

Mauritius Tix & Bernd Pfützner

Entwicklung eines Wasserbewirtschaftungskonzepts für das südliche Randowbruch

Developing a water management concept for the southern Randowbruch

Der überwiegende Teil der Niedermoore in Brandenburg ist durch Meliorationsmaßnahmen heutzutage stark entwässert, auch das südliche Randowbruch in der Uckermark. Moore spielen als Treibhausgas-Emissions-Standorte eine wichtige Rolle im Klimawandel. Eine Reduktion der Treibhausgasemissionen sowie die Bindung von Treibhausgasen in Biomasse sind nur auf nassen Moorstandorten zu gewährleisten. Daher beschäftigt sich dieser Artikel mit einem Projekt zur Entwicklung eines Bewirtschaftungskonzepts, bei dem die Wiedervernässung des Moorkörpers im südlichen Randowbruch im Fokus steht.

Die Region weist eine lange und stark anthropogen geprägte Meliorationshistorie auf. Das Durchströmungs- und Verlandungsmoor, welches sich während der Weichseleiszeit vor etwa 18.000 Jahren in der Schmelzwasserrinne eines anstehenden Gletschers ausbildete, wurde durch gezielte menschliche Eingriffe über die letzten 300 Jahre immer weiter entwässert und landwirtschaftlich nutzbar gemacht. Die Meliorationsmaßnahmen hatten in den 60er und 70er Jahren des 20. Jahrhunderts ihren Höhepunkt und befinden sich seitdem auf einem unveränderten Stand. Das Gebiet der Randowniederung ist mit seinen Bruch- und Moorflächen stark grundwasser-geprägt, daher kann eine belastbare Modellierung des Gebietswasserhaushalts in seiner gesamten Komplexität nur unter Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Grund- und Oberflächenwasser erfolgen. Aus diesem Grund ist die Basis für die Entwicklung des Bewirtschaftungskonzeptes ein gekoppeltes Modell aus dem öko-hydrologischen Modellierungssystem ArcEGMO und dem Grundwassermodellierungsprogramm FEFLOW, wobei FEFLOW die Berechnung der Grundwasserströmung und ArcEGMO die Simulation des Bodenwasserhaushalts und des Gewässersystems übernimmt.

Schlagwörter: Gekoppelte Modellierung, Grundwasser-geprägte Einzugsgebiete, Moor, Niedermoor, Moorschutz, ArcEGMO, FEFLOW, Bewirtschaftungskonzept

The majority of peatlands in Brandenburg are currently heavily drained due to melioration measures, including the southern Randowbruch region in Uckermark. Peatlands play a crucial role in climate change as significant sources of greenhouse gas emissions. Reducing these emissions, as well as sequestering greenhouse gases in biomass, can only be achieved under wet peatland conditions. This paper is concerned with a project to develop a management concept which centralizes the rehydration of the peatland of the southern Randowbruch.

The catchment area of the Randow has a long and strongly anthropogenic history of melioration. The peatland, which formed during the Vistula Ice Age about 18,000 years ago in the washout channel of a glacier, has been continuously drained and made agriculturally usable during the last 300 years by targeted human interventions. The draining measures reached their peak in the 1960s and 70s and have remained unchanged since then.

The Randow lowland, characterized by its peatland areas, is strongly influenced by groundwater dynamics. Therefore, a robust simulation of the regional water balance in its full complexity requires consideration of the interactions between groundwater and surface water. For this reason, the foundation of the management concept is a coupled modelling approach, integrating the eco-hydrological modelling system ArcEGMO with the groundwater modelling software FEFLOW. In this framework, FEFLOW is responsible for calculating groundwater flow, while ArcEGMO simulates the soil water balance and surface water system.

Keywords: Coupled Modelling, Groundwater-Dominated Catchments, Moor, Fen, Peatland, Moor Protection, ArcEGMO, FEFLOW, Water Resource Management

1 Einleitung

Anlass für das Projekt zur Entwicklung eines Bewirtschaftungskonzeptes für das südliche Randowbruch war die Umsetzung der Klimaschutzziele gemäß Klimaschutzplan 2050. Der Klimaschutzplan 2050 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU, 2016) definiert diese Meilensteine für Deutschland und erklärt die Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 im Vergleich zu 1990 um 80 bis 95 Prozent zum übergeordneten Ziel. Das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG, 2021) setzt die Klimaneutralität bereits für das Jahr 2045 an. Um dieses Ziel zu erreichen, werden für die Handlungsfelder Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft sowie Landnutzung und Forstwirtschaft unterschiedliche Strategien formuliert, die Konzepte beinhalten, um Treibhausgasemission einzusparen. Zum Sektor Landnutzung und Forstwirtschaft

gehört neben dem Erhalt von Dauergrünland und der nachhaltigen Bewirtschaftung von Wäldern auch der Moorschutz.

Ebenso wie Wälder besitzen Moore im Hinblick auf Treibhausgasemissionen besondere Eigenschaften, da bei ihrem Abbau Kohlenstoffdioxid (CO₂) freigesetzt und bei ihrem Wachstum wieder gebunden wird (AUGUSTIN, 2012). Somit bietet der Moorschutz die Möglichkeit der Reduktion von Treibhausgasemissionen in zweierlei Hinsicht: sowohl durch das Einstellen der weiteren Entwässerung und des Torfabbaus als auch durch die Speicherung von CO₂ in wiedervernässten Moorböden.

Da sich der Großteil der Moore in Deutschland seit dem 18. Jahrhundert in landwirtschaftlicher Nutzung befindet, sind die meisten Moorlandschaften weitgehend entwässert. Dies geht in fast allen Mooregebieten mit einer starken Beeinträchtigung des

Wasserhaushalts durch nutzungsorientierte Regulierungen des Vorfluters einher. Somit stellt die Mehrheit der deutschen Moore heute eine Treibhausgasemissionsquelle dar (GREIFSWALD MOOR CENTRUM, 2016).

Dies gilt auch für das Moor im südlichen Randowbruch in der Uckermark bei Passow. Das ursprüngliche Durchströmungs- und Verlandungsmoor wurde durch das Ausheben eines Hauptvorfluters im 18. Jahrhundert und das gezielte Einziehen von Gräben sowie die Installation von Stauanlagen stark entwässert und landwirtschaftlich nutzbar gemacht. Die Renaturierung eines solchen Gebiets kann nur durch die Wiedervernässung des Torfkörpers erfolgen, d. h. durch die dauerhafte Anhebung des Grundwasserspiegels. Auf dieser Grundlage wurde im Randowbruch zusammen mit dem zuständigen Wasser- und Bodenverband Welse und dem Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU) ein Pilotprojekt initiiert, das ein klimaschonendes und damit moorbodenschonendes Wassermanagement zum Ziel hat.

Neben einem umfassenden Moorschutz soll die Bewirtschaftung der landwirtschaftlich genutzten Flächen im Frühjahr weiterhin ermöglicht werden, um eine sozial und wirtschaftlich verträgliche Umsetzung sicherzustellen und die Beteiligung aller Betroffenen und jetzigen Flächennutzer zu gewährleisten. Unter diesen Anforderungen zielt das Bewirtschaftungskonzept darauf ab, möglichst viel Wasser im Gebiet zurückzuhalten, um es zielgruppenorientiert räumlich und zeitlich zu verteilen.

Die Planung einer solchen nachhaltigen Bewirtschaftung im Randowbruch erfordert eine umfassende Analyse des Wasserhaushalts des Einzugsgebiets hinsichtlich der derzeitigen Situation sowie bezüglich der Auswirkungen einer veränderten moorbodenschonenden Bewirtschaftung für die Zukunft. Da das Gebiet der Randowniederung mit seinen Bruch- und Moorflächen stark grundwassergeprägt ist und das Oberflächengewässersystem in einer engen Wechselbeziehung mit dem Grundwasser steht, kann der Gebietswasserhaushalt nur mit einem hydrologischen Modell realitätsnah abgebildet werden, das diese Wechselwirkung berücksichtigt. Unter dieser Voraussetzung beschäftigt sich diese Arbeit mit dem Aufbau eines gekoppelten Modells aus ArcEGMO (ArcGIS-gestütztes EinzugsGebietsMODEll) und FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW and transport system) sowie mit der Analyse der speziellen Eigenschaften des Einzugsgebiets im Hinblick auf den Wasserbedarf und die Entwicklung von Bewirtschaftungsoptionen.

2 Gebietsanalyse

Die Randowniederung bzw. das südliche Randowbruch ist Teil des Randow-Welse-Bruchs und liegt in der Uckermark an der Grenze zu Mecklenburg-Vorpommern im äußersten Nordosten Brandenburgs. Das südliche Randowbruch erstreckt sich in nord-südlicher Richtung auf etwa 15 km Länge und 3 km Breite zwischen den beiden Ortschaften Schmölln und Passow. Nördlich wird das Gebiet von der A 10 als künstliche Wasserscheide, in südlicher Richtung durch den Übergang in die Welse begrenzt.

Hydrologisch gliedert sich die Randowniederung in einige kleinere Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet im Westen sowie die im Randowbruch vorhandene Grabenstruktur. Neben den kleinen Binnengräben, die ursprünglich der Entwässerung einzelner Teilflächen des Gebiets dienten, existiert ein Hauptvorfluter, die

Randow. Diese durchfließt das Randowbruch in südlicher Richtung und verbindet sich im Übergangsgebiet mit der Welse, die in südöstlicher Richtung bei Schwedt in die Oder mündet. Neben der Randow existieren westlich parallel zwei weitere größere Vorfluter, der Mittelgraben und der Wiesengraben bzw. Grenzgraben Zichow.

Aufgrund fehlender kontinuierlicher Messdaten am Gebietsauslass am Pegel Schönow wird der mittlere Abfluss für das Einzugsgebiet aus Untersuchungsergebnissen einer Machbarkeitsstudie (ELLMANN, 2015) auf 550 l/s geschätzt. Die klimatische Wasserbilanz, also die Differenz aus Niederschlag und Verdunstung des Einzugsgebiets, ist in der Vegetationsperiode deutlich negativ. Über das Jahr verteilt ergibt sich ein Defizit von etwa 84 mm, für den Zeitraum von April bis September beträgt dieses ca. 184 mm. Somit herrschen im Einzugsgebiet der Randow angespannte Wasserhaushaltsverhältnisse, die eine ressourcenschonende Bewirtschaftung im Randowtal erfordern.

Das Randowtal bildete sich im pommerschen Stadium der Weichseleiszeit als spätpleistozäne Schmelzwasserrinne und schneidet etwa 30 bis 40 m in die Hochfläche der umgebenden Grundmoränenlandschaft ein. Die Moorbildung wurde daraufhin durch Grundwasserspiegelanstiege ausgelöst, während derer sich zunehmend organogene Ablagerungen – Torfe und Mudden – auf den Sedimenten in der Randowrinne bildeten. Diese wirken heute als Hauptgrundwasserleiter unterhalb des Moorkörpers. Das Randowbruch stellt aufgrund seiner Entstehungsgeschichte sowie des lateralen, sowohl westlichen als auch östlichen Wasser-

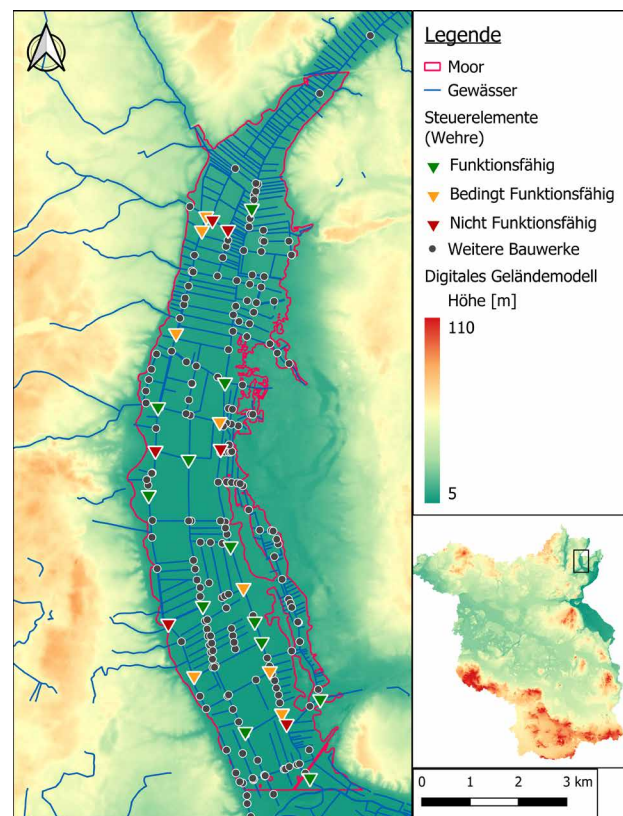


Abbildung 1
Untersuchungsgebiet: südliches Randowbruch.
Investigation area: southern Randowbruch.

zustroms einen Hybriden aus Verlandungs- und Durchströmungsmoor dar.

