

Konrad Miegel, Thomas Graeff, Benny Selle, Thomas Salzmann, Christian Franck und Axel Bronstert

Untersuchung eines renaturierten Niedermooses an der mecklenburgischen Ostseeküste – Teil I: Systembeschreibung und hydrologische Grundcharakterisierung

Investigation of a renatured fen on the Baltic Sea coast of Mecklenburg – Part I: System description and basic hydrological characterisation

Küstennahe Niedermoore wie das des Naturschutzgebietes „Hütelmoor und Heiligensee“ nordöstlich von Rostock sind prägende Elemente der Landschaft entlang der südlichen Ostseeküste. Unter natürlichen Bedingungen gehören Austauschprozesse mit der Ostsee zu ihren hydrologischen Besonderheiten. Durch menschliche Eingriffe wie Dünen- und Deichbau, Entwässerungssysteme und neuerdings Renaturierungsmaßnahmen ist ihr hydrologisches Regime über die Jahrhunderte hinweg immer wieder verändert worden. Das Naturschutzgebiet (NSG) ist nach seiner Renaturierung bestens geeignet, um solche und künftige Änderungen zu studieren. Der vorliegende Beitrag ist erster Teil einer Doppelveröffentlichung, deren Ziel darin besteht, die maßgeblichen hydrologischen Prozesse, die für den Wasserhaushalt des NSG bestimmend sind, zu identifizieren. Dies soll auf der Grundlage des seit 2009 betriebenen Messnetzes zur Erfassung von Grundwasserständen und elektrischen Leitfähigkeiten im Moorkörper sowie von meteorologischen und Durchflussmessungen erfolgen. Gegenstand von Teil I ist die Vorstellung des Untersuchungsgebietes und die Beschreibung der Grundmuster seines hydrologischen Verhaltens, soweit dies auf der Grundlage einer Systemanalyse und der Bilanzierung der Wasserflüsse über die Systemgrenzen hinweg (Niederschlag, Verdunstung, Zuflüsse aus den angrenzenden Teilen des Einzugsgebietes, unterirdischer Austausch mit der Ostsee, oberirdischer Gebietsabfluss) möglich ist. Darüber hinaus steht durch den episodischen Eintrag von salzhaltigem Wasser im Verlauf schwerer Sturmfluten, die zu Dünendurchbrüchen geführt haben, ein natürlicher Tracer zur Verfügung, um das spezifische Prozessgeschehen innerhalb der Niederung (vertikaler Austausch durch Niederschlag, Verdunstung und aufsteigendes Grundwasser (GW), laterale Transporte, Austausch mit den Gräben) schärfer als sonst möglich zu identifizieren. Das betrifft sowohl die zeitliche Dynamik (Saisonalität und Trend) als auch räumliche Muster der Salzkonzentrationen als Spiegelbild der Wasserflüsse innerhalb des Moorkörpers, worauf in Teil II (SELLE et al. 2016) näher eingegangen wird.

Schlagerörter: Gebietsabfluss, Grundwasserströmung, Niedermoor, Nutzungseinflüsse, Ostseeküste, Systemanalyse, Wasserhaushalt

Coastal wetlands like the nature reserve “Hütelmoor und Heiligensee” northeast of Rostock are characteristic elements of the landscapes along the southern Baltic Sea coastline. Under natural conditions, their hydrological peculiarities include exchange processes between the fens and the Baltic Sea. Due to human interventions, e.g. the construction of dunes and dikes, drainage systems and lately also renaturation measures, their hydrological regime has been repeatedly changed over the centuries. The nature reserve (German: Naturschutzgebiet, NSG) “Hütelmoor und Heiligensee”, formerly used for pasture, has recently been restored, which allows the investigation of past changes and the evaluation of possible and future developments. The present contribution is the first part of a double publication which aims at identifying the relevant hydrological processes that affect the water balance of the presented wetland area. The investigations are based on a monitoring network measuring groundwater levels and electric conductivity within the fen since 2009, as well as on measurements of the flow and of meteorological variables. The topic of this first publication part is the hydrological characterization of the area under study and the identification of its particular hydrological basic patterns. This is done on the basis of a principal water budget, i.e. balancing of the different water flows across the system's borders, such as precipitation, evapotranspiration, inflows from the neighbouring parts of the catchment area, subterranean exchange processes with the Baltic Sea and the area's surface discharge. Furthermore, the episodic input of salty water, in the rare cases of heavy storm tides causing dune overspilling or breaching, provides salt as a natural tracer. This tracer allows clearer distinction of the specific processes in this particular lowland (vertical fluxes due to precipitation, evaporation and rising groundwater levels, lateral transport processes, exchange with trenches). This concerns the temporal dynamics (both seasonality and trends) as well as the spatial patterns of salt concentration reflecting the water flows within the peat layers, which will be discussed in part II (SELLE et al. 2016).

Keywords: Baltic Sea Coast, coastal wetland, drainage of the catchment area, fens, groundwater flow, management effects, system analysis, water balance

1 Einleitung

Küstennahe Niedermoore gehören zu den prägenden Gewässerlandschaften an der jungglazial geformten südlichen Ostseeküste (BRIEM 2003). Sie treten sowohl an der Außenküste als auch binnenseitig an den Bodden auf (SUCCOW & JOOSTEN 2001). Zu

den wichtigsten Formen ihrer Wasserspeisung gehören neben dem Niederschlag der Zustrom von Grundwasser (GW) und/ oder Flusswasser. Bei Durchströmung durch ein Fließgewässer zeichnen sie sich aufgrund oberflächennahen GW durch enge Wechselwirkungen zwischen Oberflächenwasser und GW aus. Sie sind dann mit dem Gewässerumfeld norddeutscher Niederungsflüsse

vergleichbar. Darüber hinaus werden küstennahe Niedermoore maßgeblich durch die nahe Ostsee beeinflusst (SOMMERHÄUSER & SCHUMACHER 2003). Bei Hochwasserbedingungen im Fließgewässer bzw. bei Sturmfluten der Ostsee kommt es hierbei zu besonders intensiven Austauschprozessen.

Aufgrund menschlicher Eingriffe, d.h. durch Entwässerungssysteme und Küstenschutzanlagen wie Dünendeiche, die zur Abriegelung gegenüber der Ostsee geführt haben, ist das hydrologische Regime küstennaher Niedermoore über Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte grundlegend verändert worden. In den letzten Jahren wird zumeist aus ökologischen Überlegungen bei manchen von ihnen eine Renaturierung bzw. die Herstellung naturnaher Bedingungen durch Wiedervernässung angestrebt. Dies betrifft auch das hier vorgestellte, annähernd halbkreisförmige Küstenmoor (Abb. 1), das überwiegend zum Naturschutzgebiet (NSG) „Hütelmoor und Heiligensee“ gehört und dessen Renaturierung 1991 in Angriff genommen worden ist. Es hat diesbezüglich Pilotcharakter und ist einerseits bestens geeignet, um die hydrologischen Besonderheiten eines küstennahen Niedermoors und seine Veränderungen unter transienten Bedingungen zu untersuchen. Andererseits unterscheidet es sich damit von vielen anderen Küstenmooren, die nach wie vor entwässert werden. Daneben hat jedes Küstenmoor seine entwicklungspezifischen Besonderheiten, die es zu beachten gilt.

Der vorliegende Beitrag ist erster Teil einer Doppelveröffentlichung in diesem Heft. Das Ziel beider Beiträge besteht in der Identifikation der maßgeblichen hydrologischen Prozesse, die für den Wasserhaushalt des NSG maßgeblich sind. Dies soll Einsichten in die Funktionsweise eines Küstenmoors an der Ostsee ermöglichen. Es liegt in der Natur der Sache, dass ein entsprechendes Gesamtverständnis nur durch Einbeziehung des Einzugsgebietes erreicht werden kann, durch das ein Niedermoor jeweils gespeist wird. Daneben wird der Frage nachgegangen, wie stark bzw. relevant ein unterirdischer Austausch mit der Ostsee ist. Beide Beiträge sollen Ausgangspunkt für weiterführende Untersuchungen und Modellierungen sein, so wie sie z.B. durch KLIESCH et al. (2016) in Niederungen südlich des Barther Bodens durchgeführt worden sind.

Nachfolgend werden küstennahe Niedermoore zunächst grundlegend charakterisiert, um anschließend das Untersuchungsgebiet und sein hydrologisches Prozessgeschehen näher zu



Abbildung 1

Das küstennahe Niedermoor des Naturschutzgebietes „Hütelmoor und Heiligensee“ im Juni 2012 (Bildquelle: Dr. Lars Tiepolt) mit der Aufwölbung des „Hütelmoores“ (braune Fläche in der Bildmitte) und dem Strandsee „Heiligensee“ im Bildhintergrund

The coastal lowland fen of the nature reserve "Hütelmoor und Heiligensee" in June 2012 (image-source: Dr. Lars Tiepolt) with the raised moss "Hütelmoor" (brown area in the middle of the picture) and the lagoon "Heiligensee" (image background)

beschreiben sowie die Wasserflüsse über die Systemgrenzen hinweg zu bilanzieren. Mit den dabei angewendeten, überwiegend einfachen Methoden wird dem gegenwärtigen Kenntnisstand und den **bestehenden** Unsicherheiten Rechnung getragen.

2 Hydrologische Besonderheiten küstennaher Niedermoore

2.1 Entstehungsursachen

Küstennahe Niedermoore sind bevorzugt an flachen Küstenabschnitten und im Bereich ehemaliger Schmelzwasserrinnen entstanden, die mit Sediment aufgefüllt worden sind (SOMMERHÄUSER & SCHUMACHER 2003). Für die Torfbildung solcher Moore begünstigend waren Faktoren wie der holozäne Anstieg des Meeresspiegels, die glazial-isostatische Landsenkung, rezente Vorgänge des Küstenausgleichs, aperiodische Überflutungen durch Sturmfluten und ein binnenseitiger Wasserzustrom, der oberirdisch durch ein Fließgewässer und/ oder unterirdisch in einem Grundwasserleiter erfolgt. Sie sind häufig stärker gesättigt. Selbst Sandschichten oder Sandüberdeckungen sind nicht untypisch, wenn Sturmfluten oder Prozesse des Küstenausgleichs zum Eintrag von Sand geführt haben. IKELS (2011) verweist auf langfristige Meeresspiegelschwankungen und Phasen des Trockenfallens, aufgrund derer sich Torfbildungs- und Zersetzungs- bzw. Vererdungsphasen abgewechselt haben.

2.2 Wechselwirkungen mit der Ostsee und mit Fließgewässern

Unter natürlichen Bedingungen ist ein wechselseitiger Austausch zwischen den küstennahen Niedermooren und der Ostsee ty-



Abbildung 2

Entwässertes Niederungsgebiet am Barther Bodden ost-südöstlich von Zingst im Mai 2014 (Bildmitte rechts: Schöpfwerk mit Mahlbusen; Bildquelle: Dr. Lars Tiepolt)

Drained lowland between Baltic Sea and Barther Bodden (inner bay) nearby Zingst in May 2014 (centre right: coastal pumping station with storage basin; image source: Dr. Lars Tiepolt)

pisch. Die Dynamik des Austauschs, die von den Wasserstandsschwankungen abhängt, unterliegt dabei im Vergleich zur Nordsee kaum einem Tideeinfluss. Oft werden die Niedermoore von einem Fließgewässer aus dem Hinterland durchströmt, über das sie unter normalen hydrologischen Bedingungen in die Ostsee entwässern. Dabei erfolgt der Abfluss in Abhängigkeit von den Höhen- und Gefällverhältnissen sowie von den aktuellen Wasserständen von Ostsee bzw. Bodden und Fließgewässer mehr oder weniger rückstaubeeinflusst („Ostsee-Rückstau-Regime“, s. MEHL & THIELE 1998). Durch Rückstau ist auch die Entwässerung der Küstenmoore behindert. Eine zweite binnenseitige, auf die Küste gerichtete Strömungskomponente, die jedoch deutlich schwächer ist, ist der GW-Abfluss, der v.a. vom hydraulischen Gradienten und der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Untergrundes abhängt.

Hohe Wasserstände der Ostsee führen durch Rückstau der betreffenden Fließgewässer zur Überflutung der Niederungsgebiete und damit zu Salzeinbrüchen. Sturmfluten entstehen v.a. durch Windstaueffekte. Bei extremen Sturmfluten ist der Rückstau einfluss der Ostsee weit bis in das Binnenland hinein spürbar, wie HAUPT & MIEGEL (2006) am Beispiel der Peene nachweisen konnten. Auch die unterirdische Strömung kehrt sich bei hohen Wasserständen der Ostsee um. Überschwemmungen sind daneben durch Hochwasser aus dem Eigeneinzugsgebiet der Fließgewässer möglich.

2.3 Anthropogen bedingte Veränderungen

Die natürlichen Bedingungen und mit ihnen die hydrologische Charakteristik küstennaher Niedermoore sind in den letzten Jahrhunderten durch menschliche Eingriffe in stärkerem Maße verändert worden. Hervorzuheben sind ihre Abriegelung durch

Dünen bzw. boddenseitig durch Deiche sowie die Errichtung von Entwässerungsanlagen.

