

Carl von Ossietzky
Universität Oldenburg

Bachelorstudiengang Umweltwissenschaften

Bachelorarbeit

Wechselwirkungen zwischen Grund- und
Oberflächenwasser am Großen Meer bei Holte

vorgelegt von
Lina Otte

Gutachter:
Prof. Dr. Gudrun Massmann
M. Sc. Tobias Holt

Oldenburg, 26.11.2018

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich sehr herzlich bei Prof. Dr. Gudrun Massmann für die Vergabe der Bachelorarbeit sowie die Betreuung während der Bearbeitung bedanken.

Ein großer Dank gilt auch Tobias Holt, welcher bei Fragen immer ein offenes Ohr hatte und uns zudem tatkräftig im Feld unterstützte, auch wenn die Anreise zum See im Auto etwas beengt war. Herzlichen Dank für die Betreuung.

Weiterer herzlicher Dank gilt Dr. Jens-Uwe Holthuis, ohne den die Arbeit gar nicht erst entstanden wäre. Danke für Ihr Vertrauen und die Zusammenarbeit!

Des Weiteren möchte ich mich bei der NLWKN Betriebsstelle in Sulingen für die freundliche Unterstützung und die Bereitstellung der Daten bedanken.

Auch möchte ich der gesamten Arbeitsgruppe Hydrogeologie und Landschaftswasserhaushalt der Universität Oldenburg mein Dank aussprechen. Ein besonderer Dank gilt Dr. Janek Greskowiak für die ausführliche Einweisung ins DGPS und Nivellieren, Ulrike Kücks für den Überblick über die Gerätschaften sowie Lukas Brennecke für die Unterstützung im Gelände.

Ich danke Marlon Braun und Marius Otte für das Korrekturlesen und die Unterstützung. Auch danke ich meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglichen.

Und zu guter Letzt danke ich Frederike Müller für die tolle Zusammenarbeit. Ich hätte mir keinen besseren Partner vorstellen können.

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Interaktion zwischen dem Oberflächenwasser des „Großen Meeres“ im Landkreis Diepholz und des umliegenden Grundwassers für den Frühsommer 2018 zu charakterisieren. Dies soll dazu dienen, die Rolle des Grundwassers für die voranschreitende Eutrophierung des Gewässers abzuschätzen. Dazu wurde zunächst die hydraulische Durchlässigkeit der Gewässersohle untersucht. Zur Ermittlung der hydraulischen Verhältnisse wurden die Wasserstände des Sees sowie des umliegenden Grundwassers gemessen. Dazu wurden zwei bereits bestehende Grundwassermessstellen genutzt und weitere fünf flache Messstellen rund um den See errichtet. Um die Austauschmengen zu quantifizieren, wurden Seepage-Meter-Messungen in den sandigen Bereichen der Gewässersohle durchgeführt sowie ausgehend meteorologischer Daten und der gleichzeitigen Seespiegeländerung eine Netto-Grundwasserbilanz errechnet.

Die Ergebnisse der sedimentologischen Untersuchungen zeigen eine eher schwache Durchlässigkeit der Gewässersohle. Im Untersuchungszeitraum ist ausgehend der hydraulischen Gradienten und der Bilanzrechnung eine Infiltration des Oberflächenwassers in das Grundwasser festzustellen. Widersprüchlich dazu zeigen die mittels Seepage-Meter gemessenen Austauschmengen einen Grundwasserzuström in den See. Es wird angenommen, dass diese Messungen fehlerhaft sind. Das lokale Grundwassersystem unterscheidet sich von der regionalen Grundwasserströmung, welche von Nordosten in Richtung des „Großen Meeres“ verläuft. Um genauere Aussagen über die Grundwasserbewegung östlich des Sees zu treffen, fehlen hier allerdings die dazu notwendigen Messstellen. Es wird ein großer Einfluss der umliegenden Vegetation auf die lokalen Grundwasserstände vermutet.

Da im Frühsommer 2018 influente Verhältnisse vorherrschen, ist in diesem Zeitrahmen ein Nährstoffeintrag über das Grundwasser auszuschließen. Es ist davon auszugehen, dass sich die Interaktionsrichtung in dem Winterhalbjahr umkehrt und der Grundwasserzuström hauptsächlich von Osten besteht. Um diese These zu untersuchen, vermag es die Wasserstände des Grund- und Oberflächenwassers im jahreszeitlichen Verlauf zu ermitteln, da die Untersuchung lediglich einen kurzen Zeitraum abdeckte. Zusätzlich sind weitere tiefe Grundwassermessstellen östlich des Sees erforderlich, um eine verlässliche Aussage treffen zu können.

Abstract

The aim of this study is to characterize the interaction between surface water from the lake "Großes Meer" in lower Saxony and surrounding groundwater for early summer 2018. This is intended to estimate the impact of the groundwater on the progressing eutrophication of the water body. Hydraulic conductivity of the lakebed sediment was determined. Lake level and groundwater level were measured to estimate the hydraulic head differences. Therefore, two already existing groundwater monitoring wells were used and five flat piezometer were installed around the lake. To quantify the exchange seepage-meter were installed in sandy areas and a net ground-water budget was calculated by using meteorological data and the corresponding change in lake volume.

The sedimentological studies revealed lake sediments with low permeability. Based on the hydraulic gradients and balance sheets an infiltration of the surface water into the groundwater could be detected. On the other hand, measurements conducted with Seepage-meters revealed a stream of groundwater into the lake. The local groundwatersystem differs from the regional groundwaterflow. The flow direction of the regional groundwater is pointing towards the "Großes Meer" coming from the north-east. To make specific conclusions about the groundwaterflow on the eastern end, further groundwater monitoring wells need to be installed. We predict a high influence of the vegetation surrounding the lake on local water levels.

Influent conditions in the early summer prohibited possible income of nutritious ground water. But we have to assume that the direction and the amount of groundwater could change during the winter months. To test this hypothesis further research is needed. Especially measurements of surface- and groundwaterlevels throughout the year would fill the gaps caused by the specific duration of this research. Additionally, deeper groundwater monitoring wells in the eastern part of the lake are needed to provide a reliable conclusion.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Zusammenfassung | I |
| Abstract | II |
| Tabellenverzeichnis | IV |
| Abbildungsverzeichnis | IV |
| 1. Einleitung..... | 1 |
| 2. Theoretischer Hintergrund | 3 |
| 2.1. Der Wasserkreislauf auf der Erde | 3 |
| 2.1 Grundwasserströmung..... | 4 |
| 2.2 Grundwasser-Oberflächenwasser Interaktion | 6 |
| 3. Untersuchungsgebiet..... | 10 |
| 3.1 Verortung und Flächennutzung im Einzugsgebiet | 10 |
| 3.2 Hydrologie | 11 |
| 3.3 Geologie | 11 |
| 3.4 Hydrogeologie..... | 12 |
| 3.5 Entwicklung der letzten Jahrzehnte und Maßnahmen zur Seesanie- rung | 13 |
| 4. Material und Methoden | 14 |
| 4.1 Sedimentologische Untersuchungen..... | 14 |
| 4.2 Untersuchung der hydraulischen Druckverhältnisse..... | 15 |
| 4.2.1 Grundwassermessstellen und Lattenpegel | 15 |
| 4.2.2 Einmessen der Messstellen | 16 |
| 4.3 Direkte Messung des Wasserflusses mittels Seepage-Meter | 17 |
| 4.4 Wasserbilanzansatz zur Abschätzung des Grundwasserzu- und abflusses ... | 20 |
| 4.4.1 Die klimatische Wasserbilanz des „Großen Meeres“ | 20 |
| 4.4.1.1 Berechnung der Evaporation..... | 21 |
| 4.4.1.2 meteorologische Daten | 22 |
| 4.5 Charakterisierung der Grundwasserfließrichtungen | 22 |
| 5. Darstellung und Interpretation der Ergebnisse | 24 |
| 5.1 Charakterisierung der Sedimente..... | 24 |
| 5.1.2 Beschaffenheit der Gewässersedimente..... | 24 |
| 5.1.2 Beschaffenheit der Sedimente im näheren Umfeld des „Großen Meeres“ und Lage der Verfilterung der Grundwassermessstellen... | 25 |
| 5.2 Charakterisierung der hydraulischen Druckverhältnisse am „Großen Meer“ ... | 26 |
| 5.2.1 Wasserstandsdynamik..... | 26 |
| 5.2.2 Grundwasserfließverhältnisse im näheren Umfeld des „Großen Meeres“ | 28 |
| 5.3 Regionale Grundwasserströmung..... | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 5.4. Ergebnisse der Wasserflussmessung mittels Seepage-Meter..... | 31 |
| 5.5 klimatische Wasserbilanz..... | 33 |
| 6. Diskussion | 35 |
| 7. Fazit und Ausblick..... | 40 |
| 8. Literaturverzeichnis..... | 42 |
| Anhang | II - XVII |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Der Durchlässigkeitsbeiwerte k_f der einzelnen Korngrößen nach DIN 18130-1 (Hölting & Coldewey 2013)..... | 5 |
| Tabelle 2 Einteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte k_f nach DIN 18130-1 (Hölting & Coldewey 2013)..... | 6 |
| Tabelle 3: Überblick über die Seepage-Meter-Messungen am „Großen Meer“ | 33 |
| Tabelle 4: Netto-Grundwasserbilanz über den Zeitraum vom 04.05 – 27.06.2018..... | 34 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Schematische Darstellung von effluenten und influenten Verhältnissen. Die schwarzen Pfeile symbolisieren die Fließrichtung des Wassers. | 7 |
| Abbildung 2 Schematische Darstellung mit Durchfließen des Oberflächengewässers aufgrund effluenter und influenter Verhältnisse (links) sowie influente Verhältnisse bei getrennten Aquifer-Oberflächenwasser-Systeme (rechts)..... | 7 |
| Abbildung 3: Einfluss der Transpiration ufernaher Vegetation während der Vegetationszeit (Winter 1998)..... | 9 |
| Abbildung 4: Verortung des „Großen Meeres“ sowie die Flächennutzung im Einzugsgebiet..... | 10 |
| Abbildung 5: Empfohlene Sanierungsmaßnahmen am „Großen Meer“ (Prante 2016) | 13 |
| Abbildung 6: Probenahmepunkte des Gewässersedimentes des „Großen Meeres“.. | 14 |
| Abbildung 7: Lage der Grundwassermessstellen und des Lattenpegels am „Großen Meer“ | 15 |
| Abbildung 8: Ablaufschema für das Nivellieren mit optischem Nivelliergerät (Müller) | 17 |
| Abbildung 9: Grunddesign eines Seepage-Meters und Einbau in das Gewässersediment (Rosenberry & LaBaugh 2008) | 18 |
| Abbildung 10: Lage der Untersuchungsstandorte „Nordufer“ und „Ostufer“ der Seepage-Meter Messung..... | 19 |
| Abbildung 11: Drei Seepage-Meter vor dem Einbau am Untersuchungsstandort „Ostufer“. Alle drei Seepage-Meter sind in der modifizierten Form mit längerem Schlauch ausgestattet..... | 19 |
| Abbildung 12: Lage der Messstellen zur Konstruktion eines Grundwassergleichenplanes im weiteren Umfeld des „Großen Meeres“ | 23 |
| Abbildung 13: Überblick über die Verteilung der Bodenarten in der Gewässersohle des „Großen Meeres“ basierend auf den sechs Probenahmen mittels Kastengreifer.. | 24 |
| Abbildung 14: Profilschnitt mit Verfilterung durch das „Große Meer“ in Südwest-Nordost-Richtung. Die Grundwassermessstelle NLWKN Nord ist aufgrund fehlender Daten lediglich durch Striche angedeutet. Die blauen Markierungen zeigen den gemessenen Wasserstand vom 13.06.2018. Die Wasseroberflächen in m über NN sind angegeben. Die Wassertiefe und Schlammschicht sind anhand der Daten des NLWKN eingetragen (vgl. Anhang 1, Abbildung 1 und 2). | 26 |
| Abbildung 15: Wasserstandsdynamik der Grundwassermessstellen HM 1-5, NLWKN Nord und Holte I sowie des Seespiegels. Die tiefen Grundwassermessstellen (NLWKN Nord, Holte I) sind gestrichelt dargestellt..... | 27 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 16: Konstruierter Grundwassergleichenplan in der näheren Umgebung des „Großen Meeres“ für den 13.06.2018. Die gemessenen Wasserstände sind aufgeführt. Da in der Grundwassermessstelle HM 5 kein Wasserstand ermittelt werden konnte, liegt dieser ausgehend der Verfilterung unterhalb 34,88 über NN. Die schwarzen Pfeile visualisieren die Grundwasserfließrichtung. | 29 |
| Abbildung 17: Grundwassergleichenplan mit regionaler Grundwasserströmung | 30 |
| Abbildung 18: Schematischer Schnitt der hydraulischen Gradienten am „Großen Meer“ in Ost-West-Richtung. Die errechneten Werte der hydraulischen Gradienten sowie die Fließrichtungen sind dargestellt..... | 31 |
| Abbildung 19: Der Volumenfluss des Grundwassers in das Oberflächenwasser gemessen mittels Seepage-Meter. Die Messungen wurden an zwei Standorten (N=Nordufer und O=Ostufer) durchgeführt..... | 32 |
| Abbildung 20: Niederschlag, die berechnete Evaporation von der freien Wasserfläche sowie die KWB..... | 33 |
| Abbildung 21: kumulierte klimatische Wasserbilanz sowie die Veränderung des Seespiegels | 34 |

1. Einleitung

Oberflächenwasser und Grundwasser wurden lange Zeit als separate Einheiten betrachtet, doch zeigt sich, dass sie in den meisten Landschaften zwei miteinander gekoppelte Systeme bilden (Winter 1999, Sophocleous 2002, Kalbus et al. 2006). Aufgrund des Wasseraustausches zwischen diesen beiden Komponenten des hydrologischen Systems beeinflussen sie sich gegenseitig in ihrer Quantität und Qualität (Winter 1998, Sophocleous 2002). Mehrere Studien haben gezeigt, dass Grundwasser eine bedeutende Quelle für Nährstoffe eines Sees sein kann (Hagerthey & Kerfoot, Karan et al. 2014). So kann nährstoffreiches Grundwasser in einen See transportiert werden und diesen eutrophieren. Auch kann eine Kontaminationen des Grundwassers zur Verschmutzung des Oberflächengewässers führen. (Hagerthey & Kerfoot). Um Seen oder andere Oberflächengewässer nachhaltig zu managen, ist es daher von großer Relevanz, die Austauschprozesse des Sees zu verstehen und diese zu quantifizieren (Barr et al. 2000, Kalbus et al. 2006). Die Kontrolle der Zuflüsse spielt nicht nur für die Wasserchemie und Wasserqualität des Sees eine wichtige Rolle, sondern trägt auch zur Erhaltung und Schutzes des Lebensraums und der dortigen Biodiversität bei (Hagerthey & Kerfoot).

Der Zustand des „Großen Meeres“ (oder auch „Holter Meer“) bei Holte im Landkreis Diepholz hat sich in den letzten Jahrzehnten stark verschlechtert. Der See wird durch eine hohe organische Belastung als schwach bis stark polytroph eingestuft, zumal die Gewässersohle an vielen Bereichen mit einer mächtigen Schlammschicht bedeckt ist (NLWKN 2015). Auch zeigen Vegetationskartierungen bereits Veränderungen in den schützenswerten Pflanzengesellschaften, welche auf die hohe Nährstoffbelastung zurückzuführen ist (Mauritz 2010). Es wurden bereits einige Veränderungen am „Großen Meer“ getroffen, doch nun sind weitere Sanierungsmaßnahmen geplant, welche den Zustand des Sees nachhaltig verbessern sollen (NLWKN 2016).

Den Denkanstoß zu dieser Arbeit gab Herr Jens-Uwe Holthuis von der Stiftung Naturschutz im Landkreis Diepholz, welcher das „Große Meer“ im Rahmen des europäischen CANAPE Projektes begleitet. Da die Rolle des Grundwassers für die Eutrophierung des Sees bislang unzureichend untersucht wurde, soll dies im Rahmen zwei zusammenhängender Bachelorarbeiten erfolgen.

Ziel dieser Abschlussarbeit ist, die Wechselwirkungen zwischen dem „Großen Meer“ und dem Grundwasser zu charakterisieren. Dies soll dazu dienen, die Herkunft des Seewassers zu identifizieren, um den Einfluss des Grundwassers auf das „Große Meer“ abzuschätzen. Der Austausch wird für den Frühsommer 2018 quantifiziert. Im

Zusammenhang mit der Bachelorarbeit „Die hydrochemische Charakterisierung von Grund- und Oberflächenwasser in der Nähe des Großen Meeres“ von Frederike Müller soll sich damit ein umfassendes Bild über die Rolle des Grundwasser für die Seeeutrophierung ergeben.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1. Der Wasserkreislauf auf der Erde

Grund- und auch Oberflächenwasser bilden nur einen Teil des hydrologischen Zyklus auf der Erde. Das Wasser zeigt eine ständige Änderung des Zustandes und des Ortes in Form der drei Hauptkomponenten Niederschlag, Abfluss und Verdunstung (Hölting & Coldewey 2013). Alle weiteren Wasserhaushaltsgrößen können über die Speicheränderung $S_{\pm} = S_+ - S_-$ berücksichtigt werden. Nach dem Prinzip der Massenerhaltung werden die verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen für ein Zeitintervall in einem bestimmten Untersuchungsgebiet verknüpft. Diese mengenmäßige Erfassung wird als Wasserbilanz bezeichnet (Liebscher & Baumgartner 1990, Matthess & Ubell 2003). Die allgemeine Wasserbilanzgleichung für beliebige Zeitintervalle kann wie folgt gebildet werden (Matthess & Ubell 2003):

$$N = A + ET + (S_+ - S_-) \quad (1)$$

- mit
- N = Niederschlag
 - A = Abfluss, ober- und unterirdisch
 - ET = Verdunstung mit Evaporation, Transpiration und Interzeption
 - S_+ = Vergrößerung des ober- und unterirdischen Wasservorrates
 - S_- = Aufbrauch des ober- und unterirdischen Wasservorrates

Alle Wasserhaushaltsgrößen werden als Quotienten aus Höhe und Zeiteinheit, zum Beispiel mm/d, ausgedrückt.

Die Wasserbilanz eines Sees wird berechnet, indem alle Wassergewinne und Wasserverluste des Sees gemessen und/oder geschätzt werden sowie die Veränderung des Seevolumens über denselben Zeitraum gemessen wird (Sacks et al. 1998):

$$\Delta V = N - E + O_+ - O_- + G_+ - G_- \quad (2)$$

- mit
- ΔV = Volumenänderung des Sees
 - N = Gebietsniederschlag
 - E = Evaporation der offenen Wasserfläche
 - O_+ = Oberflächenwasserzufluss O_- = Oberflächenwasserabfluss
 - G_+ = Grundwasserzufluss G_- = Grundwasserabfluss

2.1 Grundwasserströmung

Da das Wasser auf der Erde durch Niederschläge und Evapotranspiration in ständiger Bewegung bleibt, kann sich auch im Boden nur selten ein statisches Gleichgewicht ergeben (Blume et al. 2010). Die Wasserbewegung in flüssiger Phase wird dabei maßgeblich durch hydraulische Druckverhältnisse bestimmt, wobei das Wasser von Stellen höheren Potentialen zu denen niedrigeren Potentialen fließt (Freeze & Cherry 1979). Das Potential wird definiert als „die Arbeit, die notwendig ist, eine Einheitsmenge (Volumen, Masse oder Gewicht) Wasser von einem gegebenen Punkt eines Kraftfeldes zu einem Bezugspunkt zu transportieren“ (Massmann 2016). Dabei wird Energie freigesetzt.

Das hydraulische Potential h wird durch die Addition des Druckpotentials ψ mit dem Gravitationspotential z definiert (Freeze & Cherry 1979):

$$h = \psi + z \quad (3)$$

Die Höhe des Druckpotentials ψ setzt sich aus dem hydrostatischen Überdruck P , der Dichte ρ des Fluides sowie der Erdbeschleunigung g zusammen (Freeze & Cherry 1979, Hölting & Coldewey 2013).

$$\psi = \frac{P}{\rho \times g} \quad (4)$$

Die Wasserbewegung in Richtung auf das niedrigste Potential gilt dabei nicht nur in wassergesättigten Zonen, sondern auch in nicht gesättigten Bereichen, welche sich oberhalb der Grundwasseroberfläche befinden (Blume et al. 2010). Das dimensionslose Grundwassergefälle i , oder auch hydraulische Gradient, kann aus der Differenz zweier hydraulischer Potentiale (h_1 und h_2 [m]) sowie der Fließstrecke Δl [m] berechnet werden (Hölting & Coldewey 2013):

$$i = \frac{h_1 - h_2}{\Delta l} = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (5)$$

Es zeigt sich, dass der hydraulische Gradient nicht nur die Fließrichtung, sondern auch die Strömungsgeschwindigkeit durch die Steigung des Gradienten beeinflusst. Je steiler das Grundwassergefälle also ist, desto größer ist die Fließgeschwindigkeit (Press et al. 2011)

Zusätzlich zu einem antreibenden Potentialgefälle ist die Durchlässigkeit des Bodens für das Ausmaß der Wasserbewegung von Bedeutung. Die hydraulische Leitfähigkeit des Gesteins wird durch den Durchlässigkeitsbeiwert k_f bestimmt. Dieser bezieht nicht nur

die Eigenschaften der Flüssigkeit, wie Dichte, Viskosität und Temperatur, sondern auch die des Grundwasserleiters mit ein. Dazu gehören unter anderem die Korngrößenverteilung, die Lagerungsdichte, der Porenanteil sowie Trennflächen (Hölting & Coldewey 2013).