Während die Oberflächenmorphologie der Randow vom späten pommerschen Stadium der Weichselkaltzeit geprägt ist, stammen die oberen Lockergesteinsablagerungen aus der frühen Weichselkaltzeit (LUCKNER, 1993). Diese bilden die oberen Grundwasserleiter und beeinflussen die Hydrodynamik des Einzugsgebiets. Der erste Grundwasserleiter unterlagert das gesamte Randowbruch und den Blumberger Wald östlich des Randowbruchs. Während dieser im Norden noch eine eher geringe Mächtigkeit aufweist, wächst er in Richtung Süden durch die Vereinigung mit weiteren hangenden Lockergesteinsbereichen, die als Grundwasserleiter funktionieren, zu einem überaus mächtigen Grundwasserleiterkomplex an. Eine dieser hydraulisch angeschlossenen Schichten breitet sich gen Osten als flächenmäßig weitläufiger, jedoch zumeist flachgründiger Grundwasserleiter aus. Der dritte Lockergesteinskomplex verläuft vom südwestlichen Einzugsgebiet unterhalb des Randowbruchs bis in den Osten des Gebiets. Darüber hinaus existieren weitere lokal begrenzte grundwasserleitende Schichten, die für die Hydrodynamik eine eher untergeordnete Rolle spielen. Räumlich liegen die relevanten Grundwasserleiter somit insbesondere im Osten und Südwesten des Einzugsgebiets. Im Nordwesten befindet sich dagegen ein großer Geschiebemergelkomplex, der als Grundwasserstauer mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit zu betrachten ist.

Die räumliche Verteilung der Grundwasserleiter und -stauer spiegelt sich bei genauerer Betrachtung ebenfalls in der Lage der Fließgewässer im Einzugsgebiet wider. So existieren lediglich über den gering leitenden Geschiebemergelbereichen im Nordwesten des Einzugsgebiets vier oberirdischen Zuflüsse zur Randow, während im restlichen umgebenden Gebiet keine Fließgewässer vorhanden sind. Diese Verteilung gibt bereits einen Hinweis auf die Hydrodynamik des Einzugsgebiets, die in direktem Zusammenhang mit den beschriebenen Grundwasserverhältnissen steht und als eine senkrecht zur Randow gerichteten Grund- und Oberflächenentwässerung beschrieben werden kann. Der Abfluss des Randowbruchs wird demnach zu einem Teil aus den im Westen liegenden Oberflächengewässern gespeist. Der überwiegende Anteil stammt jedoch aus dem Grundwasserzufluss.

Während im Nordosten des Gebiets das Wasser der Randow somit überwiegend oberirdisch zufließt, lässt sich der Prozess im Südwesten und insbesondere im Osten des Einzugsgebiets wie folgt beschreiben: Das Wasser, das als Grundwasserneubildung im Osten und Südwesten des Einzugsgebiets anfällt, infiltriert aufgrund eines nach unten gerichteten Druckgradienten und erreicht so die beschriebenen Grundwasserleiter. Die die Randowniederung umliegenden Areale sind demnach Speisungsflächen, von denen das Wasser langsam in Richtung Randowbruch strömt, wo es durch einen nach oben gerichteten Druckgradienten wieder gen Oberfläche transportiert wird. Infolgedessen exfiltriert es an den Rändern der Gräben bei einem positiven Gefälle von Grundwasserstand zu Wasserstand im Gewässer und kommt zum Abfluss. Das Randowbruch stellt somit das Entlastungsgebiet für das übrige Einzugsgebiet dar. Von der Größenordnung sollten im Modell dementsprechend der Abfluss aus der Randow und die Grundwasserneubildung im gesamten Einzugsgebiet in etwa übereinstimmen.

2.1 Meliorationshistorie

Die Meliorationshistorie des Randowbruchs reicht bis ins 18. Jahrhundert zurück. Innerhalb der ersten 200 Jahre erfolgten immer wieder kleinräumige Maßnahmen, die zu einer leichten Absenkung der Wasserstände im Randow-Welse-Bruch führten, unter anderem das Anlegen der Randow als Vorfluter. In den 60er und 70er Jahren des 20. Jahrhunderts startete die Sowjetische Militär-Administration (SMAD) großangelegte Meliorationsmaßnahmen, basierend auf der „Studie zur Komplexmeliolation Randow-Welse-Bruch“ (ZEITZ, 2012). Zwischen 1971 und 1976 wurden 53 km Hauptvorflut und 103 km Binnenvorflut zur Binnenentwässerung und Landschaftsgestaltung ausgebaut, das Flussbett verlegt und zahlreiche Staubauberwerke errichtet. Diese Maßnahmen beeinflussten den Abfluss und Grundwasserstand erheblich. So entwickelte sich der ursprünglich vorhandene unterirdische Abfluss aus dem Gebiet mit zunehmendem Ausbau der Meliorationsgräben zu einem oberirdischen Abfluss, der anhand der Stichtagsmessungen am Pegel Schönow in den letzten Jahren im Mittel auf etwa 550 l/s geschätzt wird.

Darüber hinaus sank infolge der Meliorationsmaßnahmen der 1960er und 1970er Jahre der Grundwasserspiegel im Randow-Welse-Bruch um bis zu 1,2 m ab, was nach 6 bis 7 Jahren zu deutlichen Ertragseinbußen durch Moordegradierung führte. Aufgrund von Bodenverdichtung und Kolmation gelang eine flächendeckende Grundwasseranhebung nicht, sodass die Moorareale zunehmend auf Niederschläge als Wasserspeisung angewiesen waren. Eine Untersuchung von LEHRKAMP (1987) zeigte, dass die Komplexmeliolation zu Moorhöhenverlusten von 1,0 bis 1,25 cm pro Jahr und einer weitgehenden Moorboden-degradation und Torfzersetzung führte. Da die wasserwirtschaftliche Praxis seit den 1980er Jahren nicht grundlegend verändert wurde, ist von einem Fortschreiten dieser Entwicklung bis heute auszugehen. Somit handelt es sich im südlichen Randowbruch um ein stark degradiertes Moor.

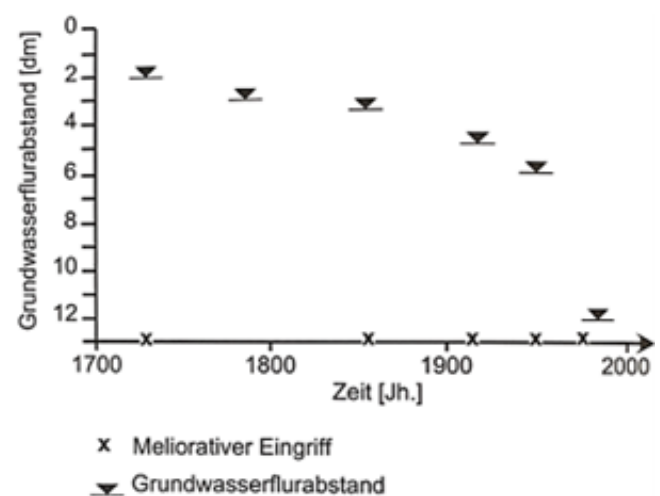


Abbildung 1
Veränderung der Grundwasserflurabstände (Sommergrundwasserstände) im Randow-Welse-Bruch im Laufe der fast 300-jährigen Meliorationsgeschichte (LEHRKAMP, 1987).
Changes to the groundwater level (summer) in the Randow-Welse-Bruch during the last approximately 300 years (LEHRKAMP, 1987).

Heute wird auf den landwirtschaftlichen Flächen im südlichen Randowbruch fast ausschließlich Grünlandwirtschaft praktiziert. Für die Bewirtschaftung werden die Flächen im Frühjahr und Herbst gewalzt und mehrere Male im Jahr gemäht. Das Stau-regime der vorhandenen wasserwirtschaftlichen Anlagen ist entsprechend der landwirtschaftlichen Praxis auf die Gewährleistung der Befahrbarkeit der Flächen sowie die Produktion von qualitativ hochwertigem Weidegras ausgelegt, sodass jedes Frühjahr und je nach Witterung Wasser über die Stauanlagen abgelassen wird.

3 Methodik

Um das hydrologische System des Randowbruchs in seiner Gesamtheit modelltechnisch belastbar abzubilden, bedarf es einer Lösung, die die Grundwasserdynamik des Einzugsgebiets sowie die Wechselwirkung zwischen Oberflächen- und Grundwasser fundiert abbildet. Dabei stellen die durch die Steuerung der Wehranlagen im Grabensystem entstehenden Wasserstände die Randbedingungen für die Grundwasserstände in der Randniederung dar und beeinflussen somit den lateralen Wasseranstrom aus den umliegenden Hochflächen. Hinzu kommt die Notwendigkeit, verschiedene Stauhaltungen in einem jahreszeitlich angepassten Stauregime sowie deren Auswirkung auf den Grundwasserspiegel und den Gebietswasserhaushalt abzubilden, also ihren Einfluss unter anderem auf Verdunstung und Grundwasserneubildung.

Das Verhalten der Grundwasserströmung sowie die Verteilung der Grundwasserstände kann nur mit einem Grundwasserströmungsmodell fundiert abgebildet werden, während der Bodenwasserhaushalt im Zusammenhang mit der komplexen Bodenstruktur infolge der Moorentwässerung nur mit einem physikalisch basierten Bodenwasserhaushaltsmodell erfasst werden kann. Aus diesem Grund ist eine gekoppelte Modellierung des Gewässersystems, der Grundwasserströmung und des Bodenwasserhaushalts notwendig. Als programmtechnische Lösung für die gekoppelte Modellierung kommt die im Büro für Angewandte Hydrologie entwickelte Kopplung zwischen den Modellierungssystemen FEFLOW und ArcEGMO zum Einsatz. Die Verbindung beruht auf der in FEFLOW vorhandenen Schnittstelle des InterfaceManagers (IfM), die es ermöglicht, ArcEGMO als Plug-In in FEFLOW zu integrieren. Dies erlaubt den Austausch von Flüssen und Potenzialen zwischen den beiden Modellen in täglicher Auflösung.

Das hydrologische Modellierungssystem ArcEGMO bildet dabei die Grundlage für die Simulation des Oberflächengewässersystems und des Bodenwasserhaushalts. Es simuliert alle wesentlichen Komponenten des Gebietswasserhaushalts, einschließlich der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Vegetation, Boden sowie ober- und unterirdischen Abflussprozessen. ArcEGMO gliedert sich in fünf Modellebenen: Meteorologie, Abflussbildung, Direktabfluss, Grundwasserabfluss und Gewässerabfluss. Diese Ebenen werden unabhängig voneinander betrachtet und können räumlich sowie zeitlich unterschiedlich diskretisiert werden.

Die Datenzuordnung erfolgt über ein Geoinformationssystem (GIS), das den Raumelementen (Punkte, Linien, Flächen) spezifische Eigenschaften zuweist. Modellflächen werden zu Elementarflächen verschnitten und bilden das Modellgrid. Physikalisch

basierte Teilprozessmodelle beschreiben jeweils einen Teil des Gesamtsystems. ArcEGMO ist somit kein geschlossenes Modell mit Nutzeroberfläche, sondern ein flexibles Modellierungssystem, das über Schnittstellen hydrologische Teilmodelle integriert. So können simulationsspezifische Prozesse berücksichtigt und an die jeweilige Fragestellung angepasst werden (BECKER et al., 2002).

Für die Grundwassermodellierung wird FEFLOW (Finite Element Subsurface FLOW and Transport System) verwendet. Es basiert auf der Finite-Element-Methode (FEM) und eignet sich besonders zur Abbildung komplexer geologischer Strukturen und Randbedingungen. FEFLOW unterstützt 2D- und 3D-Modellierungen sowie umfassende Analysen von Grundwasserströmungs- und Transportprozessen. Zentrale Funktionen sind die 2D-/3D-Visualisierung von Modellergebnissen, Partikeltracking zur Analyse von Fließwegen und Transportzeiten sowie Sensitivitätsanalysen und Kalibrierungstools. Statistische Werkzeuge und Unsicherheitsanalysen bewerten die Modellrobustheit.