Durch den Dünen- und Deichbau im 20. Jahrhundert ist das Wechselspiel der Küstenmoore mit der Ostsee nahezu vollständig unterbunden worden. Überflutungen durch die Ostsee finden nur noch selten statt, d.h. dann, wenn Sturmfluten zu einem Dünenbruch führen. Aufgrund der Abriegelung ist ein freier Gebietsabfluss zur Ostsee nicht mehr möglich, so dass die Vorflut künstlich gesichert werden muss. Dies erfolgt vor allem an den Bodden meist durch Schöpfwerke, wodurch das Schwanken der Wasserstände in den Niederungen durch Ein- und Ausschaltpegel und Zuflussdynamik bestimmt wird. Durch Verdichtung des **Baugrundes**

im Bereich von Dünen und Deichen ist davon auszugehen, dass auch der unterirdische Austausch geschwächt ist. Ähnliches gilt für Niedermoore an rückstaubeeinflussten Unterläufen größerer Fließgewässer.

Viele Küstenmoore sind bereits vor dem Dünenbau durch Entwässerungsanlagen landwirtschaftlich nutzbar gemacht worden. Auch Torfabbau spielte eine gewisse Rolle. Der Entwässerung, die zur Erhöhung der GW-Flurabstände führt, dienen i.d.R. Grabensysteme (Abb. 2). Nach der Überflutung der Niederungen durch Binnen- oder Ostseehochwasser erfolgt ihre Entwässerung wesentlich schneller, andererseits begünstigen die Grabensysteme auch den unmittelbaren Wasserzutritt bei solchen Ereignissen.

Die Entwässerung geht mit einer Degradation, d.h. Zersetzung und Vererdung der oberen Moorkörper einher. Typische Folgen sind räumlich differenzierte Moorsackungen, Verdichtungen, verminderte gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten und damit Reichweiten, die insgesamt die Effektivität der Entwässerungsmaßnahmen schmälern. Solche Nebenwirkungen haben vermutlich dazu beigetragen, dass die Grabensysteme durch Vertiefung und Verdichtung immer wieder ausgebaut worden sind. Eine Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands durch Renaturierungsmaßnahmen wird jedoch insbesondere durch den irreversiblen Rückgang der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_S des Torfkörpers nicht vollständig zu erreichen sein.

SUCCOW & JOOSTEN (2001) geben für Schilf- und Seggentorfe Werte k_S zwischen ca. $0,4 \text{ m d}^{-1}$ und $2,0 \text{ m d}^{-1}$ an. Ein Literaturüberblick zu norddeutschen Niedermoorböden von TRÜBGER (2006) ergab ca. $0,2 \text{ m d}^{-1}$ bis $6,0 \text{ m d}^{-1}$. Mit zunehmender Zersetzung der Torfe nimmt nicht nur der Volumenanteil der Grob-

poren ab, sondern auch k_s , bei starker Zersetzung mit Werten im Bereich von $0,1 \text{ m d}^{-1}$ bis $0,2 \text{ m d}^{-1}$ und darunter. Nach DYCK & PESCKE (1995) umfasst der Bereich geringer gesättigter hydraulischer Leitfähigkeiten $0,06 \text{ m d}^{-1}$ bis $0,2 \text{ m d}^{-1}$.

2.4 Besonderheiten des Standortwasserhaushalts von Niedermooren

Aufgrund geringer GW-Flurabstände zeichnen sich Niedermoore ganz allgemein durch eine enge Kopplung von gesättigter und ungesättigter Zone aus. Kennzeichnend sind daneben GW-Oberflächenwasser-Interaktionen (DWA 2013) bei Durchströmung des Gebietes durch ein Fließgewässer bzw. Ausstattung mit einem Grabensystem (KRAUSE & BRONSTERT 2007). Inwieweit ein Niedermoor mit Schwankungen der GW-Oberfläche auf vertikale Austauschprozesse mit der ungesättigten Zone bzw. Atmosphäre oder auf Interaktionen mit Oberflächengewässern reagiert, hängt maßgeblich von der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Moorkörpers ab. Dabei sind die Mechanismen mit denen von Flusstalmooren vergleichbar (TRÜBGER 2006, FRAHM 2007).

Bei großer hydraulischer Leitfähigkeit erfolgen die vertikalen Austauschprozesse mit einer hohen zeitlichen Dynamik. Intensive Niederschläge versickern, begünstigt durch starke Durchwurzelung, Schrumpfrisse nach Austrocknung und hohe Benetzungswiderstände, sehr schnell in der ungesättigten Zone, was einen beinahe spontanen Anstieg der GW-Oberfläche zur Folge hat. Die Ausbildung von Infiltrationsfronten nach Starkniederschlägen lässt sich dann kaum nachweisen. Wenn bei der Berechnung des Boden- und GW-Haushalts keine hohen zeitlichen Auflösungen (stündlich oder noch höher) gefordert sind, kann der Anstieg der GW-Oberfläche aus der Niederschlagshöhe und dem Speicherkoeffizienten berechnet werden, der bei oberflächennahem GW variabel ist und in Abhängigkeit vom GW-Flurabstand aus dem vertikalen Bodenfeuchteprofil ermittelt werden kann (z.B. TRÜBGER 2006 oder DETTMANN & BECHTOLD 2016).

Die Verdunstung erfolgt unter den Bedingungen oberflächennahen GW potenziell, entweder direkt oder indirekt infolge von Kapillaraufstieg. Weitere Phänomene, die örtlich zu hohen Verdunstungsraten beitragen, sind der Oaseneffekt und der "Clothesline-effect". Letzterer ist auf hohe Turbulenzen an Baumreihen oder Gehölzgruppen zurückzuführen, die aus ihrer Umgebung herausragen (FRAHM 2007).

An wolkenarmen und regenfreien Tagen mit hoher potenzieller Verdunstung und bei Moorböden mit guter Wassernachlieferung, entweder von unten durch gespanntes GW oder lateral bei guter hydraulischer Anbindung an ein Oberflächengewässer, macht sich der Entzug durch Verdunstung in Tagesschwankungen der GW-Oberfläche bemerkbar. Diese können in Anlehnung an die Ansätze von HAYS (2003) oder KIRCHNER (2009) genutzt werden, um die Verdunstung zu quantifizieren (FRAHM 2007). Während des Tages sinkt das GW infolge von Verdunstung ab, was einen Zustrom aus dem Fließgewässer und den Rückgang des Durchflusses im Fließgewässer nach sich ziehen kann. Nachts sorgt dieser Zustrom oder der Aufstieg gespannten GW für einen Ausgleich. Bei Starkniederschlägen steigt dagegen die GW-Oberfläche des Moores zeitweilig an, wobei sie sich in der Nähe von Gräben durch deren Dränagewirkung stärker aufwölben kann.

Bei stark zersetzten Mooren mit vergleichsweise geringer gesättigter hydraulischer Leitfähigkeit erfolgen die Austauschprozesse und Schwankungen der GW-Oberfläche wesentlich gedämpfter, wobei saisonale Einflüsse dominieren. Auswertungen von BOHNE & BOHNE (2008), die im Hütelmoor vor dem Bau der Sohlschwelle (s. Kap. 3.1) durchgeführt worden sind, haben ergeben, dass die Fluktuationen der GW-Oberfläche der Saisonalität der klimatischen Wasserbilanz mit einem zeitlichen Versatz von 20 d (in Grabennähe) bis 80 d (grabenfern) folgen. Dies deutet darauf hin, dass der Versatz vom Abstand zu den Gräben abhängt.

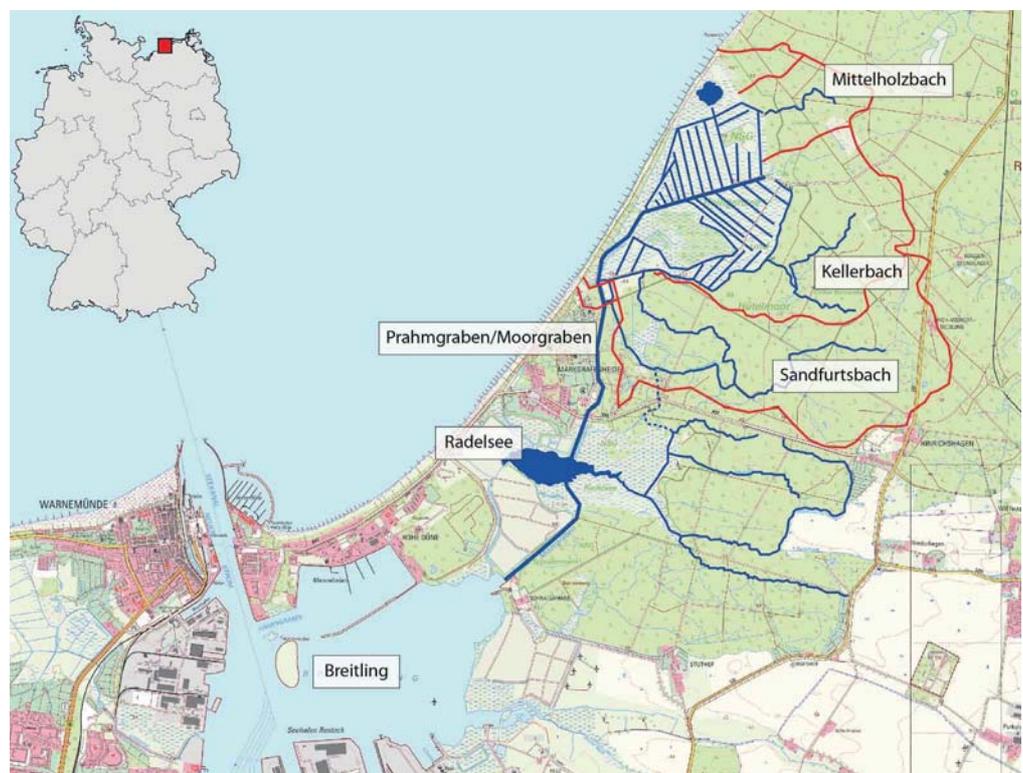


Abbildung 3

Lage des Untersuchungsgebietes an der Ostseeküste nordöstlich von Rostock mit dem Niedermoor, seinen Teileinzugsgebieten (rote Linien), seinem Entwässerungssystem und seiner Verbindung über Prahmgraben und Radelsee zum Breitling (blaue Linien)

Location of the investigation area along the Baltic Sea coast north-eastern of Rostock with the lowland fen, its sub-basins (red lines), its drain system and its connection with the Breitling via Prahmgraben and Radelsee (blue lines)

3 Untersuchungsgebiet

3.1 Entwicklungs- und Nutzungsgeschichte

Das hier untersuchte Niedermoor (Abb. 1) wird als Versumpfungsmoor angesprochen, das später in den Überflutungseinfluss der Ostsee gelangte (JESCHKE et al. 2003). STOCK (2005) beschreibt ausführlich die Nutzungsgeschichte des NSG, das v.a. im Südwesten weit in den angrenzenden Wald hineinragt. Demnach wurde in der Niederung bereits im 16. Jahrhundert mit dem Bau eines Grabenentwässerungssystems zwecks Grünlandnutzung begonnen, das bis heute immer wieder erweitert bzw. verändert worden ist (Abb. 3). Bereits damals schloss die Entwässerung aufgrund hoher natürlicher Grundwasserstände die angrenzenden östlichen Waldgebiete mit ein. Es entstanden drei Waldvorfluter (Abb. 3), die vor Errichtung des Dünendeiches sehr wahrscheinlich über das Grabensystem der Niederung in die Ostsee entwässerten (KOLP 1957).

Wie historische Karten von 1788 deutlich machen, bestand bereits im 18. Jahrhundert mit dem Prahmgraben eine Verbindung vom Entwässerungssystem der Niederung über den Radelsee zum Breitling, die auch als Moorgraben bezeichnet wird (Abb. 3). Der Breitling ist die Aufweitung der Unterwarnow vor ihrem Übergang in die Ostsee. Der Prahmgraben ist im 18. Jahrhundert für die Gewinnung und den Transport von Torf mehrfach ausgebaut worden, wobei es zur Abdichtung der direkten Ausläufe zur Ostsee kam. Im Jahr 1838 erfolgte zwecks Holztransport ein weiterer Ausbau der Gräben mit Verlängerung bis zum Waldrand der Rostocker Heide (STOCK 2005).

