickerung ermittelt.

### Water balance of farmland soils in Mecklenburg-Vorpommern

**Abstract:** The expected climate change will cause serious changes in hydrological processes in the future. In this context soil properties and land use are essential for the formation of runoff and the withdrawal of soil water by plants. Besides forestry, farming is the most important form of land use in Germany. Therefore first investigations on the influence of climate change in Mecklenburg-Vorpommern examined the change in the soil water balance of farmlands. The investigations at selected sites focused on soils dominated by vertical water exchange processes. The simulations were based on time series of meteorological data for the global scenario A1B and their regional downscaling by the model WETTREG. Higher temperatures, higher precipitation in winter and lower rain amounts in summer are expected in the region in the future. The meteorological data served as input to simulate the water balance under consideration of plant growth. The model results show that changes in temperature and precipitation will cause changed annual distributions of evapotranspiration and groundwater recharge.

### 1. Einführung

Aufgrund menschlicher Einflussnahme wird eine weltweite Erwärmung der mittleren Lufttemperatur in Deutschland um mindestens 1,5° C bis 2100 erwartet. Wegen der engen Kopplung zwischen Bodenwärme- und Bodenwasserhaushalt und Änderungen im Niederschlagsregime können Klimaschwankungen ganz erhebliche Veränderungen bei den Wasserhaushaltsgrößen und im Abflussgeschehen nach sich ziehen. Diese wiederum hätten unmittelbare Auswirkungen auf wesentliche Teilbereiche der Wasserwirtschaft, aber auch auf die Landwirtschaft.

Die Wasserwirtschaft steht vor der Aufgabe, auf die damit verbundenen Herausforderung in vernünftiger Weise vorbereitet zu sein. Grundlage dafür bilden Instrumente, mit denen Szenariobetrachtungen zu solchen Veränderungen mit ausreichender Sicherheit möglich sind.

Bei vielen derartigen Untersuchungen fällt auf, dass Modelle zur Anwendung kommen, die fixe empirische Parameter für die Verdunstungsberechnung verwenden. Die so erzielten Ergebnisse besitzen nur eine begrenzte

Aussagekraft, weil es durch Klimaänderungen aller Voraussicht nach zu einer Verschiebung von Phasen der Pflanzenentwicklung kommen wird, wie beispielsweise die Vorverlagerung von Wachstumsbeginn und Reife (Rötzer und Chmielewski, 2001). Solche phänologischen Veränderungen haben gleichfalls Einfluss auf den Wasserhaushalt und müssen in geeigneter Form berücksichtigt werden. Deshalb sind bevorzugt Wasserhaushaltsmodelle wie MINERVA zu verwenden, die als Baustein ein Pflanzenwachstumsmodell enthalten.

### 2. Material und Methoden

Eine wichtige Grundlage unserer Untersuchungen bildeten meteorologische Parameter und Bodenwasserhaushaltsdaten, die an der Lysimeterstation in Groß Lüsewitz seit 1972 erfasst werden. Mit Hilfe dieser Beobachtungswerte wurde das verwendete Bodenwasserhaushaltsmodell MINERVA kalibriert und verifiziert (siehe unten).

Zu den zentralen Fragen bei der Berücksichtigung von Klimaänderungen innerhalb von Wasserhaushaltsmodellen gehört daneben die Bereitstellung meteorologischer

Zeitreihen, die klar definierte Entwicklungsszenarios repräsentieren. Globale Modelle sind davon ausgehend in der Lage, Klimaänderungen mit einer räumlichen Auflösung von mehreren 100 km abzubilden. Sie liefern damit nur großräumig gültige, regional wenig differenzierende Aussagen. Regional modifizierend wirkende Faktoren wie Küsteneinfluss, Höhenlage und Luv/Lee-Einflüsse von Gebirgen werden entsprechend grob berücksichtigt. Aufgrund dessen kommen weiterführend regionale Modelle zum Einsatz, die in der Lage sind, die globalen Signale räumlich feiner zu untersetzen (regionales Downscaling). Dabei ist zu beachten, dass die Fehler des globalen Modells in unterschiedlicher Weise mitgeschleppt werden.