Die Grundfunktion der Schnittstelle zwischen den beiden Modellen bildet die Übergabe der im Bodenwasserhaushaltsmodell berechneten räumlich aufgelösten Grundwasserneubildung (Sickerwassermenge) durch ArcEGMO an FEFLOW, sowie die Rückgabe des Grundwasserstands je FEFLOW-Knoten an ArcEGMO. Dabei werden die Sickerwassermengen aus ArcEGMO als Materialeigenschaften an FEFLOW weitergegeben und die Grundwasserstände an den FEFLOW-Knoten den Elementarflächen in ArcEGMO zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt über eine flächengewichtete räumliche Mittelung aller Elementarflächen in ArcEGMO, welche ein FEFLOW-Element überschneiden. Aufgrund der flexiblen Modellgridstruktur in ArcEGMO lassen sich die räumlichen Diskretisierungen der beiden Modelle zudem aufeinander abstimmen, sodass das Modellgebiet in ArcEGMO auch ähnlich der in FEFLOW vorhandenen Dreieckspolygone diskretisiert werden kann. Dies fördert sowohl die Kompatibilität beim Austausch der Größen als auch die numerische Stabilität des gekoppelten Modells. Abbildung 3 stellt die Interaktion der einzelnen Modellkomponenten schematisch dar.

Neben dem Austausch von Grundwasserneubildung und Grundwasserstand ermöglicht die Kopplung aus ArcEGMO und FEFLOW die Modellierung des Austauschs zwischen Grundwasser und Gewässern an der Oberfläche. Dieser wird für vier verschiedene Fälle betrachtet, je nachdem, ob sich Wasser im Oberflächengewässer befindet und ob der Grundwasserspiegel über der Gewässersohle liegt.

Die folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die möglichen Zustände, bei denen der Austausch simuliert werden kann, sowie darüber, welche Randbedingungen für den einzelnen Fall angesetzt werden.

Beim Ansatz der Randbedingung dritter Art wird ein dem Gewässer zugeordneter Wasserspiegel, für den in FEFLOW eine fixe Austauschfläche vorgegeben ist, mit dem Grundwasserspiegel am Schnittknoten verglichen. Der Wassertransfer findet vom höheren zum niedrigeren Wasserspiegel statt, also effluent oder influent. Die Austauschrate wird aus der Wasserspiegeldifferenz, multipliziert mit einem der Gewässersohle zugewiesenen Austauschkoeffizienten sowie der Austauschfläche, berechnet. Der Austauschkoeffizient bildet die Kolmation an der Gewässersohle

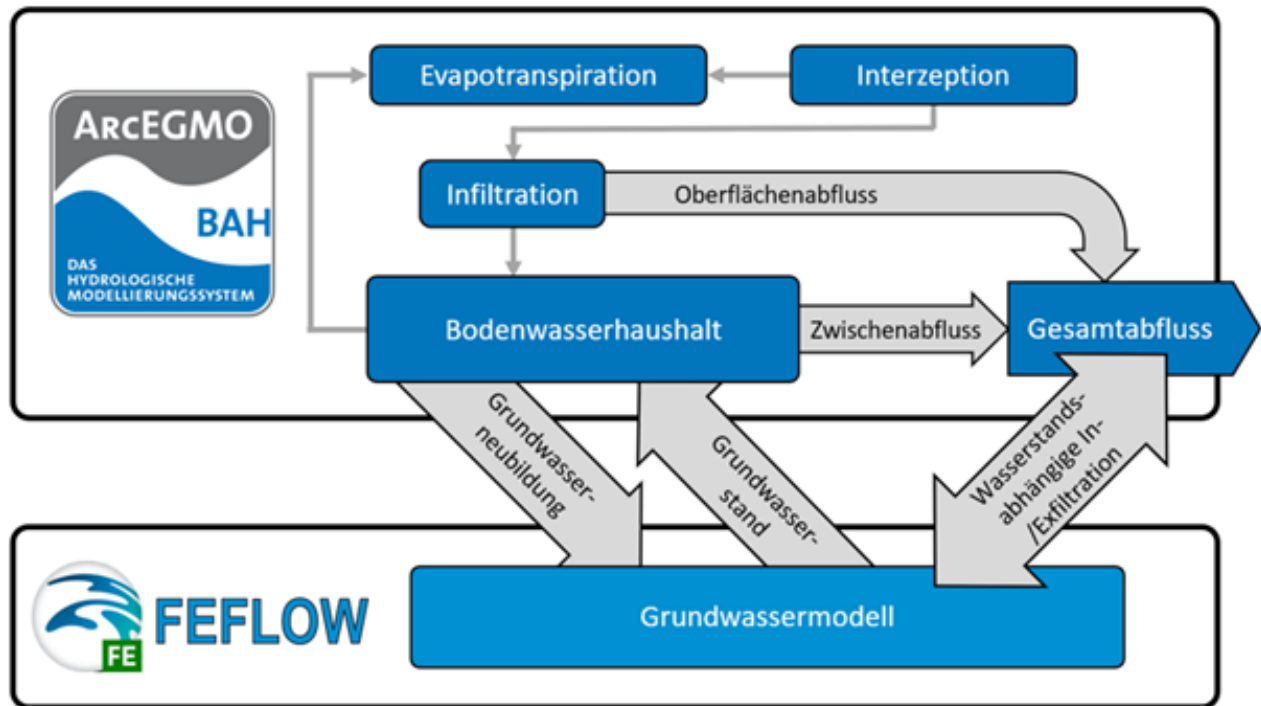


Abbildung 3
Interaktion der Modellteile untereinander und ihre Austauschgrößen.
Interaction of the two models.

Tabelle 1 Überblick über die angesetzten Randbedingungen für die Berechnung des Austauschs zwischen dem Oberflächengewässer (ArcEGMO) & dem Grundwasser (FEFLOW). <i>Overview of possible boundary conditions to calculate the exchange between the groundwater and surface water.</i>		
	Wasser im Gewässer	Kein Wasser im Gewässer
Grundwasserspiegel über Sohle des anstehenden Gewässers	Randbedingung 3. Art, in FEFLOW berechnet (fixe Austauschfläche) oder Brunnenrandbedingung, Terme in ArcEGMO berechnet (variable Austauschfläche)	Randbedingung 3. Art, in FEFLOW berechnet (fixe Austauschfläche) oder Brunnenrandbedingung, Terme in ArcEGMO berechnet (variable Austauschfläche)
Grundwasserspiegel unterhalb der Sohle	Brunnenrandbedingung, Terme in ArcEGMO berechnet (variable Austauschfläche)	Kein Transfer/Austausch

ab und kann für effluente und influente Verhältnisse unterschiedlich parametrisiert werden. Der Ansatz der Randbedingung dritter Art bietet sich insbesondere an, wenn keine umfassenden Gewässerprofile für abflussabhängige Wasserstandberechnung zur Verfügung stehen.

Für den Ansatz der Brunnenrandbedingung wird die Austauschfläche der Geometrie des Gewässers entsprechend realitätsgetreu abgebildet, wobei ArcEGMO die je nach Wasserstand variable Austauschfläche berechnet. Dementsprechend beruht das System für die Modellierung des Wasseraustauschs im Randowbruch auf der Brunnenrandbedingung mit variabler Transferfläche. Dies dient dazu, die Auswirkungen der Wasser-

standsschwankungen in den Oberflächengewässern infolge der Stauhaltung, die Bewegungen des Grundwassers sowie deren Interaktion abzubilden.

4 Modellaufbau und Funktionsnachweis

4.1 Modellaufbau

Eine wesentliche Grundlage des Bodenwasserhaushaltsmodells für die Randow bildete das GIS-Datenmodell des im Büro für Angewandte Hydrologie entwickelten Brandenburg-Modells des Landesamtes für Umwelt. Als Datenbasis für die meteorologischen Eingangsdaten wurde hier auf Stationsdaten sowie die regionalisierten Niederschläge aus dem REGNIE-Datenbestand

(RAUTHE et al., 2013; DWD, 1999–2019) zurückgegriffen. Weiterhin fanden für die Landnutzung Color-Infrarot-Daten (CIR) (MLUK, 2009), für die Morphologie das digitale Geländemodell mit 1 qm Auflösung (DGM1) (LGB, 2015) und für die Bodendaten die Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 300.000 (BÜK300) (LBGR, 2019) Verwendung. Der Teilbereich des Einzugsgebiets des südlichen Randowbruchs wurde darüber hinaus mit weiteren räumlichen Gebietsinformationen unteretzt. Zu nennen sind hier insbesondere die aufbereiteten Bodendaten für das Moor auf Grundlage der von LEHRKAMP (1987) erarbeiteten Erkenntnisse zu den Moorbodenhorizonten sowie Vermessungsdaten der Gerinneprofile für das Fließgewässernetz (ELLMANN, 2015). Letzteres wurde aufgrund der vorhandenen Vermessungsdaten und der numerischen Stabilität des Modells auf die Hauptfließgewässer im wasserwirtschaftlichen System des Randowbruchs reduziert. Somit erfolgte keine Übertragung der Stichgräben ins Modell.

Nach Aufbau und Kalibrierung des Modells wurden beispielhaft für einen Standort alle vorhandenen Stichgräben im Modell abgebildet und parametrisiert. Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Entwässerung dieses Bereichs ließen sich keine Differenzen zum vereinfachten Fließgewässernetz feststellen. Nach Aufbereitung aller relevanten Daten wurden den einzelnen Elementarflächen (Modellflächen) die räumlichen Flächen-, Linien- und Punktdaten zugeordnet, sodass die Teilmodelle von ArcEGMO auf die ihnen zugewiesenen Informationen zugreifen können.

Für den Aufbau des Grundwassermodells wurde zunächst ein geologisches Strukturmodell erstellt. Es vereint Bohrkern- und Grundwassermessstellendaten des Landesamtes für Umwelt Brandenburg sowie die Informationen der hydrogeologischen (LBGR, 1986) und der Lithofazieskarte 1 : 50.000 des Landesamts für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR, 1987).

Der erste Schritt bestand darin, anhand der hydrogeologischen Karten (HYK) der DDR die Ausdehnung und Mächtigkeit der Grundwasserleiter zu identifizieren. Die Karten zeigen eine Sedimentabfolge von mächtigen Lockergesteinsablagerungen, die das gesamte Randowbruch und den Blumberger Wald unterlagern (LBGR, 1986). Weitere Lockergesteinskomplexe liegen im Osten und Südwesten des Einzugsgebiets und sind mit dem Hauptgrundwasserleiter hydraulisch verbunden. Diese Schichten bilden die unterirdische Verbindung der Randowniederung mit dem Rest des Einzugsgebiets und gewährleisteten die Wasserversorgung der Randow. Im Nordwesten befindet sich ein großer Geschiebemergelkomplex, der als Grundwasserstauer wirkt. Die räumliche Verteilung der Grundwasserleiter und -stauer spiegelt sich ebenfalls in der Lage der Fließgewässer wider. Diese liegen, wie in Kapitel 2 dargelegt, ebenfalls im Nordwesten und somit über dem Geschiebemergelkomplex. Im Rest des Einzugsgebiets erfolgt die Speisung der Randowniederung über den beschriebenen Mechanismus im Grundwasser.

Mithilfe der Schnitkarten der Lithofazieskarte sowie der Bohrkerninformationen wurde die räumliche Ausdehnung der Grundwasserleiter und -stauer nochmals geprüft und ggf. präzisiert. Im nächsten Schritt erfolgten die Abgrenzung des Modellgebiets und dessen Diskretisierung basierend auf den Daten der Grundwassereinzugsgebiete und den Hydroisohypsenplänen.

Eine natürliche Grundwasserscheide, die das Modellgebiet im Westen begrenzt, wurde als NO-FLOW-Randbedingung zweiter Art implementiert. Die Abgrenzung im Süden, Osten und Norden erfolgte orthogonal zu den Hydroisohypsen ebenfalls als NO-FLOW-Randbedingung, wobei die Modellränder strategisch so festgelegt wurden, dass sowohl die Auswirkungen der Randbedingungen auf das Kerngebiet als auch der Rechenaufwand möglichst gering blieben.