Nach verschiedenen Maßnahmen des Küstenschutzes im 17. bis 19. Jahrhundert erfolgten ab 1903 der Bau eines Dünendeiches, durch den der Prahmgraben endgültig zum alleinigen oberirdischen Entwässerungsweg geworden ist, und weitere Unterhaltungs- bzw. Sicherungsmaßnahmen (BOHNE & BOHNE 2008). Die bis heute mit Abstand schwerste durch Messwerte belegte Sturmflut ereignete sich drei Jahrzehnte davor im Jahr 1872 mit einem Scheitelwasserstand in Warnemünde in Höhe von 2,43 m ü NN (BLU-MV 1996). Nach dem Bau des Dünendeiches, der bis 1963 Schutz gegen Sturmfluten bis zu einem Wasserstand von 1,50 m ü NN bot, ereigneten sich Salzeinträge nur noch durch die Sturmfluten der Jahre 1904, 1913, 1949, 1954 und 1995 (BOHNE & BOHNE 2008). Im Jahr 1963 erfolgte der Neubau des Dünendeiches, wobei sich die Bemessung am Hochwasser von 1872 orientierte.

In den 1970er Jahren machten Meliorationsmaßnahmen die Intensivnutzung des Niedermoors als Grünland möglich. Es wurden u.a. neue tiefere Gräben angelegt, alte Gräben zugepflügt, im Jahr 1975 ein Schöpfwerk gebaut, mit dem damaligen Gebietsauslass hinter dem Mahlbusen im Bereich der Messstelle R7 (Abb. 7), und der Wasserspiegel in stärkerem Maße abgesenkt, wodurch sich die Degradation des Moores mit den oben genannten Folgen verstärkte.

Ab 1991 erfolgte schließlich im Rahmen einer geplanten Renaturierung und Wiedervernässung der Schöpfwerksbetrieb nur noch sporadisch (SALIX 1996). Das Schöpfwerk wurde 1993 rückgebaut (STOCK 2005). Verdichtung und Moorsackungen, die zuvor die Entwässerung erschwerten, begünstigten nun die Wiedervernässung, wobei bevorzugt ab Februar bis in das zeitige Frühjahr Überstau zu beobachten war.

Am 3./4. November 1995 führte letztmalig eine Sturmflut, deren Scheitelwasserstand 1,58 m ü NN lag (BLU-MV 1996), aufgrund eines Dünendurchbruchs zur vollständigen Überflutung des Gebietes mit Ostseewasser. Das Wiederkehrintervall dieses Ereignisses beträgt ca. 20 Jahre (KRÜGER 1995). Danach wurde die Düne noch einmal durch Aufspülung mariner Sande verstärkt, was seit 2000 im Interesse einer naturnahen Entwicklung des Gebietes gänzlich unterlassen wird. Erwartet werden u.a. der Abtrag der Düne vor dem Heiligensee, der schon eingesetzt hat (Abb. 4), Küstenrückgang und die Ausbildung einer flachen Bucht (STOCK 2005).



Abbildung 4

Küstenrand des NSG mit der potenziellen, bereits teilweise abgetragenen Durchbruchsstelle (Bildquelle: Konrad Miegel)
The coastal edge of the nature reserve with partly removed dune, location of the expected dune breach (image source: Konrad Miegel)

Um die hohen Winterwasserstände länger bis in die Sommermonate hinein im Gebiet zu halten, wurde schließlich im November 2009 die Wiedervernässung zusätzlich durch Einbau einer Sohlschwelle am neu geschaffenen Gebietsauslass (entspricht der Abflussmessstelle in Abb. 7) gefördert, dem das Wasser der Niederung durch einen Graben parallel zum Prahmgraben zugeführt wird. Die Einbauhöhe (Oberkante) der Sohlschwelle beträgt 0,40 m über HN. Den Vermessungsangaben von DAHMS (1991) zufolge müssten bei Einstau bis zu diesem Höhengniveau 270 ha, d.h. 83 % der Niederung, unter Wasser stehen. Durch Bedeckung mit Röhricht wirken jedoch die Wasserflächen in Luftbildern (Abb. 5), besonders bei niedrigeren Wasserständen in der Vegetationsperiode, wesentlich kleiner. Aufgrund des Einstaus, von dem auch größere Teile des Grabensystems betroffen sind, wird heute deutlich mehr Wasser im Gebiet gespeichert. Die Betrachtungen zum Wasserhaushalt in Kapitel 6 beziehen sich auf diesen Ist-Zustand.

Die Veränderungen durch Aufgabe des Schöpfwerkes und Bau der Sohlschwelle lassen sich in Abbildung 6 an der Entwicklung des Wasserstands ablesen. Die Ganglinie setzt sich aus zwei Zeitabschnitten zweier Messstellen des alten und neuen Messnetzes mit ähnlichen Standortverhältnissen zusammen (Messstelle BR20 bzw. R2; Abb. 7), an denen jedoch mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung gemessen worden ist (Tab. 1). Deutlich werden die starken saisonalen Schwankungen (Kap. 5), die die wasserbaulich bedingten Veränderungen teilweise maskieren. Dennoch ist die Tendenz eines zunehmenden Wasserstands ab 1993 und sein sprunghafter Anstieg im Jahr 2009 zu erkennen.

3.2 Gebietsmerkmale

Umfassende Darstellungen zum Untersuchungsgebiet, insbesondere mit einer detaillierten Beschreibung seiner hydrologischen Verhältnisse und Entwässerungssituation unter den damaligen Nutzungsbedingungen, sind in einer Studie von DAHMS (1991) zu finden. Die meisten der nachfolgenden Angaben, insbesondere zu den Höhenverhältnissen, zur Geologie, zum Torfkörper und zur Entwässerungssituation, entstammen dieser Studie:

Lage und Ausdehnung des Untersuchungsgebietes: Die ca. 339 ha große Niederung ist nordöstlich von Rostock bzw. Markgrafeneide gelegen (Abb. 3). Das NSG gehört nach JESCHKE et al. (2003) zur Landschaftseinheit Rostock-Gelbensander Heide im Unterwarnowgebiet des Ostseeküstenlandes. Die Niederung



Abbildung 5

Das Niedermoor des Naturschutzgebietes „Hütelmoor und Heiligensee“ im Mai 2014 von Nordwest aus gesehen. Links unten ist der Heiligensee zu sehen, in dessen Bereich der Küstendurchbruch erwartet wird. Rechts in der Bildmitte ist der Prahmgraben als küstenseitiger Hauptgraben zu erkennen (Bildquelle: Dr. Lars Tiepolt).

The lowland fen of the nature reserve "Hütelmoor und Heiligensee" in Mai 2014, view from northwest. Left side below: lake Heiligensee, location of the expected dune breach; centre right: the ditch Prahmgraben, one of the main ditches (image source: Dr. Lars Tiepolt).

wird in Richtung Westnordwest durch den Dünendeich der Ostsee begrenzt. Sie ist ansonsten von der ca. 60 km² großen Rostocker-Gelbensander Heide, dem Stadtwald Rostocks, umgeben. Ihre räumliche Begrenzung ergibt sich aus der Ausdehnung der anstehenden Torfböden. Dass diese weitgehend mit der natürlichen Waldgrenze der Rostocker Heide übereinstimmt (Abb. 1), ist auf den Anstieg des Geländes am Waldrand sowie auf den Waldrandgraben und die Bewirtschaftung durch Mahd zurückzuführen, wodurch episodische Überflutungen durch die Ostsee topografisch begrenzt sind.

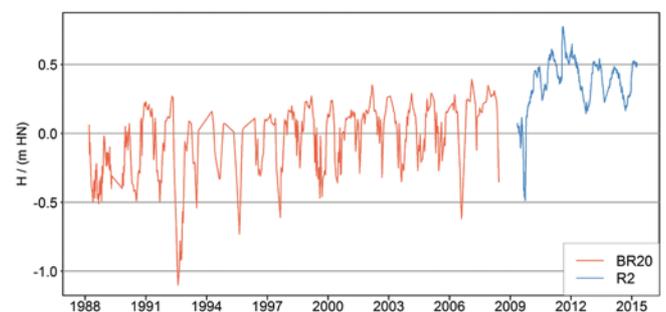


Abbildung 6

Ganglinie des Wasserstands mit seinem Anstieg durch Aufgabe des Schöpfwerksbetriebs Anfang der 1990er Jahre und dem Anstau der Niederung durch Bau der Sohlschwelle im Jahr 2009

Hydrograph with water level rise caused by the abandonment of pumping operations in the early 1990s and the sharp water level rise after construction of the ground sill in 2009

Höhenverhältnisse und Mikrorelief um 1990 ohne Überstau:

Die Geländeoberfläche des Küstenmooses schwankt mit Ausnahme von ca. 10 % der Gesamtfläche zwischen -0,3 m HN und 0,7 m HN. Es dominieren Flächenanteile zwischen -0,2 m HN und 0,4 m HN. Die Flächen mit Höhen unter 0,0 m HN liegen überwiegend an den Vorflutern. Im südlichen Teil der Niederung befindet sich mit dem „Hütelmoor“ ein Hochmoor, das in Abbildung 1 in der Mitte als braune Fläche und in Abbildung 3 im südlichen Teil der Niederung als grüne Fläche zu erkennen ist, ca. 40 ha groß ist und mit ca. 0,6 m HN die sonstige Niederung leicht überragt. Die Niedermoorbereiche stellen eine Senke dar, deren Mikrorelief durch räumlich unterschiedliche Moorsackungen, Grabenauswurf und Verfüllung alter Gräben sehr bewegt ist. In den angrenzenden Teilen des Stadtwaldes dominieren Geländehöhen zwischen 0,5 m HN bis 2 m HN.

Klima: Großräumig betrachtet liegt das Untersuchungsgebiet im Übergangsbereich vom maritimen Westseitenklima zum Kontinentalklima Osteuropas (ZAHN 1996). Es ist also sowohl maritim als auch kontinental beeinflusst. Der maritime Einfluss spiegelt sich in einem relativ ausgeglichenen Temperaturregime wider. Regional betrachtet gehört das Gebiet nach HURTIG (1957) zum Nordmecklenburgischen Küstenbezirk des Ostseeküstenklimas, der sich von Travemünde bis West-Rügen erstreckt und einen bis zu 20 km breiten Küstenstreifen umfasst. Kennzeichnend sind im Vergleich zum Binnenland im Mittel etwas niedrigere Temperaturen, ein späterer Beginn von Frühjahr und Sommer, höhere Luftfeuchten und eine größere Anzahl stürmischer Tage. Nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes DWD (mittlere Jahreswerte des Zeitraums 1981 bis 2010) beträgt an der Station Rostock-Warnemünde die Lufttemperatur 9,2 °C, die Sonnenscheindauer 1.735 h und der Niederschlag unkorrigiert 616 mm. In der Niederung selbst ist lokalklimatisch der Windschutz hervorzuheben, der durch den angrenzenden, etwas höher gelegenen Wald und in Richtung Ostsee durch den Dünendeich hervorgerufen wird. Eigene meteorologische Messungen haben hier im Vergleich zu Rostock-Warnemünde nicht nur geringere Windgeschwindigkeiten, sondern auch höhere Luftfeuchten ergeben, letztere noch begünstigt durch den Feuchtgebietscharakter. BOHNE & BOHNE (2008) verweisen auf einen Oaseneffekt, der nach ihren Berechnungen an Tagen mit hoher potenzieller Verdunstung wirksam ist.

Vegetation: Im Feuchtgebiet dominieren Schilfbestände (*Phragmites australis*) neben Strandsimse (*Bolboschoenus maritimus*) und Salzteichbinse (*Schoenoplectus tabernaemontani*), die sich alle durch Salzverträglichkeit auszeichnen. Die Kanäle sind sehr stark mit rauem Hornblatt (*Ceratophyllum demersum*) verkrautet. Der Dünenbereich wird durch Ölweiden (*Elaeagnus angustifolia*) und Sanddornbestände (*Hippophae rhamnoides*) als auch Strandhafer (*Ammophila arenaria*) geprägt. Im Forstgebiet dominieren Kiefern (*Pinus sylvestris*) und Rotbuchen (*Fagus sylvatica*) in Vergesellschaftung mit Adlerfarn (*Pteridium aquilinum*). In den feuchteren Standorten überwiegen die leicht salztoleranten Schwarzerlen (*Alnus glutinosa*). Durch die starken Sommerniederschläge 2011 (MIEGEL et al. 2014) in Kombination mit lang andauernder Staunässe sind die wenigen Gehölze im Feuchtgebiet flächendeckend abgestorben. Nur an exponierten Standorten, insbesondere in der Aufwölbung des Hütelmooses mit dem Charakter eines Sauer-Armmoores, was auf einen ehemals stärkeren Regenmooreinfluss schließen lässt, haben vereinzelt Eichen, Kiefern und Birken überlebt. Anzutreffen ist

ebenso eine Besiedlung von Gagelstrauch (*Myrica Gale*) sowie Pfeifengraswiesen (*Molinia*).