Der Durchlässigkeitsbeiwert wurde von dem französischen Ingenieur Henry Darcy eingeführt. Dieser stellte fest, dass der durch eine bestimmte Querschnittsfläche fließende Volumenstrom dem Unterschied der Drückhöhen direkt proportional ist und sich umgekehrt proportional der Fließlänge verhält. Mittels des Durchlässigkeitsbeiwertes führt er den filterspezifischen Proportionalitätsfaktor ein. Das DARCY-Gesetz wird nun wie folgt definiert:

$$Q = A * k_f * i \quad (6)$$

- mit
- Q = Volumenstrom [m^3/s]
 - A = durchflossene Querschnittsfläche [m^2]
 - k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
 - i = hydraulischer Gradient [-]

Aus der Gleichung (6) lässt sich schließen, dass je größer der hydraulische Gradient ist, desto geringer ist die Durchlässigkeit.

Den jeweiligen Korngrößen von Lockersedimenten werden k_f -Werte zugeordnet sowie ihre Durchlässigkeit eingeteilt (DIN 18130-1) (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 2).

Tabelle 1: Der Durchlässigkeitsbeiwerte k_f der einzelnen Korngrößen nach DIN 18130-1 (Hölting & Coldewey 2013)

| Lockergestein | Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s] |
|----------------------|--|
| reiner Kies | $10^{-1} - 10^{-2}$ |
| grobkörniger Sand | $= 10^{-3}$ |
| mittelkörniger Sand | $10^{-3} - 10^{-4}$ |
| feinkörniger Sand | $10^{-4} - 10^{-5}$ |
| schluffiger Sand | $10^{-5} - 10^{-6}$ |
| toniger Sand | $10^{-6} - 10^{-9}$ |
| Ton | $< 10^{-9}$ |

Tabelle 2 Einteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte k_f nach DIN 18130-1
(Hölting & Coldewey 2013)

| Einteilung | Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s] |
|--------------------------|--|
| sehr stark durchlässig | $> 10^{-2}$ |
| stark durchlässig | $10^{-2} - 10^{-4}$ |
| durchlässig | $10^{-4} - 10^{-6}$ |
| schwach durchlässig | $10^{-6} - 10^{-8}$ |
| sehr schwach durchlässig | $< 10^{-8}$ |

2.2 Grundwasser-Oberflächenwasser Interaktion

Die Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser wird im Wesentlichen durch drei Faktoren bestimmt (Sophocleous 2002):

- dem hydraulischen Druckgradienten zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser
- der Verteilung und Höhe der hydraulischen Leitfähigkeit der Gewässersohle und der angrenzenden Sedimente
- sowie der Geometrie und Lage des Gewässerbettes

Die Austauschrichtung der Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktion wird durch hydraulische Potentialdifferenzen bestimmt (Sophocleous 2002). Dabei werden zwei Fließrichtungen unterschieden: Das Grundwasser exfiltriert in das Oberflächenwasser (effluente Verhältnisse), oder das Oberflächenwasser infiltriert in das Grundwasser (influente Verhältnisse) (Hölting & Coldewey 2013).

Wenn eine hydraulische Anbindung zwischen dem Oberflächengewässer und einem dynamischen Grundwasserströmungssystem besteht, kann die Oberfläche des oberirdischen Gewässers als Ausdruck des Grundwasserspiegels angesehen werden (Stephenson 1971). Die Richtung des Wasserflusses variiert dann mit den hydraulischen Druckverhältnissen zwischen Grund- und Oberflächenwasser (Sophocleous 2002). Bei effluenten Verhältnissen ist der Wasserspiegel des Grundwassers höher als der des Oberflächengewässers, wodurch das Grundwasser dem oberirdischen Gewässer Zutritt.

Wenn hingegen der Wasserspiegel des Oberflächengewässers so hoch ist, dass sich ein Gefälle zum Grundwasser hin ergibt, versickert das oberirdische Wasser in das Grundwasser (vgl. Abbildung 1) (Sophocleous 2002, Hölting & Coldewey 2013).

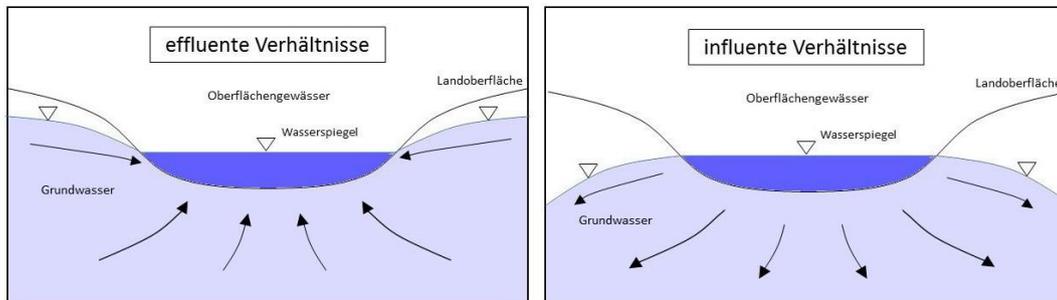


Abbildung 1: Schematische Darstellung von effluenten und influenten Verhältnissen. Die schwarzen Pfeile symbolisieren die Fließrichtung des Wassers.

Zudem können unterschiedlich hohe Grundwasserstände, welche in einigen Bereichen influente und in anderen effluente Bereiche entstehen lassen, zu einem Durchströmen des Grundwassers durch das Oberflächengewässer führen (vgl. Abbildung 2, links) (Winter 1999, Sophocleous 2002). Folglich kann bei hydraulischer Anbindung die Interaktion in drei grundlegenden Weisen geschehen (Winter 1998).

Wenn der Grundwasserkörper durch eine ungesättigte Zone von der Gewässersohle getrennt ist, besteht zwar keine hydraulische Anbindung, dennoch können influente Verhältnisse vorliegen: Das Oberflächenwasser versickert in das Grundwasser (vgl. Abbildung 2, rechts) (Winter 1998, Winter 1999, Hölting & Coldewey 2013).

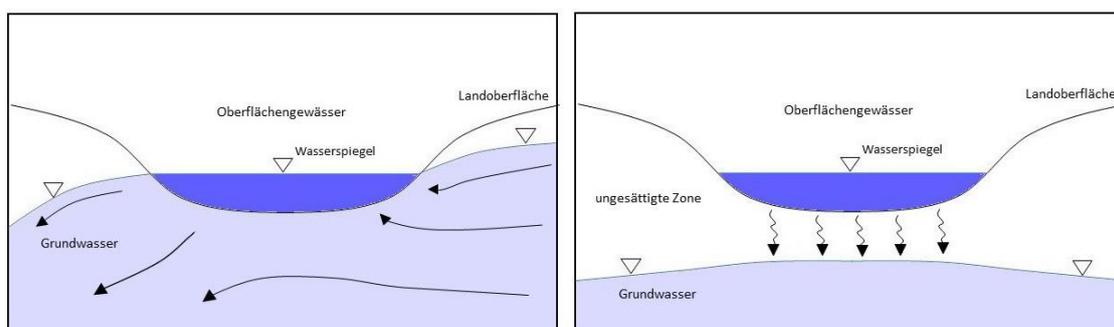


Abbildung 2 Schematische Darstellung mit Durchfließen des Oberflächengewässers aufgrund effluenter und influenter Verhältnisse (links) sowie influente Verhältnisse bei getrennten Aquifer-Oberflächenwasser-Systeme (rechts).

Die hydraulischen Druckverhältnisse bestimmen nicht nur die Fließrichtung, sondern zudem auch die Intensität des Austauschprozesses. Je größer das Potentialgefälle zwischen den Wasserständen ist, desto mehr Wasser interagiert. Aber auch kleine

hydraulische Gradienten können bei ausgedehnten Interaktionsbereichen eine große Menge Wasser ex- beziehungsweise infiltrieren lassen.

Die hydraulische Leitfähigkeit des Sediments steuert die tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Organische Sedimentauflagen auf der Gewässersohle können zu geringeren Leitfähigkeiten führen und in Abhängigkeit von der Mächtigkeit die Intensität und räumliche Verteilung des Austauschprozesses beeinflussen (Sophocleous 2002).

Da das Grund- und Oberflächenwasser als Teil des hydrologischen Zyklus eng an klimatische Gegebenheiten und Niederschläge gekoppelt ist (vgl. Kapitel 2.1. Der Wasserkreislauf auf der Erde), können die Fließrichtungen und Austauschmengen zeitlich variieren. So ist es möglich, dass starke Niederschlagsereignisse und saisonale Unterschiede zu ausreichenden Wasserstandsänderungen des lokalen Grundwasserfließsystems und des Oberflächenwassers führen und damit einen Wechsel zwischen influenten und effluenten Verhältnissen bewirken (Stephenson 1971, Sophocleous 2002). So werden Oberflächengewässer beobachtet, die im Frühling und Sommeranfang vom Grundwasser gespeist werden, und im Sommer und Herbst ihr Wasser an das Grundwasser abgeben (Sophocleous 2002).

Oberflächengewässer bilden oft mit ihrem Grundwasserkörper kleine eigenständige Systeme, welches sich von den regionalen Grundwasserverhältnissen unterscheiden (Winter 1998). Eine Grundwasserentnahme zur Trinkwassergewinnung oder landwirtschaftlichen Zwecken können die Fließsysteme im Untergrund verändern, welches sich auf die Fließverhältnisse zwischen Grund- und Oberflächenwasser auswirken kann. Auch die Transpiration der ufernahen Vegetation kann die Interaktion beeinflussen. Aufgrund der geringen Tiefe des Grundwassers in der Nähe des Oberflächengewässers können die Pflanzen in die gesättigte Zone eindringen und das Wasser direkt aus dem Grundwasser entziehen. Dies führt zu einem trichterförmigen Absinken des Grundwassers, ähnlich wie der Effekt eines gepumpten Brunnens. Die täglich und saisonal variierende Transpiration aus dem Grundwasser hinaus kann den Grundwasserabfluss in das Oberflächengewässer erheblich reduzieren. Auch kann das Absinken des Grundwassers zum Austreten des Oberflächenwassers führen (vgl. Abbildung 3) (MEYBOOM 1966, Winter & Rosenberry 1995, Winter 1999).

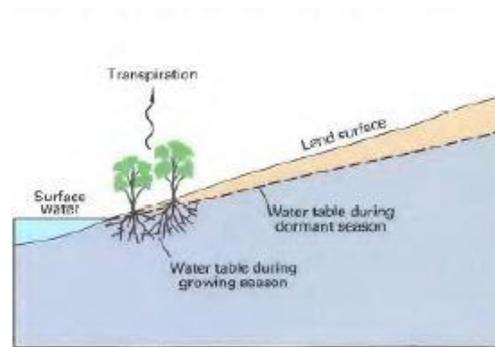


Abbildung 3: Einfluss der Transpiration ufernaher Vegetation während der Vegetationszeit (Winter 1998)

Zur Charakterisierung der Interaktionen zwischen Grund- und Oberflächenwasser können verschiedene Methoden angewendet werden, welche je nach Untersuchungsziel sowie der räumlichen und zeitlichen Skala gewählt werden. Die Messungen können im Grundwasserleiter, im Oberflächenwasser oder direkt in der Austauschzone durchgeführt werden (Kalbus et al. 2006).

3. Untersuchungsgebiet

3.1 Verortung und Flächennutzung im Einzugsgebiet

Das Untersuchungsgebiet, der See „Großes Meer“, befindet sich im Landkreis Diepholz in Niedersachsen und liegt nahe der Bauernschaft Holte in der Gemeinde Eydelstedt (vgl. Abbildung 4). Der See ist in das 24,55 ha große gleichnamige Naturschutzgebiet (NSG HA 012) eingebettet, welches im Jahr 1942 anerkannt wurde und damit eins der ältesten Naturschutzgebiete Norddeutschlands bildet (NLWKN (b)).

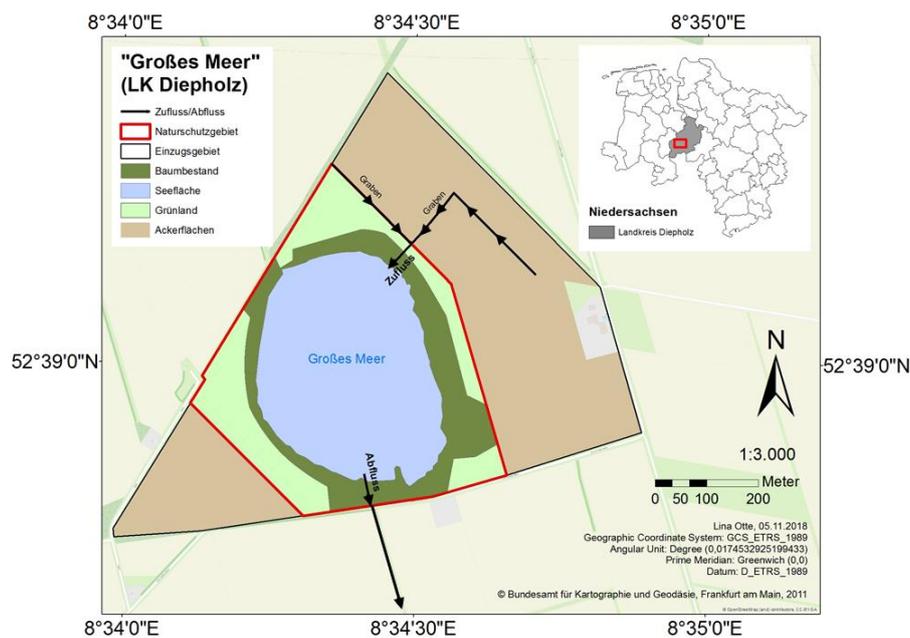


Abbildung 4: Verortung des „Großen Meeres“ sowie die Flächennutzung im Einzugsgebiet.

Die Grenze des oberflächlichen Einzugsgebietes (ca. 36,18 ha¹) ist durch ein Straßen- und Wegenetz erkennbar. Etwa 60%¹ dieser Fläche werden intensiv ackerbaulich genutzt, wobei die landwirtschaftlichen Flächen bis zu 55 m an die Ufergrenze des „Großen Meeres“ heranreichen¹. Innerhalb des Naturschutzgebietes findet sich heute extensiv genutztes Grünland, welches als Pufferzone zwischen der Ackerflächen und dem See dient. Des Weiteren wird der See von einem Vegetationsgürtel, primär bestehend aus einem bodensauren Eichen-Mischwald und einem Weiden-Mantel, vollständig umringt (Mauritz 2010). Das Naturschutzgebiet wird zur Erholung sowie der See durch den Fischereiverein Barnstorf e.V. als Angelgewässer genutzt. Der Steg des Angelvereins und eine Badestelle sind am Südwest-Ufer des „Großen Meeres“ zu finden.

¹ gemessen mit ArcGIS

3.2 Hydrologie

Das „Große Meer“ ist oval geformt und dehnt sich in Nord-Süd-Richtung um 470 m und in Ost-West-Richtung in 340 m aus. Aufgrund der geringen Wassertiefen von durchschnittlichen 1,09 m sowie einer maximalen Wassertiefe von 1,55 m wird das „Große Meer“ als Flachsee charakterisiert (vgl. Anhang 1 Abbildung 1) (NLWKN 2015). Zudem ist davon auszugehen, dass der See polymiktrisch ist, also aufgrund der geringen Wassertiefen im Jahresverlauf keine Temperaturschichtungen entstehen (NLWKN 2015).

Die offene Wasserfläche beträgt etwa 11,02 ha (Stand 2011), wodurch sich ein Seevolumen von ca. 119.000 m³ ergibt (NLWKN 2015). Der Wasserstand des Sees liegt bei etwa 35 m über NN, doch zeigen sich im Jahresverlauf Wasserstandschwankungen von durchschnittlich 0,2 bis 0,3 m. Bei trockenen Sommern kann der Wasserstand auch um bis zu 0,8 m absinken (Pfaffenberg 1941, Wasserwirtschaftsamt Sulingen 1984). In den Wintermonaten wird der See vom umliegenden Grundwasser gespeist, wohingegen ab Mai das Seewasser in das Grundwasser infiltriert. Der Grundwasserzufluss erfolgt hauptsächlich von Osten (Wasserwirtschaftsamt Sulingen 1984).

Zusätzlich zum Niederschlag erhält das „Große Meer“ Wasserzufluss über das oberirdische Einzugsgebiet. Im Nordosten befindet sich in den landwirtschaftlich genutzten Flächen ein angelegtes Grabennetz, über welches das Wasser direkt in den See geleitet wird (vgl. Abbildung 4). Ein Zufluss über diesen Graben ist allerdings nur in den regenreichen Monaten und bei starken und/oder andauernden Niederschlägen zu erwarten. Natürlicherweise hat das „Große Meer“ keinen Oberflächenabfluss, doch wurde aufgrund von Meliorationsmaßnahmen im Süden des Sees ein Abfluss zur Otterriede errichtet, um eine Entwässerung in die Wagenfelder Aue bei einem Wasserstand des Sees über 35,11 m über NN zu ermöglichen (NLWKN 2015).

3.3 Geologie

Die Geologie und Oberflächengestaltung des norddeutschen Tieflandes wurden durch verschiedene Eiszeiten des Pleistozäns geprägt. Das seit etwa 10.000 Jahren bestehende Holozän gestaltet diese eiszeitlich geprägten Formen fortlaufend (Heunisch et al. 2017). Ein geologischer Profilschnitt in unmittelbarer Nähe des „Großen Meeres“ zeigt den Einfluss der Eiszeiten in bis zu 60 Metern Tiefe. An der Oberfläche steht eine bis zu 20 m mächtige Ablagerungsschicht mit fluviatilen Sanden aus der Weichsel-Kaltzeit, welche mit zwei Beckenablagerungen ebenfalls aus der Weichsel-Kaltzeit stammend durchzogen ist. In den tieferen Schichten finden sich glazifluviale

Sande/Kiese des Drenthe-Stadiums und der Elster-Kaltzeit. Zudem befindet sich nordwestlich des Sees unterhalb der fluviatilen Sandschicht eine bis zu 20 m mächtige Ablagerung von Geschiebelehm und -mergel, ein typisches Sediment einer Grundmoräne (vgl. Anhang 2) (LBEG 2006b).

Die Geologie lässt vermuten, dass das „Große Meer“ Ursprung glazialer Prozesse ist. Vor etwa 14.000 Jahren soll sich das Gewässer als Depression in dem weichselzeitlichen Talsand als Toteissee entwickelt haben. Umrundet ist der See mit einer 2m mächtigen Flugsandschichtung, welche diese These unterstützt (vgl. Anhang 4, Abbildung 1) (LBEG 1991). Im weiteren Umfeld des Sees sind Flussablagerungen der Niedertrasse zu finden (Wasserwirtschaftsamt Sulingen 1984).

3.4 Hydrogeologie

Das Einzugsgebiet des „Großen Meeres“ wird dem Grundwasserkörper „Hunte-Lockergestein-rechts“ zugeordnet, welches sich durch hydraulische Grenzen sowie hydrogeologische Kriterien von anderen unterscheidet. Die Einteilung in Grundwasserkörper wurde im Rahmen der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) umgesetzt und verzichtet auf eine Differenzierung in die Tiefe (NLWKN (a)). Die oberflächennahen Gesteine im Umland des Sees bilden Porenwasserleiter mit hohen Durchlässigkeiten mit k_f – Werten von 1 bis 10^{-4} . Nordöstlich des Sees ab einer Entfernung von etwa 1.500 m findet sich weniger durchlässiger Geschiebemergel sowie Torfböden (vgl. Anhang 4, Abbildung 2) (LBEG 2000).

Die heterogene Schichtenabfolge von Sand, Kies, Beckenablagerungen und Geschiebelehm unter dem „Großen Meer“ bewirken ungleichmäßige Grundwasserverhältnisse. Der oberflächennahe Grundwasserleiter aus fluviatilen Sanden und Flugsanden aus der Weichsel-Kaltzeit wird mit zwei Schichten geringer Mächtigkeiten bestehend aus glazialen Beckensedimenten durchzogen, welche als Grundwasserhemmer wirken. Zudem wird eine Schicht aus Geschiebelehm/ -mergel, welche in Nord-West-Richtung eine Mächtigkeit von etwa 20 m erreicht, als Geringwasserleiter klassifiziert. Die tiefer liegenden Grundwasserleiter aus glazifluviatilen Sanden und Kiesen aus dem Drenthe-Stadium und Elster-Kaltzeit zeigen nur vereinzelt als Grundwasserhemmer fungierende Schichten mit lediglich geringen Mächtigkeiten (vgl. Anhang 3) (LBEG 2006b).

4. Material und Methoden

4.1 Sedimentologische Untersuchungen

Die Charakterisierung der Sedimente der Gewässersohle sowie des umliegenden Grundwasserleiters soll Aufschluss über die hydraulische Leitfähigkeit geben. Die Sedimentansprache erfolgte nach DIN 4022, in welcher die für die Hydrogeologie besonders entscheidende Korngrößenverteilung mit den Haupt- und Nebenanteilen sowie Beimengungen und sonstige Merkmale untersucht werden. Die Ansprache der Proben wurde vor Ort im Feld mittels Fingerprobe durchgeführt. Zur Charakterisierung der Gewässersohle wurde das „Großen Meer“ mit einem Schlauchboot befahren. Ziel war es, einen Überblick über die Gewässersohle des Sees zu erhalten und sandige Bereiche zu identifizieren. Die sechs Entnahmepunkte sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Probeentnahme erfolgte mit einem Kastengreifer.