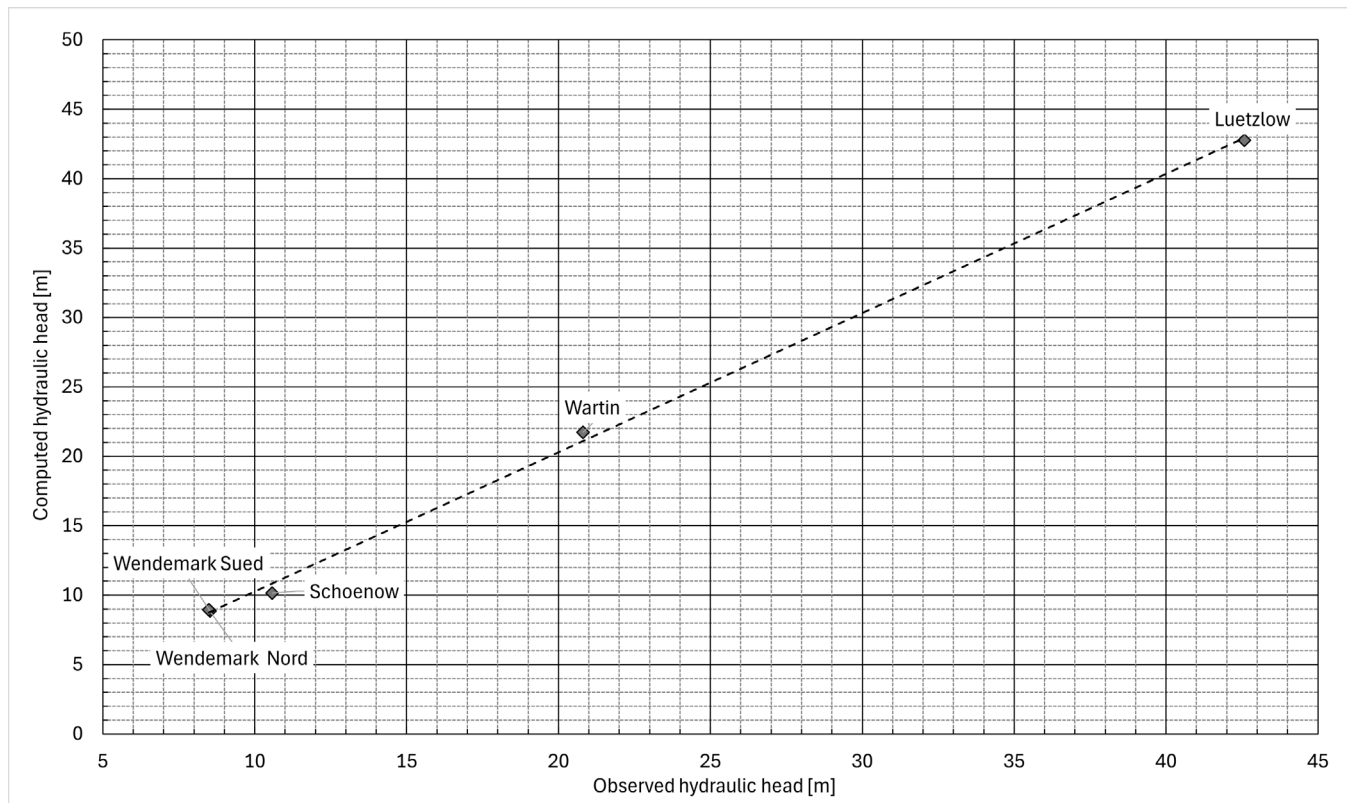
Für die Gewässer wurde zunächst die Randbedingung erster Art mit einem festen Wasserstand festgelegt. Die Diskretisierung erfolgte mithilfe des im Modell FEFLOW vorhandenen Meshing-Tools und wurde an den Fließgewässern fein sowie in den peripheren Bereichen grob gewählt, um den Rechenaufwand zu minimieren. Darauf folgte die Übertragung der Daten des geologischen Strukturmodells Schicht für Schicht in FEFLOW, wobei jede Schicht entsprechend der Daten aus den hydrogeologischen Karten eine räumliche Parametrisierung erfuhr. Für die Grundwasserleiter ergeben sich hydraulische Durchlässigkeiten zwischen 10^{-5} und 10^{-3} m/s, während für die Geschiebemergelschichten der Grundwasserstauer zunächst Werte zwischen 10^{-6} bis 10^{-7} m/s angesetzt werden.

Die Kalibrierung des gekoppelten Modells erfolgte in zwei Schritten. Zuerst fand eine stationäre Kalibrierung des Grundwassermodells mit einer vom Bodenwasserhaushaltsmodell vorgegebenen und geprüften mittleren Verteilung der Grundwasserneubildung für das Einzugsgebiet statt. Dabei erfolgte eine stufenweise Anpassung der Parametrisierung bis zu einem Gleichgewichtszustand, bei dem die Grundwasserstände im Modell mit denen der Hydroisohypsenpläne weitestgehend übereinstimmten. Nachfolgend sind die Abweichungen grafisch als Scatter-Plot dargestellt (Abb. 4).

Im zweiten Schritt wurden die beiden Modelle gekoppelt und die Parametrisierung instationär anhand der Ganglinien der relevanten Grundwassermessstellen weiter verfeinert. Für das instationäre Modell erfolgte zudem eine Kalibrierung der Leakage-Faktoren an den Gewässern (Gräben), die nun nicht mehr mit einem festen, sondern mit einem variablen, vom Bodenwasserhaushaltsmodell vorgegebenen Wasserstand simuliert wurden. An dieser Stelle kommt die in der Methodik beschriebene Brunnenrandbedingung (Randbedingung dritter Art) zum Einsatz. Nach Abschluss der Kalibrierung ergaben sich für die Grundwasserleiter Werte zwischen 10^{-4} bis 10^{-2} m/s sowie für die Grundwasserstauer von 10^{-4} m/s für die oberste Schicht und 10^{-5} m/s bzw. 10^{-6} m/s für die jeweils hangenden Stauschichten. Diese ungewöhnlich hohen Leitfähigkeiten für Geschiebemergel konnten durch Bohrkerndaten bestätigt werden, die die oberen Schichten des Geschiebemergels als sandig ausweisen. Auch ein hydrogeologisches Gutachten von 2001, das die hohe Wasserdurchlässigkeit mit der Entkalkung des Geschiebemergels erklärt (HENNIG & KANTER, 2001), belegt sie. Zuletzt erfolgte eine Validierung des Modells für einen von der Kalibrierung unabhängigen Zeitraum, ebenfalls mithilfe der Ganglinien an den ausgewählten Grundwassermessstellen.

4.2 Funktionsnachweis

Nach Abschluss des Modellaufbaus erfolgte zunächst ein Modelltest hinsichtlich der im Einzugsgebiet vorhandenen Prozesse mit speziellem Fokus auf der Abbildung des Speisungsmechanismus im Einzugsgebiet des Randowbruchs. Für die Analyse wurde in

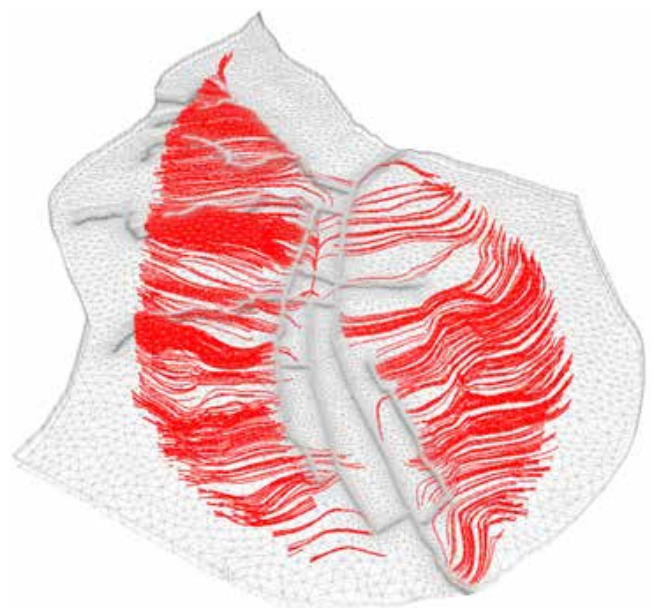
**Abbildung 4**

Scatter-Plot Grundwasserstand an relevanten Grundwasserpegeln (FEFLOW).
 Scatter plot of groundwater levels at relevant monitoring wells (FEFLOW).

FEFLOW das Particle-Tracking aktiviert. Diese Funktion ermöglicht die Nachverfolgung der Fließwege im Modellgebiet. Somit war es möglich zu prüfen, ob das auf den Hochflächen infiltrierte Wasser lateral in Richtung der Randowniederung fließt und dort zum Abfluss kommt.

Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, verlaufen die Fließpfade erwartungsgemäß auf beiden Seiten der Randowniederung in Richtung des Vorfluters, wobei sie durch den hydraulischen Gradienten und die spezifische hydraulische Leitfähigkeit unterschiedlich beeinflusst werden. Ein weiteres Augenmerk bei dem Funktionsnachweis lag auf dem Zusammenhang zwischen Grundwasserneubildung und dem Gebietsabfluss. Die folgende Grafik zeigt die Verteilung der Grundwasserneubildung mit dem derzeitigen Stauregime, gemittelt über eine 30-Jahre-Langzeitsimulation mit dem gekoppelten Modell.

Wie zu erkennen, ist die Grundwasserneubildung erwartungsgemäß für das Moor im Randowbruch negativ: Es erfolgt eine Zehrung. Weiterhin zeigt sich, dass auch der Blumberger Wald östlich des Randowbruchs in Teilen eine negative Grundwasserneubildung aufweist. Für den Rest des Einzugsgebiets, der überwiegend landwirtschaftlich geprägt ist und aus Ackerfläche besteht, ergibt sich eine positive Grundwasserneubildung von bis zu 200 mm/a auf den Hochflächen. Die durchschnittliche Grundwasserneubildung des gesamten Einzugsgebiets beträgt 69 mm/a. Dies entspricht einem Gebietszufluss von etwa $0,84 \text{ m}^3/\text{s}$.

**Abbildung 5**

Particle-Tracking im Modellgebiet des südlichen Randowbruchs (FEFLOW).

Particle tracking in the model area of the southern Randowbruch (FEFLOW).

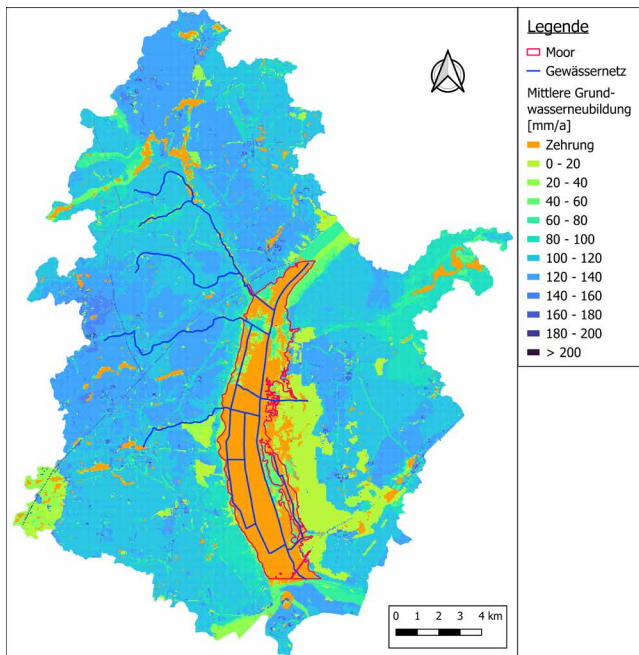


Abbildung 6
Verteilung mittlere Grundwasserneubildung (1990 bis 2019).
Distribution of median groundwater recharge (1990–2019).

Umgerechnet auf die Fläche des Grundwassermodells, die 62 % der Fläche des Bodenwasserhaushaltsmodells ausmacht, ergibt sich somit ein Zustrom von $0,52 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser entspricht in etwa sowohl dem aus den Stichtagsmessungen am Gebietsauslass ermittelten mittleren Abfluss von $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$ als auch dem im Modell simulierten mittleren Abfluss von $0,53 \text{ m}^3/\text{s}$ aus dem Einzugsgebiet. Dementsprechend fließt im Randowbruch im Mittel die Menge an Wasser über die Vorfluter ab, die durch die Grundwasserneubildung des gesamten Einzugsgebiets, also durch die Zuflüsse minus eines Verdunstungsverlustes im Randowbruch, zur Verfügung gestellt wird. Dies bestätigt die Annahme aus Kapitel 2 und zeigt, dass das Modell den Grundmechanismus des Einzugsgebiets, d. h. die Versorgung der Randow mit dem Grundwasser der Hochflächen, wie beabsichtigt abbildet.

5 Analyse des Ist-Zustandes

Im nächsten Schritt erfolgte eine Defizitanalyse des derzeitigen wasserwirtschaftlichen Systems. Für die Analyse des Wasserdargebots in seiner räumlichen und zeitlichen Verteilung stand bei der Untersuchung der Grundwasserflurabstand innerhalb des

Randowbruchs im Fokus, insbesondere im Zusammenhang mit der Bewirtschaftbarkeit der landwirtschaftlichen Flächen und dem Moorschutz.

Für den Moorschutz gelten zwei Zielgrößen hinsichtlich der Grundwasserflurabstände in den Sommermonaten: Grundwasserflurabstände kleiner 4 dm gewährleisten den Moorerhalt, während Grundwasserflurabstände kleiner 1 dm das Moorwachstum ermöglichen. Im Gegensatz dazu erfordert die Landwirtschaft beziehungsweise die Befahrbarkeit mit schwerem Gerät im Frühjahr Grundwasserflurabstände von mehr als 4 dm.