Geologie: Bei der Beurteilung der Untergrundverhältnisse wird sich auf Bohrprofile des Geologischen Dienstes Mecklenburg-Vorpommerns bzw. zusätzliche Sondierungen bezogen (DAHMS 1991). In der Niederung dominiert die Folge Torfkörper, Sandaquifer und Geschiebemergel. Im nördlichen Teil des NSG durchzieht eine Talsandrinne den Untergrund, während im südlichen Teil der Geschiebemergel ab ca. 3 m bis 4 m Tiefe oberflächennah ansteht. Aus diesem Grund schwankt die Mächtigkeit des Sandes küstenparallel besonders stark, d.h. ca. zwischen 17 m im nördlichen und 2,5 m im südwestlichen Teil des NSG. Im angrenzenden Waldgebiet hat sich über dem Sand ein Eisen-Humus-Podsol mit mäßigem bis starkem Grundwassereinfluss ausgebildet. Aus zehn Bohrprofilen vor der Düne ist zu entnehmen, dass dort der Sandaquifer überwiegend aus Feinsand besteht und im Mittel 6,6 m mächtig ist. Im Anstrombereich der Niederung (13 Bohrprofile) ist der Feinsand homogen, dicht gelagert und im Mittel 9,8 m mächtig. Umfassende oberflächennahe Sondierungen haben gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten k_s im Bereich 0,3 m/d bis 4,3 m/d ergeben (Mittelwert 1,4 m/d; DAHMS 1991). Aufgrund der Homogenität des Sandaquifers und der Übereinstimmung mit Richtwerten für Feinsand (z.B. HEATH 1988) kann angenommen werden, dass die Sondierungsergebnisse annähernd für den gesamten Aquifer gültig sind.

Torfkörper: Das Torfwachstum führte zu mesotrop-sauren Moortypen. Der Moorkörper besteht aus mittel bis stark zersetzten Schilfseggentorfen, die überwiegend zwischen 1 m und 2 m mächtig (Gesamtschwankungsbreite ca. 0,2 m bis 3 m) sowie oberflächennah (ca. 0,4 m bis 0,5 m) stark vererdet und z.T. stark durchwurzelt sind. Im Durchschnitt nimmt die Mächtigkeit des Torfkörpers in Richtung Küste zu, wohingegen er in Richtung Wald keilförmig ausstreicht. In der Niederung überwiegt der Bodentyp Anmoorgley und in Küstennähe Moorgley. Die Leitfähigkeit k_s schwankt überwiegend zwischen 0,4 m/d und 1,2 m/d (Spannweite aller Sondierungen 0,03 m/d bis 17,5 m/d). Im Mittel kann von einer oberen, besser durchlässigen Torfschicht ausgegangen werden, die 0,8 m mächtig und ähnlich leitfähig ist wie der Sandaquifer (DAHMS 1991). Sie wird nach unten meist durch eine Tonmulde begrenzt, die mit k_s -Werten $< 0,1$ m/d stauend wirkt (BOHNE & BOHNE 2008). Örtlich sind weitere Muddeschichten vorhanden. In östlichen und südlichen Teilen des Hütelmooses überdecken Sande den Torf. BOHNE & BOHNE (2008) haben der oberen Torfschicht anhand von Messpunkten am Rande des Hütelmooses, die für die Niederung als repräsentativ angenommen werden können, einen hohen Speicherkoeffizienten von durchschnittlich ca. 0,5 abgeleitet. Da der obere Torf zudem stark durchwurzelt ist, weisen sie ihm hydraulische Eigenschaften zu, die zwischen denen eines Poren- und eines Kluftsystems liegen.

Insgesamt sind die pedologischen und geologischen Verhältnisse bezüglich Schichtung, Mächtigkeit und Leitfähigkeit der Schichten, Torfart, Grad der Degradation des Torfes und Mikrorelief sehr heterogen. Die Festlegung eines repräsentativen Bodenprofils und repräsentativer Parameter ist aufgrund dieser Heterogenität mit größeren Unsicherheiten verbunden.

Entwässerungssituation: Das Grabensystem ist in Abbildung 3 veranschaulicht. Es ist insgesamt mehr als 20 km lang. Seine Sohlhöhen liegen zwischen -0,5 m und -2,05 m HN. Es schneidet

folglich über weite Strecken bis in den Sandaquifer ein. Besonders hinzuweisen ist auf die beiden Hauptvorfluter Waldgraben am südwestlichen Rand der Niederung und Prahmgraben in ihrem Zentrum. Die Entwässerung des Gebietes erfolgt schließlich über die Sohlschwelle durch den Prahm- bzw. Moorgaben zum Breitling (Abb. 3).

Einzugsgebiet: Die Niederung mit ihrem Entwässerungssystem ist aus hydrologischer Sicht kein in sich geschlossenes System. Zu ihrem oberirdischen Einzugsgebiet (Abb. 3) gehören die drei größeren bewaldeten Teileinzugsgebiete des Mittelholzbaches (96,1 ha), des Kellerbaches (292,3 ha) und des Sandfurtsbaches (455,0 ha) sowie zwei namenlose Teilgebiete mit zusammen 39,0 ha. Der Kellerbach mündet an vielen Stellen in den Randgraben. Der Sandfurtsbach hat eine Verbindung zum Waldrandgraben der Niederung, die jedoch durch wasserbauliche Eingriffe nicht mehr aktiv und für den Wasserhaushalt der Niederung nicht mehr relevant ist. Die Entwässerung seines Teileinzugsgebietes erfolgt unterhalb der Sohlschwelle direkt in den Prahmgraben. Der Abfluss des Sandfurtsbaches kann somit an der Sohlschwelle nicht mehr erfasst werden. Den GW-Isophypsen der Hydrogeologischen Kartierung der DDR (ZGI 1984b) zufolge ist das unterirdische Einzugsgebiet weit über die oberirdische Wasserscheide hinaus ausgedehnt, wobei ein großräumiger Zustrom von GW existiert, der auf die Küstenlinie gerichtet ist. Die detaillierte hydrologische Charakterisierung des Untersuchungsgebietes erfolgt in Kapitel 5.

4 Messprogramm

Der Beginn des hydrologischen Monitorings im Jahr 1987, das sich zunächst auf die Hochmoorkalotte Hütelmoor und die sie umgebenden Gräben beschränkte, geht auf die damalige Professur „Hydromelioration/Kulturtechnik“ der Universität Rostock zurück. Das Messnetz bestand aus 13 Lattenpegeln und 28 GW-Beobachtungsrohren (Tab. 1, ausführlicher s. DAHMS 1991 sowie BOHNE & BOHNE 2008). Die Erfassung von Wasserständen erfolgte mit Handmessgeräten. Im April 1995 kamen Messungen der elektrischen Leitfähigkeiten hinzu, so dass ein Vergleich der Salzgehalte unmittelbar vor der Sturmflut im November 1995 und danach möglich ist.

Ab dem Jahr 2009 wurde das bestehende Messprogramm im Kerngebiet Hütelmoor im Interesse des Naturschutzes aufgegeben und durch die AG „Hydrologie“ ein neues Messprogramm in der Niederung selbst eingerichtet (Abb. 7). Zugleich erfolgte die Umstellung auf Sensoren zur kontinuierlichen Erfassung von Wasserständen und elektrischen Leitfähigkeiten. Die meteorologische Station MS1 und Durchflussmessungen an der Messstelle R12, d.h. am Auslass des Gebietes, ergänzen das Messprogramm (Tab. 1). In Abbildung 7 sind der Übersichtlichkeit halber nur die Messstellen dargestellt, auf die in den folgenden Kapiteln Bezug genommen wird.

In dieser Zeit wurde auch die Kooperation mit den Professuren „Wasser- und Stofftransport in Landschaften“ und „Hydrologie und Klimatologie“ der Universität Potsdam begründet, die weitere Messstellen im Bereich des Heiligensees installierten. Messungen zum Gasaustausch in der Niederung durch die Professur „Landschaftsökologie und Standortkunde“ dienen u.a. zur Abschätzung der Kohlenstoffbilanz dieses Moores (KOEBSCH et al. 2013, KOEBSCH et al. 2015).

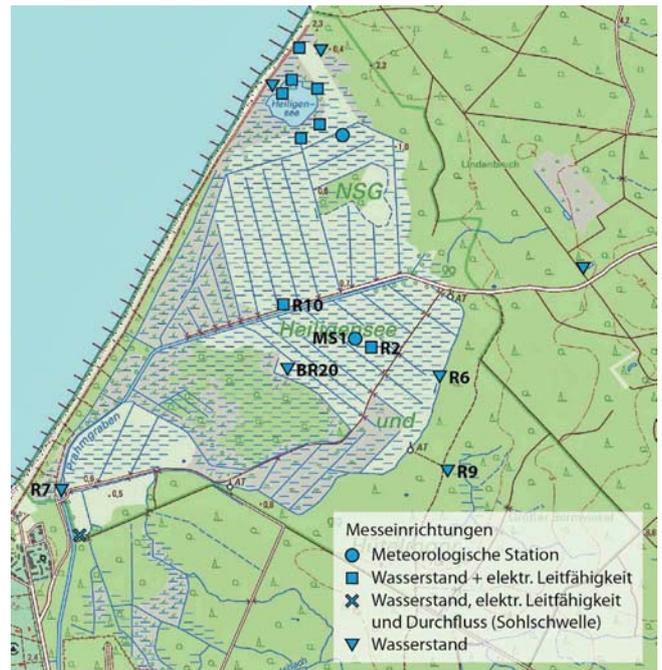


Abbildung 7

Das Küstenmoor des NSG mit Entwässerungssystem und Messstationen (s. auch Tab. 1). Die Abflussmessstelle befindet sich vor dem Gebietsauslass an der Sohlschwelle. Die Verbindung über den Radelsee zum Breitling ist in Abbildung 3 dargestellt.

The lowland fen of the nature reserve with drainage system and monitoring stations (see table 1). The gauging station is located at the outlet (ground sill). The rear connection of the area with the Breitling via Radelsee is indicated in figure 3.

Eine weitere Grundlage bilden die Wasserstandsmessungen des Ostseepegels Warnemünde, der vom Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund betrieben wird.

Da das NSG nur in größeren zeitlichen Abständen begangen werden darf, lassen sich v.a. bei den meteorologischen Messgrößen Datenausfälle und Datenlücken nicht vermeiden, so dass teilweise auf Daten der Station Rostock-Warnemünde zurückgegriffen werden muss. Beim Niederschlag bilden deshalb ausschließlich Messergebnisse von Rostock-Warnemünde die Grundlage. Ebenso ist davon auszugehen, dass die meteorologischen Messergebnisse der Station in der Niederung nur für die Niederung selbst, nicht aber für das umgebende Waldgebiet repräsentativ sind. Dies ist nicht nur auf die Nutzungsverhältnisse, sondern auch auf lokalklimatische Besonderheiten in der Niederung zurückzuführen (Kap. 3.2). Für die Berechnung der Verdunstung im umgebenden Waldgebiet (Kap. 6.1) werden deshalb prinzipiell Messergebnisse der DWD-Station Rostock-Warnemünde verwendet.

Für die Ermittlung des Durchflusses Q wurde oberhalb der Sohlschwelle zunächst ein Ultraschallsensor zur Erfassung der Fließgeschwindigkeit installiert. Dieser lieferte jedoch aufgrund der komplizierten örtlichen Verhältnissen (Krautwuchs u.a. Störereinflüsse) keine kontinuierlich verwertbaren Signale. Alternativ ist es auf der Grundlage von 24 Handmessungen mit einem induktiven Sensor (Zeitraum Februar 2011 bis Juli 2012) gelungen, eine Abflusskurve abzuleiten. In der daraus berechneten Reihe täglicher Durchflüsse müssen zusätzlich Rückstauereignisse

Tabelle 1
 Messeinrichtungen der Arbeitsgruppen im Untersuchungsgebiet
Monitoring stations of the working groups in the research area

Bezeichnung	Messgröße	Anfang	Ende	zeitliche Auflösung	Bemerkung zur Messstelle und Messmethode	
R2	Wasserstand el. Leitfähigkeit	12.05.2009 26.10.2010	--- 18.05.2014	15 min	in der Fläche, d. h. grabenfern	
R6	Wasserstand el. Leitfähigkeit	22.06.2009 13.05.2015	--- ---	15 min	Randgraben	
R7	Wasserstand	29.11.2015	---	15 min	Randgraben	
R8	Wasserstand	06.07.2009	---	15 min	im Waldgebiet	
R9	Wasserstand	06.07.2009	---	15 min	im Waldgebiet	
R10	Wasserstand el. Leitfähigkeit	13.11.2009 13.11.2009	--- ---	15 min		
R11	Wasserstand el. Leitfähigkeit	13.11.2009 13.11.2009	--- ---	5 min/10 min		
R12	Wasserstand el. Leitfähigkeit	01.08.2011 06.02.2013	--- ---	5 min/15 min	Oberwasser Sohlschwelle	
R13	Wasserstand	13.02.2012	---	15 min	Unterwasser Sohlschwelle	
MS1	Lufttemperatur Windparameter Strahlung Niederschlag	20.04.2009 20.04.2009 20.04.2009 20.04.2009	--- --- --- ---	15 min	Niederschlag nur zeitweise	
Sohlschwelle	Durchfluss	24 Messungen 2011/2012 1 Messung 2015				induktiv mit Flomate 2000
LP1 bis LP13	Wasserstand el. Leitfähigkeit	10.12.1987 12.12.1987	06.09.2008 06.09.2008	teilw. monatlich oder wöchentlich	Lattenpegel in den Gräben	
BR1 bis BR28	Wasserstand el. Leitfähigkeit	12.12.1987 12.12.1987	06.09.2008 06.09.2008	teilw. monatlich oder wöchentlich	Brunnenrohre im Hütelmoor	
R14-R18	Wasserstand el. Leitfähigkeit Temperatur	01.05.2011 01.05.2012 01.04.2014	--- --- ---	30 min und 1 h	Heiligensee/Jägerwiese	
MS2	Niederschlag Temperatur Wasserstand el. Leitfähigkeit Bodenfeuchte	01.04.2012	---	5 min	Jägerwiese, Niederschlag nur zeitweise	

bereinigt werden. Dies ist unter Berücksichtigung von Ober- und Unterwasserständen möglich. Als Ergebnis liegen tägliche Durchflüsse für einen 4-jährigen Zeitraum vor (Abb. 8). Die steilen Abflussspitzen in Abbildung 8 kennzeichnen unbereinigte Rückstauereignisse.