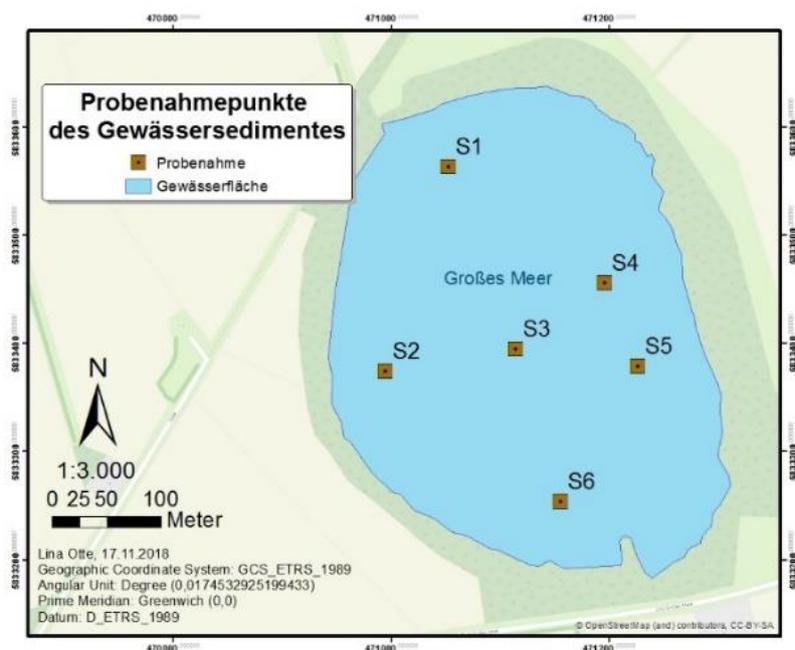


Abbildung 6: Probenahmepunkte des Gewässersedimentes des „Großen Meeres“.

Für die sedimentologische Untersuchung des umliegenden Grundwasserleiters wurden die Bohrkerns verwendet, welche beim Bau der Grundwassermessstellen dem Boden entnommen wurden (vgl. Kapitel 4.2). Dazu wurde das gesamte Bohrgut teufengerecht auf eine Plane gelegt. Die Bestimmung erfolgte auch hier vor Ort mittels Fingerprobe.

4.2 Untersuchung der hydraulischen Druckverhältnisse

4.2.1 Grundwassermessstellen und Lattenpegel

Zur Ermittlung der hydraulischen Druckverhältnisse zwischen Grund- und Oberflächenwasser wurden Grundwassermessstellen sowie ein Lattenpegel genutzt. Fünf Grundwassermessstellen wurden in gleichmäßigen Abständen im Baumgürtel des Naturschutzgebietes „Großes Meer“ eingebaut (vgl. Abbildung 7). Zur Zeit der Errichtung am 16.05.2018 befanden sich die Grundwassermessstellen in etwa 5 – 10 m Entfernung zum Seeufer. Die Messstellen wurden per Hand installiert. Zunächst wurde mit einem Eijkelkampbohrer ein etwas 1,5 m tiefes Loch gebohrt und eine Ansprache des Bohrgutes gehalten (vgl. Kapitel 4.1). Zum Einsetzen in das Sediment wurde eine Eisenstange in das Piezometerrohr gesteckt, um mittels Kunststoffhammer die Messstelle in den Boden zu treiben. Die verwendeten 2 m langen Piezometer bestehen aus mehreren Teilen: einem spitzen Rammstück, einem 1 m langem Filterrohr sowie dem ebenfalls 1 m langen Aufsatzstück. Vor dem Zusammenbau wurden die Gewinde zur Abdichtung mit Teflonband umbunden. Oben sind die Grundwassermessstellen mit einer Aufsatzkappe verschlossen und mit dem jeweiligen Namen markiert. Zur Benennung wurden die Abkürzung HM („Holter Meer“) mit Nummerierung gewählt. Bei der Grundwassermessstelle HM 5 wurde auf das Aufsatzrohr verzichtet, da an diesem Standort ein geringer Flurabstand vermutet wurde und zudem der dichte Boden eine tiefere Bohrung nicht ermöglichte. Nach Errichtung der Grundwassermessstellen wurden sie klargepumpt.

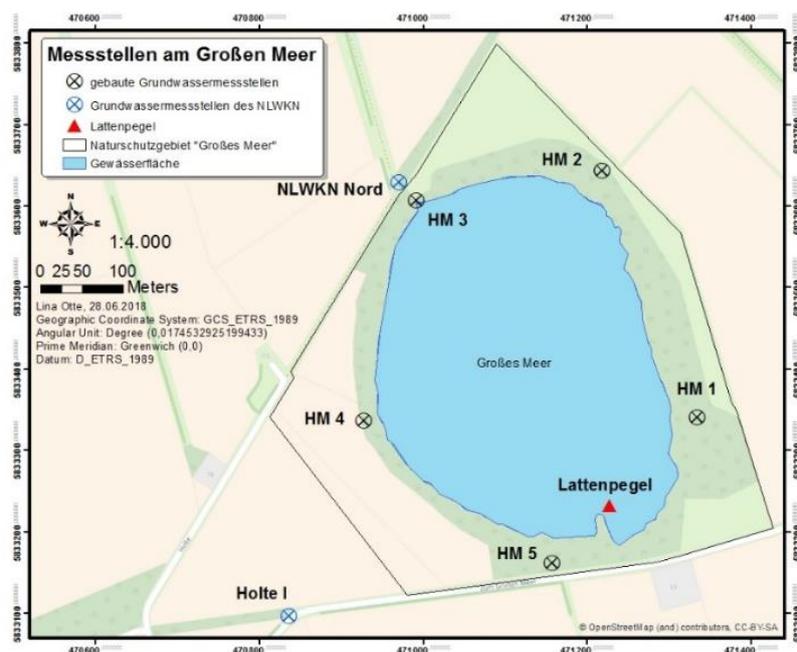


Abbildung 7: Lage der Grundwassermessstellen und des Lattenpegels am „Großen Meer“.

Neben den neu errichteten Grundwassermessstellen stehen zudem zwei weitere Grundwassermessstellen zur Verfügung. Beide Messstellen befinden sich in näherer Umgebung des Naturschutzgebietes: Die Grundwassermessstellen „NLWKN Nord“ nördlich und „Holte I“ südwestlich des Sees an der Zufahrtsstraße gelegen (vgl. Abbildung 7). Zuvor war angedacht, zusätzlich noch weitere, tiefe Grundwassermessstellen am östlichen Rand des oberirdischen Einzugsgebietes nahe der Straße zu installieren, um die Grundwasserbewegung östlich des Sees und somit den Einfluss des Grundwassers unterhalb der Ackerfläche besser untersuchen zu können (vgl. Abbildung 5). Da für den Bau der tiefen Grundwassermessstellen unter anderem eine Kampfmittelfreigabe erforderlich war, welche eine längere Wartezeit mit sich gebracht hätte, wurde dieser Überlegung im Rahmen der zeitlich eingeschränkten Bachelorarbeiten nicht weiter nachgegangen.

Zur Messung der Grundwasserstände in den Piezometern wurde ein Kabellichtlot verwendet. Um den Wasserstand des „Großen Meeres“ bestimmen zu können, befindet sich am Ende des Steges des ansässigen Fischereivereins Barnstorf e.V. ein Lattenpegel (vgl. Abbildung 7).

4.2.2 Einmessen der Messstellen

Die neu installierten sowie die bereits bestehenden Grundwassermessstellen NLWKN Nord und Holte I wurden auf die Höhe m über Normal-Null eingemessen. Dazu wurde die Rohroberkante (ROK) der Grundwassermessstellen genutzt, um mittels eines Abstiches den jeweiligen Grundwasserstand in m über NN zu errechnen. Zudem wurde der Lattenpegel eingemessen. Das Einmessen der Messstellen wurde mit dem Differential GPS „Stonex S9 III Plus GNSS“ durchgeführt.

Ein präzises Vermessen der vier Grundwassermessstellen HM 2, HM 5, Holte I sowie NLWKN Nord war mittels des DGPS nicht möglich. Ursache dafür war vermutlich das an diesen Standorten besonders dichte Blätterdach, welches den Empfang zu stark abschirmte. Da für die Untersuchung der Grundwasserstände ein möglichst genauer Höhenwert notwendig ist, wurde eine weitere Methode, das Nivellement, gewählt. Die Hoch- und Rechtswerte wurden aus den Daten der DGPS-Messung entnommen. Für das Nivellement wurden ein optisches Nivelliergerät und eine 4 m lange Nivellierlatte mit 1 cm Angabe verwendet. Ziel der Nivellementmethode ist es, mittels einer horizontalen Ziellinie den Unterschied der Geländehöhen – beziehungsweise in diesem Fall der Grundwasserrohroberkante – zu ermitteln und daraus die gesuchte Höhe in m über NN zu errechnen. An den vier oben genannten Grundwassermessstellen wurde dies wie folgt durchgeführt (vgl. Abbildung 8): Zunächst wurde ein markanter Bezugspunkt wie

beispielsweise ein Zaunpfosten mittels des DGPS eingemessen (Höhenfestpunkt H_A). Auf diesen Punkt wurde die Nivellierlatte gestellt und diese möglichst lotrecht an den seitlichen Griffen festgehalten. Nun wurde ein Standort für das Nivelliergerät gesucht. Idealerweise wird dieser so gewählt, dass durch das Drehen des Objektivs sowohl die Nivellierlatte am Bezugspunkt A als auch eine auf dem Grundwasserrohr stehenden Nivellierlatte am Messpunkt B zu sehen ist, um die Messung nur einmal durchführen zu müssen. Aus dem gesuchten Höhenunterschied

$$\Delta h = \text{abgelesener Rückblick (r)} - \text{abgelesener Vorblick (v)} \quad (7)$$

und der eingemessenen Höhe des Bezugspunkts H_A wird nun die Höhe des gesuchten Messpunktes H_B , welche der Grundwasserrohroberkante entspricht, berechnet:

$$\text{Höhe Rohroberkante} = H_A - \Delta h \quad (8)$$

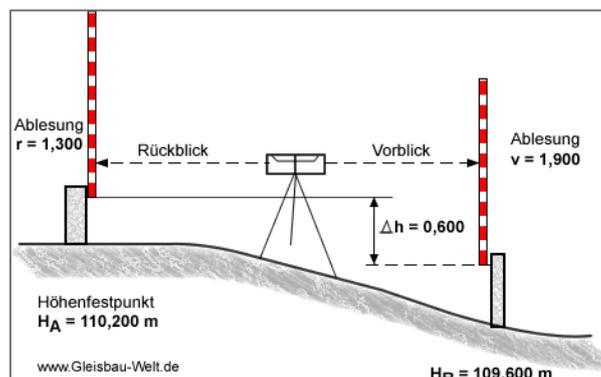


Abbildung 8: Ablaufschema für das Nivellieren mit optischem Nivelliergerät (Müller).

4.3 Direkte Messung des Wasserflusses mittels Seepage-Meter

Seepage-Meter (Lee 1977) ermöglichen eine direkte Messung des Flusses zwischen Grund- und Oberflächenwasser wie Seen, Flüssen und Feuchtgebieten (Kalbus et al. 2006, Rosenberry & LaBaugh 2008). Auch werden sie in Küstengebieten angewandt (Cable et al. 1997). Seepage-Meter-Messungen können nicht nur sehr geringe Flussraten quantifizieren sondern auch komplexe Grundwasserzu- und abflusssysteme in Seen untersuchen (Boyle 1994).

Das Grundkonzept eines Seepage-Meters besteht darin, einen Teil des Gewässersediments mit dem bodenlosen Zylinder abzudecken. An dem Zylinder wird über einen Schlauch eine Plastiktüte angebracht und die Volumenänderung des Wassers innerhalb der Tüte über einen bestimmten Zeitraum ermittelt (Rautio & Korkka-Niemi 2011).

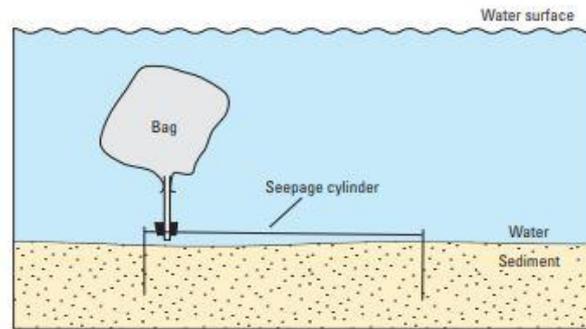


Abbildung 9: Grunddesign eines Seepage-Meters und Einbau in das Gewässersediment (Rosenberry & LaBaugh 2008).

Der Volumenfluss Q ($\text{l m}^{-2} \text{d}^{-1}$) wird nach Rautio & Korkka-Niemi (2011) mit folgender Formel ermittelt:

$$Q = \frac{(V_E - V_B)}{A} / t \quad (9)$$

- mit
- V_B = Wasservolumen im Plastikbeutel zu Beginn der Messung (l)
 - V_E = Wasservolumen im Plastikbeutel am Ende der Messung (l)
 - A = Sedimentoberfläche, abgedeckt durch das Seepage-Meter (m^2)
 - t = Messzeitraum, in welchem der Plastikbeutel angeschlossen ist (d)

Ein positiver Volumenfluss, der sich bei einem Wassergewinn im Plastikbeutel ergibt, zeigt einen Fluss vom Grundwasser in das Oberflächenwasser (effluentes Verhältnis) wohingegen ein negativer Volumenfluss, erkennbar am Wasserverlust im Plastikbeutel, einen Fluss vom Oberflächenwasser ins Grundwasser bedeutet (influentes Verhältnis) (Rautio & Korkka-Niemi 2011).

Am „Großen Meer“ wurden die Seepage-Meter-Messungen an zwei Standorten durchgeführt (vgl. Abbildung 10). Untersuchungsstandort „Nordufer“ sowie „Ostufer“ zeigten sandiges Sediment ohne Verschlammung. Die fünf verwendeten Seepage-Meter bestehen aus einem bodenlosen Zylinder aus Plastik mit einem Durchmesser von 0,59 m und einer Höhe von 0,15 m. Am Rand oder Oberseite ist ein kurzer Schlauch befestigt, welcher zudem mit einem Hahn versehen ist. Es wurden abnehmbare Plastiktüten (3 und 5 l) verwendet, in welche vor jedem Messvorgang ein vordefiniertes Wasservolumen von 1000 ml gefüllt wurde. Nachdem die Seepage-Meter in das Sediment eingebaut wurden, konnte der gegebenenfalls entstandene Druck sowie letzte Luftblasen über den offenen Schlauch entweichen. Kurz darauf wurde der Hahn verschlossen und die Plastiktüte angebaut. Es wurde beachtet, dass die Plastiktüte möglichst wenig Luft

enthält und sich unterhalb der Wasseroberfläche befindet, um die Druckbedingungen nicht zu beeinflussen.

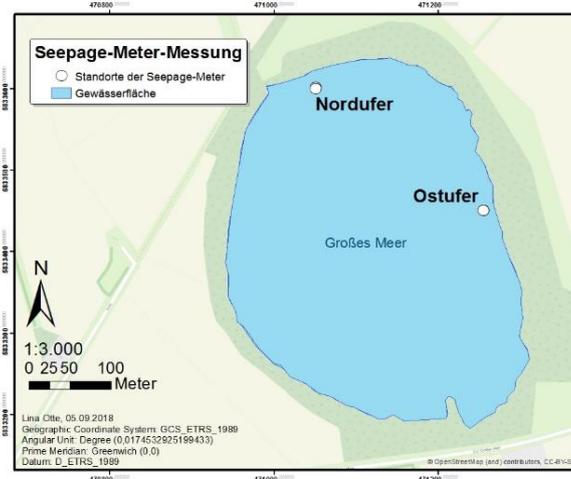


Abbildung 10: Lage der Untersuchungsstandorte „Nordufer“ und „Ostufer“ der Seepage-Meter Messung.

Da sich der Anbau der Plastiktüte unterhalb der Wasseroberfläche als schwierig erwies und hohe Fehlerwerte vermutet wurden, wurden drei der fünf Seepage-Meter wie folgt modifiziert: Der kurze, nur wenige Zentimeter lange Schlauch wurde durch einen längeren Schlauch ausgetauscht, der es ermöglichte, die Plastiktüte oberhalb der Wasseroberfläche anzubauen. Die Plastiktüte wurde dann für die Zeit der Messung mit Kabelbindern an den Halterungen der Seepage-Meter befestigt, damit diese nicht zur Wasseroberfläche aufsteigen konnten. Abbildung 11 zeigt die drei modifizierten Seepage-Meter vor dem Einbau in das Sediment.



Abbildung 11: Drei Seepage-Meter vor dem Einbau am Untersuchungsstandort „Ostufer“. Alle drei Seepage-Meter sind in der modifizierten Form mit längerem Schlauch ausgestattet.

4.4 Wasserbilanzansatz zur Abschätzung des Grundwasserzu- und abflusses

4.4.1 Die klimatische Wasserbilanz des „Großen Meeres“

Am „Großen Meer“ kann der oberirdische Zufluss innerhalb des Untersuchungszeitraumes vom 04.05 bis zum 27.06.2018 vernachlässigt werden, da das Grabensystem im Nordosten bei jeder Begehung kein Wasser in den See leitete beziehungsweise ausgetrocknet war. Auch fiel in dem Zeitraum kein starker Niederschlag, welcher möglicherweise einen kurzzeitigen Zufluss über das oberirdische Einzugsgebiet bedeutet hätte. Des Weiteren war ein oberirdischer Abfluss über das Rohr im Süden wegen zu geringer Wasserstände des „Großen Meeres“ nicht möglich.

Aufgrund des fehlenden Oberflächenzuflusses und –abflusses am „Großen Meer“ kann die Gleichung (2) mit dem Netto-Grundwasserfluss $G_{net} = G_+ - G_-$ wie folgt umgestellt werden:

$$\Delta V - G_{net} = N - E \quad (10)$$

Bei einem positiven G_{net} -Wert übersteigt der Zufluss des Grundwassers den Abfluss des Grundwassers und kann als Mindestmenge des Grundwasserzuflusses im Wasserhaushalt des Sees angesehen werden. Anders herum zeigt ein negativer Netto-Grundwasserfluss die Mindestmenge des Oberflächengewässers, welches in das Grundwasser infiltriert (Sacks et al. 1998).

Die Differenz der Niederschlagshöhe mit der potentiellen Höhe der Evaporation ist die klimatische Wasserbilanz (KWB), welche den Einfluss der zeitlichen klimatischen Gegebenheiten verdeutlicht. Positive Werte der KWB zeigen einen Wasserüberschuss, negative ein Wasserdefizit (Matthess & Ubell 2003):

$$KWB = N - E \quad (11)$$

Die Gleichung (11) kann in die Gleichung (10) eingesetzt und wie folgt nach G_{net} umgestellt werden:

$$G_{net} = \Delta V - KWB \quad (12)$$

Die Volumenänderung des „Großen Meeres“ (ΔV) kann mittels Lattenpegel gemessen werden. Über die Differenz mit der klimatischen Wasserbilanz kann der Netto-Grundwasserfluss des „Großen Meeres“ über einen bestimmten Zeitraum abgeschätzt werden.

4.4.1.1 Berechnung der Evaporation

Zur Berechnung der Evaporation von der freien Wasserfläche E_W wird das vereinfachte Kombinationsverfahren nach Richter (1984) angewendet, wobei angenommen wird, dass die potentielle Evaporation mit der tatsächlichen Evaporation übereinstimmt. Die Gleichung lautet wie folgt:

$$E_W = (0,327 \times (e_s(Tw_0) - e) + 0,00055 \times R_G - 0,035) \quad (13)$$

wobei $e_s(Tw_0)$ den Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur der Wasseroberfläche Tw_0 in hPa entspricht. Die Berechnung der Wasseroberflächentemperatur Tw_0 nach Gleichung

$$Tw_0 = p \times T^* + q \quad (14)$$

berücksichtigt, dass der Gang der Wasseroberflächentemperatur verzögert zur Lufttemperatur (T^*) verläuft. p und q sind Koeffizienten, welche die mittlere Tiefe des Sees einbeziehen (Richter 1977).

Der Sättigungsdampfdruck $e_s(Tw_0)$ in hPa wird nach folgender Gleichung errechnet (DVWK 1996):

$$e_s(Tw_0) = 6,11 \times \exp\left(\frac{17,62 \times Tw_0}{243,12 + Tw_0}\right) \quad (15)$$

Der Dampfdruck e wird über die relative Luftfeuchte U in % nach Gleichung (16) errechnet:

$$e = e_s(T) \times \frac{U}{100} \quad (16)$$

wobei der Sättigungsdampfdruck $e_s(T)$ in hPa aus der mittleren Tagestemperatur nach Gleichung (15) ermittelt wird (DVWK 1996).

Die Globalstrahlung R_G wird wie folgt nach Ångström (1924) berechnet,

$$R_G = R_0 \times \left(a + b \times \frac{S}{S_0} \right) \quad (17)$$

wobei R_0 die extraterrestrische Strahlung in W/m^2 als Tagesmittel angibt. a und b sind Koeffizienten der Globalstrahlung und S_0 die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer in h/d. Diese Werte können Tabellen des DVWK (1996) entnommen werden. Die tatsächliche Sonnenscheindauer S in h/d wird durch den Deutschen Wetterdienst (vgl. Abschnitt 4.4.1.2) zur Verfügung gestellt.