Für die Analyse wurden drei Stauvarianten miteinander verglichen, die jeweils den unterschiedlichen Anforderungen des Moorschutzes und der Bewirtschaftung der Flächen gerecht werden sollten. Variante 1 beschreibt die Wehrsteuerung gemäß des derzeitigen Stauregimes. Diese Variante dient als Vergleich und wurde mit den mittleren Stauhöhen des Stautagebuchs des Wasser- und Bodenverbandes Welse der letzten zwei Jahre simuliert. Das Stautagebuch zeigt eine mittlere bis hohe Stauhaltung vom Sommer bis in den Winter sowie einen Abstau in den Monaten März bis Mai. Der Abstau an den Wehren erfolgt in der bisherigen Praxis punktuell und wird teilweise von den Landwirten selbst durchgeführt. Aufzeichnungen über diese individuellen Stauregelungen sind nicht vorhanden. Daher wurde für die Simulation im Modell ein generalisiertes Stauregime angesetzt, d. h. die mittlere Stauhöhe aus dem Stautagebuch für Sommer bis Winter und ein Abstau von etwa 3 dm in den Monaten März und April.

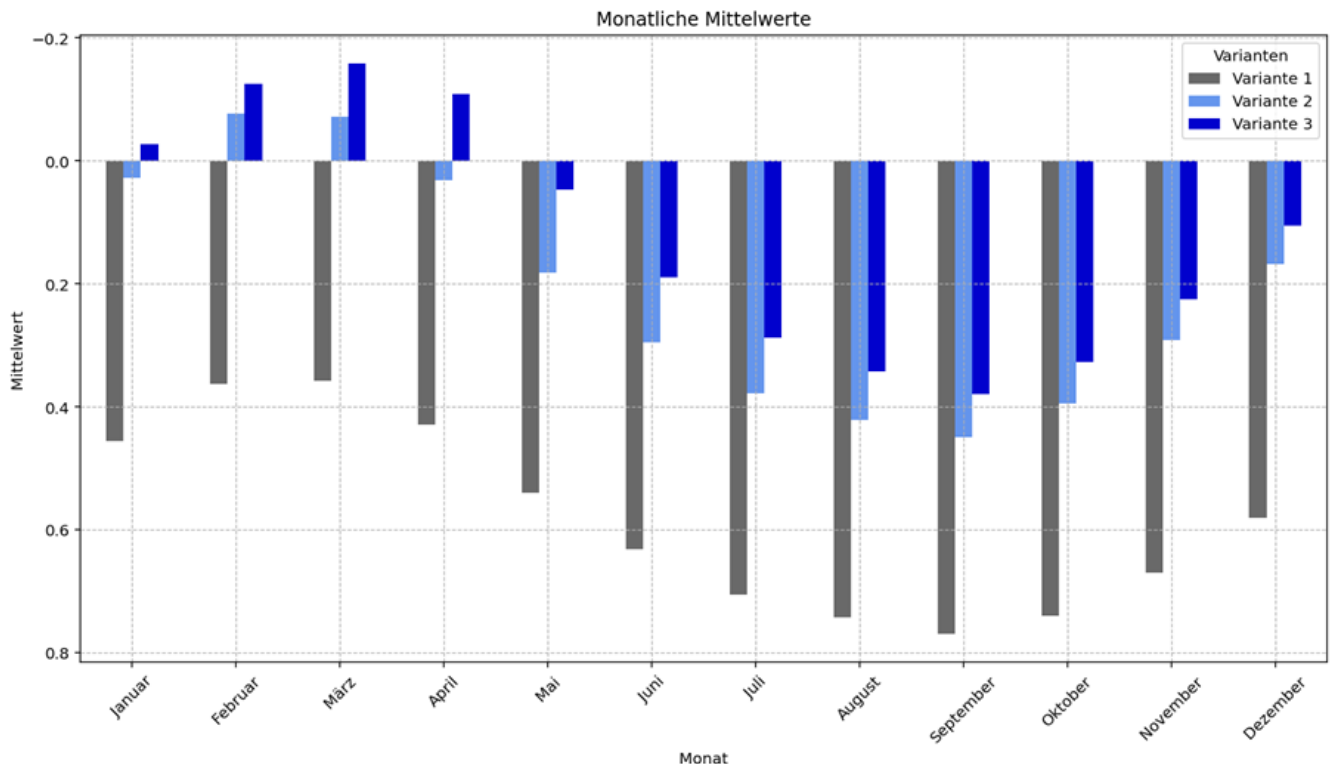
Für Variante 2 erfolgte, gemäß den Empfehlungen des LfU für die Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen, im April ein kurzzeitiger Abstau von 3 dm und ansonsten ein Vollstau gemäß der maximal realisierbaren Stauhöhe an den funktionsfähigen Wehren. In Variante 3 werden die funktionsfähigen Stauanlagen ganzjährig im Vollstau gehalten.

Für alle Szenarien wurde der Zeitraum zwischen 1990 bis 2019 simuliert. Zur Analyse der Bewirtschaftbarkeit konzentrierte sich die Untersuchung auf den mittleren Grundwasserflurabstand für die einzelnen Monate im Randowbruch. Die Abgrenzung des zu erfassenden Bereiches erfolgte anhand der Moormächtigkeitskarte sowie der referenzierten Moorkarte des Landesamtes für Umwelt Brandenburg (LfU, 2021).

Abbildung 7 zeigt die für jeden Monat berechneten mittleren Grundwasserflurabstände auf den Modellflächen innerhalb dieses Areals, bezogen auf die 30-Jahre-Langzeitsimulation. Sie verdeutlicht einen ausgeprägten saisonalen Verlauf des Grundwasserflurabstands. Bei den Stauvarianten 2 und 3 zeigt

Tabelle 2
Übersicht Stauvarianten.
Overview of management options.

	Beschreibung
Variante 1	Mittlere bis hohe Stauhaltung vom Sommer bis in den Winter – Abstau in den Monaten März und April. Dies simuliert die bisherige Praxis.
Variante 2	Maximale Stauhöhe an den funktionsfähigen Wehren – Kurzzeitiger Abstau im April für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung.
Variante 3	Ganzjährig maximale Stauhöhe an den funktionsfähigen Wehren.

**Abbildung 7**

Mittlerer monatlicher Grundwasserflurabstand für die drei simulierten Stauvarianten in Meter.
Average monthly groundwater levels for three different water management options.

sich eine signifikante Erhöhung des Grundwasserstands über das gesamte Jahr hinweg, mit einer ganzjährigen Differenz von etwa 2 dm im Vergleich zum Ausgangszustand. Dadurch wird der gewünschte Effekt einer erhöhten Stauhaltung erreicht, sodass der sommerliche Grundwasserflurabstand bei Variante 3 über 4 dm gehalten werden kann. Zudem wird erkennbar, dass die Grundwasserstände der Stauvariante 2 im April und Mai deutlich unter denen der Variante mit ganzjährigem Vollstau liegen. Dieses Defizit bleibt auch im restlichen Jahresverlauf bestehen, sodass der angestrebte Abstand von weniger als 4 dm nur mit der dritten Variante erreicht wird. Auf der anderen Seite ermöglicht der kurzzeitige Abstau in Variante 2 nicht die notwendigen Wasserstände, um eine Befahrbarkeit und landwirtschaftliche Nutzung im Frühjahr sicherzustellen. Ausreichend hohe Wasserstände für Moorerhalt bzw. Moorbewuchs ergeben sich lediglich bei der ganzjährigen Vollstauhaltung, bei der die Zielgröße von 4 dm unter Flur im Sommer theoretisch realisierbar ist. Eine Bewirtschaftung wäre in diesem Szenario jedoch ausgeschlossen.

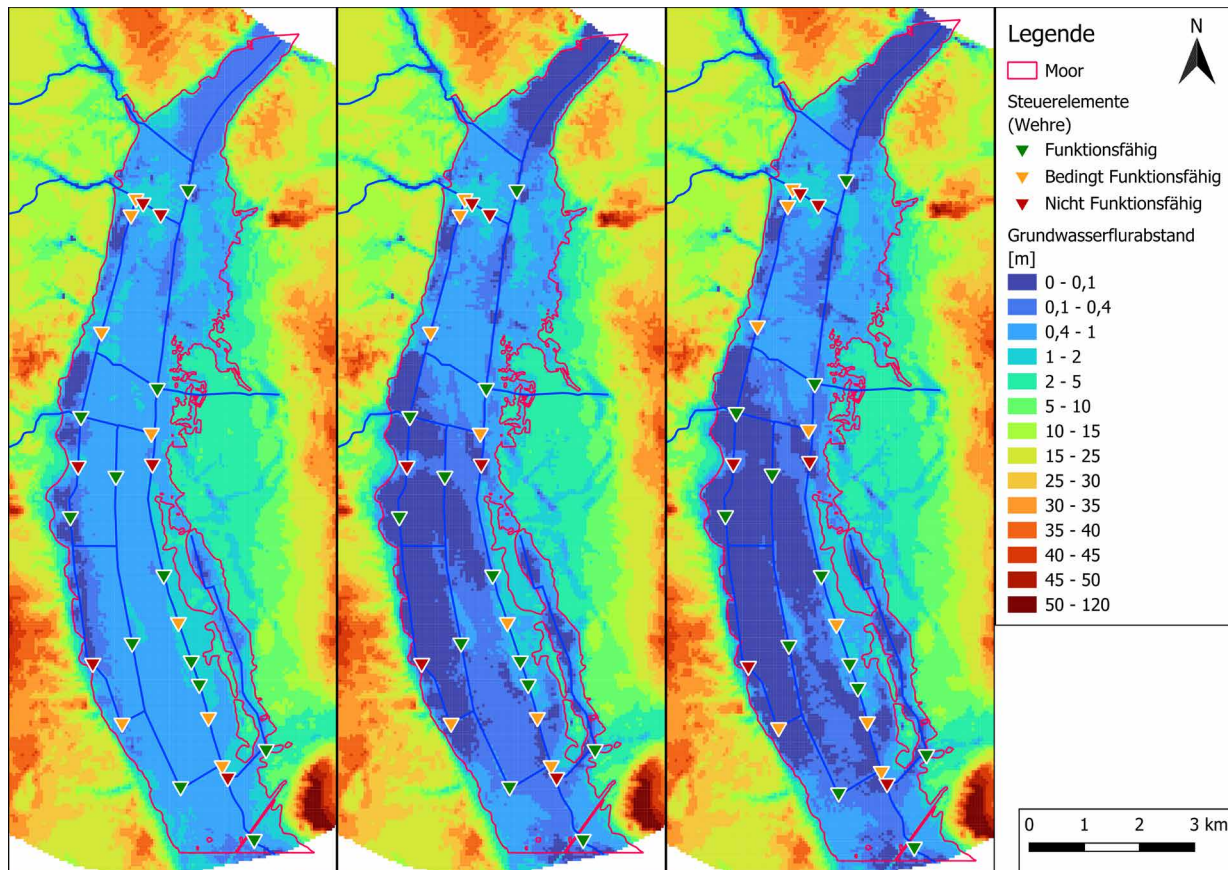
Zur Analyse des Wasserdargebots in seiner räumlichen Verteilung sowie der dem Moor zur Verfügung stehenden Wassermengen visualisiert Abbildung 8 die mittleren Grundwasserflurabstände der Szenarien für den Monat August. Anhand der Darstellung lassen sich die Bereiche identifizieren, in denen die Stauwirkung und damit der Wasserrückhalt am effektivsten erfolgt.

Aus Abbildung 8 wird die Veränderung durch das angepasste Stauregime der beiden entwickelten Varianten deutlich. Während beim Ausgangszustand im August bis auf kleinere Senken an der Westseite des Moorbereichs der Grundwasserflurabstand

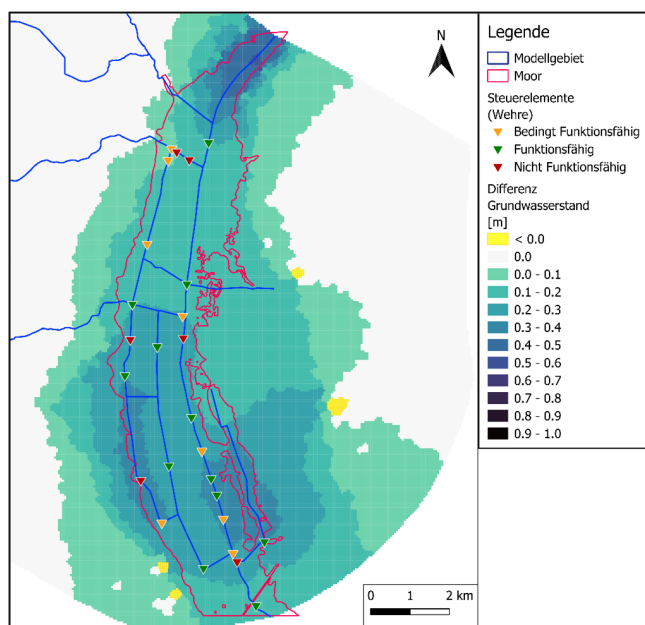
größtenteils unter 4 dm liegt, kann in den beiden anderen Varianten in weiten Teilen ein höherer Wasserstand gehalten werden. Variante 3 hebt sich dabei noch heraus. Interessant zu beobachten ist, dass sich die erhöhten Wasserstände insbesondere in der Südhälfte einstellen und in der Nordhälfte aufgrund des höheren Geländegefälles nur punktuell vorliegen. Der nördlichste Teil stellt eine Ausnahme dar, da hier das Gelände gen Norden abfällt und somit ein Vollstau am nördlichsten Klappenwehr sehr hohe Wasserstände hervorruft.