Im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA zur regionalen Untersuchung von Klimaänderungen in Süddeutschland kamen drei verschiedene Downscaling-Verfahren zur Anwendung, die durch Bartels (2004) vergleichend diskutiert worden sind. Alle Methoden weisen gewisse Vor- und Nachteile auf, so dass es letzten Endes vom Zweck abhängt, für welches Modell man sich entscheidet. Bartels (2004) schätzte damals das statistisch-dynamische WETTREG-Verfahren als das am besten geeignete ein. Die hierbei verwendeten statistischen Zusammenhänge sind an langjährig beobachteten Klimastationen abzuleiten, wofür in Mecklenburg-Vorpommern (M-V) 10 Stationen zur Verfügung stehen. WETTREG-Daten liegen für den Zeitraum 1961 bis 2100 vor und sind ausschließlich für den Standort der jeweils betrachteten meteorologischen Station gültig, an der die Simulation erfolgte. Die resultierenden Datenreihen dienen für das Bodenwasserhaushaltsmodell als Input.

Bevor das Modell MINERVA (Richter et. al., 1993), das für die Simulation des Bodenstickstoffhaushaltes landwirtschaftlich genutzter Böden entwickelt worden ist und die Berücksichtigung verschiedener Bewirtschaftungsformen zulässt, eingesetzt werden konnte, war es auf seine Tauglichkeit hin zu überprüfen (Kalibrierung an Lysimeterdaten der Station Groß Lüsewitz: 1997-2002, Verifikation: 2003-2005).

Bei der Simulation des Pflanzenwachstums nach dem Modell von SUCROS (van Keulen et al., 1982) sind die photosynthetisch aktive Strahlung und phasenspezifische Teiltemperatursummen während der Vegetationsperiode die maßgeblichen Steuergrößen. Durch die ermittelte Blattfläche wird die tägliche Strahlungsaufnahme und damit die temperaturabhängige CO<sub>2</sub>-Assimilation gesteuert. Ein entscheidender Vorteil ist die Berücksichtigung limitierender Faktoren bei der Stickstoffaufnahme, wie Trockenheit. Trotz dieser sehr prozessnahen Beschreibung des Pflanzenwachstums kommen auch in diesem Modell empirische Parameter und Funktionen zur Anwendung, die auf der Grundlage von Feldversuchen ermittelt werden müssen und zum Teil regional gültig sind. Inwieweit diese auch veränderte Klimabedingungen repräsentieren, ist unsicher.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen zur Auswirkung von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt in M-V bilden die WETTREG-Daten des mittleren globalen Szenarios A1B die Grundlage (IPCC, 2002). Sie umfassen Tageswerte von insgesamt 10 Wetterelementen: maximale Temperatur, mittlere Temperatur, minimale

Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Dampfdruck, Sonnenscheindauer, Bewölkung und Windgeschwindigkeit.

Die Simulationen konnten aus Aufwandsgründen nicht flächendeckend durchgeführt werden. Es wurden deshalb die Stationen Schwerin (Westmecklenburg), Teterow (zentrale Lage - Übergangsbereich), Ueckermünde (östliches Vorpommern), Greifswald (nordöstliches Vorpommern) und Warnemünde (Küsteneinfluss) als Referenzstationen gewählt.

Um regionale Unterschiede bei den Klimaänderungen in ihrer Wirkung auf den Bodenwasserhaushalt schärfer abbilden zu können, wurde bei den Szenariosimulationen von den gleichen Boden- und Bewirtschaftungsverhältnissen ausgegangen. Der dominierende Bodentyp, der in allen Regionen von M-V anzutreffen ist, ist die Parabraunerde. Als regional weitgehend repräsentative Fruchtfolge wurde die Folge Wintergerste, Winterweizen und Winterraps gewählt.