5 Hydrologisches Prozessgeschehen

Grundlage für die Identifikation der Grundmuster des hydrologischen Prozessgeschehens sind die in Kapitel 3.2 besprochenen Gebietsmerkmale, Erkenntnisse aus Begehungen des NSG sowie Messergebnisse zu Wasserstand und Durchfluss (Kap. 4).

Unterirdischer Zu- und Abfluss: In Abbildung 9 sind die Wasserstände entlang eines Längsschnittes von der Messstelle R9 im Wald durch die Niederung bis zur Ostsee an zwei Stichtagen nach dem Winter bzw. nach der Vegetationsperiode dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Niederung nahezu ausgespiegelt ist und ein Gefälle der GW-Oberfläche vom Wald auf den Waldrandgraben sowie vom westlichen Rand der Niederung zur

Ostsee gerichtet ist – und dies unabhängig von der Jahreszeit. Zum Vergleich betragen im Jahr 2014 die Mittelwerte 1,01 m HN (Messstelle R9), 0,35 m HN (R6), 0,34 m HN (R2), 0,33 m HN (R10 und R7) und - 0,07 m HN (Ostseepegel in Warnemünde). Damit ist es sinnvoll, das Einzugsgebiet entlang dieser Achse von der Wasserscheide durch die Niederung bis zum Ufer der Ostsee in 3 Bereiche zu unterteilen:

- Bereich 1: Waldgebiet bis zum Waldrandgraben,
- Bereich 2: die Niederung selbst mit einem extrem kleinen Wasserspiegelgefälle,
- Bereich 3: Gebiet vom Prahmgraben vor der Düne bis zur Uferlinie.

Davon ausgehend wurde ein idealisierter Schnitt durch das Gebiet erstellt, in dem die wichtigsten Strömungskomponenten durch Pfeile symbolisiert sind (Abb. 10). Die dunkelbraune Farbgebung am unteren Rand des Moorkörpers stellt die abdichtende Muddeschicht dar. Der Moorkörper ist beim Dünenbau überschüttet worden und dadurch stark zusammengepresst und verdichtet. Er streicht fragmentarisch bis in die Ostsee aus (s. braune Flecken unter Wasser in Abb. 5). Das östlich des Wald-



Abbildung 8
 Ganglinien des Wasserstands (Messstelle R12) und des Durchflusses an der Sohlschwelle (Zeitraum September 2011 bis August 2015) ohne Bereinigung von Rückstauereignissen
Hydrographs of water level (gauging station R12) and discharge above the groundsill (period September 2011 to August 2015) without correction of backlog events

randgrabens ansteigende Gelände kennzeichnet das angrenzende Waldgebiet.

Eine Strömung von Grundwasser findet hauptsächlich im Sandaquifer statt. Sie ist vom Waldgebiet auf die Niederung hin ausgerichtet und wird oberflächennah durch den Waldrandgraben aufgenommen. Typischen Strömungsmustern folgend dürfte auch tieferes GW in die Gräben aufsteigen, so dass der Grundwasserstrom unter dem Moorkörper in Richtung Ostsee immer schwächer wird. Es ist zu erwarten, dass die Salz-/Süßwassergrenze die Strömung bis zur Ostsee behindert oder sogar als Barriere wirkt. Da die Gräben der Niederung über weite Strecken in den Sandaquifer einschneiden, ist nicht gänzlich auszuschließen, dass Wasser dem Gefälle der GW-Oberfläche folgend sowohl im oberen, besser durchlässigen Moorkörper, als auch vom Hauptgraben vor der Düne durch den Sandaquifer in Richtung Ostsee strömt (genauer s. Kap. 6.2).

Bei Hochwassern der Ostsee ist kurzfristig eine Umkehrung des Wasserflusses und das Vordringen der Salzfront in Richtung Niederung zu erwarten. Vor dem Einstau der Niederung war dies in

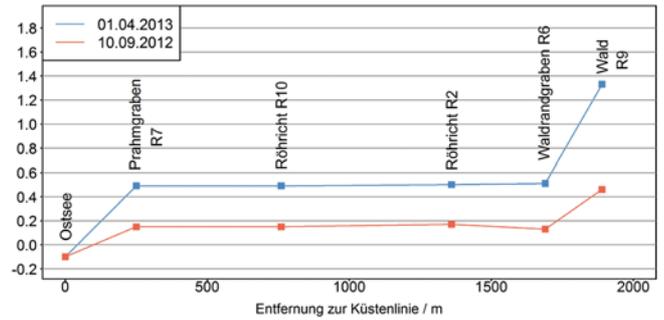


Abbildung 9
 Wasserstände an zwei Stichtagen nach dem Winter bzw. nach der Vegetationsperiode (Abstände von R7, R6 und R9 zum Ufer der Ostsee ca. 250 m, 1.680 m und 1.880 m)
Water levels on two days after the winter respectively growing season (distances between shore and gauging station R7, R6 and R9 circa 250 m, 1.680 m and 1.880 m)

sommerlichen Phasen mit geringen Wasserständen (Abb. 6) auch längere Zeit möglich (BOHNE & BOHNE 2008).

Da der hydraulische Gradient im Moorkörper der Niederung selbst nahezu Null ist, ist hier von sehr schwachen, räumlich begrenzten lateralen Wasserflüssen zwischen den Gräben auszugehen (SELLE et al. 2016), die sich auf den Austausch der Gräben mit den von ihnen umschlossenen Teilflächen beschränken. BOHNE & BOHNE (2008) verweisen diesbezüglich auf sehr geringe Porenwassergeschwindigkeiten und damit schwache laterale Wassertransporte, z.B. beim Sandaquifer bedingt durch geringe Leitfähigkeiten und kleine hydraulische Gradienten. Letztere haben sich durch Bau der Sohlschwelle, Einstau der Niederung und Ausspiegelung eher noch verringert. Ein unterirdischer Wasseraustausch zwischen Niederung und Ostsee findet damit wie oben skizziert nur im Nahbereich zur Ostsee statt.

Genauere Aussagen über die unterirdischen Strömungsmuster, u.a. zur Reichweite des Zustroms aus dem Waldgebiet in die Niederung und zu den örtlichen Verhältnissen im Bereich der Düne, sind nicht ohne eine aufwändige Modellierung möglich.

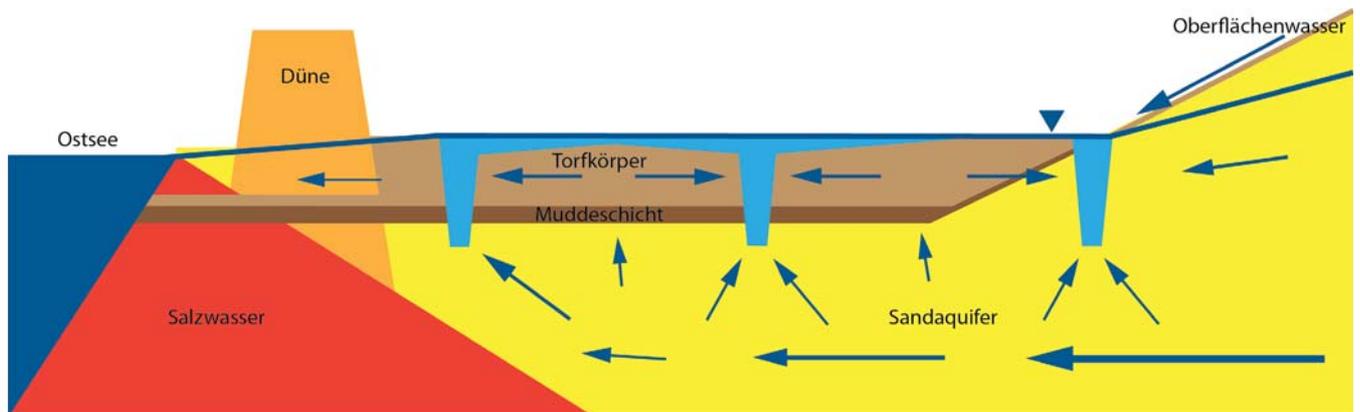


Abbildung 10
 Schematischer Schnitt durch die Niederung von der Ostsee bis zum östlichen Waldrandgraben.
Schematic cross-section through the lowland from the Baltic Sea to the forest area

Unsicherheiten werden aber auch dann unvermeidbar bleiben, besonders weil sich k_S nur mit einer Wertespanne angeben lässt, die mindestens eine Zehnerpotenz umfasst.

Oberirdischer Zufluss: STOCK (2005) nimmt an, dass das hydrologische Regime des Gebietes allein vom GW bestimmt wird und der Oberflächenabfluss unerheblich ist. Dies widerspricht dem Bedarf an Entwässerung durch ein verzweigtes und vermaschtes Grabensystem in den bewaldeten Teileinzugsgebieten, das Vernässung durch oberflächennahes GW verhindern, d.h. dieses aufnehmen soll. So sind speziell in den Wintermonaten gut gefüllte Gräben, in denen Wasser strömt, zu beobachten. Dies zeugt davon, dass im Waldgebiet neben dem GW-Abfluss eine oberflächennahe, schnellere Abflusskomponente eine nicht unerhebliche Rolle spielt (s. auch Kap. 6.2), die durch das Waldgrabensystem in den östlichen Hauptgraben der Niederung geleitet wird. Von dort aus gelangt das Wasser direkt oder indirekt über das Grabensystem der Niederung zum Gebietsauslass.

Nennenswerte, schnellere Abflussanteile sind auch aus der Niederung selbst bei stärkeren Niederschlägen und Wasserständen über dem Höhenniveau der Sohlschwelle zu erwarten. Dabei machen sich das geringe Wasserspiegelgefälle und der hydraulische Widerstand der Vegetation mit einer stark gedämpften Gebietsreaktion bemerkbar. Im Vergleich zur Abflussbildung in Mittelgebirgen sollte daher wie bei den Zuflüssen in den Waldgräben nicht von Direktabfluss, sondern genauer von verzögertem Direktabfluss gesprochen werden.

Gebietsabfluss und Wasserstandsschwankungen in der Niederung: Für die Dynamik des Abflusses aus der Niederung sind zwei Faktoren bestimmend. Aufgrund der Bedeutung schnellerer Abflussanteile (der zuvor genannte verzögerte Direktabfluss) sind die saisonalen Schwankungen der Abflussbildung relativ groß (Abb. 8). Daneben hängt der Abfluss an der Sohlschwelle hydraulisch bedingt von den Wasserständen in der Niederung ab (Abb. 11), die als Retentionsraum dämpfend und verzögernd wirkt.

Im späten Frühjahr und Sommer dominiert in der Niederung die Verdunstung, wodurch die Wasserstände zurückgehen. Der Gebietsabfluss erreicht dadurch bereits im Verlauf des Frühjahrs geringe Werte. Im Sommer kommt er regelmäßig fast vollständig zum Erliegen (Abb. 8), wenn der Wasserstand ca. 0,25 m HN unterschreitet. Durch den Rückgang der Wasserstände ist die Retentionswirkung der Niederung nach der Vegetationsperiode besonders groß. Erst wenn diese durch Niederschlagsüberschüsse und Abflussbildung im Verlauf des Winterhalbjahrs über das Höhenniveau 0,4 m der Sohlschwelle angestiegen sind, schwillt der Abfluss wieder deutlich an.