4.4.1.2 meteorologische Daten

Die für die Berechnung der klimatischen Wasserbilanz notwendigen meteorologischen Tagesdaten wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) ermittelt und online bereitgestellt. Die Werte zur Sonnenscheindauer und relativen Luftfeuchtigkeit wurden in ca. 16 km Entfernung in Diepholz gemessen, die täglichen Niederschlagsmengen bei Barnstorf in etwa 8 km Kilometer Entfernung (Deutscher Wetterdienst (DWD)).

4.5 Charakterisierung der Grundwasserfließrichtungen

Eine größere Anzahl von Grundwassermessstellen in einem Gebiet kann dazu dienen, die Fließrichtungen des lokalen und regionalen Grundwassers zu charakterisieren (Hölting & Coldewey 2013). Dazu wird aus den ermittelten Wasserständen ein Grundwassergleichenplan konstruiert, welcher – ähnlich wie Höhenlinien einer topografischen Karte – Linien gleicher Grundwasserhöhen in m über Normal-Null beinhaltet (Freeze & Cherry 1979, Hölting & Coldewey 2013). Da Grund- und Oberflächenwasser miteinander interagieren, werden nicht nur die Wasserstände der Grundwassermessstellen, sondern auch die der Oberflächengewässer gemessen und in den Grundwasserplan einbezogen. Es ist darauf zu achten, dass sich die Verfilterungen aller Grundwassermessstellen im gleichen Grundwasserstockwerk befinden. Dies lässt sich über den geologischen Aufbau des Untergrundes abschätzen. Zudem sollten alle Wasserstanddaten möglichst zeitgleich aufgenommen werden, um ein aktuelles Bild der Grundwasserstände ohne Verfälschung, etwa durch plötzlichen Niederschlag zu erhalten. Aus den Grundwassergleichen können das Grundwassergefälle ermittelt sowie die Fließrichtung abgeschätzt werden. Es wird deutlich, dass sich schon visuell über die Anordnung der Grundwassergleichen Rückschlüsse auf die Durchlässigkeit ziehen lassen. Je näher die Grundwassergleichen aneinander liegen, desto größer das hydraulische Gefälle und desto geringer die hydraulische Durchlässigkeit des Sedimentes (Hölting & Coldewey 2013).

Zusätzlich zu den sieben Grundwassermessstellen im direkten Umfeld des „Großen Meeres“ (HM 1-5, NWLKN Nord und Holte I) wurden weitere acht Grundwassermessstellen untersucht. Diese liegen im Umkreis von etwa 12,5¹ Kilometern zum See und befinden sich im Grundwasserkörper „Hunte Lockergestein rechts“ (vgl. Abbildung 12). Die Stichtagsmessung dieser Messstellen wurde durch den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küstenschutz

¹ gemessen mit ArcGIS

und Naturschutz (NLWKN) durchgeführt. Zusätzlich stehen Pegel­daten der drei Oberflächengewässer Dümmer, Wagenfelder Aue und Hunte zur Verfügung.

Mittels eines Grundwassergleichenplanes soll so die Fließrichtung des Grundwassers hin und weg vom „Großen Meer“ untersucht werden, um die mögliche Herkunft der Nährstoffe lokalisieren zu können.

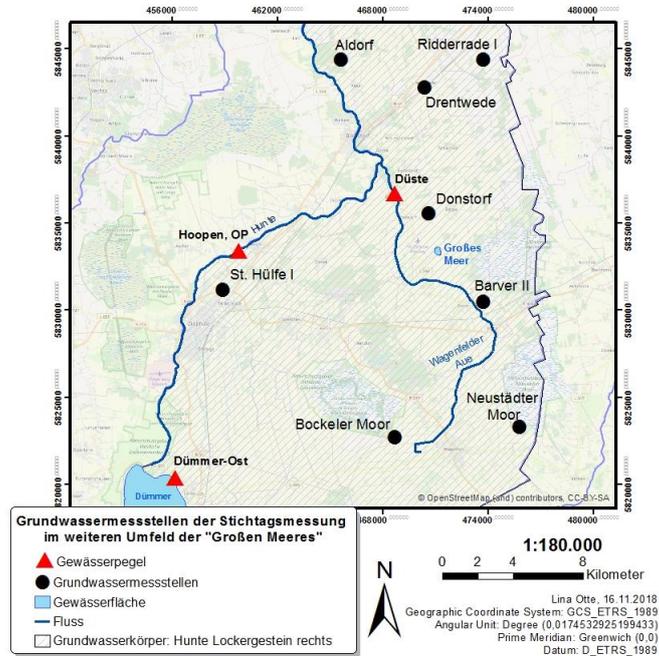


Abbildung 12: Lage der Messstellen zur Konstruktion eines Grundwassergleichenplanes im weiteren Umfeld des „Großen Meeres“.

5. Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

5.1 Charakterisierung der Sedimente

5.1.2 Beschaffenheit der Gewässersedimente

Die sedimentologische Ansprache der Gewässersohle mittels Fingerprobe identifiziert Bereiche mit höherem organischen Anteil beziehungsweise jene mit höherem mineralischen Anteil. Die Sedimentprobe S1 im Norden und S6 im Süden werden als Feinsand mit geringem Anteil organischen Materials charakterisiert. Nach DIN 18130-1 werden Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f = 10^{-4}$ bis 10^{-5} erwartet, welche als durchlässig angesehen wird. Ebenfalls geringe Anteile an organischem Material weisen die Proben mittig und nordöstlich davon auf (S3, S4). Diese werden als schluffige Sande beschrieben, welche eine schwächere Durchlässigkeit mit einem k_f – Wert von 10^{-5} bis 10^{-6} aufweisen. Das Sediment im Westen (S2) sowie im Osten (S5) besitzen einen hohen Anteil organischer Materialien und werden als Schlamm charakterisiert. Dementsprechend werden schwache bis sehr schwache Durchlässigkeiten erwartet (Neher 2008). Eine Übersicht der Ergebnisse der Feldansprache sind in Abbildung 13 dargestellt. Die dazugehörige Datentabelle ist in Anhang 5 angelegt.

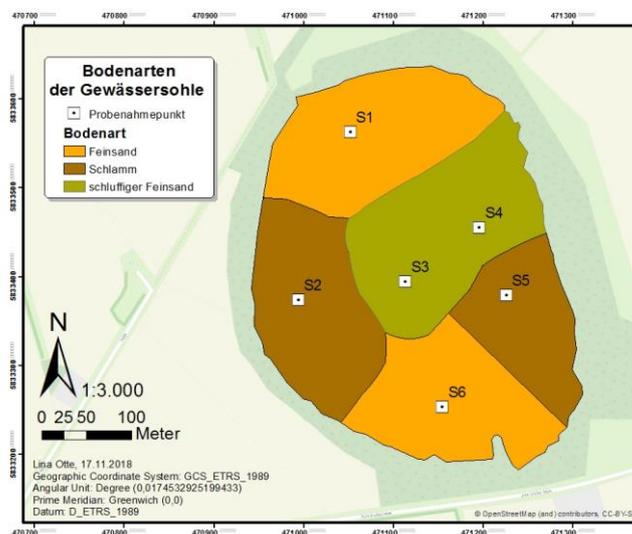


Abbildung 13: Überblick über die Verteilung der Bodenarten in der Gewässersohle des „Großen Meeres“ basierend auf den sechs Probenahmen mittels Kastengreifer.

Zusätzlich zur sedimentologischen Ansprache mittels Fingerprobe wurde das „Große Meer“ im Rahmen weiterer Untersuchungen¹ nahe des Ufers ringsum durchlaufen. Dabei wurden im Norden und Osten sandige Sedimente sowie eine mächtige

¹ Das „Große Meer“ wurde für den Einbau der „Seepage-Meter“ (vgl. Kapitel 4.3 der vorliegenden Arbeit) sowie zur Beprobung mit Porenlanzen (vgl. Müller (2018)) betreten.

Schlammsschicht vor allem im westlichen Teil des Sees festgestellt. Auch im Süden nahe des Steges wurden Schlammsschichten vermerkt.

5.1.2 Beschaffenheit der Sedimente im näheren Umfeld des „Großen Meeres“ und Lage der Verfilterung der Grundwassermessstellen

Zur Charakterisierung des umliegenden Sediments des „Großen Meeres“ stehen die Bohrkerne des Grundwassermessstellenbaues zur Verfügung. Für die neu errichteten Grundwassermessstellen HM 1-5 wurden Schichtenverzeichnisse und Ausbaupläne erstellt. Die Bohrgutansprache charakterisiert vor allem Feinsande und Mittelsande, welche durchlässige bis stark durchlässige Lockersedimente bilden (k_f – Wert von 10^{-3} bis 10^{-5}). Die Grundwassermessstelle HM 2 zeigt ab 0,80 Tiefe eine als tonigen Schluff charakterisierte Schicht. Nach DIN 18130-1 ist diese Schicht mit dem k_f – Wert von 10^{-6} bis 10^{-9} als schwach bis sehr schwach durchlässig anzusehen. Die Verfilterungen der Grundwassermessstellen befinden sich im durchlässigen Lockersediment der Fein- und Mittelsande. Die letzten etwa 0,30 m der Grundwassermessstelle HM 2 ist im Schluff eingebaut (vgl. Anhang 5 und 6).

Die Grundwassermessstelle Holte I zeigt wie die Grundwassermessstellen HM 1-5 eine anstehende Schicht aus Feinsanden in bis 2,80 Tiefe. Danach folgen zwei Schichten aus Schluff (1,60 und 1,10 m Mächtigkeit), welche sich mit Feinsanden abwechseln. In 9,80 m Tiefe ist eine 1,70 m mächtige Schluffschicht, welche als Geschiebelehm charakterisiert wird und als Grundwasserhemmer wirkt. Die danach folgende Schicht wird als Mittelsand klassifiziert. Die Verfilterung dieser Messstelle ist in 23 – 26 m Tiefe und damit unterhalb der angesprochenen Schluffschicht (vgl. Anhang 7, Abbildung 1 und 2). Zur Grundwassermessstelle NLWKN Nord ist weder ein Schichtenverzeichnis, noch ein Ausbauplan auffindbar. Die Messstelle ist allerdings über 30 Meter tief, wie eine Messung mittels Lichtlot ergab.

Es wurde ein Profilschnitt in Nordost-Südwest-Richtung durch den See erstellt (vgl. Abbildung 14). Dazu wurden sowohl die Schichtenverzeichnisse als auch das „Große Meer“ mit Wasserstand, Wassertiefe¹ und Schlammstärke¹ berücksichtigt. Die Verfilterung der Grundwassermessstellen ist ebenfalls eingezeichnet. Der Profilschnitt

¹ Der Wasserstand des „Großen Meeres“ in der Zeit der Datenerhebung zur Wassertiefe und Schlammstärke ist nicht weiter bekannt. Die Daten wurden im Jahr 2011 durch den NLWKN aufgenommen (vgl. Anhang 1: Abbildung 1 und 2). Um den See dennoch in den Profilschnitt einzubeziehen, wurde von einem Wasserstand von etwa. 35 m über NN ausgegangen.

gibt einen Überblick über die vorliegende Hydrogeologie sowie der Grundwassermessstellen.

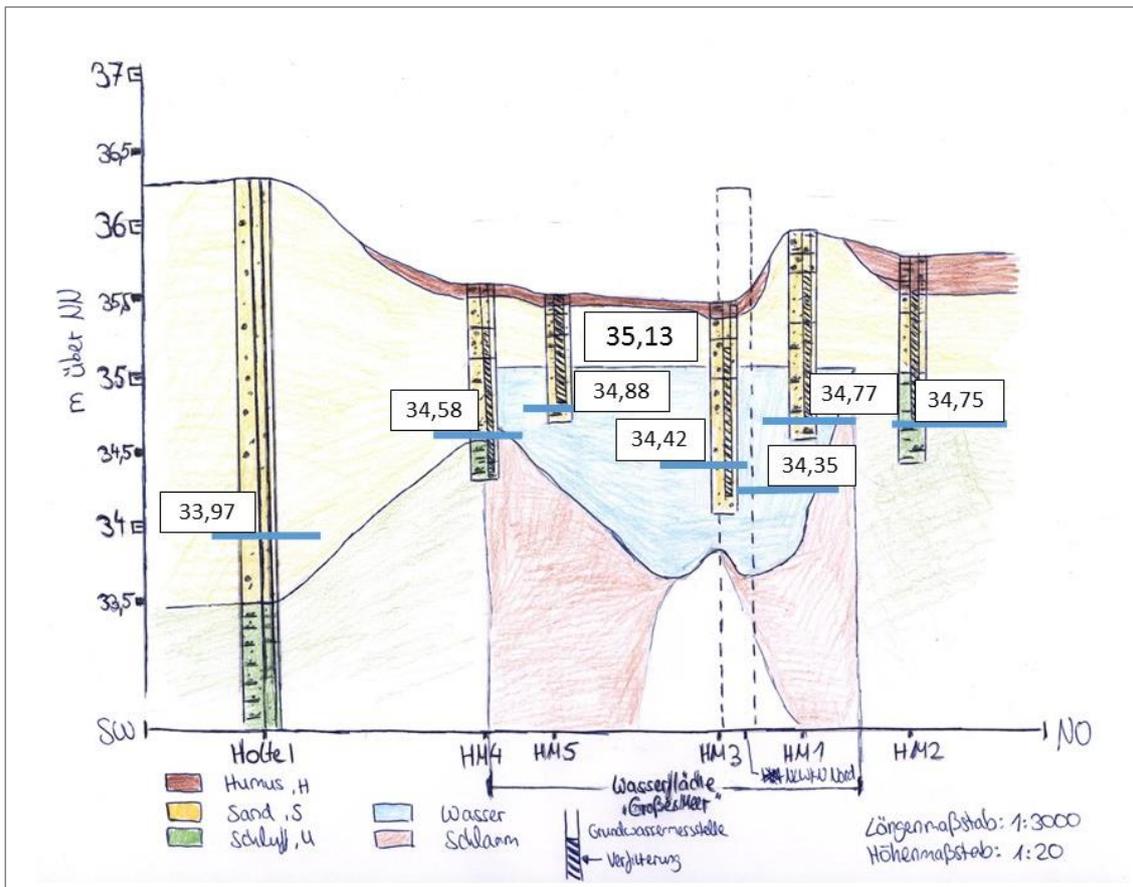


Abbildung 14: Profilschnitt mit Verfiltration durch das „Große Meer“ in Südwest-Nordost-Richtung. Die Grundwassermessstelle NLWKN Nord ist aufgrund fehlender Daten lediglich durch Striche angedeutet. Die blauen Markierungen zeigen den gemessenen Wasserstand vom 13.06.2018. Die Wasseroberflächen in m über NN sind angegeben. Die Wassertiefe und Schlammsschicht sind anhand der Daten des NLWKN eingetragen (vgl. Anhang 1, Abbildung 1 und 2).

5.2 Charakterisierung der hydraulischen Druckverhältnisse am „Großen Meer“

5.2.1 Wasserstandsdynamik

Die Wasserstände des Sees und des Grundwassers, gemessen in den sieben umliegenden Grundwassermessstellen, wurden zwischen dem 04.05. und 27.06.2018 in teils unregelmäßigen Abständen aufgezeichnet. Die Wasserstandsdynamik ist der Abbildung 15 zu entnehmen. Die zugehörigen Datentabellen sind in Anhang 8 und 9 zu finden.

Zu drei Untersuchungstagen (13., 20. und 27.06.2018) liegen sowohl die

Wasserstandsmessungen aller sieben Grundwassermessstellen als auch die des Sees vor. An allen weiteren Tagen wurden aus organisatorischen Gründen nur vereinzelte Messstellen untersucht, da es beispielsweise nicht möglich war, den Steg mit dem sich dort befindlichen Lattenpegel zu betreten. Am 22.05 begann die Wasserstandsmessung der Grundwassermessstellen HM 1-5, nachdem sie eine Woche zuvor installiert wurden. Diese Messstellen wurden an jedem Untersuchungstag vollständig überprüft. Es konnten allerdings nicht alle neu errichteten Grundwassermessstellen (HM 1-5) über den gesamten Untersuchungszeitraum zum Messen des Grundwasserstandes genutzt werden. In der Messstelle HM 5 wurde lediglich am ersten Untersuchungstag ein Grundwasserstand gemessen. Ab dem zweiten Untersuchungstag konnte zudem HM 1 nicht mehr zu Bestimmung der Grundwasseroberfläche genutzt werden, da kein Abstich messbar war. Es schließt sich allerdings daraus, dass der Wasserstand unterhalb des möglich messbaren Wertes liegen muss.

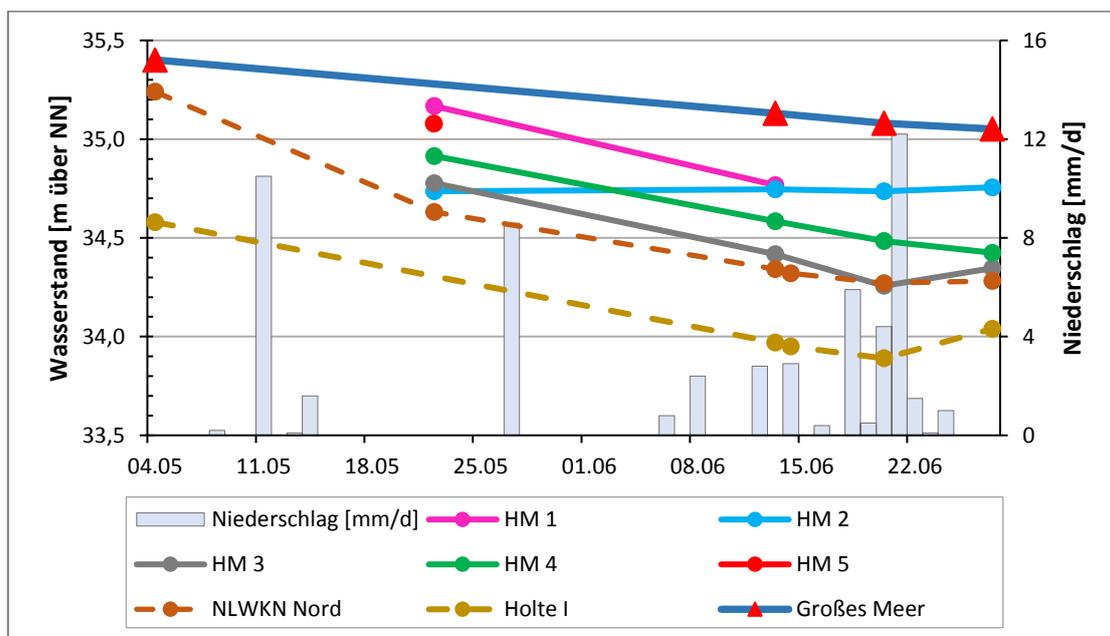


Abbildung 15: Wasserstandsdynamik der Grundwassermessstellen HM 1-5, NLWKN Nord und Holte I sowie des Seespiegels. Die tiefen Grundwassermessstellen (NLWKN Nord, Holte I) sind gestrichelt dargestellt.

Auffällig ist, dass die Wasserstände des Grundwassers stets unterhalb des Seespiegels liegen und demnach zu jeder Zeit influente Verhältnisse vorliegen: Das Seewasser infiltriert in das Grundwasser. Des Weiteren zeigen die Wasserstände über den Untersuchungszeitraum hinweg fallende Tendenzen. Die einzige Ausnahme bildet HM 2. Diese Messstelle zeigt stagnierende Wasserstände zwischen 34,75 und 34,76 m über NN. Der Wasserstand in der Grundwassermessstelle NLWKN Nord hingegen fällt

innerhalb des Untersuchungszeitraumes um 0,81 m ab. Nachdem es vom 18.06. bis 21.06 täglich Niederschlag mit vergleichsweise hohen Mengen von durchschnittlich 5,75 mm pro Tag gab, waren bei der Hälfte der Messstellen (HM 2, HM3, NLWKN Nord, Holte I) ein höherer Wasserstand als am vorherigen Untersuchungstag messbar. Der Wasserstand der Grundwassermessstelle Holte I nimmt mit 0,15 m am meisten zu. Die Messungen des Lattenpegels am „Großen Meeres“ zeigen über den gesamten Zeitraum hinweg keinen Anstieg des Wasserspiegels.

Die gemessene Wasserstandsdynamik lässt vermuten, dass vor der Untersuchung die Grundwasserstände im Bereich der neu errichteten Messstellen oberhalb des Seespiegels lagen (mit Ausnahme von HM 2). Auch die Dynamik der Grundwassermessstelle NLWKN Nord lässt diese Vermutung zu. Dies würde bedeuten, dass vor dem Untersuchungszeitraum effluente Verhältnisse vorlagen und das Grundwasser ins das Oberflächenwasser exfiltrierte. Anders sieht der Verlauf der Grundwassermessstelle Holte I aus. Da die Steigung des Wasserstandes dieser Messstelle und des Wasserspiegels ähnlich verlaufen, ist weniger gewiss, wie die hydraulischen Verhältnisse vor Beginn der Untersuchung waren. Auffällig ist zudem, dass die tieferen Grundwassermessstellen, vor allem Holte I, einen geringeren Grundwasserstand als die neu errichteten Messstellen haben.