Es ist besonders hervorzuheben, dass sich die Betrachtungen auf landwirtschaftliche Flächen beschränken, bei denen der vertikale Wasseraustausch dominiert. Des Weiteren ist zu beachten, dass es sich nachfolgend aufgrund von Annahmen nicht um Prognoseergebnisse handelt und wir es entlang der gesamten Methodenkette mit einer Vielzahl, auch methodischer Unsicherheiten zu tun haben. Deshalb können nur Wirkrichtungen zu möglichen Entwicklungen aufgezeigt werden.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Niederschlag und Temperatur

Die Auswertung der WETTREG-Daten für die Jahre bis 2100 ergibt in M-V voraussichtliche Veränderungen bei den Klimagrößen, die insbesondere Niederschlag und Temperatur betreffen. Zukünftig ist vor allem im Zeitraum 2051-2100 von höheren Winter- und geringeren Sommerniederschlägen auszugehen, wobei die Winter-niederschläge den Rückgang der Sommerniederschläge kaum kompensieren, so dass insgesamt die Jahresmengen niedriger ausfallen. Dabei sind in M-V größere regionale Unterschiede zu beachten. Demnach nehmen die jährlichen Niederschlagsmengen (Zeitraum 2051 bis 2100) im zentralen und nordöstlichen Teil unseres Bundeslandes um etwa 12 % bis 14 % ab, während in den übrigen Landesteilen der Rückgang nur etwa 5 % bis 6 % betragen wird. Bedeutsame regionale Unterschiede wird es auch bei der innerjährlichen Umverteilung des Niederschlags geben. Dabei repräsentiert die Station Teterow in etwa die mittleren Verhältnisse und Änderungsraten (Abb. 1).

Ein Anstieg der Temperaturen ist sowohl im Sommer als auch im Winterhalbjahr zu erwarten. Im Zeitraum 2001 bis 2050 beträgt er 0,4 bis 0,5 °C im Vergleich zum Messzeitraum 1951 bis 2003 und im Zeitraum 2051 bis 2100 sogar 1,8 bis 2,0 °C.

Die Veränderungen bei den Klimagrößen, insbesondere die innerjährliche Umverteilung des Niederschlags, haben unter den vorgegebenen Standortbedingungen entscheidende Auswirkungen auf die Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung und Grundwasserneubildung.