Abbildung 11 zeigt eindrucksvoll die saisonalen Schwankungen der Wasserstände für zwei hydrologische Jahre, mit Rückgängen bis in den September und hohen Wasserständen ab Ende des Winters, je nach Niederschlagsgeschehen mehr oder weniger lange anhaltend. Deutlich werden auch die kurzfristigen niederschlagsbedingten Schwankungen der Wasserstände. Rückgänge in niederschlagsfreien Phasen sind bei Wasserständen unter Höhenniveau der Sohlschwelle vorrangig mit Zehrung durch Verdunstung zu erklären, bei höheren Wasserständen in stärkerem Maße auch durch Abfluss. Am Gebietsauslass kann es bei Hochwasserständen der Ostsee durch Rückstau über den

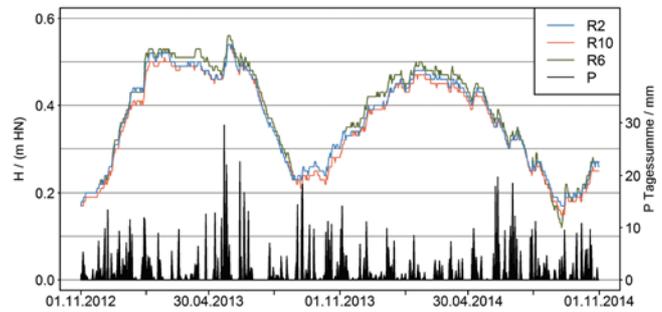


Abbildung 11
Tagesniederschläge und Ganglinien des Wasserstands über die hydrologischen Jahre 2012/2013 und 2013/2014 an der Messstelle Waldrandgraben (Rohr 6), einer Messstelle in der Fläche nahe der meteorologischen Station (Rohr 2) und im Zentrum des Gebietes in Nähe des mittleren Hauptgrabens (Rohr 10; s. Abb. 7)
Daily precipitation and water levels at three monitoring stations, hydrological years 2012/13 and 2013/14, first one in the main ditch along the edge of the forest (red line), second one near the meteorological station (blue line) and third one near the main ditch in the centre of the lowland fen (green line; locations see figure 7)

Breitling episodisch zur Umkehrung der Fließrichtung und damit zum rückwärtigen Einstrom salzhaltigen Wassers in das Untersuchungsgebiet kommen (SELLE et al. 2016).

In der Niederung selbst sind damit insgesamt drei laterale Strömungskomponenten zu erwarten, nämlich eine Grundwasserströmung im liegenden Sandaquifer, oberflächennah im oberen, besser durchlässigen Moorkörper und im Grabensystem. Obwohl seit dem Bau der Sohlschwelle neben den Entwässerungsgräben auch größere Flächenanteile des Niedermooses unter Wasser stehen, ist davon auszugehen, dass der Abfluss wegen des Fließwiderstands der Vegetation nicht flächenhaft erfolgt. Vielmehr fungieren die Gräben wegen günstigerer Rauigkeits- und Querschnittsverhältnisse auch weiterhin als bevorzugte Abflussbahnen (SELLE et al. 2016).

6 Bilanzierung des Wasserhaushalts

6.1 Bilanzierung des gesamten Einzugsgebietes

Mit Mittelwerten des korrigierten Niederschlags P_{korr} und der Evapotranspiration ET lautet die mittlere Bilanz, bei der Speicheränderungen vernachlässigt werden können, wie folgt:

$$R = P_{\text{korr}} - ET$$

Ergebnis der Bilanz ist der mittlere Gebietsabfluss R . Für dessen Überprüfung stehen am Gebietsauslass für den 4-jährigen Zeitraum September 2011 bis August 2015, dessen mittlerer Niederschlag mit einer Abweichung von - 4 % fast genau dem 30-jährigen Mittelwert entspricht, Angaben zum täglichen Durchfluss zur Verfügung (Abb. 8).

Niederschlag: Da die DWD-Station Rostock-Warnemünde nur leicht windgeschützt ist, ist bei der Bilanzierung des mittleren Wasserhaushalts eine Niederschlagskorrektur unverzichtbar. Diese erfolgt auf der Grundlage mittlerer monatlicher Korrekturfaktoren nach RICHTER (1995). Der mittlere Jahresniederschlag beträgt in Warnemünde im Zeitraum 1951 bis 2010 insgesamt 602 mm, woraus sich durch Korrektur ein Wert P_{korr} von 693 mm

ergibt. Dies entspricht ca. den Messwerten der Niederschlagsmesser der Universität Rostock (Professur Hydrologie), die in Bodenniveau aufgestellt sind. In Rostock, Station Satower Straße, beträgt der Mittelwert 709 mm (Juli 2000 bis Juni 2010) und an der Lysimeterstation Groß Lüsewitz 688 mm (November 1973 bis Oktober 2010).

Verdunstung: Bei der Berechnung der Verdunstung ist zwischen dem bewaldeten Teil des Einzugsgebietes und der Niederung zu unterscheiden. Eine weitere Differenzierung ergibt sich aus dem Einstau der Niederung, so dass diese in Luftbildern teilweise als Wasserfläche in Erscheinung tritt. Die Größe des überstauten Flächenanteils lässt sich aufgrund seiner geometrischen Unregelmäßigkeit (die eingestauten Flächen sind selbst teilweise bewachsen) und saisonalen Schwankungen schwer abschätzen. Ausgehend von durchschnittlich 30 % wird dieser Wert bei der Verdunstungsberechnung näherungsweise wie ein Gewässer behandelt, während 70 % der Niederung aufgrund oberflächennahen GW als optimal mit Wasser versorgte Röhrichtfläche eingestuft werden. Damit setzt sich das Einzugsgebiet nach DAHMS (1991) aus 415 ha Wald, 102 ha Wasserfläche und 237 ha Schilf zusammen (insgesamt 754 ha).

Beim **Flächenanteil Wasser**, der insgesamt 13,5 % des betrachteten Einzugsgebietes ausmacht, wird näherungsweise eine regional gültige Gewässerverdunstung nach KLÄMT & NEUBERT (2007) in Höhe von 620 mm angesetzt.

Beim **Flächenanteil Röhricht** liegen aufgrund oberflächennahen GW potenzielle Verdunstungsbedingungen vor, wobei von der Grasreferenzverdunstung ET_0 nach ALLEN et al. (1998) und meteorologischen Messergebnissen in der Niederung (Messzeitraum Mai 2009 bis April 2015) ausgegangen wird, die jedoch lückenhaft sind. Die Lückenschließung anhand von Daten der DWD-Station Rostock-Warnemünde wird wie folgt durchgeführt:

1. Berechnung von ET_0 an Tagen ohne Messausfälle,
2. Umrechnung der Windgeschwindigkeit v_{12m} in Rostock-Warnemünde in der Messhöhe 12 m in die Windgeschwindigkeit v_{2m} in 2 m Höhe nach HÄCKEL (1999) mit dem Rauigkeitskoeffizienten $c = 0,15$ wie folgt:

$$v_{12m} = v_{2m} * \left(\frac{h_{12m}}{h_{2m}} \right)^c$$

3. Berechnung von $ET_{0,WM}$ für Warnemünde,
4. Schließung von Lücken an Tagen mit Messausfällen in der Niederung anhand von Werten $ET_{0,WM}$ über den Zusammenhang: $ET_0 = 0,955 * ET_{0,WM} - 0,272$ (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,90$)
5. Umrechnung von ET_0 in die potenzielle Verdunstung von Röhricht $ETP_{Röhricht}$

Im 6-jährigen Messzeitraum beträgt ET_0 demnach 484 mm/a, d.h. ca. 80 % von $ET_{0,WM}$. Für den Zeitraum 1951 bis 2010 ergibt sich $ET_{0,WM}$ zu 604 mm. Dieser Wert bildet die Grundlage für die Berechnung der Waldverdunstung.

Die Umrechnung von ET_0 in $ET_{Röhricht}$ stützt sich auf Untersuchungen von FRAHM (2007) im Flusstalmoor Gragetopshof südlich von Rostock, der einen mittleren Umrechnungsfaktor von 1,1 angibt (Mittelwert der untersuchten Sommermonate = 1,26). Nach FRAHM (2007) ergaben verschiedene andere Untersuchungen in Deutschland aufgrund von Oaseneffekten überwiegend höhere Verdunstungsraten. Da diese nach BOHNE & BOHNE (2008) auch

in der Niederung eine Rolle spielen, wird im Weiteren von 1,2 als Umrechnungsfaktor ausgegangen. Dies führt zu einem Mittelwert $ETP_{Röhricht}$ in Höhe von 581 mm.

Bei der Schätzung der mittleren Verdunstung ETR_{Wald} für den **Flächenanteil Wald** kommt hier das BAGROV-GLUGLA-Verfahren zum Einsatz (ATV-DVWK 2002). Es wird von mittleren Waldverhältnissen und einem BAGROV-Faktor $n = 3$ ausgegangen. Daraus ergeben sich folgende Werte:

$$ETP_{Wald} = 1,17 * ET_{0,WM} = 706 \text{ mm, Verhältnis } ETP_{Wald} / ETR_{Wald} = 0,8, ETR_{Wald} = 565 \text{ mm.}$$

Die flächengewichtete mittlere Verdunstung des Einzugsgebietes beträgt schließlich 578 mm und der mittlere Gebietsabfluss als Differenz von Niederschlag und Verdunstung 115 mm. Dies entspricht 27,7 L/s.

Vergleich des bilanzierten Abflusses mit Durchflussmessungen:

Der Mittelwert des Durchflusses aus den 24 Handmessungen an der Sohlschwelle (Kap. 4) beträgt $Q = 44$ L/s. Nicht berücksichtigt ist dabei der außergewöhnliche Messwert der Größe 428 L/s, der nach Extremniederschlägen Ende Juli 2011 (MIEGEL et al. 2014) beobachtet werden konnte. Die 24 Handmesswerte spiegeln die Saisonalität des Abflussverhaltens vom Spätherbst bis zum Sommeranfang zwar recht gut wider, im Sommer kommt es jedoch zu Phasen ohne Gebietsabfluss, die weit bis in den Herbst hinein andauern können (Abb. 8). Dadurch sind die Monate Juli bis September, für die nur zwei Messwerte vorliegen, unterrepräsentiert. Der Mittelwert der Handmessungen liegt damit erwartungsgemäß deutlich über dem bilanzierten Abfluss (s.o.).

Bestimmt man dagegen den mittleren Abfluss aus den in Abbildung 8 dargestellten Tageswerten des Durchflusses, dann ergeben sich 24,4 L/s bzw. bezogen auf das Einzugsgebiet 101 mm Abfluss. Dies stimmt mit dem bilanzierten Abfluss gut überein, womit sich beide Ergebnisse gegenseitig stützen.

6.2 Bilanzierung der Wasserflüsse über die Systemgrenzen der Niederung

Bei der Bilanzierung der mittleren Wasserflüsse in die Niederung hinein und aus dieser heraus bildet das Prozessverständnis gemäß Kapitel 5 den Ausgangspunkt. Danach kann die Bilanz der Niederung wie folgt geschrieben werden:

$$Q = QG_W + QD_W + QD_N - QG_{OS}$$

Der Gebietsabfluss Q ist durch Messung bzw. durch die Gebietsbilanz gegeben. Der Zustrom von GW aus dem bewaldeten Einzugsgebiet QG_W und der Abstrom von GW zur Ostsee QG_{OS} lassen sich vereinfachend mit dem Darcy-Gesetz berechnen (s.u.). Der verzögerte Direktabfluss QD_N , der in der Niederung gebildet wird und sich aus der Differenz von Niederschlag und Verdunstung ergibt, gewichtet für die Flächenanteile Wasser und Röhricht, beträgt mit den Angaben in Kapitel 6.1 genau 100 mm bzw. bei einer Fläche von 339 ha einen Wert von 10,8 L/s. Unter der Annahme, dass QG_W auch tatsächlich unterirdischen Zufluss zur Niederung repräsentiert, der im bewaldeten Teilgebiet gebildet worden ist, ergibt sich als Restglied der Bilanz der Grabenzufluss QD_W .

Bei der Abschätzung der unterirdischen Zu- und Abflüsse wird aufgrund der sehr heterogenen Untergrundverhältnisse verein-

Tabelle 2

Parameter für die Berechnung unterirdischer Strömungskomponenten
Parameters for the calculation of subsurface flow components

Parameter	Strömung aus dem Wald zur Niederung		Strömung von der Niederung zur Ostsee	
	Sandaquifer	Moorkörper	Sandaquifer	
Ort/Schicht	Sandaquifer	oberer, besser durchlässiger Moorkörper	Sandaquifer	
Substrat	überwiegend Feinsand	Moorgley	dicht gelagerter Feinsand	
mittlere Mächtigkeit	9,8 m	0,8 m	6,6 m	
Breite b	radial bzw. halbkreisförmig, b = 4.400 m	senkrecht zur Uferlinie, b = 3.000 m	senkrecht zur Uferlinie, b = 3.000 m	
k _s -Wert	0,3 m/d bis 4,3 m/d, Mittelwert 1,4 m/d	0,4 m/d	0,3 m/d bis 4,3 m/d, Mittelwert 1,4 m/d	
hydraulischer Gradient I	0,002	0,004	0,0019	

fachend von mittleren Mächtigkeiten und Spannweiten der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des oberen, besser durchlässigen Moorkörpers bzw. des Sandaquifers ausgegangen (Kap. 3.2). Alle Ausgangsgrößen sind noch einmal in Tabelle 2 zusammengestellt.