5.2.2 Grundwasserfließverhältnisse im näheren Umfeld des „Großen Meeres“

Zusätzlich zur zeitlichen Auswertung der Wasserstände in Grund- und Oberflächengewässer werden die hydraulischen Potentiale im Bereich des „Großen Meeres“ räumlich dargestellt. Dazu wurde ein von Hand gezeichneter Grundwassergleichenplan für den 13.06.2018 konstruiert (vgl. Abbildung 16). Unter der Annahme, dass eine hydraulische Anbindung zwischen dem Grund- und Oberflächengewässer besteht, wurde die Seefläche des „Großen Meeres“ in den Gleichenplan einbezogen. Die senkrecht zu den Grundwassergleichen stehenden Fließpfade visualisieren die vorliegenden influenten Verhältnisse: Die Fließrichtung zeigt die Infiltration des Oberflächenwassers in das umliegende Grundwasser. Anhand der Abstände zwischen der Grundwassergleichen lassen sich schon visuell auf Unterschiede zwischen dem Grundwassergefälle schließen.

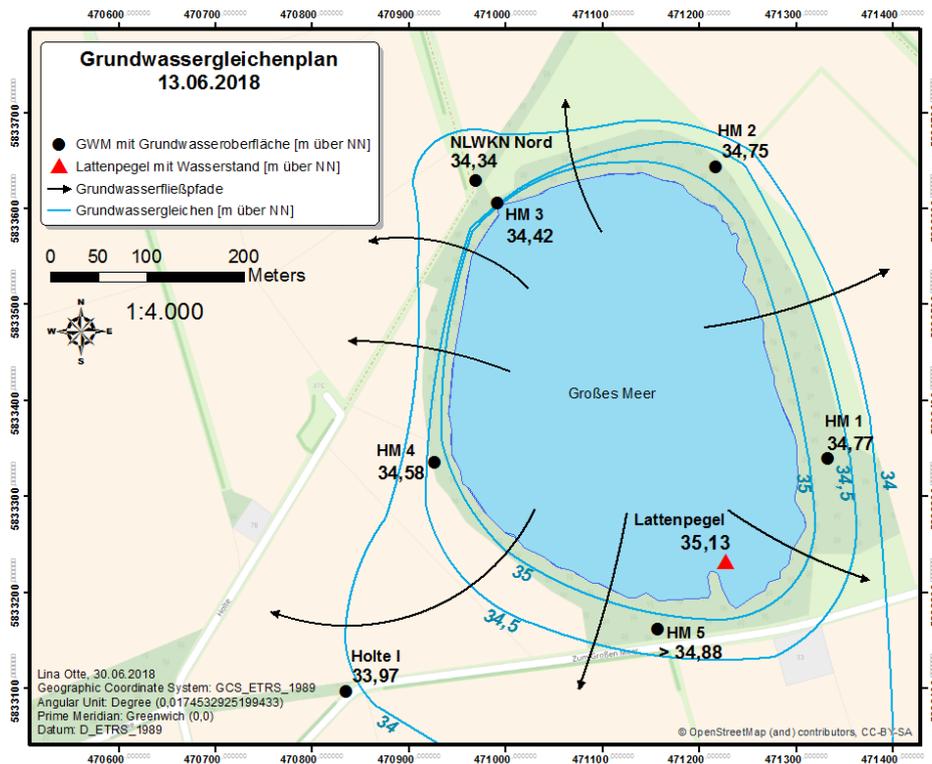


Abbildung 16: Konstruierter Grundwassergleichenplan in der näheren Umgebung des „Großen Meeres“ für den 13.06.2018. Die gemessenen Wasserstände sind aufgeführt. Da in der Grundwassermessstelle HM 5 kein Wasserstand ermittelt werden konnte, liegt dieser ausgehend der Verfilterung unterhalb 34,88 über NN. Die schwarzen Pfeile visualisieren die Grundwasserfließrichtung.

Ausgehend von der Entfernung zwischen der Ufergrenze und den jeweiligen Messstellen¹ wurden hydraulische Gradienten berechnet. Auf der Ostseite des Sees lässt sich anhand der Messstellen HM 1 und HM 2 ein hydraulischer Gradient von 0,011 beziehungsweise 0,009 berechnen. Am Nordufer bei der Grundwassermessstelle HM 3 wird das stärkste Grundwassergefälle mit 0,179 festgestellt. An der Grundwassermessstelle HM 4 liegt der hydraulische Gradient bei einem Wert von 0,03. Schon in dem Gleichenplan ist die Grundwassermessstelle Holte I aufgrund der großen Abstände zwischen der Gleichen auffällig. Der errechnete hydraulische Gradient beträgt hier lediglich 0,005. Da sich die hydraulischen Gradienten der zwei weiteren Untersuchungstage kaum von denen hier dargestellten unterscheiden, ist von einer ähnlichen Anordnung der Grundwassergleichen, wie in Abbildung 16 gezeigt, auszugehen (vgl. Anhang 10).

¹ gemessen mit ArcGIS

5.3 Regionale Grundwasserströmung

Abbildung 17 zeigt die regionale Grundwasserströmung für den 25.06.2018¹ basierend auf der Stichtagsmessung von acht Grundwassermessstellen des NLWKN. Über die eingezeichneten Fließpfade kann die Grundwasserfließrichtung innerhalb des Grundwasserkörpers „Hunte Lockergestein rechts“ abgeschätzt werden. Um die Wasserstände der oberirdischen Gewässer mit den erstellten Grundwassergleichen zu vergleichen, sind drei Wasserstände (Dümmer, Wagenfelder Aue und Hunte) aufgeführt. Die zugehörige Datentabelle ist in Anhang 11 zu finden.

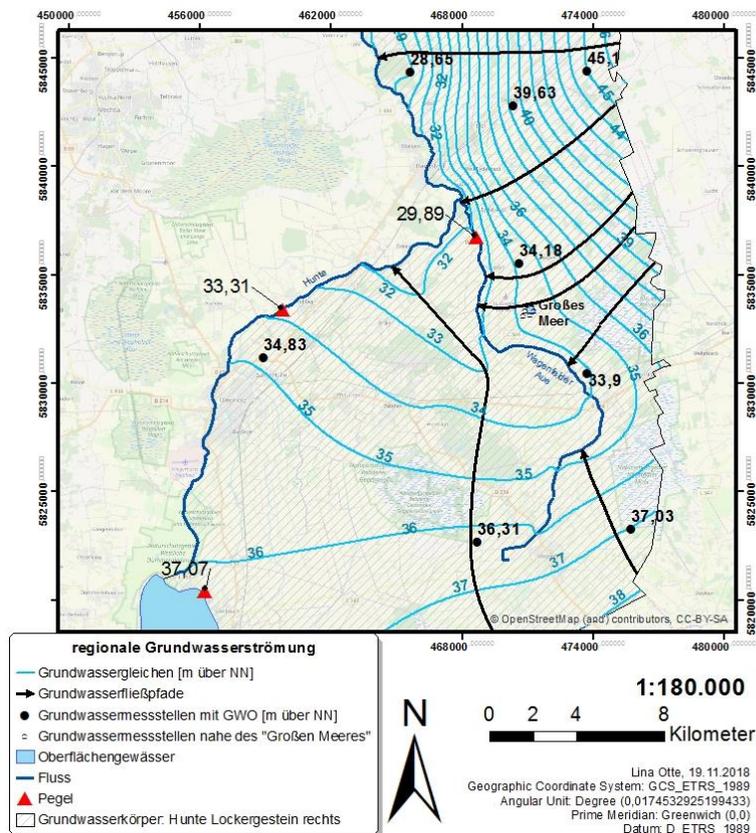


Abbildung 17: Grundwassergleichenplan mit regionaler Grundwasserströmung.

Im nördlichen Bereich der Karte zeigt sich eine Grundwasserströmung von Nord-Ost nach Süd-West beziehungsweise nördlich der Grundwassermessstellen Aldorf und Ridderrade I (28,65 und 45,1 m über NN) eine Fließrichtung von Osten nach Westen. Im südlichen Teil der Karte, vor allem im Bereich zwischen der Hunte und der Wagenfelder Aue, ist eine Süd-Nord Fließrichtung erkennbar. Im Bereich des Großen Meeres zeigt sich eine Grundwasserfließrichtung von Nordosten hin zur Wagenfelder Aue im Westen.

¹ Interpolation erstellt mit ArcGIS

Basierend auf den Grundwassergleichen der Höhen 35 und 36 m über NN und einem Abstand¹ von etwa 1.200 m ergibt sich ein hydraulischer Gradient von gerundet 0,001.

Die Wasserstände des Dümmers (Oberflächengewässer im Südwesten) und der Hunte stimmen mit denen mittels von ArcGIS interpolierten Grundwassergleichen überein, wohingegen die Gleichen im Gebiet des Pegels der Wagenfelder Aue zu hoch angesetzt sind. Allerdings liegt dieses Gebiet recht weit entfernt vom „Großen Meer“, wodurch davon auszugehen ist, dass sich dieser Fehler nicht auf die Grundwassergleichen im Bereich des Sees auswirkt.

Abbildung 18 gibt einen Überblick über die errechneten hydraulischen Gradienten ausgehend der Wasserstandsmessungen am „Großen Meer“ sowie des erstellten regionalen Grundwassergleichenplans. Der Schnitt ist in Ost-West-Richtung angesetzt. Es wird deutlich, dass sich die lokalen Grundwassergefälle direkt am See, ausgehend der Grundwassermessstellen HM 1 und HM 4, von der Region unterscheiden. In weiterer Entfernung in Ost sowie Westrichtung zeigen sich größere hydraulische Gradienten. Des Weiteren zeigen die Grundwasserfließpfade östlich des Sees in entgegengesetzte Richtungen.

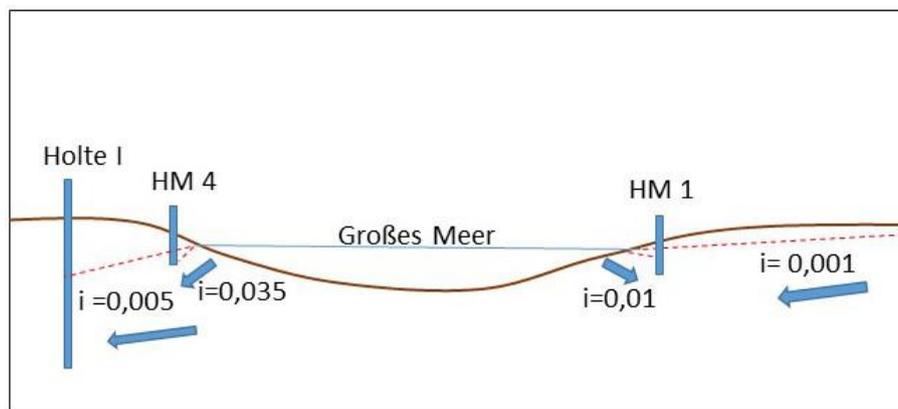


Abbildung 18: Schematischer Schnitt der hydraulischen Gradienten am „Großen Meer“ in Ost-West-Richtung. Die errechneten Werte der hydraulischen Gradienten sowie die Fließrichtungen sind dargestellt.

5.4. Ergebnisse der Wasserflussmessung mittels Seepage-Meter

Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse der sieben Seepage-Meter-Messungen. Zwei weitere Messungen wurden aufgrund von Messfehlern (undichte Plastiktüten) ausgeschlossen. Der gemessene Volumenfluss Q variierte zwischen 2,63 - 7,70 l m⁻² d⁻¹ (vgl. Anhang 12).

¹ gemessen mit ArcGIS

Bei der Messung N5 konnte keine Volumenänderung festgestellt und folglich kein Volumenfluss gemessen werden. Da alle anderen Seepage-Meter-Messungen positive Volumenflüsse zeigen, ist von effluenten Verhältnissen auszugehen, bei denen das Grundwasser in das Oberflächenwasser exfiltriert.

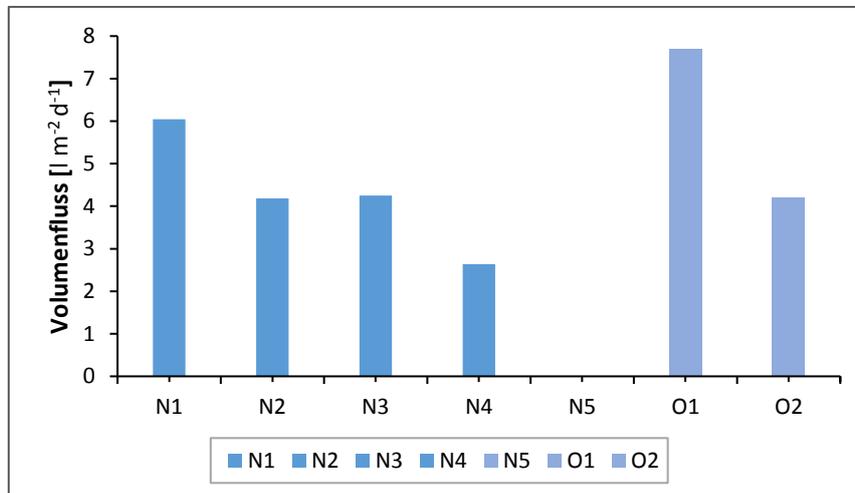


Abbildung 19: Der Volumenfluss des Grundwassers in das Oberflächenwasser gemessen mittels Seepage-Meter. Die Messungen wurden an zwei Standorten (N=Nordufer und O=Ostufer) durchgeführt.

Wie der Tabelle 3: Überblick über die Seepage-Meter-Messungen am „Großen Meer“ zu entnehmen, wurden zunächst die Messungen N1-N4 im Nordufer vorgenommen. Der Messzeitraum der Messung N4 wurde doppelt so lang gewählt, um die Volumenänderung im Plastikbeutel mit den anderen Messungen zu vergleichen. Auffällig ist, dass sich trotz verdoppelter Messzeit die Volumenänderung nicht von denen der anderen Messungen unterscheidet. Die Seepage-Meter-Messungen wurden am 12.07.2018 wiederholt, wobei nun am Nordufer kein Volumenfluss festgestellt werden konnte, obwohl ein langer Zeitraum gewählt wurde. Es wurden zusätzlich zwei Seepage-Meter mit einem längeren Schlauch verwendet, welche das Anbauen der Tüte oberhalb der Wasseroberfläche ermöglichten. Um Fehler zu minimieren, wurde eine lange Messzeit gewählt (vgl. Abbildung 19).

Tabelle 3: Überblick über die Seepage-Meter-Messungen am „Großen Meer“

| Seepage-Meter | Datum | Bemerkung | Zeit [min] | ΔV [ml] |
|---------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| N1 | 27.06.2018 | kurzer Schlauch | 30,5 | 35 |
| N2 | 27.06.2018 | kurzer Schlauch | 31,5 | 25 |
| N3 | 27.06.2018 | kurzer Schlauch | 31 | 25 |
| N4 | 27.06.2018 | kurzer Schlauch | 60 | 30 |
| N5 | 12.07.2018 | kurzer Schlauch | 455 | 0 |
| O1 | 12.07.2018 | langer Schlauch | 308 | 450 |
| O2 | 12.07.2018 | langer Schlauch | 301 | 240 |

5.5 klimatische Wasserbilanz

Abbildung 20 zeigt den Niederschlag, die Evaporation und die sich daraus ergebende klimatische Wasserbilanz für das „Große Meer“ zwischen dem 04.05 und 27.06.2018. Die dazugehörige Datentabelle ist dem Anhang 13 zu entnehmen. Die Tageswerte der klimatischen Wasserbilanz zeigen größtenteils Wasserdefizite, welche einen Wert von bis zu $-5,84$ mm/Tag einnehmen. Lediglich an sechs Tagen ist ein Wasserüberschuss mit einem Maximalwert von $7,84$ mm am 21.06 erkennbar.

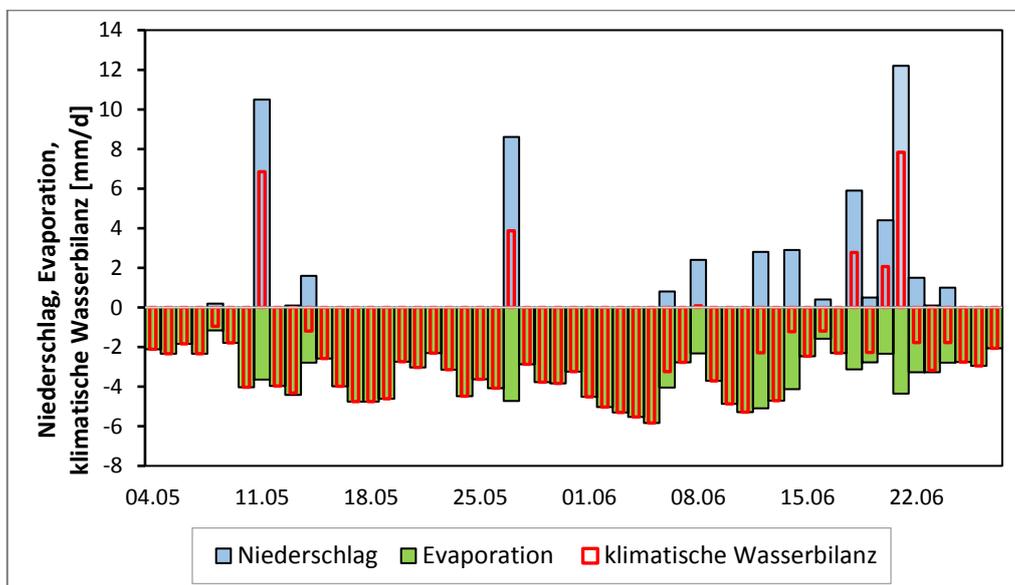


Abbildung 20: Niederschlag, die berechnete Evaporation von der freien Wasserfläche sowie die KWB.

Die errechneten Werte der klimatischen Wasserbilanz wurden kumuliert, um sie mit der Veränderung des Wasserspiegels des „Großen Meeres“ über denselben Zeitraum zu vergleichen (vgl. Abbildung 21). Auffällig ist, dass der Wasserspiegel schneller als die Kurve der klimatischen Wasserbilanz sinkt. Über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg fällt die Kurve der klimatischen Wasserbilanz auf -136,2 mm. Der Wasserstand des Sees wurde im Untersuchungszeitraum in regelmäßigen Abständen sieben Mal gemessen. Der Wasserstand fällt über den gesamten Zeitraum hinweg recht gleichmäßig auf -350 mm ab. Nach Formel (12)(12) ergibt sich über den Untersuchungszeitraum ein Netto-Grundwasserfluss von -213,8 mm, welches einem täglichen Fluss von etwa -3,89 mm entspricht. Bei einer Seefläche von 110.200 m² versickern innerhalb des Untersuchungszeitraumes so etwa 23.556 m³ des Seewassers ins Grundwasser. Über den Untersuchungszeitraum hinweg ist der See vor allem durch dem Abfluss in das Grundwasser und der Verdunstung beeinflusst (vgl. Tabelle 4).

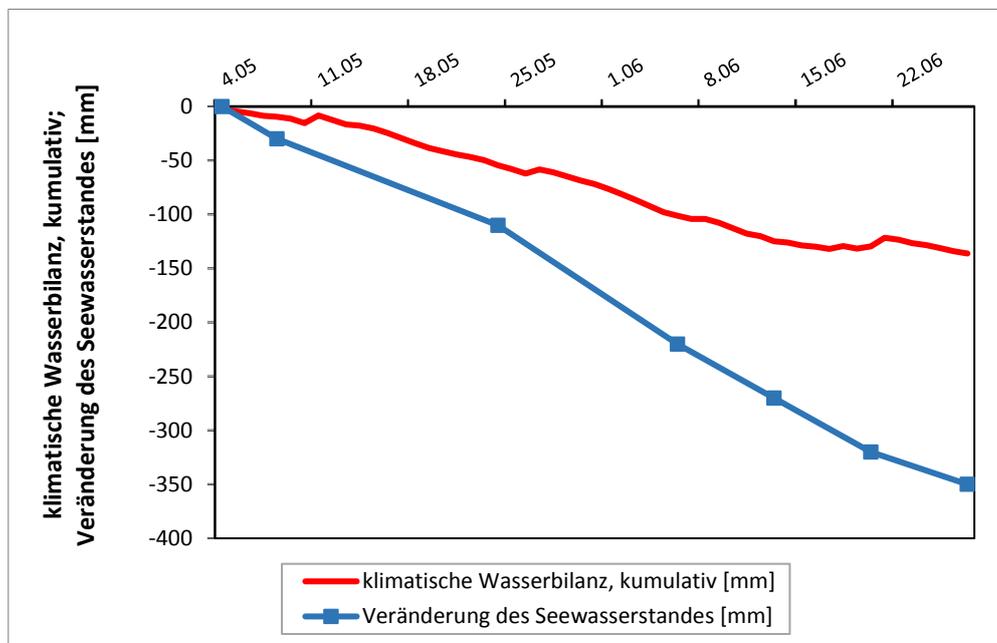


Abbildung 21: kumulierte klimatische Wasserbilanz sowie die Veränderung des Seespiegels

Tabelle 4: Netto-Grundwasserbilanz über den Zeitraum vom 04.05 – 27.06.2018

| Niederschlag | Evaporation | Δ Seespiegel | Grundwasseranteil |
|--------------|-------------|--------------|-------------------|
| 56 mm | -192 mm | -350 mm | -214 mm |

6. Diskussion

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollen die Wechselwirkungen zwischen dem Oberflächenwasser des „Großen Meeres“ und des umliegenden Grundwassers untersucht werden, auch um als Grundlage für die verzahnte Bachelorarbeit zur hydrochemischen Charakterisierung (Müller 2018) zu dienen. Ziel ist es, mit den Erkenntnissen beider Arbeiten die Rolle des Grundwassers für die Nährstoffbelastung des Sees zu untersuchen.