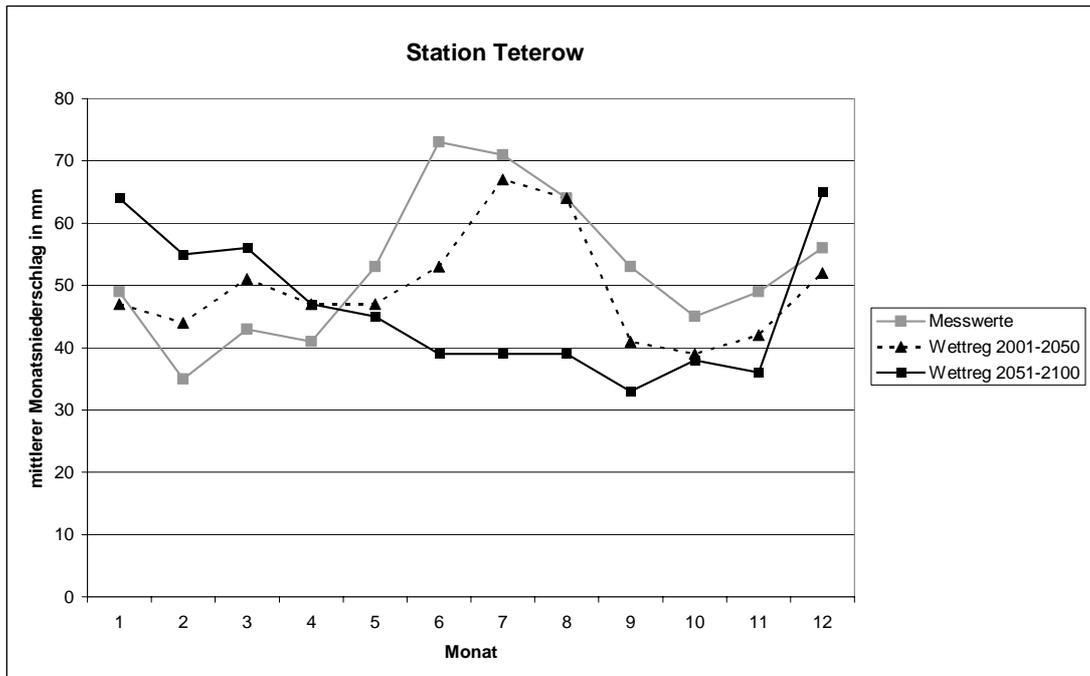


Abb. 1: Umverteilung der mittleren monatlichen Niederschlagsmengen.

### 3.2 Verdunstung

Die Ergebnisse machen an allen untersuchten Klimastationen deutlich, dass die höchste Verdunstung aufgrund der Temperaturzunahme im Monat Mai statt bisher in den Monaten Juni/Juli erreicht wird. Insgesamt geht die Verdunstung jedoch in den Sommermonaten aufgrund der geringeren Niederschlagsmengen und der damit verbundenen geringeren Bodenfeuchte zurück. Die Vermutung, dass der Temperaturanstieg zu einer deutlichen Verdunstungszunahme führen könnte, bestätigt sich aufgrund der innerjährlichen Niederschlagsumverteilung nur im Frühjahr. Auf das Jahr bezogen, wird folglich die

erhöhte Frühjahrsverdunstung durch geringere Verdunstungsraten in den Sommermonaten kompensiert.

Die Veränderungen bei der Verdunstung fallen auch regional sehr unterschiedlich aus. Da im Winter das Niederschlagsangebot bei keiner Station limitierend wirkt, bedingt hier die Temperaturzunahme generell eine höhere Verdunstung. In den Sommermonaten wirkt dagegen, wie gezeigt, das Niederschlagsangebot limitierend. Dabei ist im nordöstlichen Landesteil der Rückgang der Verdunstung am höchsten (Abb. 2), da hier die geringsten Niederschlagsmengen zu verzeichnen sind.