Grundwasserzustrom QG_w aus dem bewaldeten Teilgebiet:

Die Festlegung des hydraulischen Gradienten mit I = 0,002 basiert auf Messungen zum Grundwasserstand im Wald und im Waldrandgraben im Jahr 2014 und auf der Hydrogeologischen Kartierung der DDR (ZGI 1984a). Demnach beträgt I = 0,0025 bzw. I = 0,0017. Die Berechnungsergebnisse von QGW sind Tabelle 3 (oberer Teil) zu entnehmen. Mittelwert und Maximum von QGW entsprechen mit 1,4 L/s bzw. 4,3 L/s in Bezug auf die bewaldeten Teilgebiete 11 mm bzw. maximal 33 mm GW-Neubildung. Dies deutet darauf hin, dass der Gebietsabfluss zwar durch den Zustrom von GW beeinflusst, aber nicht dominiert wird.

Abstrom von GW zur Ostsee QGOS: Die Betrachtung mit den Angaben in Tabelle 2 ist zunächst auf den Moorkörper beschränkt. Der Wert I = 0,004 basiert auf einem mittleren Abstand zwischen seeseitigem Moorrund und Ostseeufer, der ca. 100 m beträgt,

und einem mittleren Höhenunterschied zwischen Grundwasseroberfläche und Ostsee h = 0,40 m. Nach DAHMS (1991) fällt k_s im Bereich vor der Düne mit 0,4 m/d deutlich kleiner aus als im sonstigen Torfkörper.

Mit diesen Angaben ergibt sich eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 0,6 m/a und ein Abstrom zur Ostsee von 1,6 L/(m² d). Dieser Wert bestätigt der Größenordnung nach Untersuchungsergebnisse von SCHLÜTER et al. (2004) an der südwestlichen Ostseeküste, die 1 L/(m² d) ermittelten. 1,6 L/(m² d) entsprechen bezogen auf den gesamten Strömungsquerschnitt 0,044 L/s. Das sind lediglich 0,16 % des bilanzierten Gebietsabflusses. Es kann geschlussfolgert werden, dass der unterirdische Abstrom aus dem Torfkörper der Niederung zur Ostsee vernachlässigbar klein ist.

Geht man allein vom hydraulische Gradienten (Tab. 2) aus, dann müsste auch ein Volumenstrom aus dem Hauptgraben vor der Düne durch den Sandaquifer zur Ostsee stattfinden, der sich mit den Angaben in Tabelle 2 abschätzen lässt. Demnach würde der unterirdische Abstrom zur Ostsee im Mittel insgesamt 0,65 L/s und maximal 1,9 L/s betragen (Tab. 3, unterer Teil).

Tabelle 3

Berechnungsergebnisse zum unterirdischen Zufluss zur Niederung (oberer Teil) und zum unterirdischen Abstrom von der Niederung zur Ostsee unter Vernachlässigung der Salz-/Süßwassergrenze (unterer Teil)
Calculation results on the groundwater inflow into the lowland (upper part) and on the groundwater outflow from the lowland into the Baltic Sea neglecting the interface between saltwater and freshwater (lower part)

Grundwasserstrom QG _w zur Niederung			
Parameter/Strömungskomponente	Untergrenze	Mittelwert	Obergrenze
k _s -Wert des Sandaquifers	0,30 m/d	1,4 m/d	4,3 m/d
Fließgeschwindigkeit v	0,22 m/a	1,0 m/a	3,1 m/a
unterirdischer Zufluss QG _w	0,30 L/s	1,4 L/s	4,3 L/s
Anteil am mittleren bilanzierten Gebietsabfluss Q = 27,7 L/s (Kap. 6.1)	1,1 %	5,1 %	16 %
verzögerter Direktabfluss insgesamt	27,4 L/s	26,3 L/s	23,4 L/s
Grundwasserstrom von der Niederung zur Ostsee im Torfkörper und Sandaquifer, ohne Berücksichtigung der Salz-/Süßwassergrenze			
Parameter	Untergrenze	Mittelwert	Obergrenze
k _s -Wert des Sandaquifers	0,30 m/d	1,4 m/d	4,3 m/d
unterirdischer Abfluss Q _u insgesamt	0,17 L/s	0,65 L/s	1,9 L/s
Anteil am mittleren bilanzierten Gebietsabfluss (Kap. 6.1)	0,6 %	2,3 %	6,9 %

Die Verdichtung des Untergrundes unter der Düne und Unterschiede in der Dichte von Salz- und Süßwasser, d.h. die Ausbildung einer Salz-/Süßwassergrenze, lassen jedoch erwarten, dass der Grundwasserstrom zur Ostsee im Sandaquifer signifikant kleiner ist als diese ohnehin schon geringen Berechnungswerte oder dass dieser sogar Null beträgt. Damit kann ihm insgesamt keine entscheidende Bedeutung für die mittlere jährliche Wasserbilanz des Niedermoors zugesprochen werden. Dafür spricht auch die gute Übereinstimmung von bilanziertem und gemessenem Gebietsabfluss.

Direktabfluss $QD = QD_w + QD_N$: Nach den Angaben in Tabelle 3 beträgt der verzögerte Direktabfluss QD insgesamt mindestens 23,4 L/s bzw. 84 % von Q , bei Annahme mittlerer Leitfähigkeiten 26,3 L/s bzw. ca. 95 %. Abzüglich des in der Niederung selbst gebildeten $QD_N = 10,8$ L/s verbleiben im Mittel für den Grabenzufluss aus dem Wald $QD_w = 15,5$ L/s. Dieser relativ große Anteil am Gesamtabfluss bestätigt den Bedarf an Entwässerung im Waldgebiet. Die geringe Bedeutung des unterirdischen Zuflusses macht verständlich, warum es im Sommer zum Trockenfallen des Abflusses am Gebietsauslass aus der Niederung kommt, wenn bei hohen Verdunstungsraten und mäßigen Niederschlägen Direktabfluss ausbleibt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Küstennahe Niedermoore gehören zu den prägenden Landschaftselementen an der südlichen Ostseeküste und den Bodengewässern. Sie zeichnen sich einerseits durch Besonderheiten aus, die ihnen gemeinsam sind. Mögliche Austauschprozesse mit der Ostsee sind in diesem Zusammenhang hervorzuheben. Andererseits hat jedes Küstenmoor seine entwicklungspezifischen Eigenheiten, so dass Verallgemeinerungen nur eingeschränkt möglich sind. Dies betrifft u.a. den geologischen Aufbau, die Speisung durch GW und/ oder Oberflächenwasser und die spezifische Entwässerungssituation.

Die Abriegelung durch Dünen und Deiche sowie Entwässerungsmaßnahmen haben in den letzten Jahrhunderten zu starken Veränderungen der natürlichen Verhältnisse geführt. Seit einigen Jahren befinden sich einzelne Niedermoore durch Renaturierungsmaßnahmen erneut in Veränderung. Das untersuchte NSG „Hütelmoor und Heiligensee“, das sich geohydrologisch durch eine ungewöhnliche Heterogenität auszeichnet, hat Pilotcharakter, um solche Veränderungen zu studieren. Die Wiedervernäsung erfolgte durch Rückbau des Schöpfwerkes und Anlegen einer Sohlschwelle am Gebietsauslass, durch die es zum Einstau der Niederung gekommen ist, mit Auswirkungen auf Verdunstung, Retention und Abflussgeschehen.

Die Analyse zur grundsätzlichen hydrologischen Charakterisierung des NSG zeigt, dass das interne Prozessgeschehen solcher Niedermoore nur verstanden werden kann, wenn ihr Einzugsgebiet in die Betrachtungen einbezogen wird. Sie hat zur Erkenntnis geführt, dass der Abfluss zu großen Teilen im Einzugsgebiet gebildet wird, wobei die Niederung NSG selbst als Transferzone mit erheblicher Retentionswirkung aufgefasst werden kann.

Überraschend ist die Erkenntnis, dass im Einzugsgebiet trotz geringen Gefälles, sandiger Böden und Bewaldung schnellere Abflusskomponenten überwiegen, wofür der Standortfaktor

oberflächennahes GW die Hauptursache ist. Dies hat zur Folge, dass der oberirdische Zufluss in die Niederung, der über Grabensysteme erfolgt, den Zustrom von GW überwiegt. In der Niederung selbst sorgt das Grabensystem nach wie vor für effiziente Entwässerung, obwohl dieses teilweise selbst eingestaut ist. Starkniederschläge in Verbindung mit hohen Wasserständen führen auch hier zu Abflussbildung.

Für die Dynamik des Gebietsabflusses sind die Saisonalität der Bildung schnellerer Abflusskomponenten, die im Winterhalbjahr erfolgt, und die Retentionswirkung der Niederung bestimmend. Diese ist besonders nach dem Sommer groß, wenn die Wasserstände deutlich unter das Niveau der Sohlschwelle abgefallen sind und kein Abfluss mehr erfolgt. Im Verlauf des Winterhalbjahrs wird die Niederung durch Niederschlag und Zufluss aus dem Einzugsgebiet aufgefüllt. Die Stärke des Gebietsabflusses hängt dann davon ab, inwieweit der Wasserspiegel das Niveau der Sohlschwelle übersteigt. Durch Rückstau über den Breitling infolge hoher Ostseewasserstände kann sich die Fließrichtung am Gebietsauslass episodisch umkehren, was ein Rückströmen in das Gebiet zur Folge hat.

In den Teilflächen zwischen den Gräben der Niederung dominieren vertikale Austauschprozesse durch Niederschlag und Verdunstung. Die horizontale Strömung im oberen besser durchlässigen Torfkörper erfolgt mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten. Es handelt sich dabei um Nahtransporte bis zu den Gräben, die die Teilfläche jeweils begrenzen. Auch der laterale unterirdische Abstrom zur Ostsee ist aufgrund ungünstiger hydraulischer Bedingungen sehr schwach. Ein stärkerer Austausch mit der Ostsee ist nur episodisch bei Sturmfluten der Ostsee zu erwarten, wenn es zu einem Dünendurchbruch kommt. Im Zusammenhang mit der Bilanzierung des Gebietswasserhaushaltes sind damit die Wasserflüsse zwischen Niederung und Ostsee insgesamt zu vernachlässigen.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass dieses in der Renaturierungsphase befindliche küstennahe Niedermoor heterogene hydrologische Prozesse und einen damit verbundenen Wasserhaushalt aufweist. Charakteristisch ist die hohe Relevanz unterirdischer Prozesse mit dem im Niedermoor und im angrenzenden Waldgebiet gebildeten verzögerten Direktabfluss als quantitativ wichtigstem Anteil. Die Prozesse weisen starke saisonale Schwankungen auf, mit sehr geringen Abflussspenden im Sommer (abgesehen von sommerlichen Starkregenperioden) und beachtlichen Abflussspenden im Winter.

Die Eingriffe des Menschen in diese küstennahen Gebiete in den letzten zwei Jahrhunderten haben deren Wasserhaushalt stark verändert, sowohl hinsichtlich der Verhinderung des Austauschs mit der Ostsee, als auch in Richtung einer gezielten Entwässerung des Gebietes. Auch nach der bisherigen Renaturierung ist die Wechselwirkung mit der Ostsee durch einen Grundwasseraustausch unter der Dünendeichlinie sehr gering.

Künftigen Untersuchungen bleibt es vorbehalten, die weiteren Veränderungen infolge Renaturierung zu studieren. Von besonderem Interesse sind dabei die Entwicklungen, die möglicherweise nach einem vollständigen Abtrag der Düne durch Sturmfluten zu erwarten sind. Es stellt sich die Frage, ob dann ein Gebietsauslass über die Sohlschwelle noch erforderlich ist. Hinzu kommen die zu erwartenden Veränderungen durch globalen Wandel wie

Anstieg des Meeresspiegels, Zunahme der Verdunstung in der Niederung und Änderung des Niederschlagsregimes.

Die hier vorgestellte Abschätzung der einzelnen Bilanzgrößen des Wasserhaushalts stellt aufgrund verschiedener Unsicherheiten eine relativ grobe Näherung dar. Teilweise resultieren diese aus der Charakteristik des Untersuchungsgebietes selbst, so wie das für kleinere Einzugsgebiete mit geringem Geländegefälle und hoher Relevanz unterirdischer Prozesse typisch ist. Dies betrifft die Gewinnung zuverlässigerer Abflussdaten. Insofern wird es im Weiteren darauf ankommen, die Unsicherheiten zu minimieren, die Wasserflüsse genauer zu quantifizieren und die Vorstellung über das Prozessgeschehen im Untersuchungsgebiet, vor allem durch Modellierung, weiter zu schärfen. Weitere Anregungen sind diesbezüglich bei SELLE et al. (2016) zu finden.

Summary and Outlook

Coastal wetlands are characteristic elements of the landscapes along the German coastline of the Baltic Sea and the Bodden waters. On the one hand, they are characterised by peculiarities which they all have in common. Possible exchange processes between the fens and the Baltic Sea have to be highlighted in this context. On the other hand, each coastal fen has its own characteristics specific to its development, so that only partial generalisations can be made. This refers, e.g., to the geological structure, the alimentation by groundwater and/or surface water and the specific discharge situation.