6.1 Charakterisierung der Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser

Die sedimentologische Untersuchung des unmittelbaren Umfeldes des „Großen Meeres“ ermittelte Feinsande bis Mittelsande, welches sich mit dem vom Wasserwirtschaftsamt Sulingen (1984) beschriebenen Flugsandschichtung deckt. Der Grundwasserleiter kann demnach als durchlässig bis stark durchlässig eingestuft werden. An der Gewässersohle werden geringere Durchlässigkeiten aufgrund der als Feinsande und Schluff charakterisierten Sedimente erwartet. Zudem zeigt sich vor allem im Westen eine aufliegende Schlammschicht, welche laut einer Untersuchung des LGEB bis zu 2,5 m mächtig sein kann. Da eine Verschlammung die Gewässersohle abdichtet und damit die Durchlässigkeit als nur schwach bis sehr schwach einzustufen ist, können die Austauschprozesse in diesen Bereichen kaum bis gar nicht stattfinden (Hölting & Coldewey 2013). Demnach stehen vor allem der östliche Teil des Sees sowie die ufernahen Bereiche mit dem umliegenden Aquifer in Kontakt, allerdings ist auch dieser aufgrund eher schwacher Durchlässigkeiten eingeschränkt.

Ausgehend der Wasserstandsunterschieden zwischen dem Wasserspiegel des „Großen Meeres“ und der umliegenden Grundwasseroberfläche sowie der bereits beschriebenen Durchlässigkeit der Sedimente kann über den Untersuchungszeitraum im Frühsommer 2018 von influenten Verhältnissen ausgegangen werden. Das Oberflächenwasser infiltriert in das Grundwasser. Dies deckt sich mit den Untersuchungen des NLWKN (2015), welche Anhand von Pegelständen zwischen 1980 und 1984 sowie zwischen 1990 und 1996 für die Sommermonate einen Abstrom des Seewassers in das Grundwasser ergaben. Da die Grundwassermessstellen HM 1-5 den See gleichmäßig umranden, sind Bereiche mit entgegengesetzter Interaktionsrichtung auszuschließen. Die Bestimmung der Wasserstände des Grund- und Oberflächengewässers kann zwar gewisse Messungenauigkeiten beinhalten, doch bewegen sich diese im geringen

Zentimeterbereich. Sowohl das Einmessen mittels Differential GPS als auch die Verwendung eines optischen Nivelliergerätes gelten als sehr genau (Mischke, Stonex Deutschland). Die möglichen Fehler, welche sich dem Ablesen des Lattenpegels und des Lichtlotes ergeben, schwanken voraussichtlich zwischen 1-2 Zentimetern, welches für eine Umkehr der Interaktionsrichtung nicht ausreichend ist. Anzusprechen sind allerdings die Messdaten der Grundwassermessstellen HM 1 und HM 2. Aufgrund der großen Abstiche von knapp unter der Piezometerlänge können diese Messungen durch eine Restmenge Wasser oder Schlamm innerhalb Piezometer verfälscht sein. Für diese Theorie spricht auch die Wasserstandsdynamik der Messstelle HM 2, da sich diese aufgrund recht stagnierender Wasserstände von den anderen Grundwassermessstellen unterscheidet. Nichtsdestotrotz würde ein zu gering gemessener Abstich kein Widerspruch zu influenten Verhältnissen bedeuten, da der tatsächliche Wasserstand den Wert der Potentialdifferenz verkleinern würde.

Die Wasserbilanzrechnung des „Großen Meeres“ zeigt, dass der Wasserstand innerhalb des Untersuchungszeitraumes vor allem durch die Verdunstung und den Abfluss in das Grundwasser beeinflusst ist. Folglich kann auch hier von einem Versickern des Seewassers in das Grundwasser ausgegangen werden. Die errechnete Verdunstung von insgesamt ca. 190 mm innerhalb der etwa zweimonatigen Untersuchung scheint zunächst im Vergleich zur mittleren jährlichen Verdunstung von ca. 660 mm recht hoch (Wasserwirtschaftsamt Sulingen 1984). Allerdings ist anzumerken, dass das Klima zur Zeit der Untersuchung verhältnismäßig warm war und zudem eine hohe Sonnenscheindauer gemessen wurde. Als größtmögliche Fehlerquelle kann die Berechnung der Verdunstung angenommen werden. Es besteht die Annahme, dass die potentielle Verdunstung der tatsächlichen Verdunstung entspricht. Dies würde bedeuten, dass an allen Bereichen des Sees optimale Bedingungen herrschen. Da aber zum Beispiel der See an einigen Stellen aufgrund des Baumgürtels überschattet ist, kann dies nicht der Fall sein. Zudem wurden die Daten zur Berechnung der Evaporation, wie auch die Niederschlagsdaten, nicht in unmittelbarer Nähe zum „Großen Meer“ gemessen, sondern stammen aus 8 und 16 km Entfernung. Wie Winter (1981) erläutert, ist die Verwendung regionaler Daten zur Ermittlung lokaler Wasserhaushaltsgrößen mit Ungenauigkeiten verbunden. Daher können die Daten zur Errechnung der Verdunstung sowie die Niederschlagsdaten nur als Näherung angesehen werden. Des Weiteren betrachtet die errechnete klimatische Wasserbilanz lediglich die Evaporation der freien Wasseroberfläche. Die Transpiration der sich im Wasser befindlichen Röhrichtbestände sowie der weiteren Vegetation im Uferbereich werden nicht einbezogen. Wie Mauritz (2010) kartierte, befindet sich vor allem am Nord-Ost-Ufer ein flächiger Weidensumpf

(insgesamt 2,80 ha) sowie ein Röhrichtbestand (0,53 ha) im Süden, welche große Mengen Wasser in die Atmosphäre abgeben können. Wie eine Ermittlung der Gesamtverdunstung einer schilfbestandenen Wasserfläche zeigte, kann der Schilfbestand die Verdunstung im Vergleich zu einer unbewachsenen Wasserfläche mindestens verdoppeln (Tuschl 1967, Darnhofer 1971). Kusnezov (1969) geht von einem groben Richtwert vom Verhältnis von 1,5 zwischen der Verdunstung bewachsener und unbewachsener Wasserflächen aus. Es ist daher anzunehmen, dass die tatsächliche Verdunstung unterschätzt wurde, was einen geringeren Netto-Grundwasserfluss zur Folge hätte.

Die Ergebnisse der Wasserflussmessung mittels Seepage-Meter werfen einige Fragen auf, da effluente Verhältnisse gemessen wurden. Dies ist ein Widerspruch zu den ermittelten hydraulischen Druckverhältnissen zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser sowie dem errechneten Netto-Grundwasserfluss. Die Ergebnisse der Wasserflussmessung gilt es unter Berücksichtigung der bereits dargestellten Erkenntnisse zu bewerten. Wie bereits im Abschnitt 4.3 beschrieben, wurde ein zweiter Untersuchungstag veranlasst, da die ersten Seepage-Meter-Messungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse brachten. Grund dafür war die stetig gleiche Volumenänderung sowie vielmehr der positive Volumenfluss, welcher das Exfiltrieren des Grundwassers in das Oberflächenwasser bedeutet. Doch zeigt dies einen Widerspruch zu den Ergebnissen der anderen Methoden, die influente Verhältnisse aufzeigen. Seepage-Meter ermöglichen es, durch die direkte Messung in der Austauschzone zwar sehr komplexe Interaktionen zu untersuchen und damit innerhalb eines Sees Bereiche mit Infiltrations- und Exfiltrationen zu messen (Boyle 1994), doch sind die Grundwassermessstellen zur Untersuchung der Potentialdifferenzen gleichmäßig um den See verteilt. Der zweite Untersuchungstag am 12.07 liegt zwar zeitlich außerhalb der Messungen der Potentialdifferenzen, allerdings kann aufgrund des weiter sinkenden Seespiegel weiterhin von influenten Verhältnissen ausgegangen werden. Allerdings zeigen die Ergebnisse des zweiten Untersuchungstages wiederholt effluente Verhältnisse, auch obwohl zwei Seepage-Meter mit längerem Schlauch zur Dezimierung der Fehlerhaftigkeit verwendet wurden. Da sich die insgesamt sieben Seepage-Meter-Messungen in ihren Messstandorten unterscheiden, ist ein Vergleich aller Messungen nicht ohne weiteres möglich. Es ist davon auszugehen, dass die Seepage-Meter-Messung stark fehlerhaft ist.

Bei der Verwendung von Seepage-Meter können gewisse Fehler entstehen. Zum einen kann das Ablesen des Messzylinders zu Ungenauigkeiten führen, auch da sowohl vor der eigentlichen Messung zunächst das vordefinierte Wasservolumen abgemessen als auch am Ende des Versuches das Wasservolumen bestimmt werden muss. Des Weiteren kann es beim Anbau der Plastiktüte zum Wasseraustausch kommen. Lee (1977) geht von ungefähr 5 ml aus, die unvermeidbar beim Anbau in die Plastiktüte gelangen. Allerdings ist von viel größeren Fehlern auszugehen, da zum Beispiel bei der Messung O1 eine Volumenzunahme von 450 ml gemessen wurde. Möglicherweise ist dies mit dem Einbau der Seepage-Meter in die Gewässersohle zu erklären. Rosenberry & LaBaugh (2008) erläutern, dass das Sediment beim Installieren der Zylinder zunächst stark komprimiert wird und die natürlichen Wasserströmungen durch das Sediment gestört werden. Es ist demnach notwendig eine gewisse Wartezeit zwischen dem Einbau und der Verwendung einzuplanen, um die Messung nicht zu verfälschen. Die erforderliche Wartezeit ist an das Sediment anzupassen und kann zwischen mehreren Wochen und wenigen Minuten liegen (Rosenberry & LaBaugh 2008). Studien zeigten, dass in sandigen Sedimenten, wie auch bei den Untersuchungsstandorten vorliegend, Wartezeiten von 30 Minuten ausreichend sein können (Rosenberry & Morin 2004, Rosenberry & LaBaugh 2008). Bei der Seepage-Messung im „Großen Meer“ wurde zwischen der Installation und dem Beginn der Messung keine Wartezeit eingeplant beziehungsweise lag diese aus organisatorischen Gründen lediglich bei wenigen Minuten. Inwieweit diese Zeitspanne nicht ausreichend war, um die Druckverhältnisse über den dünnen Schlauch auszugleichen, ist ungewiss. Es würde allerdings eine Erklärung dafür sein, dass sich zu viel Wasser in den Plastiktüten befand und dadurch effluente Verhältnisse gemessen wurden.

Wie bereits erwähnt versickert im Frühsommer 2018 das Oberflächenwasser an allen Bereichen des Sees in das naheliegende Grundwasser. Im Kontrast dazu zeigt die ermittelte regionale Grundwasserströmung im gleichen Zeitraum allerdings eine von Nordosten hin zur Wagenfelder Aue im Westen verlaufende Fließrichtung. Dies würde bedeuten, dass das Grundwasser den See durchströmt. Diesen Widerspruch gilt es zu diskutieren. Die Datenbasis, auf der die Konstruktion des regionalen Grundwassergleichenplans beruht, scheint zunächst unzureichend, doch zeigen die ermittelten Grundwassergleichen eine klare Übereinstimmung mit denen des LBEG (2008) (vgl. Anhang 14). Folglich kann generell von einer regionalen Grundwasserfließrichtung von Osten nach Westen ausgegangen werden. Dennoch ist ungewiss, wie hoch das Grundwasser östlich des Sees innerhalb des

Untersuchungszeitraumes stand und folglich wie die Fließrichtung verläuft. Die lokalen Wasserstandsdaten beruhen lediglich auf den flachen, nahe des Sees liegenden Grundwassermessstellen. Die anfangs geplanten tiefen Grundwassermessstellen im Osten des Einzugsgebietes wären demnach elementar gewesen, um diese Frage zu beantworten. Es ist davon auszugehen, dass der See und der umliegende Grundwasserkörper innerhalb des Untersuchungszeitraumes ein eigenes kleines System bilden und sich von dem regionalen Grundwassersystem abgrenzen. Dieses mögliche Phänomen wird auch bei anderen Seen (Winter 1998) beschrieben. Möglicherweise bewirkt die Transpiration der großen Vegetationsbestände ein Absinken des Grundwassers im ufernahen Bereich, wohingegen in weiterer Entfernung vom See der Grundwasserstand höher ist. Dies würde bedeuten, dass der Grundwasserfluss von Osten besteht, aber die Vegetation diesen beeinflusst und so ein Exfiltrieren in den See verhindert (MEYBOOM 1966, Winter & Rosenberry 1995, Winter 1999).

Die Wasserstandsdynamik im Frühsommer 2018 lässt vermuten, dass vor dem Untersuchungszeitraum der Grundwasserstand oberhalb des Seespiegels lag, welches ein Zuströmen des Grundwassers in das Oberflächenwasser bedeutet. Ausgehend der regionalen Grundwasserfließrichtung sowie der durchlässigeren Sedimente im Osten des Sees ist die Anstromrichtung dann vor allem von Nordosten zu erwarten. Diese Vermutung deckt sich mit den Ergebnissen der 1980 bis 1984 durchgeführten Messungen des Grundwasserstandes und des Seespiegels, welche effluente Verhältnisse im Zeitraum von November bis April sowie influente Bedingungen in den restlichen Zeiten des Jahres ergaben (Wasserwirtschaftsamt Sulingen 1984). In den Wintermonaten ist von einer höheren Grundwasserneubildungsrate auszugehen. Des Weiteren liegt der Zeitraum von November bis April außerhalb der Vegetationsperiode, weshalb ein Ansteigen des Grundwassers im Umfeld des Sees zu erwarten ist und zu einem Wechsel von influenten zu effluenten Verhältnissen führt.

6.2 Das Grundwasser als Nährstoffquelle für das „Große Meer“?

Zeitgleich zur Charakterisierung der Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktion wurden hydrochemische Untersuchungen durchgeführt, welche die Nährstoffsituation des „Großen Meeres“ und des umliegenden Grundwassers darlegen. Es konnten sowohl höhere Nährstoff- als auch Ionenkonzentrationen im Grundwasser als im See festgestellt werden (Müller 2018). Da zur Zeit der Untersuchung im Frühsommer 2018 allerdings influente Verhältnisse vorliegen, können die Nährstoffe nicht in den See transportiert werden. Mit der erwarteten Umkehr der Interaktion in den Wintermonaten ist dies allerdings möglich. Da vor allem mit einem Zustrom aus Nordost-Richtung gerechnet wird, ist die dortige Grundwasserbelastung für den Nährstoffeintrag von großer Bedeutung. Ausgehend der Tatsache, dass die Untersuchungen lediglich einen kurzen Zeitraum im Frühsommer 2018 abdecken, ist allerdings nicht abzuschätzen, wie hoch der Grundwasserzu- und abfluss im Winterhalbjahr ausfällt. Die geplante Extensivierung der Ackerfläche in Nordosten des Einzugsgebietes erweist sich zur Reduzierung des Nährstoffeintrages in den See als sinnvoll: Neben dem Nährstoffeintrag ausgehend des Zuflussgrabens ist zudem ein Eintrag über das Grundwasser in den Wintermonaten anzunehmen.

7. Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass das Sediment der Gewässersohle des „Großen Meeres“ als eher schwach durchlässig charakterisiert werden kann. Zudem wird dies an einigen Stellen, vor allem in der westlichen Seehälfte, durch eine Schlammschicht verstärkt. Im Frühsommer 2018 sind influente Verhältnisse festzustellen, bei denen das Oberflächenwasser in das Grundwasser versickert. Widersprüchlich dazu zeigen Wasserflussmessungen innerhalb der Austauschzone ein Exfiltrieren des Grundwassers in das Oberflächenwasser, doch wird dies aufgrund der gemessenen hydraulischen Potentialunterschiede und einer Wasserbilanzrechnung als fehlerhaft angesehen. Des Weiteren wird von einem hohen Einfluss der umliegenden Vegetation ausgegangen, welche nicht nur eine hohe Verdunstung aus dem Oberflächengewässer, sondern auch aus dem Grundwasser bewirken können.

Für den Frühsommer 2018 kann hinsichtlich des Nährstoffeintrages kein Einfluss des Grundwassers festgestellt werden, da dies nicht in den See exfiltriert. Voraussichtlich wird sich aber die Interaktionsrichtung aufgrund steigender Grundwasserneubildung und der Vegetationsruhe in den Wintermonaten umkehren, wodurch eine Beeinflussung des

Grundwassers zu erwarten ist. Das Ausmaß der Interaktion ist angesichts des untersuchten Zeitraumes nicht bekannt, doch ist der Grundwasserzstrom aus Nordosten zu erwarten.

Um genauere Aussagen über die Interaktionsrichtung und -intensität in den Wintermonaten treffen zu können, sollten die Wasserstände des Oberflächenwassers und Grundwassers im Jahresverlauf aufgezeichnet werden. Auch empfiehlt es sich, weitere Grundwassermessstellen östlich des Einzugsgebiets zu errichten, um den Anstrombereich besser untersuchen zu können. Auch sollten die Nährstoffkonzentrationen des Grund- und Oberflächenwassers weiterhin überblickt werden.

8. Literaturverzeichnis

- Ångström, A.: Solar and terrestrial radiation (1924)
- Barr, A.D., Turner, J.V., Townley, L.R.: WSiBal: a coupled water, conservative solute and environmental isotope mass balance model for lakes and other surface water bodies. *IHAS Publ. (Int. Assoc. Hydrol. Sci.)*(262), 539–544 (2000)
- Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., Thiele-Bruhn, S., Welp, G.: *Lehrbuch der Bodenkunde*; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (2010)
- Boyle, D.R.: Design of a seepage meter for measuring groundwater fluxes in the nonlittoral zones of lakes - Evaluation in a boreal forest lake. *Limnol. Oceanogr.*(39 (3)), 670–681 (1994)
- Cable, J.E., Burnett, W.C., Chanton J. P., Cable, P.H.: Field Evaluation of Seepage Meters in the Coastal Marine Environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*(45), 367–375 (1997)
- Darnhofer, T.: Verdunstungsstudien im Schilfgürtel des Neusiedler Sees. Dissertationsschrift, 202 S. (1971)
- Deutscher Wetterdienst (DWD). verfügbar unter:
https://www.dwd.de/DE/leistungen/weste/westexl/weste_xl.html. Zugegriffen: Daten bezogen am: 23. Juni 2018 und 29. Juni 2018
- DVWK: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. ; 1996., Bonn (1996)
- Freeze, R.A., Cherry, J.A.: *Groundwater*. 604 S.; Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ (1979)
- Hagerthey, S.E., Kerfoot, W.C.: Groundwater flow influences biomass and nutrient ratios of epibenthic algae in a north temperate seepage lake
- Heunisch, C., Caspers, G., Elbracht, J., Langer, A., Röhling, H.-G., Schwarz, Carsten, Streif, Hansjörg: *Erdgeschichte von Niedersachsen: Geologie und Landschaftsentwicklung* (2017)
- Hölting, B., Coldewey, W.G.: *Hydrogeologie*; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (2013)
- Kalbus, E., Reinstorf, F., Schirmer, M.: Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*(10), 873–887 (2006)
- Karan, S., Kidmose, J., Engesgaard, P., Nilsson, B., Frandsen, M., Ommen, D.A.O., Flindt, M.R., Andersen, F.Ø., Pedersen, O.: Role of a groundwater–lake interface in controlling seepage of water and nitrate. *Journal of Hydrology* **517**, 791–802 (2014). doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.011
- Kusnezov, V.J.: *Die Berechnung der Verdunstung freier und bewachsener Wasserflächen mit Hilfe von Daten experimenteller Untersuchungen* (1969)
- LBEG: *Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000 - Grundkarte* (1991)

- LBEG: Geologische Übersichtskarte von Niedersachsen 1 : 500 000 (2000)
- LBEG: Hunte Lockergestein rechts, Geologischer Schnitt S2: Bearbeitung: Merzbach, G.; Zeichnung: Ebeling, L. (2006a)
- LBEG: Hunte Lockergestein rechts, hydrostatisgrafischer Schnitt S2: Bearbeitung: Merzbach, G.; Zeichnung: Ebeling, L. (2006b)
- LBEG: Hydrogeologische Karte von Niedersachsen 1 : 50 000 - Lage der Grundwasseroberfläche (2008)
- Lee, D.R.: A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. *Limnol. Oceanogr.*(22), 140–147 (1977)
- Liebscher, H.-J., Baumgartner, A. (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrologie. 673 S.; Borntraeger, Berlin (1990)
- Massmann, G.: Veranstaltung zum Modul: Bodenkunde, Hydrologie und Ökosystem, Carl v. Ossietzky Universität Oldenburg, WS 2016/2017 (2016)
- Matthess, G., Ubell, K.: Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt: Mit 83 Tabellen. 575 S., 2. Aufl. Lehrbuch der Hydrogeologie, / hrsg. von Georg Matthess ; Bd. 1; Borntraeger, Berlin (2003)
- Mauritz, M.: Entwicklung und aktuelle Situation der Vegetation und Standortbedingungen des NSG "Großes Meer" (Landkreis Diepholz): Bachelorarbeit der Universität Bremen (2010)
- MEYBOOM, P.: Unsteady groundwater flow near a willow ring in hummocky moraine. *Journal of Hydrology*(4), 38–62 (1966)
- Mischke, A.: Vorlesung zur Veranstaltung Vermessungskunde, Skript Teil 6: Nivellement; Hochschule Bochum
- Müller, F.: Die hydrochemische Charakterisierung von Grund- und Oberflächenwasser in der Nähe des Großen Meeres: Bachelorarbeit der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (2018)
- Müller, M. Ablaufschema für das ordnungsgemäße Nivellieren. <https://www.gleisbauwelt.de/lexikon/gleisbau-und-instandhaltung/gleisvermessung/visieren/>. Zugegriffen: 15. November 2018
- Neher, H.P.: Zeitabhängiges Materialverhalten und Anisotropie von weichen Böden – Theorie und Anwendung, Dissertation, Universität Stuttgart (2008)
- NLWKN: Vorbereitende Planung zur Sanierung des "Großen Meeres" bei Barver (LK Diepholz): Bearbeiter: Apel, A. (2015)
- NLWKN: Vereinfachte Flurbereinigung Donstorf Vorbereitende Planung zur Sanierung des „Großen Meer“ (2016)
- NLWKN (a) Grundwasserkörper.
<https://www.umwelt.niedersachsen.de/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht/nutzung/hydrogeologie/koerper/grundwasserkoeper-105236.html>. Zugegriffen: 14. November 2018
- NLWKN (b) Steckbrief Naturschutzgebiet "Großes Meer".
http://www.nlwkn.niedersachsen.de/naturschutz/schutzgebiete/einzelnen_naturschu