Abbildung 9 zeigt den Anstieg des Grundwasserstands als Differenz für Stauvariante 3 im Vergleich zum Ausgangszustand. Es ergeben sich ausgeprägte Stauwurzeln mit einer Grundwasserstands-differenz von bis zu 4 dm. Der Südteil hebt sich in der Karte deutlicher hervor: Dies ist zum einen auf ein im Vergleich zum Nordteil geringeres Gefälle, zum anderen auf die Menge der Staubauewerke zurückzuführen. Wie bereits bei der Analyse der Grundwasserflurabstände für den Monat August zeigt sich auch hier der Anstieg für den nördlichsten Teil des Randowbruchs aufgrund der speziellen Geländeeigenschaften.

Darüber hinaus fällt auf, dass der Anstieg des Grundwassers weit über den Moorbereich hinausgeht. Dies betrifft speziell das östliche Einzugsgebiet im Bereich des Blumberger Waldes und darüber hinaus, wo ein flachgründiger, aber flächenmäßig großer Grundwasserleiter ansteht. Hier ist eine weiträumige Anhebung des Grundwassers deutlich zu erkennen. Mit der Stauhaltung lässt sich demnach mehr Wasser im Gebiet zurückhalten als erwartet. Zudem ist das gespeicherte Wasser in den benannten Bereichen eher oberflächenfern, sodass hier die Verdunstung im Gegensatz


Abbildung 8

Mittlerer Grundwasserflurabstand im August für die drei Varianten (links: Variante 1 – Ausgangszustand, Mitte: Variante 2, rechts: Variante 3).
Average groundwater table depth in August for the three variants (left: version 1 – status quo, middle: version 2, right: version 3).


Abbildung 9

Mittlere Differenz des Grundwasserflurabstands für Stauvarianten 1 und 3.
Average difference in groundwater table depth between damming variants 1 and 3.

zu den Flächen im Randowbruch eine geringere Rolle spielt und das Potenzial für eine länger anhaltende Wasserversorgung in der Vegetationsperiode vorhanden ist. Im Westen des Einzugsgebiets ist der Effekt weniger stark ausgeprägt. Dies ist sowohl auf das relativ hohe Geländegefälle und die hydrogeologischen Schichten zur Hochfläche hin als auch auf den dort anstehenden hydraulisch gering leitenden Geschiebemergel zurückzuführen.

Abschließend ist festzustellen, dass durch die gezielte Stauhaltung ein sowohl großflächiger als auch dauerhafter Wasserrückhalt erzielt werden kann. Aufgrund des starken Jahresgangs der Grundwasserstände ist jedoch eine konventionelle Bewirtschaftung der landwirtschaftlich genutzten Flächen durch kurzzeitigen Abstau nicht zu ermöglichen. Hierzu wäre ein ganzjährig niedrigeres Niveau der Stauhöhen bzw. ein längeres Absenken der Stauanlagen im Frühjahr notwendig, das wiederum dem ausreichenden Wasserrückhalt für den Moorschutz entgegensteht.

Für die weitere Bearbeitung des Projekts wurde sich daher mit den Projektpartnern auf die Analyse einer Lösung geeinigt, die dem Moorschutz im Randowbruch den Vorrang gibt und eine Anpassung der Landwirtschaft an ein feuchtes Moor bedingt. Auf dieser Grundlage ist eine ganzjährig hohe Stauhaltung realisierbar, die einen möglichst geringen Grundwasserflurabstand über das gesamte Jahr hält und die Degradierung der Moorböden verhindert.

Tabelle 3

Übersicht Stauvarianten Maßnahmenplan.

Overview of the action plan for the damming variants.

Variante	Beschreibung
Ausgangszustand	Mittel bis hohe Stauhaltung vom Sommer bis in den Winter – Abstau in den Monaten März und April. Dies simuliert die bisherige Praxis.
Planzustand 1	Ganzjährig im Vollstau mit fünf gestaffelten Staugürteln
Planzustand 2	Hangparallele Wasserführung durch Verfüllung talwärts gerichteter Verbindungsgräben.

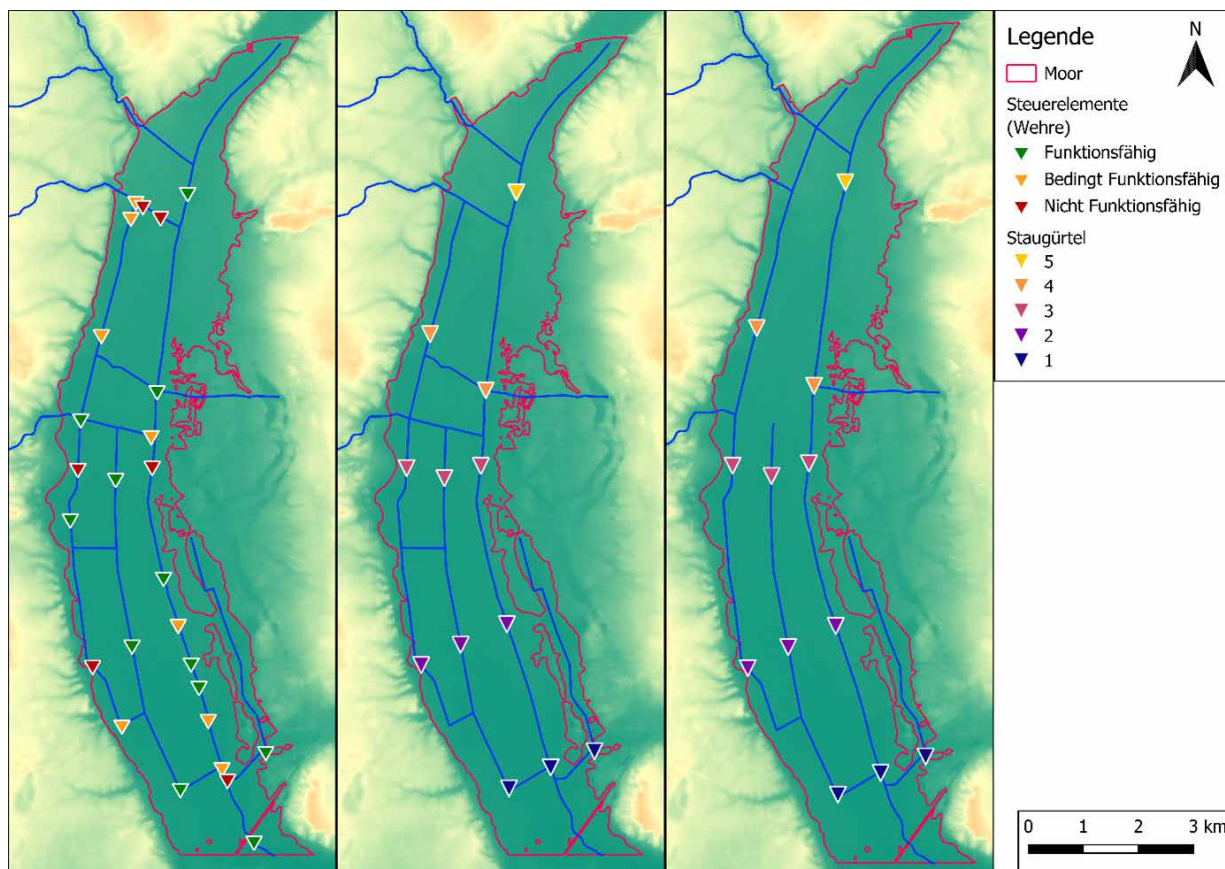
6 Maßnahmenplan

Gemäß den Erkenntnissen aus der Analyse des Ist-Zustandes und der Ermittlung des Zielerreichungsstandes mit dem derzeitigen Stausystem wurde im Hinblick auf das angestrebte Bewirtschaftungskonzept für das südliche Randowbruch ein Maßnahmenplan entwickelt, der verschiedene Planzustände für eine stufenweise Optimierung des wasserwirtschaftlichen Systems beinhaltet. Die beinhalteten Maßnahmen wurden mithilfe des gekoppelten Modells simuliert und auf ihre Wirksamkeit hinsichtlich des Wasserrückhalts und der Wasserverteilung untersucht.

Die beiden grundlegenden Ideen, die zur Umstrukturierung des Fließgewässer- und Stausystems im Randowbruch in Betracht gezogen wurden, sind einerseits sogenannte Staugürtel, beste-

hend aus bis zu drei auf gleicher Höhe angeordneten Wehren, die einen gestaffelten Wasserrückhalt in Nord-Süd Richtung gewährleisten sollen. Andererseits wurde die Verfüllung von Teilen des Grabensystems im Randowbruch im Modell umgesetzt. Diese Maßnahme zielt darauf ab, das Wasser hangparallel auf einem höheren Niveau zu halten und das schnelle Abfließen in die Talmitte zu verhindern, ähnlich dem ursprünglichen und somit natürlichen Zustand des Randowbruchs.

Hierfür wurden zwei Planzustände entwickelt. Planzustand 1 beinhaltet eine Stauhaltung mit fünf gestaffelten Staugürteln bzw. vier Staugürteln plus einem Wehr, die sich gleichmäßig über das Randowbruch verteilen und ganzjährig im Vollstau gehalten werden. Planzustand 2 beinhaltet ebenfalls die Stauhaltung mittels Staugürteln sowie zusätzlich das veränderte Fließgewässer-

**Abbildung 10**

Planzustände für das Randowbruch (links: Ausgangszustand, Mitte: Planzustand 1: Fünf Staugürtel, rechts: Planzustand 2: Hangparallele Wasserverteilung).
Water management options for the southern Randowbruch (left: initial state, middle: planned state 1: five dams, right: planned state 2: water distribution parallel to slope).