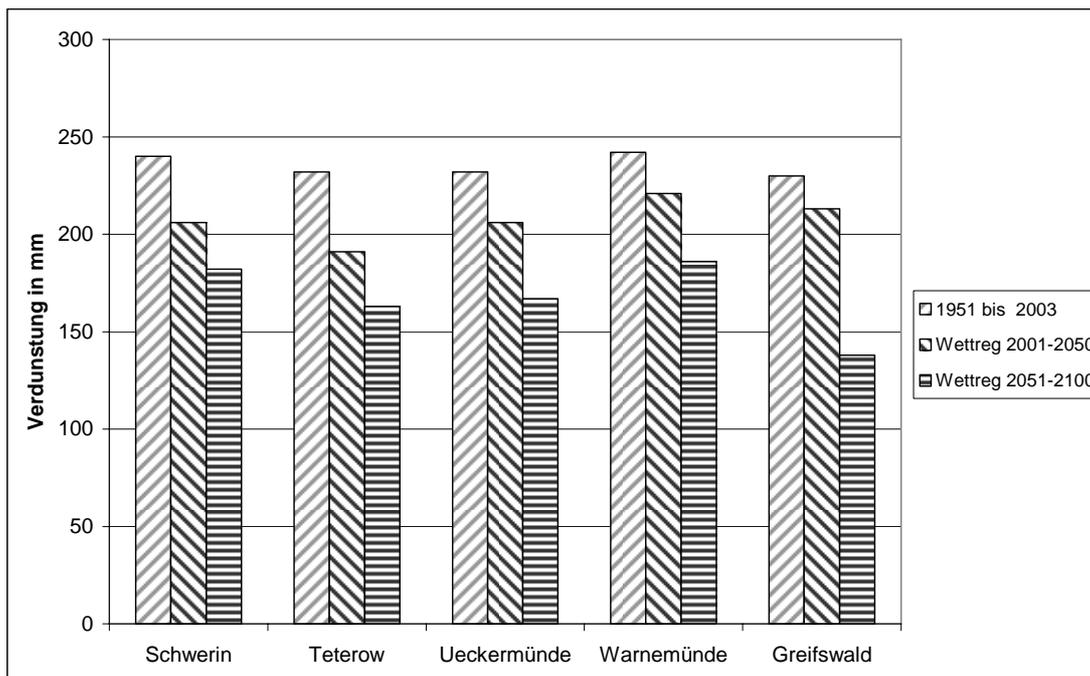


Abb. 2: Verdunstungsrückgang in den Monaten Juni bis August.

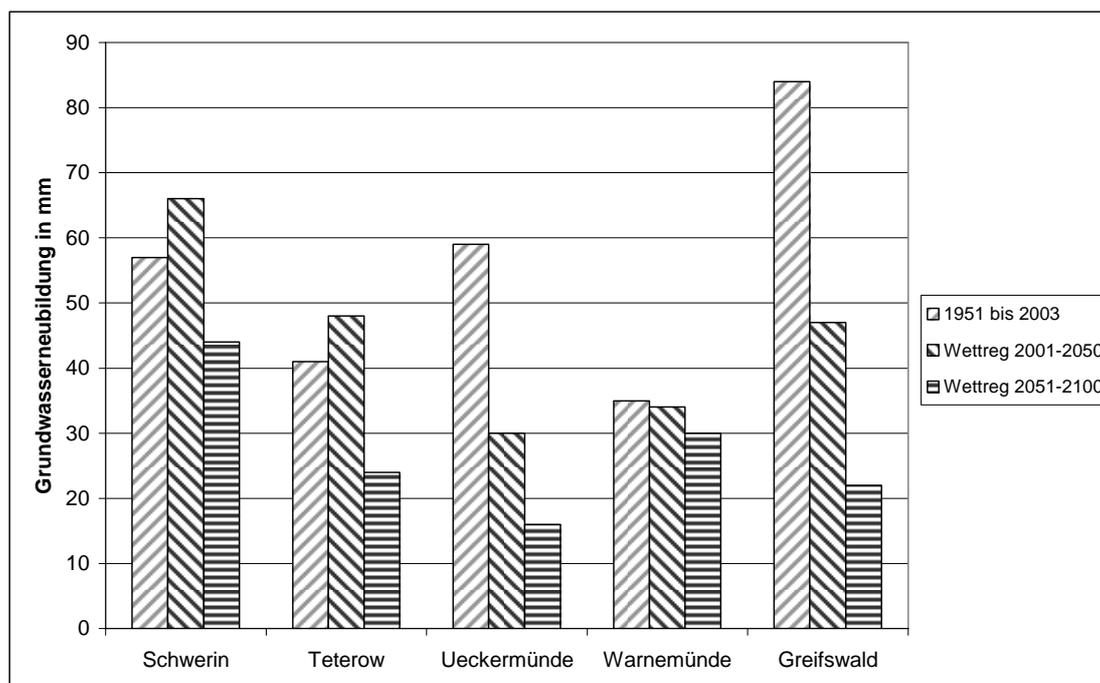


Abb. 3: Änderung der Grundwasserneubildung in den Monaten Oktober bis Dezember.

### 3.3 Grundwasserneubildung

Infolge der höheren winterlichen Niederschlagsmengen wird an allen untersuchten Klimastationen von einem starken Anstieg der Grundwasserneubildung (GWN) ab ca. Januar bis in das zeitige Frühjahr ausgegangen. Damit würde in diesem Zeitraum ein höheres Grundwasserangebot zur Verfügung stehen.

Als Risiko stellt sich die verringerte GWN in den Sommermonaten dar. Nach der intensiven Zehrung durch Verdunstung bis Mai findet in den Monaten Juni bis Oktober aufgrund des Niederschlagrückgangs im Zeitraum bis 2100 so gut wie keine GWN mehr statt. Es können sich Verringerungen des Bodenwassergehaltes in der Vegetationsperiode von bis zu 25 % ergeben. Der bereits heute trockenere östliche Landesteil ist davon stärker betroffen als der westliche Teil von M-V.