- tzgebiete/steckbrief-naturschutzgebiet-groes-meer-39924.html. Zugriffen: 13. November 2018
- Pfaffenberg: Gutachten, "Das Große Meer bei Holte" (1941)
- Press, F., Siever, R., Grotzinger, J.: Allgemeine Geologie. 735 S., 5. Aufl. Spektrum-Lehrbuch; Spektrum Akad. Verl., Berlin (2011)
- Rautio, A., Korkka-Niemi, K.: Characterization of groundwater-lake water interactions at Pyhäjärvi, a lake in SW Finland. *Boreal Environment Research*(16), 363–380 (2011)
- Richter, D.: Zur einheitlichen Berechnung der Wassertempertaur und der Verdunstung von freien Wasserflächen auf statistischer Grundlage; *Abh. Meteor. Dienst der DDR* 16 (1977)
- Richter, D.: Klimadaten der Deutschen Demokratischen Republik: Ein Handbuch für die Praxis. Reihe B, Band 6 "Verdunstung", Potsdam (1984)
- Rosenberry, D.O., LaBaugh, J.W.: Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water; *U.S. Geological Survey Techniques and Methods 4–D2* (2008)
- Rosenberry, D.O., Morin, R.G.: Use of an electromagnetic seepage meter to investigate temporal variability in lake seepage. *Ground Water*(v. 42, no. 1), 68–77 (2004)
- Sacks, L.A., Swancar, A., Lee, T.M.: Estimating ground-water exchange with lakes using water-budget and chemical mass-balance approaches for ten lakes in ridge areas of Polk and Highlands counties, Florida. *Water-Resources Investigations Report* (1998)
- Sophocleous, M.: Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal* **10**(1), 52–67 (2002). doi: 10.1007/s10040-001-0170-8
- Stephenson, D.A.: GROUNDWATER FLOW SYSTEM ANALYSIS IN LAKE ENVIRONMENTS, WITH MANAGEMENT AND PLANNING IMPLICATIONS. *J Am Water Resources Assoc* **7**(5), 1038–1047 (1971). doi: 10.1111/j.1752-1688.1971.tb05024.x
- Stonex Deutschland: Einfach Messen: Stonex S9 III Plus GNSS
- Tuschl, P.: Die Transpiration von *Phragmites communis* im geschlossenen Bestand des Neusiedler Sees. Dissertation, 73 S. (1967)
- Wasserwirtschaftsamt Sulingen: Untersuchung zur Planung von Sanierungsmaßnahmen (1984)
- Winter, C.T.: Relation of streams, lakes and wetland to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal* **7**, 28–45 (1999)
- Winter, T.C.: Uncertainties in estimating the water balance of lakes. *Water Resources Bulletin*(17), 82–115 (1981)
- Winter, T.C.: Ground water and surface water: A single resource. vii, 79. U.S. Geological Survey circular, Bd. 1139; U.S. Geological Survey, Denver, Colo. (1998)

Winter, T.C., Rosenberry, D.O.: The interaction of ground water with prairie pothole wetlands in the Cottonwood Lake area, east-central North Dakota, 1979–1990. *Wetlands* 15, 193–211 (1995)

Anhang 1

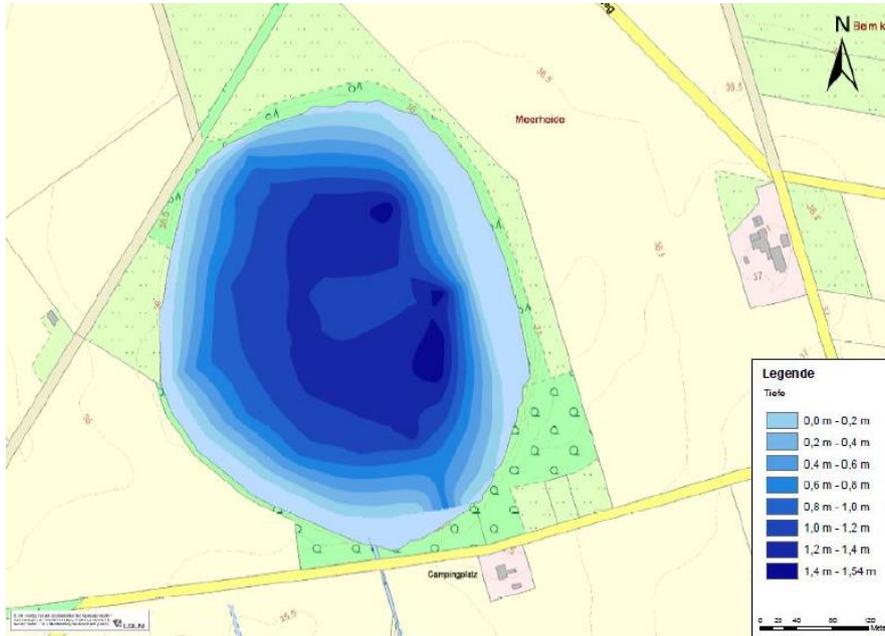


Abbildung 1: Tiefenkarte des „Großen Meeres“, LBEG

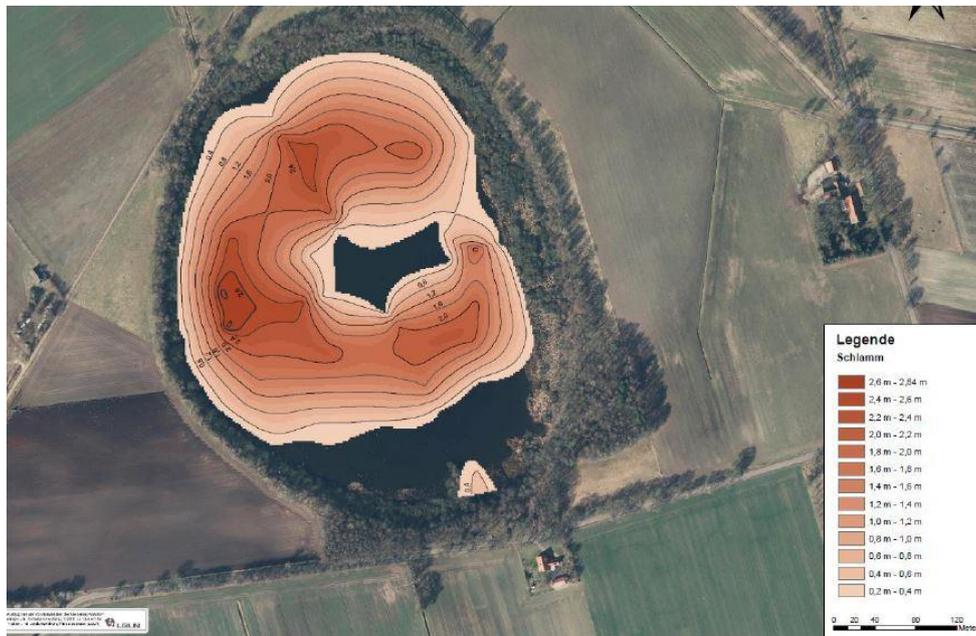


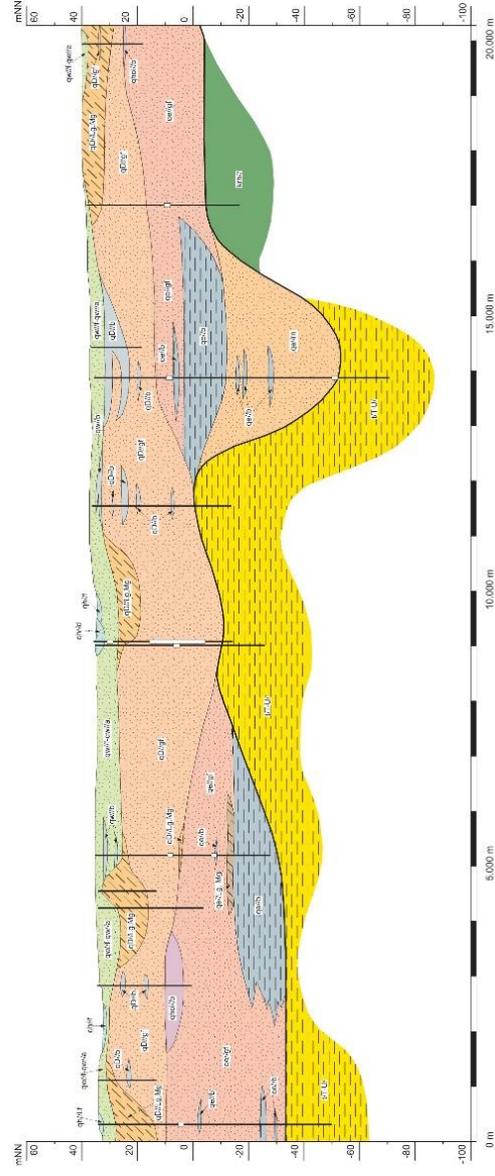
Abbildung 2: Schlammstärke im „Großen Meer“, LBEG

Anhang 2 Geologischer Schnitt (LBEG 2006a)

Hunte Lockergestein rechts Geologischer Schnitt S2

Legende

| | |
|--------|------------------------------------|
| qH1f | Ausleimer, Holozän |
| qH2f | flutfläher Sand, Holozän |
| qH3f | Dünen, Holozän |
| qH4f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH5f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH6f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH7f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH8f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH9f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH10f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH11f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH12f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH13f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH14f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH15f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH16f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH17f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH18f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH19f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH20f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH21f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH22f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH23f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH24f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH25f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH26f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH27f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH28f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH29f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH30f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH31f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH32f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH33f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH34f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH35f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH36f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH37f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH38f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH39f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH40f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH41f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH42f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH43f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH44f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH45f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH46f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH47f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH48f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH49f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH50f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH51f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH52f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH53f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH54f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH55f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH56f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH57f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH58f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH59f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH60f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH61f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH62f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH63f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH64f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH65f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH66f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH67f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH68f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH69f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH70f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH71f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH72f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH73f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH74f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH75f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH76f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH77f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH78f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH79f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH80f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH81f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH82f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH83f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH84f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH85f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH86f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH87f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH88f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH89f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH90f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH91f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH92f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH93f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH94f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH95f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH96f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH97f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH98f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH99f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |
| qH100f | flutfläher Sand, Weichsel-Kaltzeit |



Hydrogeologie

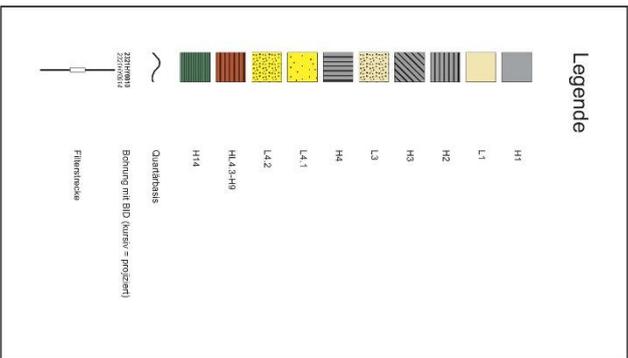
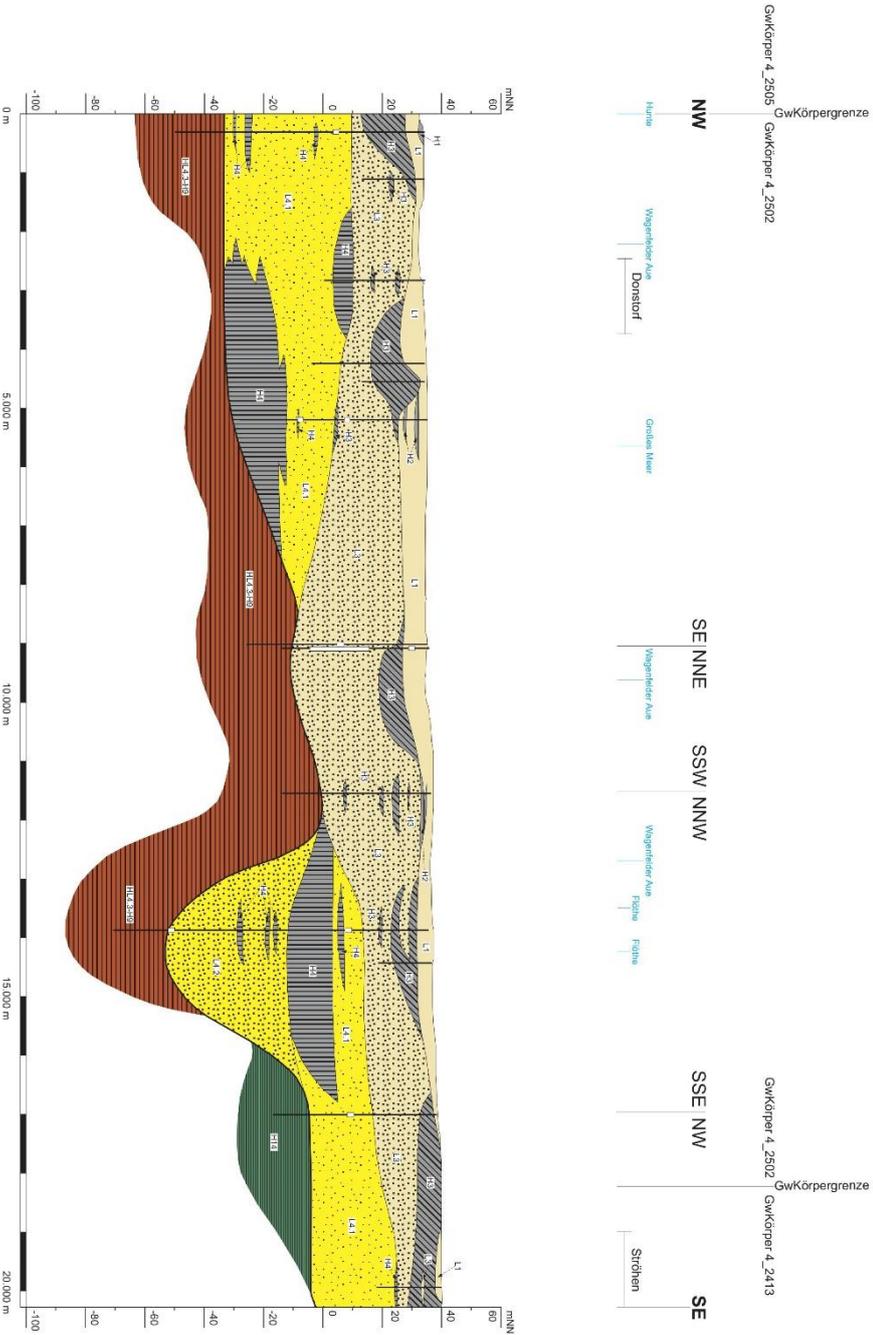
**Hunte Lockergestein rechts
Geologischer Schnitt S2**

| | | |
|--------------|-------------|---------------------|
| Bearbeitung: | Datum: | Maßstab: |
| G. Mernbach | August 2006 | 1:50.000 1:1.000 |
| Zeichnung: | | |
| L. Ebeling | | |

LBEG
Leibniz-Bereich
Stilleweg 2
30655 Hannover

Anhang 3 Hydrostratigrafischer Schnitt (LBEG 2006b)

Hunte Lockergestein rechts Hydrostratigrafischer Schnitt S2



| | | |
|--|-------------|---|
|  <h3>Hydrogeologie</h3> | | |
| Hunte Lockergestein rechts Hydrostratigrafischer Schnitt S2 | | |
| Bearbeitung: | Datum: | Maßstab: |
| G. Morzsch | August 2006 | Länge 1 : 50.000 Höhe 1 : 1.000 |
| L. Ebeling | | |
|  | | LBEG Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Stillweg 2 30655 Hannover |

Anhang 4

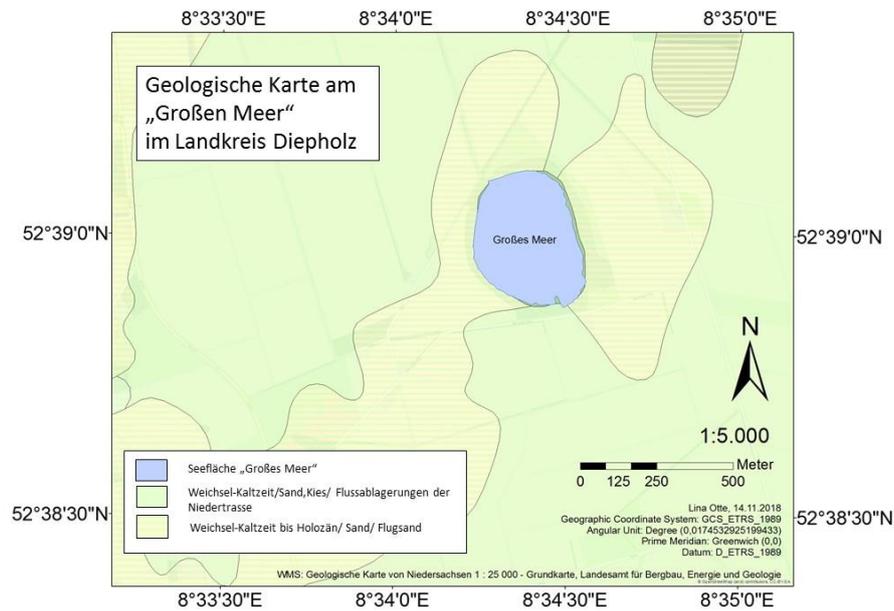


Abbildung 1: Detaillierte geologische Karte am „Großen Meer“ mit Informationen zur Verbreitung, Beschaffenheit und Abfolge der Gesteine in bis zu 2 m Tiefe (LBEG 1991).

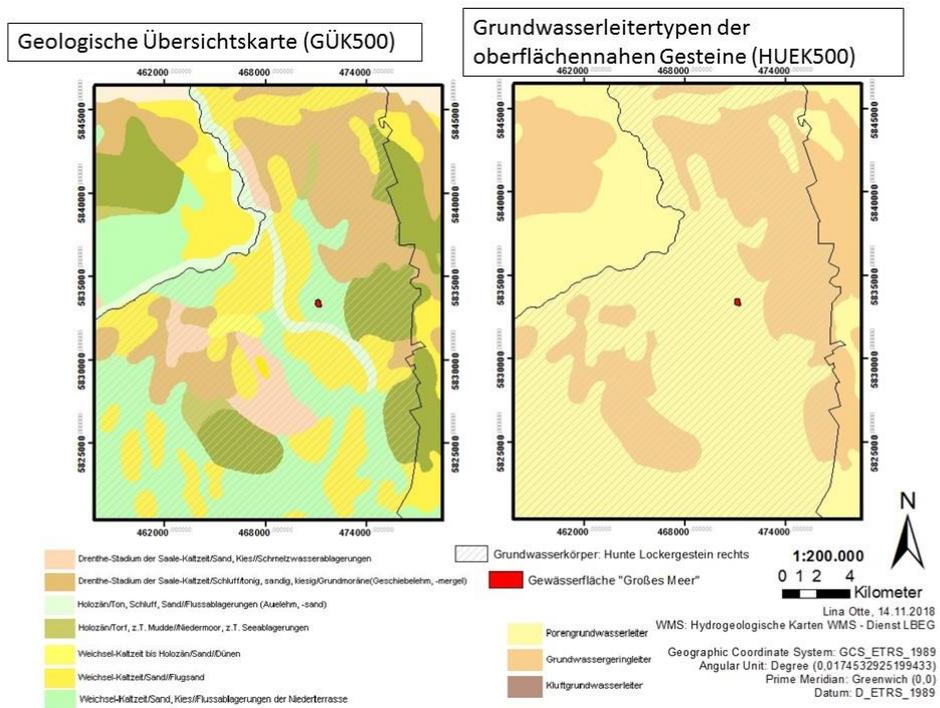


Abbildung 2: Übersichtskarten der Geologie und Grundwasserleitertypen der oberflächennahen Gesteine im weiteren Umfeld des „Großen Meeres“. (LBEG 2000).