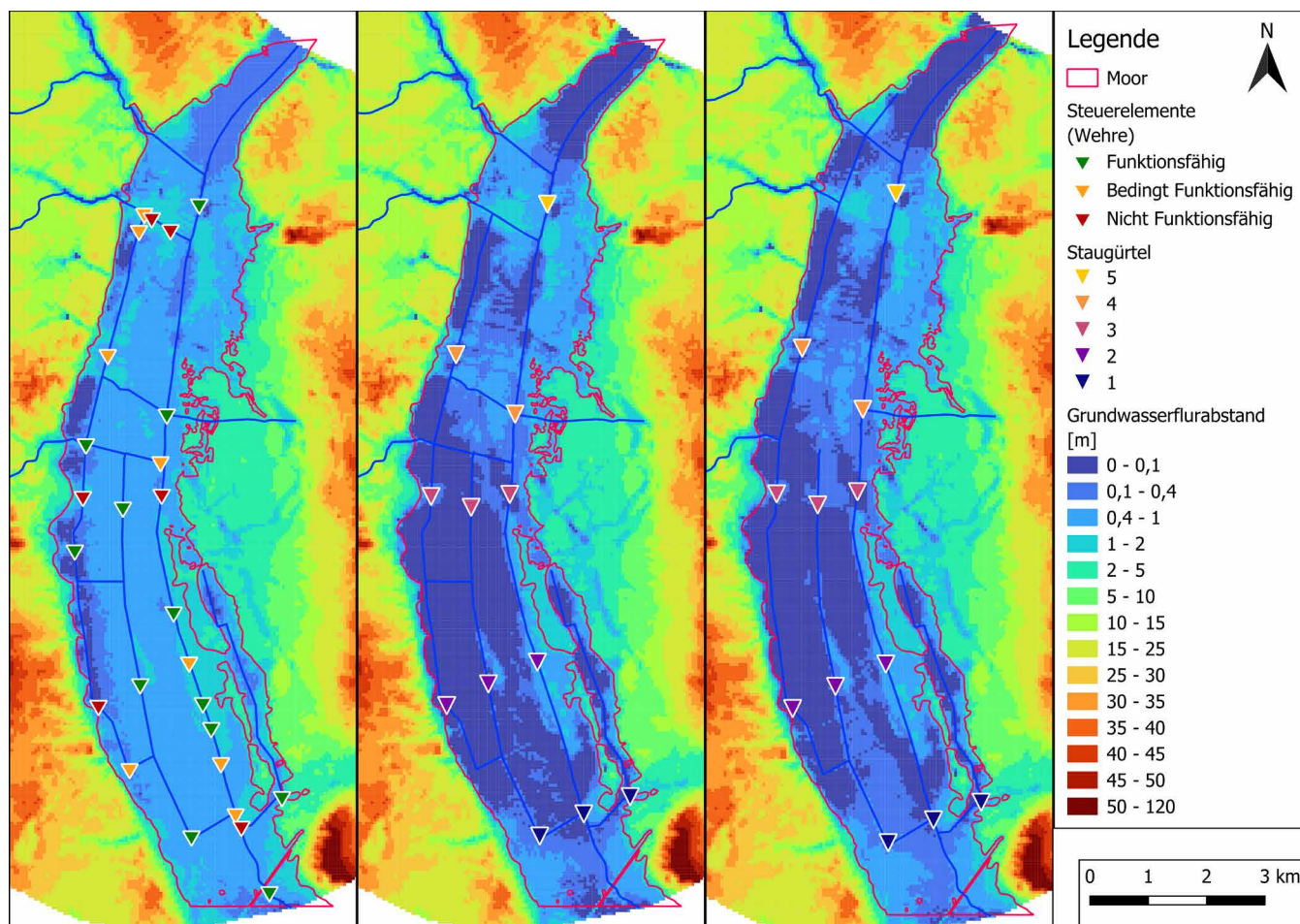


Abbildung 11

Mittlerer Grundwasserflurabstand im August für die drei Planzustände (links: Ausgangszustand, Mitte: Planzustand 1: Fünf Staugürtel, rechts: Planzustand 2: Hangparallele Wasserverteilung).

Average groundwater table depth in August for the three scenarios (left: initial state, middle: planned state 1: five dams, right: planned state 2: water distribution parallel to slope).

system mit der beschriebenen hangparallelen Wasserhaltung. In dieser Variante wurde außerdem der Wiesengraben (westlicher Hauptgraben) nach Norden verlängert, um den Zustrom aus dem größten Zufluss in den Wiesengraben umzuleiten und das Wasser im nördlichen Bereich ebenfalls auf einem möglichst hohen Niveau zu halten. Als Referenzzustand wird wie zuvor beschrieben der Ausgangszustand mit dem derzeitigen Stausystem und Stauregime beibehalten.

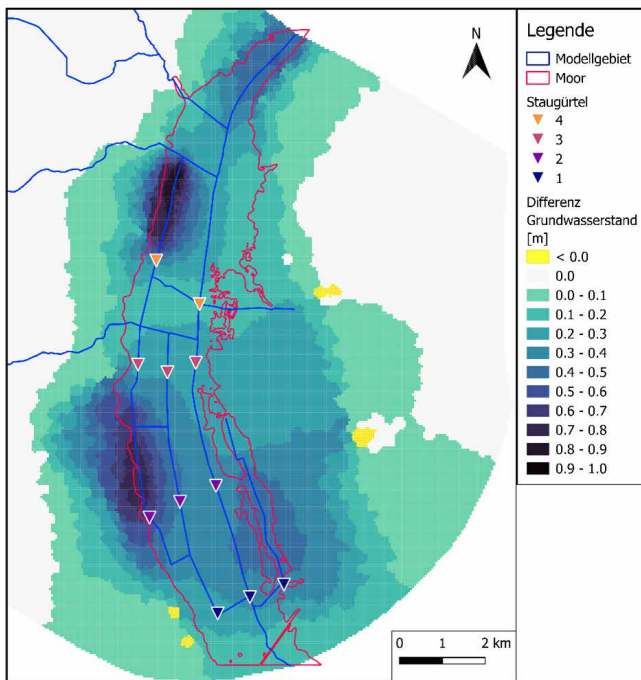
6.1 Auswertung

Analog zur Analyse des Ist-Zustandes werden die Grundwasserflurabstände für den Monat August mit der Differenz der Grundwasserstände, gemittelt über den gesamten Simulationszeitraum, sowie mit den mittleren monatlichen Grundwasserflurabständen verglichen.

Bei der Betrachtung der Grundwasserflurabstände (Abb. 11) wird deutlich, in welchen Bereichen des Randowbruchs der Wasserrückhalt durch die Staugürtel am effektivsten erfolgt. Eine deutliche Anhebung ist im gesamten Südteil zu erkennen, allerdings ergeben sich durch die Staugürtel auch im Nordteil deutlich höhere Wasserstände im Vergleich zum Ausgangszustand. Für

Planzustand 2 fällt zudem auf, dass die Wasserstände an der Verlängerung des Wiesengrabens deutlich ansteigen. Dagegen ergeben sich für den Bereich des Mittelgrabens Defizite im Vergleich zu Planzustand 1.

Die Differenz zwischen Ausgangszustand und Planzustand 1 in Abbildung 12 ergibt ein ähnliches Bild. Insbesondere die Areale am nordwestlich gelegenen Wiesengraben werden hervorgehoben und zeigen eine großräumige Anhebung des Grundwasserspiegels von bis zu einem Meter. Ähnliches gilt für den Bereich weiter südlich sowie rund um den Torfgraben im Südosten des Randowbruchs. Weiterhin zeigt sich durch die optimierte Stauhaltung eine Anhebung der Wasserstände von 4 dm auf großer Fläche. Der Wasserrückhalt setzt sich, verglichen mit dem Ist-Zustand, im Vollstau noch weiter in das Einzugsgebiet fort. Flächenmäßig ist, wie bereits mit dem derzeitigen Stausystem, insbesondere das östliche Einzugsgebiet betroffen. Hier wird ein Wasserrückhalt auf großer Fläche im östlich gelegenen Grundwasserleiter erzielt. Im Westen ist die Wirkung in die Fläche weniger weiträumig. Dies liegt, wie bereits erwähnt, an den hydrogeologischen Gegebenheiten im Einzugsgebiet, d. h. dem flachgründigen und weiträumigen Grundwasserleiter im Osten

**Abbildung 12**

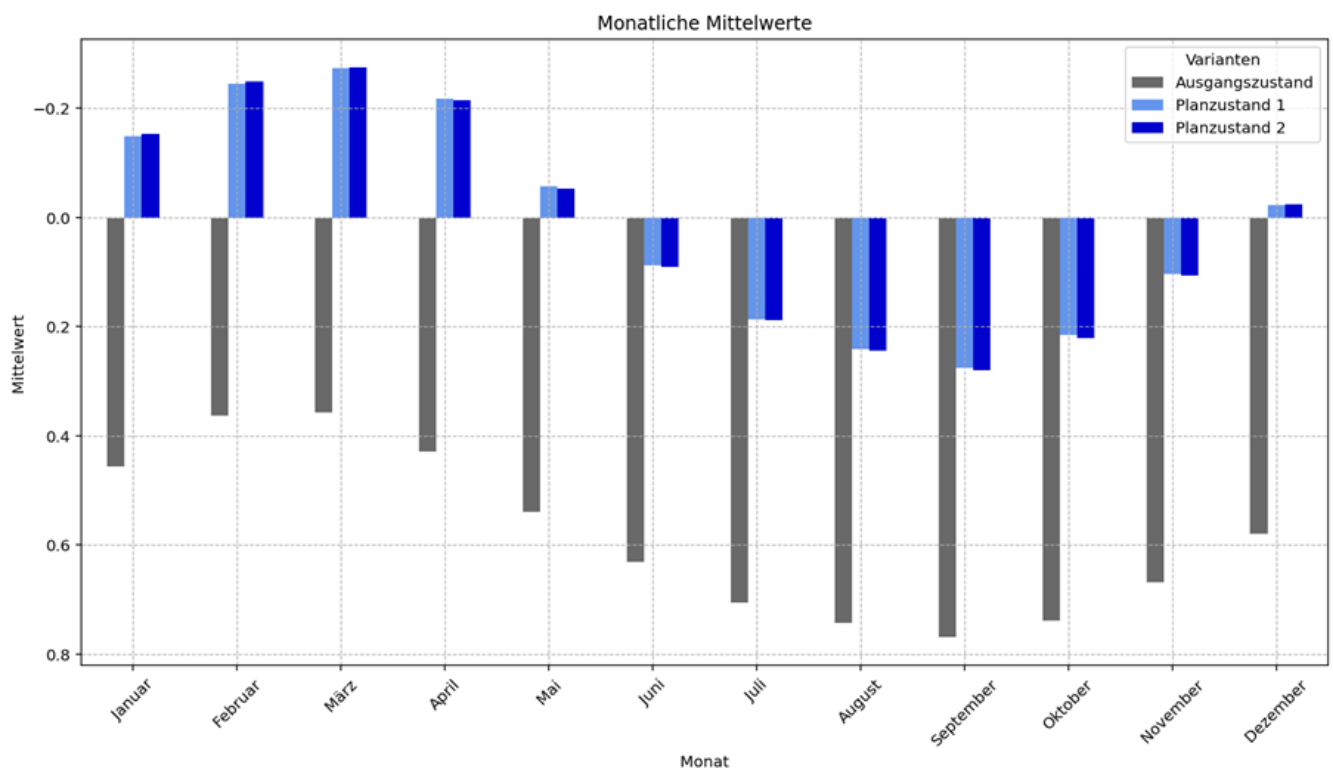
Differenz des mittleren Grundwasserflurabstands für die Variante derzeitiges Stauregime (Realstau) und den ganzjährigen Vollstau mit fünf Staugürteln.

Difference of the average groundwater level for management options one and three.

sowie dem lokal begrenzten Grundwasserleiter und einem steilen Gelände- und Grundwassergefälle im Westen.

Die in Abbildung 13 dargestellten monatlichen Mittel zeigen nach wie vor einen ausgeprägten Jahresgang. Allerdings werden auch hier die Optimierungen im Stausystem deutlich. Im Vergleich wird durch die beiden Planzustände ein signifikant höherer Grundwasserstand erzielt. Im Gegensatz zum Ausgangszustand steigen die Grundwasserstände um weitere 1 dm über das gesamte Jahr an. Die sommerlichen Grundwasserstände liegen dabei nur etwa 2,5 dm unterhalb der Geländeoberkante. Des Weiteren wird deutlich, dass aus beiden Planzuständen bezogen auf die Fläche des Moores ähnliche Wasserstände über das Jahr resultieren. Der Unterschied liegt hier in der räumlichen Verteilung. Planzustand 1 ist demnach aus wasserwirtschaftlicher Sicht sowie aus umsetzungstechnischer Sicht am effektivsten.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass moorschonende Wasserstände durch die Stauhaltung der Planzustände im Sommer kleinräumig in Bereichen der Nordhälfte und großflächig in der Südhälfte erreicht werden. In der Nordhälfte geht aus den Differenzkarten punktuell die größere Anhebung hervor. Aufgrund des dort vorhandenen Geländegefälles sind ganzjährig oberflächennahe Grundwasserstände großflächig jedoch nicht zu realisieren. Die Südhälfte begünstigt dagegen durch ihre Beckenstruktur oberflächennahe Wasserstände. Für den Moorschutz ergeben sich somit günstigere Bedingungen in der Südhälfte.

**Abbildung 13**

Mittlerer monatlichen Grundwasserflurabstand für drei Planzustände.

Average monthly groundwater level for three water management options.

7 Zusammenfassung

Im Zuge der Entwicklung des Wasserbewirtschaftungskonzepts für das südliche Randowbruch ergaben sich bedeutende Erkenntnisse in Bezug auf die gekoppelte Modellierung grundwassergeprägter Einzugsgebiete mit Moorböden und der Vereinbarung eines nachhaltigen Moorschutzes mit weiterhin zu gewährleistender landwirtschaftlicher Nutzung.

Zunächst ist zu konstatieren, dass mithilfe des gekoppelten Modells die hydrologischen und hydraulischen Prozesse im Einzugsgebiet des südlichen Randowbruchs in ihrer komplexen Wechselwirkung abgebildet werden konnten. So lassen sich der Mechanismus aus Speisungs- und Entlastungsgebiet im Grundwasser sowie die Auswirkungen der Stauhaltung auf die Grundwasserstände und den Abfluss im Randowbruch belastbar modellieren. Darüber hinaus konnten Einsichten für die Umsetzung verschiedener wasserwirtschaftlicher Maßnahmen in Bezug auf unterschiedliche Planzustände herausgearbeitet werden. Diese sind insbesondere im Hinblick auf die Zukunft und ein sich wandelndes Wasserdargebot im südlichen Randowbruch infolge klimatischer Änderungen für ein nachhaltiges Konzept zur Umsetzung des Moorschutzes maßgeblich.