Ob es insgesamt, d. h. auf das Jahr bezogen, zu einer Zu- oder Abnahme der GWN kommt, hängt davon ab, ob die erhöhten Defizite des Bodenwasservorrats im Sommer durch die höheren Winterniederschläge überkompensiert werden oder nicht. So nimmt bei den untersuchten Standortbedingungen die GWN im mittleren und westlichen Teil des Landes bis 2050 sogar zu (Abb. 3), während sich im östlichen Landesteil die Verhältnisse weiter verschlechtern.

Diese Aussagen gelten jedoch nur unter der Bedingung, dass sich die Bodennutzung nicht grundsätzlich ändert, denn veränderte Bewirtschaftungsverhältnisse und ein erhöhter Beregnungsbedarf können andererseits auch den Rückgang der jährlichen GWN mit einer drastischen

Absenkung der Grundwasserspiegel zur Folge haben. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse die Komplexität der Zusammenhänge.

### 3.4 Messwerte Groß Lüsewitz 2008

Auch wenn Beobachtungsergebnisse von Einzeljahren nur eine begrenzte Aussagekraft besitzen und ihr direkter Vergleich mit Simulationsergebnissen problematisch ist, ist das hydrologische Jahr 2008 für die Verifizierung der Untersuchungsergebnisse durchaus aufschlussreich. So wurden an der Lysimeterstation Groß Lüsewitz, 25 km südöstlich von Rostock gelegen und langjährig mit einer landwirtschaftlichen Fruchtfolge bebaut, bei den Klimagrößen Niederschlag und Temperatur Werte gemessen, deren Höhe und innerjährliche Verteilung weitgehend den Verhältnissen entsprechen, wie sie durch Klimamodelle für A1B in den nächsten Jahrzehnten simuliert werden. So fielen im Winterhalbjahr 80 mm mehr Niederschlag als normal, dafür war im Vergleich zum langjährigen Mittel das Sommerhalbjahr mit 116 mm weniger Niederschlag zu trocken. Daneben lagen die mittleren monatlichen Temperaturen durchweg über dem langjährigen Mittel (im Jahresmittel um 1 K).

Bemerkenswert ist, dass die an der Lysimeteranlage gemessenen monatlichen Verdunstungs- und Versickerungswerte dieses Jahres im Sommerhalbjahr annähernd mit denen übereinstimmen, die sich aus den Simulationen für die Jahre 2051 bis 2100 ergeben (Abb. 4). Im Winterhalbjahr liegen die Verdunstungswerte höher, da in der aktuellen Fruchtfolge verstärkt Winterzwischenfrüchte angebaut werden.