The blockage by dunes and dykes as well as drainage measures led to strong changes in the natural conditions during the last centuries. For some years now, single fens have been subjected to new changes in the wake of restoration measures. The area investigated here, the nature reserve "NSG Hütelmoor und Heiligensee", geohydrologically characterised by an unusual heterogeneity, is well suited as a pilot area to study those changes. The rewetting was implemented by demolishing the pumping station and constructing a ground sill at the catchment outlet, causing the lowland to fill with water, consequently impacting on evaporation, retention and discharge behaviour.

The analysis of the general hydrological characterisation of the NSG shows that the internal processes of those fens cannot be understood unless their catchment area is included into the considerations. It led to the understanding that the discharge is largely produced within the catchment, whereby the lowland itself can be seen as a transfer zone with considerable retention effects.

It is surprising that despite low slope, sandy soils and forest vegetation, the catchment area is dominated by quick discharge components with the near-surface groundwater being the main cause. As a result, the aboveground inflow into the lowland, generated directly in this area, via trench systems is larger than the inflow of groundwater. Within the lowland itself, the trench system provides an efficient drainage, although the system itself is sometimes filled with water. Heavy precipitation combined with high water levels can also cause runoff formation.

The dynamics of the area's discharge is controlled by the seasonality of the formation of quick discharge components, which

normally occur during the winter half-year, and by the retention effect of the lowland. The retention is especially high in summer, when the water levels have sunken clearly under the level of the ground sill, and no discharge is taking place any more. During summer, high evaporation rates form the 2nd reason for the low runoff from that region. Within the course of the winter half-year, the lowland is filled with precipitation and inflow from the catchment. The magnitude of the area's outflow thus depends on how much the water level exceeds the ground sill's level. Due to a backlog of water via the Breiðling caused by high water levels of the Baltic Sea, the direction of flow at the outlet can be turned around episodically, resulting in a backflow of the water into the area.

In the subareas between the trenches of the lowland, vertical exchange processes from precipitation and evaporation dominate. The horizontal flow in the upper peat body with a higher permeability takes place with very low flow velocities. This flow is a short-distance haul to the trenches, which are the borders of the subareas. Also, the lateral sub-surface outflow to the Baltic Sea is very weak due to unfavourable hydraulic conditions. A more intense exchange with the Baltic Sea can be expected only episodically during storm tides in the Baltic Sea, when gaps within the dunes occur. In connection with the water balance, the water flows between fen and Baltic Sea are altogether negligible.

In summary, it can be said that this coastal low moor, being in the process of renaturation, shows heterogeneous hydrological processes and a corresponding water balance. A characteristic element is the high relevance of the subterranean processes, with the delayed direct runoff, that originates from the fen and from the adjacent forest area, being the most important component with respect to its quantity. The processes show strong seasonal variations, that is very low discharge rates in summer (except for summerly heavy precipitation periods) and high discharge rates in winter.

The anthropogenic interventions in those coastal areas during the last two centuries have changed their water balance exceedingly, in terms of the prevention of exchange with the Baltic Sea as well as regarding an intentional drainage of the area. Also after the previous restoration, the interaction with the Baltic Sea via groundwater exchange under the dunes is very small.

Future investigations will thus have to study further changes due to renaturation. The possible future developments after a complete removal of the dunes by storm tides are of particular interest. The question arises, whether an outlet of the catchment area via the ground sill will still be necessary in that case. Furthermore, certain changes are to be expected in the wake of global climate change, e.g. rising sea levels, increasing evaporation in the lowland and changes in the precipitation regime.

The present estimate of the single components of the water balance represents only a relatively rough approximation due to different uncertainties. Some of those uncertainties are parts of the research subject itself, as is typical for smaller catchment areas with low ground slope and a high relevance of subterranean processes. This concerns i.a. the collection of reliable runoff data. In future, it will therefore be important to minimise the uncertainties, quantify the water flows more precisely, and sharpen the perception of the processes in the area under study. Further

suggestions concerning this matter are to be found at SELLE et al. (2016).

Danksagung

Wir danken dem Deutschen Wetterdienst und dem Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund für die Bereitstellung meteorologischer Daten der Station Rostock-Warnemünde bzw. von Pegeldata des Ostseepiegels Warnemünde. Dr. Lars Tiepolt hat dankenswerterweise Schrägluftbilder von Befliegungen der Ostseeküste zur Verfügung gestellt. Nicht zuletzt bedanken wir uns bei Herrn Jörg Harmuth (Leiter des Stadtforstamtes Rostock) und Frau Angelika Stoll, dort u.a. verantwortlich für Fragen des Naturschutzes, für die Erlaubnis, experimentelle Arbeiten im NSG durchführen zu können. Herrn Andreas Bauer danken wir für die Aufbereitung der Grafiken und Leonore Behr für Berechnungen zur Grasreferenzverdunstung.

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. K. Miegel
Dr. T. Salzmann
Dipl.-Ing. C. Franck
Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Universitätsplatz 1, 18051 Rostock
konrad.miegel@uni-rostock.de

Prof. Dr. A. Bronstert
Dr. T. Gräff
Prof. Dr. B. Selle*
Universität Potsdam, Institut für Erd- und Umweltwissenschaften
Karl-Liebknecht-Str. 24, 14476 Potsdam
* aktuell: Beuth Hochschule für Technik Berlin, Fachbereich III „Bauingenieur- und Geoinformationswesen“

Literaturverzeichnis

- ALLEN, R.G., M. SMITH, A. PERRIER & L.S. PEREIRA (1998): Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. – Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rom
- ATV-DVWK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. – Merkblatt M 504. – Deutsche Vereinigung für Wasser, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- BLU-MV (1996): Dokumentation der Sturmflut vom 3. und 4. November 1995. – Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt des Landes Mecklenburg-Vorpommern. – Hrsg. Redick & Schade GbR, Rostock
- BOHNE, B. & K. BOHNE (2008): Monitoring zum Wasserhaushalt einer auf litoralem Versumpfungsmoor gewachsenen Regenmoorkalotte – Beispiel Naturschutzgebiet „Hütelmoor“ bei Rostock. – In: Stüdemann, O. (2008): Aspekte der Geoökologie. – Weißensee Verlag, Berlin, 313–338
- BRIEM, E. (2003): Gewässerlandschaften der Bundesrepublik Deutschland. – ATV-DVWK-Arbeitsbericht, Hennef, 176 S.
- DAHMS, P. (1991): Studie Wasserregulierung Hütelmoor. – Universität Rostock, Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz, Fachgebiet Kulturtechnik
- DETTMANN, U. & M. BECHTOLD (2016): One-dimensional expression to calculate specific yield for shallow groundwater systems with microrelief. – Hydrological Processes 30 (2), 334–340
- DWA (2013): Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser. – DWA-Themen T 2/2013. – Deutsche Vereinigung für Wasser, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- DYCK, S. & G. PESCHKE (1995): Grundlagen der Hydrologie. – Verlag für Bauwesen, Berlin
- FRAHM, E. (2007): Bestimmung der realen Evapotranspiration für Weide (*Salix* spp.) und Schilf (*Phragmites australis*) in einem nordostdeutschen Flusstalmoor. – Institut für Umweltingenieurwesen, Band 7, Universität Rostock
- HAUPT, R. & K. MIEGEL (2006): Analyse rückstaubeinflusster Wasserstände der Peene und Ableitung von Bemessungswasserständen. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 50 (6), 297–302
- HAYS, K.B. (2003): Water use by saltcedar and associated vegetation on the Canadian, Colorado and Pecos Rivers in Texas. – M.S. thesis. College Station, TX Texas A&M University. 132 S.
- HEATH, R.C. (1988): Einführung in die Grundwasserhydrologie. – R. Oldenbourg Verlag, München-Wien
- HURTIG, T. (1957): Physische Geographie von Mecklenburg. – VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin
- IKELS, L. (2011): Bodenwasserhaushalt einer Salzgraswiese der Vorpommerschen Boddenlandschaft unter sich verändernden Klimabedingungen. – Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt
- JESCHKE, L., U. LENSCHOW & H. ZIMMERMANN (2003): Die Naturschutzgebiete in Mecklenburg-Vorpommern. – Hrsg. Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern, Demmler Verlag, Schwerin
- KLÄMT, A. & W. NEUBERT (2007): Die Verdunstungsverluste von Gewässern in Deutschland – mittlere regionale Verteilung und Langzeitverhalten 1891–2005. – In: Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 20.07, Band 1
- KIRCHNER, J.W. (2009): Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward. – Water Resources Research 45, W02429; DOI: 10.1029/2008WR006912
- KLIESCH, S., L. BEHR, T. SALZMANN & K. MIEGEL (2016): Simulation des Grundwasserhaushalts in ausgewählten Niederungsgebieten an der deutschen Ostseeküste. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 60 (2)108–118; DOI: 10.5675/HyWa_2016,2_1
- KOEBSCHE, F., S. GLATZEL, J. HOFMANN, I. FORBRICH & G. JURASINSKI (2013): CO₂ exchange of a temperate fen during the conversion from moderately rewetting to flooding. – Journal of Geophysical Research-Biogeosciences 118 (2), 940–950; DOI: 10.1002/jgrg.20069, 2013
- KOEBSCHE, F., G. JURASINSKI, S. KOCH & S. GLATZEL (2015): Controls for multi-scale temporal variation in ecosystem methane exchange during the growing season of a permanently inundated fen. – Agricultural and Forest Meteorology 204, 94–105; DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.02.002

- KOLP, O. (1957): Die nordöstliche Heide Mecklenburgs. – VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin
- KRAUSE, S. & A. BRONSTERT (2007): The impact of groundwater-surface water-interactions on the water balance of a mesoscale lowland river catchment in Northeastern Germany. – *Hydrological Processes* 21 (2), 169–184
- KRAUSE, S., J. JACOBS & A. BRONSTERT (2007): Modeling the impacts of land-use and drainage density on the water balance of a lowland-floodplain landscape in Northeast Germany. – *Ecological Modeling* 200 (3–4), 475–492
- KRÜGER, K. (1995): Untersuchung zur Salzbeeinflussung überflutungsgefährdeter, forstlich genutzter Flächen im Naturschutzgebiet Hütelmoor-Heiligensee. – Diplomarbeit, Universität Rostock, Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz
- MEHL, D. & V. THIELE (1998): Fließgewässer- und Talraumtypen des Norddeutschen Tieflandes am Beispiel der jungglazialen Naturräume Mecklenburg-Vorpommerns. – Parey-Verlag, Berlin, 261 S.
- MIEGEL, K., D. MEHL, G. MALITZ & H. ERTEL (2014): Ungewöhnliche Niederschlagsereignisse im Sommer 2011 in Mecklenburg-Vorpommern und ihre hydrologischen Folgen – Teil 1: Hydrometeorologische Bewertung des Geschehens. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 58 (1), 18–28; DOI: 10.5675/HyWa_2014, 1_2
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. – *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 194, Offenbach a.M.
- SALIX (1996): Pflege- und Entwicklungsplan Naturschutzgebiet „Heiligensee & Hütelmoor“. – Studie im Auftrag des Umweltministeriums Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin. – Büro für Landschaftsplanung Waren
- SELLE, B., T. GRÄFF, T. SALZMANN, S. OSWALD, M. WALTHER & K. MIEGEL (2016): Untersuchung eines renaturierten Niedermooses an der deutschen Ostseeküste – Teil II: Salzdynamik und Wasserhaushalt. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 60 (4) ???; DOI: 10.5675/HyWa_2016, 4_2
- SCHLÜTER, M., E.J. SAUTER, C.E. ANDERSEN, H. DAHLGAARD & P.R. DANDO (2004): Spatial distribution and budget for submarine groundwater discharge in Eckernförde Bay (Western Baltic Sea). – *Limnology and Oceanography* 49, 157–167
- SUCCOW, M. & H. JOOSTEN (2001): Landschaftsökologische Moorkunde. – E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 2. völlig neu bearb. Aufl.
- SOMMERHÄUSER, M. & H. SCHUHMACHER (2003): Handbuch der Fließgewässer Norddeutschlands. – Ecomed-Verlag, Landsberg, 278 S.
- STOCK, A. (2005): Standortkennzeichnungen und Ableitung eines geökosystemaren Monitorings zur Abschätzung von Veränderungen nach Deichaufgabe im Bereich des NSG „Heiligensee & Hütelmoor“. – Diplomarbeit, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
- TRÜBGER, E.-R. (2006): Entwicklung eines Ansatzes zur Berücksichtigung der ungesättigten Zone bei der Grundwassersimulation von Feuchtgebieten. – Institut für Umweltingenieurwesen, Band II, Universität Rostock
- ZAHN, U. (1996): Diercke Weltatlas. – Westermann Schulbuchverlag, Braunschweig, 4. Aufl.
- ZGI (1984a): Hydrogeologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik – Karte der Hydroisohypsen. – Zentrales Geologisches Institut, Berlin
- ZGI (1984b): Hydrogeologische Kennwerte. – Zentrales Geologisches Institut, Berlin