Generell wurde festgestellt, dass ein moorschonender Grundwasserstand im Südteil des Mooregebiets durch die Stauhaltung und die morphologischen Verhältnisse großflächig umsetzbar ist. Im Nordteil können dagegen im Sommer nur in Teilen Grundwasserflurabstände von weniger als 4 dm gehalten werden.

Hinsichtlich der Ergebnisse und der Umsetzung der Stauhaltungen ist festzuhalten, dass die simulierten Stauhöhen das theoretisch mögliche Maximum darstellen. In der Praxis sollte stets ein Sicherheitspuffer berücksichtigt werden, um auf Starkregen oder ähnliche Ereignisse vorbereitet zu sein. Unabhängig davon werden sich die Interessen der Flächennutzer und die des Moorschutzes zumindest in den ersten Jahren gegenüberstehen, da die Landwirte im südlichen Randowbruch weiterhin ihren Lebensunterhalt bestreiten müssen. Dabei sind auf beiden Seiten Kompromisse einzugehen, jedoch werden Landnutzer in Zukunft nicht umhinkommen, die von Ihnen angewandten Methoden zur landwirtschaftlichen Bewirtschaftung umzustellen. Die Aufgabe des Landesamtes für Umwelt Brandenburg ist daher die Unterstützung der Landwirte in einem solchen Wandel. Dabei stehen insbesondere die Entwicklung und Optimierung neuer Bewirtschaftungstechniken sowie finanzielle Hilfe für die Landwirte in diesem Prozess im Vordergrund. Ausschlaggebend wird jedoch sein, inwieweit sich für neue landwirtschaftliche Erzeugnisse Wertschöpfungsketten innerhalb der Wirtschaft etablieren, um die Existenzen der Landwirte zu sichern und ein nachhaltiges Wirtschaften auf den Flächen im Einklang mit einem nassen Moor gewährleisten zu können. Auch hierbei unterstützt das Landesamt die Landwirte.

Zuletzt sind noch die aktuellen Entwicklungen im Randowbruch zu beachten. Da es während des Projektes durch eine offene Kommunikation und die Präsentation der Modellergebnisse bei Staubeiratstreffen gelang, mehr und mehr Landwirte vom Moorschutz zu überzeugen, realisiert seither der Wasser- und Bodenverband Welse in enger Absprache mit den Landwirten eine möglichst hohe Stauhaltung. Diese sind zwar nicht gleich der im Modell maximal simulierten Stauhöhen, allerdings sollen

im Zuge des Folgeprojektes „Brandenburgs Luchgebiete klimaschonend bewahren – Initiierung einer moorerhaltenden Stauhaltung und Bewirtschaftung“ (BLuMo), das den Moorschutz auf mehreren Moorstandorten in Brandenburg untersucht, auf ausgewählten Flächen des südlichen Randowbruchs Probestauhaltungen durchgeführt werden, die ganzjährig hohe Stauhaltungen und somit moorschonende Wasserstände zum Ziel haben. Mit dem Projekt soll unter den Nutzern eine Moorgemeinschaft entstehen, wodurch die Grundlage für eine betriebsangepasste Neuverteilung der Moorflächen geschaffen wird.

Eine weitere Maßnahme für die Landwirte sind die Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen (AUKM) zum Moorbodenschutz. Diese Förderung gleicht die Erschwernisse und Ertragseinbußen der Landwirte bei einer hohen Stauhaltung auf ihren Flächen aus.

Conclusion

During the course of developing the water management concept for the southern Randowbruch, insights were gained in relation to the coupled modelling of groundwater-dominated catchment areas with peatlands and the reconciliation of two conflicting interests – sustainable peatland protection and continued agricultural use.

First of all, it was possible to model the hydrological and hydraulic processes in the catchment area in their complex interaction with the coupled model of ArcEGMO and FEFLOW. Thus, the mechanism of the water transport from the surroundings of the catchment area via the aquifers to the peat body as well as the effects of the implemented water management on the groundwater levels and the discharge in the Randow were modelled reliably. It was also possible to develop findings concerning the implementation of various water management measures in relation to different plan states. These findings are particularly important in terms of the future and a changing water supply in the southern Randowbruch as a result of climatic changes, so as to ensure a sustainable concept for the implementation of moor protection.

In general, the project revealed that water retention, combined with the morphological conditions, allows for widespread implementation of peat-conserving groundwater levels in the southern part of the peatlands. By contrast, in the northern Randowbruch, depths to groundwater of below 4 dm can only be maintained in some parts during the summer.

Considering the effects and establishment of the retention structures, it should be noted that the model simulated theoretical maximum retention levels. In practice, a safety buffer should always be applied to account for heavy rain or similar events. Nevertheless, the interests of the land users and those of moor protection will conflict, at least in the first few years since local farmers still rely on this area to earn their living. Both sides will have to make compromises, although in the future, it is certain that the land users will not be able to avoid changing the methods of agricultural management that they use. Therefore, the task of the Brandenburg State Office for the Environment is to support farmers during such change. The focus must be on the development and optimization of new management techniques, as well as the provision of financial support for farmers in this process. However, the decisive factor will be the extent to which value chains are established within the economy for the new

agricultural products in order to secure the livelihoods of farmers and be able to guarantee a sustainable management in harmony with a wet moor. Here again, the State Office provides assistance to farmers.

Lastly, current developments in the Randowbruch must be considered. Due to open communication and the presentation of model results during water board meetings, the project successfully convinced an increasing number of farmers of the importance of peatland conservation. As a result, the Welse Water and Soil Association has since been implementing the highest possible water retention levels in close coordination with local farmers. Although these retention levels do not reach the maximum simulated in the model, pilot retention measures are planned as part of the follow-up project "Preserving Brandenburg's Luch Areas in a Climate-Friendly Way – Initiation of Peatland-Conserving Water Retention and Management" (BLuMo). This project, which focuses on peatland conservation across multiple sites in Brandenburg, aims to establish high water retention levels all year-round, creating peat-conserving water conditions on selected areas of the southern Randowbruch. BLuMo is also meant to initiate the formation of a "peatland community" of land users, laying the foundation for a reallocation of the peatlands based on operational needs.

Other ways to support farmers include the peat soil conservation projects under the Agri-Environmental and Climate Measures (AUKM) program, which compensate them for additional obstacles or income losses resulting from high retention levels on their land.

Hinweis zur Datenverfügbarkeit

Die dem Projekt und dem Modell zugrunde liegenden Daten sind größtenteils frei zugänglich und können öffentlich genutzt werden. Die Datenquellen sind unter den Literaturverweisen aufgeführt. Die Ergebnisse des Projekts hingegen gehören dem Auftraggeber, dem Landesamt für Umwelt Brandenburg, und unterliegen daher spezifischen Nutzungsbedingungen.

Danksagung

Wir danken Dr. Lukas Landgraf vom Landesamt für Umwelt Brandenburg und den anonymen Gutachtern für die wertvollen Hinweise, die zur Verbesserung des Artikels beigetragen haben.

Anschrift der Verfasser:

M.Sc. Mauritius Tix
Dr. Bernd Pfützner
Büro für Angewandte Hydrologie GmbH
Köberlesteig 6
13156 Berlin
Mauritius.Tix@bah-berlin.de
Bernd.Pfützner@bah-berlin.de

Literaturverzeichnis

- AUGUSTIN, J. (2012): Emission, Aufnahme und Klimarelevanz von Spurengasen: Nordostdeutsche Niedermoore als Quellen klimarelevanter Spurengase. – SUCCOW, M. & H. JOOSTEN (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde, Schweizerbart, 28-38.
- BECKER, A., B. KLÖCKING, W. LAHMER & B. PFÜTZNER (2002): The Hydrological Modelling System ArcEGMO. – SINGH, V.P. & D.K. FREVERT (Hrsg.): Mathematical Models of Large Watershed Hydrology. Water Resources Publications, 321-384.

- BMU, BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf.
- ELLMANN, H. (2015): Machbarkeitsstudie: Verbesserung der hydrologischen Verhältnisse und der ökologischen Durchgängigkeit in der Randowniederung. Ingenieurbüro Ellmann/Schulze GbR.
- GREIFSWALD MOOR CENTRUM (2016): Moore im Klimaschutzplan 2050. https://greifswaldmoor.de/files/images/pdfs/Moore%20im%20Klimaschutzplan%202050_Greifswald%20Moor%20Centrum.pdf.
- KLÖCKING, B. (2009): Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebietsmodells ArcEGMO. Büro für Angewandte Hydrologie. <http://www.doku.arcegmo.de/module/pscn/theoretische-modellbeschreibung/>, zuletzt aufgerufen am 13.03.2025.
- KSG, Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 235) geändert worden ist. <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html>.
- LEHRKAMP, H. (1987): Die Auswirkungen der Meliorationen auf die Bodenentwicklung im Randow-Welse-Bruch. Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin.
- LUCKNER, L. (1993): Grundwasser: Grundwasserverhältnisse in den neuen Bundesländern. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Universität Hannover. <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-01603.pdf>.
- MONNINKHOFF, L., & J.N. HARTNACK (2009): Improvements in the Coupling Interface between FEFLOW and MIKE11. – Proceedings of the 2nd International FEFLOW User Conference.
- RAUTHE, M., H. STEINER, U. RIEDIGER, A. MAZURKIEWICZ & A. GRATZKI (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). – Meteorologische Zeitschrift, 22(3), 235-256. DOI:10.1127/0941-2948/2013/0436.
- ROSEMANN, H.J., & J. VEDRAL (1971): Das Kalinin-Miljukov-Verfahren zur Berechnung des Ablaufs von Hochwasserwellen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, 6.
- ZEITZ, J. (2012): Randow-Welse-Flußtalmoor. – SUCCOW, M., H. JOOSTEN (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde, Schweizerbart, 434-436.

Verwendete Datensätze

- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST (1999-2019): Klimadaten für 4 Hauptstationen in Brandenburg. ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/.
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST (1999-2019): REGNIE-Daten – Regionalisierte Niederschläge im 1 km-Raster. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/monthly.
- LfU, LANDESAMT FÜR UMWELT BRANDENBURG (2021): Referenzierte Moorkarte des Landes Brandenburg. <https://lbgr.brandenburg.de/lbgr/de/geologischer-dienst/bodengeologie/downloads/>.
- LBGR, LANDESAMT FÜR BERGBAU, GEOLOGIE UND ROHSTOFFE BRANDENBURG (1986): HYK50 – Hydrogeologische Übersichtskarte im Maßstab 1 : 50.000. <https://geo.brandenburg.de/?page=LBGR-Webservices>.
- LBGR, LANDESAMT FÜR BERGBAU, GEOLOGIE UND ROHSTOFFE BRANDENBURG (1987): LKQ50 – Lithofazieskarte Quartär im Maßstab 1 : 50.000.
- LBGR, LANDESAMT FÜR BERGBAU, GEOLOGIE UND ROHSTOFFE BRANDENBURG (2019): BÜK300 – Bodenkundliche Übersichtskarte im Maßstab 1 : 300.000. Version 2.3.

LGB, LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION BRANDENBURG (2015): DGM1 – Digitales Geländemodell von Brandenburg (DGM1) im Maßstab 1 : 10.000. <https://data.geobasis-bb.de/geobasis/daten/dgm/>.

MLUL, MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE ENTWICKLUNG, UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT BRANDENBURG (2009): Flächendeckende Biotop- und Landnutzungskartierung im Land Brandenburg (BTLN) – CIR-Biotoptypen 2009. https://mlul.brandenburg.de/lua/gis/btln_cir_fl.zip.

MLUL, MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE ENTWICKLUNG, UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT BRANDENBURG (2012): Unterirdische Einzugsgebiete im Grundwasser Brandenburg (Stand: 2012). https://mlul.brandenburg.de/lua/gis/ezg_unterirdisch.zip.

MLUL, MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE ENTWICKLUNG, UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT BRANDENBURG (2014): Oberirdische Einzugsgebiete Brandenburg – ezg25 (Version 4.0; Stand: 2014). <https://mlul.brandenburg.de/lua/gis/gewnet25.zip>.

MLUL, MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE ENTWICKLUNG, UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT BRANDENBURG (2015): Gewässernetz Brandenburg (Version 4.1; Stand: 18.08.2015). <https://mlul.brandenburg.de/lua/gis/gewnet25.zip>.

MLUK, MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND KLIMASCHUTZ BRANDENBURG (2015): Hydroisohypsen des oberen genutzten Grundwasserleiters des Landes Brandenburg (Stand: 1999, 2006, 2011, 2015). https://mluk.brandenburg.de/lua/gis/GWD_1999.zip.