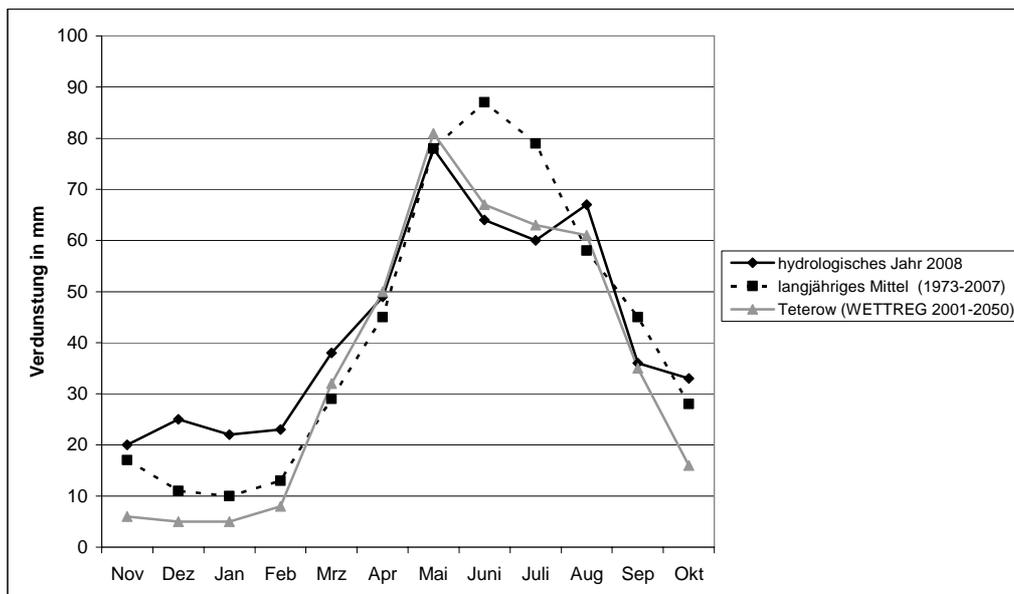


Abb. 4: Veränderung der innerjährlichen Verdunstungswerte.

#### 4. Schlussfolgerungen

Bereits heute sind deutliche phänologische Veränderungen zu beobachten. Diese erfordern die Kopplung von Wasserhaushalts- mit Pflanzenwachstumsmodellen.

Änderungen des Wasserhaushalts sind bei gleichbleibendem Niederschlagsdargebot allein schon durch veränderte innerjährliche Niederschlagsverteilungen zu erwarten. In den Spätsommermonaten drohen zunehmend Dürren und Wassermangel in der durchwurzelten Bodenzone. Selbst auf dem relativ kleinen Territorium von M-V sind bereits jetzt erhebliche regionale Unterschiede zu verzeichnen.

Entlang der gesamten Methodenkette haben wir es mit einer Vielzahl, auch methodischer Unsicherheiten zu tun. Von zentraler Bedeutung dürften darüber hinaus plausible Annahmen zur künftig angepassten Bewirtschaftung sein, um zu belastbaren Aussagen zu gelangen. Deshalb können nur Wirkrichtungen aufgezeigt werden.

Die erzielten Ergebnisse dürfen vorerst nur als eine erste Bestandsaufnahme für die betrachteten Standortverhältnisse angesehen werden. Folgende weiterführende Untersuchungen sind zu empfehlen:

- Betrachtung unterschiedlicher Szenarios und Realisierungen;
- fundierte Quantifizierung der Modellunsicherheiten;
- Erweiterung der Betrachtungen auf Einzugsgebiete und Landschaftsausschnitte mit ihren unterschiedlichen Standort- und Nutzungsverhältnissen;
- Ableitung von Vorschlägen für eine angepasste Bewirtschaftung;
- methodische Verbesserungen, u. a. Berücksichtigung veränderter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf das Pflanzenwachstum (Eitzinger et al., 2009);
- Untersuchungen zur Anwendbarkeit einfacherer Ansätze der Verdunstung und zu ihrer Parametrisierung.

#### 5. Literatur

- Bartels, H., 2004. Vergleich regionaler Klimaszenarienrechnungen für Süddeutschland. In: Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.): 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg. Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. KLIWA-Berichte 4, 73-86. München.
- Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H. (Hrsg.), 2009. Landwirtschaft im Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze.
- IPCC (Hrsg.), 2002. Klimaänderung 2001. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (International Panel on Climate Change IPCC), Deutsche IPCC Koordinierungsstelle des BMBF und BMU. Bonn.
- Richter, G.A., Beblík, A.J., Kersebaum, K.C., 1993. Modellierung des Nitrataustrags – Beratungsinstrument für den GW-Schutz in Niedersachsen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 68, 115-118.
- Rötzer, T., Chmielewski, F., 2001. Phenological maps of Europe. Climate Research 18, 249-257.
- van Keulen, H., Penning de Vries, F.W.T., Drees, E.M., 1982. A summary model for crop growth. In: Penning de Vries, F.W.T., van Laar, H. H. (Hrsg.): Simulation of plant growth and crop production. S. 87-97. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.





ISSN 1610-0956

K. Kaiser et al., Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland

STR10/10