Anhang 5

Datentabelle 1: Datentabelle der Sedimentansprache der Gewässersohle

| Probenahme | Hochwert | Rechtswert | Bodenart | Bemerkung |
|-------------------|-----------------|-------------------|----------------------|---------------------------------------|
| S1 | 5833249 | 471153 | Feinsand | geringer Anteil organischen Materials |
| S2 | 5833374 | 470985 | -Schlamm- | ohne Sand |
| S3 | 58,33559 | 47105 | schluffiger Feinsand | geringer Anteil organischen Materials |
| S4 | 5833392 | 471113 | schluffiger Feinsand | geringer Anteil organischen Materials |
| S5 | 5833450 | 471194 | -Schlamm- | ohne Sand |
| S6 | 5833376 | 471225 | Feinsand | geringer Anteil organischen Materials |

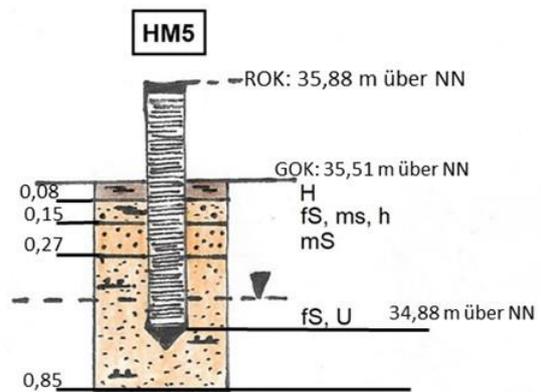
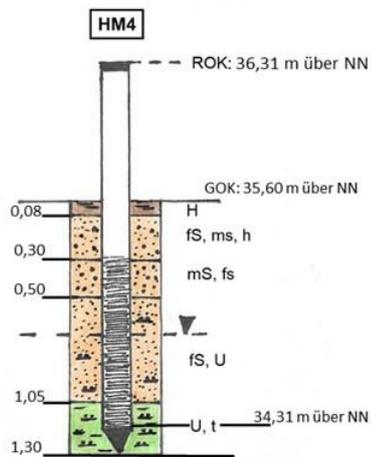
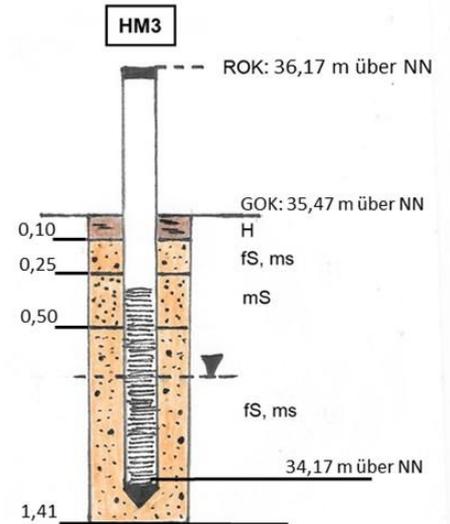
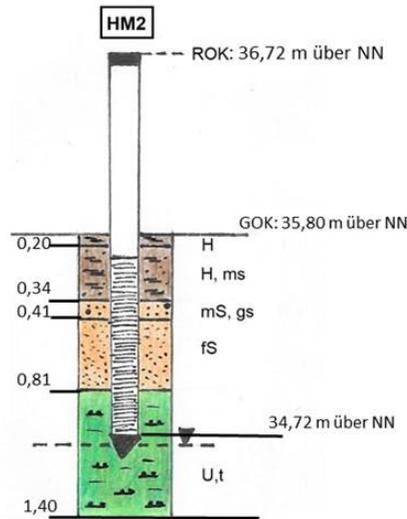
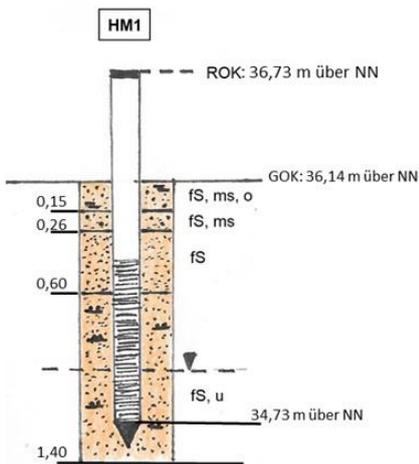
Anhang 5

Datentabelle: Bohrgutansprache der Grundwassermessstellen HM 1-5 nach DIN 4022

| HM 1 | | | | | |
|---|-------------------------|-------------|----------------|------------------|----------------|
| Bis ... m unter Ansatzpunkt | 0,15 | 0,26 | 0,6 | 0,96 | 1,4 |
| Benennung der Bodenart und Beimengungen | fS-ms, o | fS-ms | fS | fS | fS, U |
| Bindigkeit | 0 | 1 | 3 | 5 | 5 |
| Formbarkeit | 0 | 0 | 1 | 3 | 3 |
| Farbe | dunkelbraun | mittelbraun | beige (sandig) | hellbraun | grau |
| HM 2 | | | | | |
| Bis ... m unter Ansatzpunkt | 0,2 | 0,34 | 0,41 | 0,81 | 1,4 |
| Benennung der Bodenart und Beimengungen | H | H, mS | ms , gs | fS | U, t |
| Bindigkeit | 0 | 1 | 1 | 4 | 5 |
| Formbarkeit | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 |
| Farbe | hell-dunkelbraun | dunkelbraun | graubraun | grau | grau |
| HM 3 | | | | | |
| Bis ... m unter Ansatzpunkt | 0,1 | 0,25 | 0,5 | 1,4 | |
| Benennung der Bodenart und Beimengungen | H | fS, ms | mS | fS-ms | |
| Bindigkeit | 0 | 2 | 2 | 2 bis 3 | |
| Formbarkeit | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| Farbe | dunkelbraun | beige-braun | beige-braun | | |
| HM 4 | | | | | |
| Bis ... m unter Ansatzpunkt | 0,08 | 0,3 | 0,5 | 1,05 | 1,3 |
| Benennung der Bodenart und Beimengungen | H | fS-ms, H | mS, fs | fS, U | U, t |
| Bindigkeit | 0 | 1 | 3 | 4 | 5 |
| Formbarkeit | 0 | 0 | 0 | 1 bis 2 | 3 |
| Farbe | mittelbraun-dunkelbraun | mittelbraun | beige-braun | intensives braun | grau-gruenlich |
| HM 5 | | | | | |
| Bis ... m unter Ansatzpunkt | 0,08 | 0,15 | 0,27 | 0,85 | |
| Benennung der Bodenart und Beimengungen | H | fS-ms, H | mS | fS, U | |
| Bindigkeit | 1 | 3 | 2 | 5 | |
| Formbarkeit | 0 | 2 | 1 | 3 | |
| Farbe | dunkel/schwarz | dunkelbraun | beige-braun | | |

Anhang 6

Schichtenverzeichnisse und Aufbaupläne der Grundwassermessstellen HM1-HM5 (mit Grundwasserstand vom Tag der Einmessung, 23.05.2018), nicht maßstabsgetreu



Anhang 7

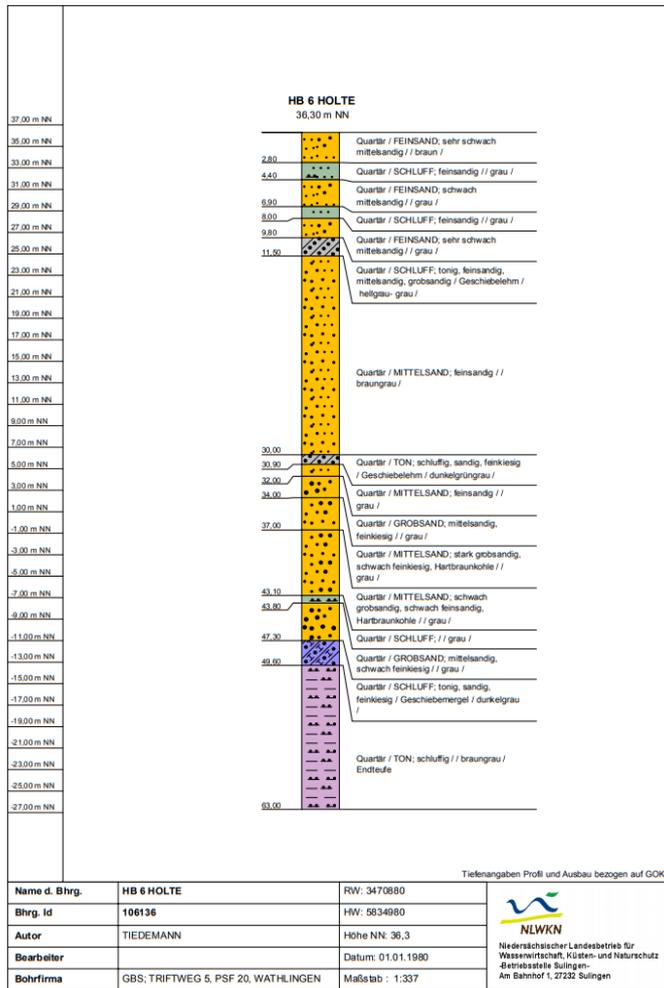


Abbildung 1: Schichtenverzeichnis der Grundwassermessstelle Holte I

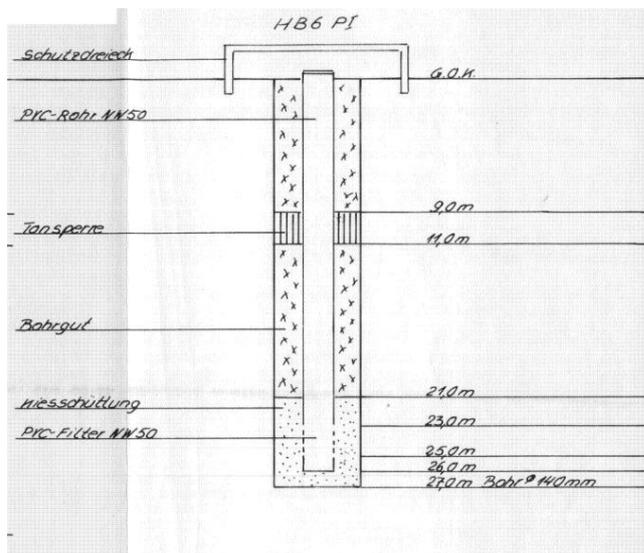


Abbildung 2: Ausbauplan der Grundwassermessstelle Holte I (NLWKN)

Anhang 8

Datentabelle: Einmessen der Grundwassermessstellen und Lattenpegel

| | Hochwert | Rechtswert | Nivellement | | | ROK Höhe [m über NN] | Höhe ROK ü. GOK [m] | GOK Höhe über NN [m] |
|-------------------|----------|------------|---------------------------------|---------------|--------------|----------------------|---------------------------|-------------------------|
| | | | Bezugspunkt Höhe über NN [m] | Rückblick [m] | Vorblick [m] | | | |
| HM 1 | 5833340 | 471333 | -- | -- | -- | 36,7373 | 0,60 | 36,1373 |
| HM 2 | 5833643 | 471218 | 36,5960 | 1,30 | 1,18 | 36,7200 | 0,92 | 35,8000 |
| HM 3 | 5833606 | 470991 | -- | -- | -- | 36,1672 | 0,68 | 35,4872 |
| HM 4 | 5833336 | 470927 | -- | -- | -- | 36,3147 | 0,71 | 35,6047 |
| HM 5 | 5833161 | 4711577 | 36,4878 | 0,91 | 1,52 | 35,8800 | 0,37 | 35,5100 |
| NLWKN Nord | 5833629 | 470969 | 36,4710 | 1,44 | 1,53 | 36,3900 | 0,15 | 36,2400 |
| Holte I | 5833096 | 470836 | 36,2900 | 1,28 | 0,85 | 36,7200 | 0,41 | 36,3100 |

| | Hochwert | Rechtswert | Höhe Oberkante [m über NN] | abgelesener Wert an Oberkante [m] | Pegelnulldpunkt [m über NN] |
|--------------------|----------|------------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Lattenpegel | 5833231 | 471227 | 35,6213 | 1,65 | 33,97 |

Anhang 9

Datentabelle: Wasserstandsmessungen der Grundwassermessstellen HM 1-5, Holte I und NLWKN Nord sowie des Lattenpegels

| Messstelle | ROK/Pegelnullpunkt über NN [m] | 04.05.2018 | | 22.05.2018 | | 13.06.2018 | | 14.06.2018 | | 20.06.2018 | | 27.06.2018 | |
|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| | | Abstich [m] | Wasserstand über NN [m] |
| HM 1 | 36,73 | | | 1,57 | 35,17 | 1,97 | 34,77 | | | | | | |
| HM 2 | 36,72 | | | 1,98 | 34,74 | 1,97 | 34,75 | | | 1,98 | 34,74 | 1,96 | 34,76 |
| HM 3 | 36,16 | | | 1,39 | 34,78 | 1,75 | 34,42 | | | 1,91 | 34,26 | 1,82 | 34,35 |
| HM 4 | 36,31 | | | 1,40 | 34,91 | 1,73 | 34,58 | | | 1,83 | 34,48 | 1,89 | 34,42 |
| HM 5 | 35,88 | | | 0,80 | 35,08 | | | | | | | | |
| NLWKN Nord | 36,39 | 1,15 | 35,24 | 1,75 | 34,64 | 2,04 | 34,35 | 2,06 | 34,33 | 2,11 | 34,28 | 2,10 | 34,29 |
| Holte I | 36,72 | 2,14 | 34,58 | | | 2,75 | 33,97 | 2,77 | 33,95 | 2,83 | 33,89 | 2,68 | 34,04 |
| Lattenpegel | 33,97 | 1,43 | 35,40 | | | 1,16 | 35,13 | | | 1,11 | 35,08 | 1,08 | 35,05 |

Anhang 10

Datentabelle: Potentialdifferenz und hydraulische Gradienten

| Messstelle | l [m] | 13.06.2018 | | | 20.06.2018 | | | 27.06.2018 | | |
|--------------------|-------|------------|----------------|-------|------------|----------------|-------|------------|----------------|-------|
| | | h [m] | Δh [m] | i | h [m] | Δh [m] | i | h [m] | Δh [m] | i |
| Großes Meer | - | 35,13 | | | 35,08 | | | 35,05 | | |
| HM 1 | 33 | 34,77 | 0,36 | 0,011 | -- | -- | | -- | -- | -- |
| HM 2 | 39 | 34,75 | 0,38 | 0,010 | 34,74 | 0,34 | 0,009 | 34,76 | 0,29 | 0,007 |
| HM 3 | 4 | 34,42 | 0,71 | 0,179 | 34,26 | 0,82 | 0,206 | 34,35 | 0,70 | 0,176 |
| HM 4 | 18 | 34,58 | 0,55 | 0,030 | 34,48 | 0,60 | 0,033 | 34,42 | 0,63 | 0,035 |
| HM 5 | 30 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| NLWKN Nord | 38 | 34,35 | 0,78 | 0,021 | 34,28 | 0,80 | 0,021 | 34,29 | 0,76 | 0,020 |
| Holte I | 237 | 33,97 | 1,16 | 0,005 | 33,89 | 1,19 | 0,005 | 34,04 | 1,01 | 0,004 |

Anhang 11

Datentabelle: Regionale Grundwasserströmung

| Messstelle | Typ | Datum | Rechtswert | Hochwert | Abstich [m] | MP [m über NN] | GWO über NN [m] |
|------------------------|---------------------------|------------|------------|----------|-------------|----------------|-----------------|
| Aldorf | GWM | 25.06.2018 | 465632 | 5844372 | 3,31 | 31,96 | 28,65 |
| Drentwede | GWM | 25.06.2018 | 470370 | 5842783 | 4,63 | 44,26 | 39,63 |
| Ridderrade I | GWM | 25.06.2018 | 473736 | 5844408 | 5,08 | 50,18 | 45,10 |
| Donstorf | GWM | 25.06.2018 | 470640 | 5835536 | 2,71 | 36,89 | 34,18 |
| Barver II | GWM | 25.06.2018 | 473723 | 5830458 | 3,27 | 37,17 | 33,90 |
| Neustädter Moor | GWM | 25.06.2018 | 475767 | 5823291 | 2,38 | 39,41 | 37,03 |
| Bockeler Moor I | GWM | 25.06.2018 | 468710 | 5822701 | 2,44 | 38,75 | 36,31 |
| St. Hülfe I | GWM | 25.06.2018 | 458924 | 5831185 | 9,02 | 43,85 | 34,83 |
| Hoopen OP | Pegel, Hunte | 25.06.2018 | 459814 | 5833387 | | | 33,31 |
| Dümmer-Ost | Pegel, Dümmer | 25.06.2018 | 456215 | 5820392 | | | 37,07 |
| Düste | Pegel, Wagenfelder Aue | 25.06.2018 | 468680 | 5836715 | | | 29,89 |

Anhang 12

Datentabelle: Seepage-Meter-Messungen

| Datum | Standort | Hochwert | Rechtswert | Name | Bemerkung | Durchmesser [m] | Volumen vorher [ml] | Volumen nachher [ml] | ΔV [ml] | Zeit [min] | Volumenfluss [$l \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$] |
|------------|-----------|----------|------------|------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------------|-----------------|------------|--|
| 27.06.2018 | Nord-Ufer | 5833600 | 471051 | N1 | kurzer Schlauch | 0,59 | 1000 | 1035 | 35 | 30,5 | 6,044172 |
| 27.06.2018 | Nord-Ufer | 5833450 | 471255 | N2 | kurzer Schlauch | 0,59 | 1000 | 1025 | 25 | 31,5 | 4,180209 |
| 27.06.2018 | Nord-Ufer | 5833450 | 471255 | N3 | kurzer Schlauch | 0,59 | 1000 | 1025 | 25 | 31 | 4,247632 |
| 27.06.2018 | Nord-Ufer | 5833450 | 471255 | N4 | kurzer Schlauch | 0,59 | 1000 | 1030 | 30 | 60 | 2,633532 |
| 12.07.2018 | Nord-Ufer | 5833601 | 471051 | N5 | kurzer Schlauch | 0,59 | 1000 | 1000 | 0 | 455 | 0 |
| 12.07.2018 | Ost-Ufer | 5833489 | 471240 | O1 | langer Schlauch | 0,59 | 1000 | 1450 | 450 | 308 | 7,695386 |
| 12.07.2018 | Ost-Ufer | 5833489 | 471240 | O2 | langer Schlauch | 0,59 | 1000 | 1240 | 240 | 301 | 4,199652 |

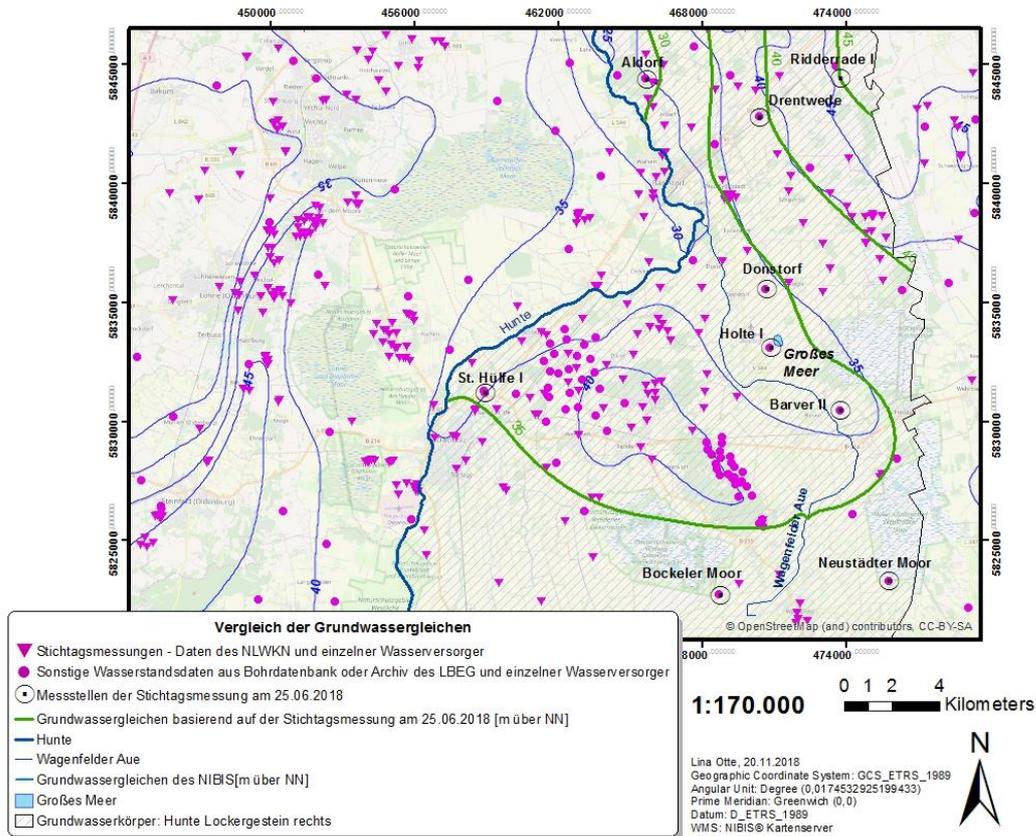
Anhang 13 Datentabelle: Klimatische Wasserbilanz und Wasserstandsänderung des Sees

| Datum | Temperatur [°C] | es(T) [haP] | T* [°C] | es(TW ₀) [°C] | TW ₀ [°C] | U [%] | e | S [h/d] | a | b | S ₀ [h/d] | R ₀ [W/m ²] | R _{0,0} | E _w | KWBz [mm/d] | KWB, kumuliert [mm] | N [mm/d] | Wasserstand [m über NN] | Wasserstandsänderung [m] |
|------------|-----------------|-------------|---------|---------------------------|----------------------|-------|-------|---------|------|------|----------------------|------------------------------------|------------------|----------------|-------------|---------------------|----------|-------------------------|--------------------------|
| 30.04.2018 | 13,5 | 15,44 | | | | 64,6 | 9,97 | 2,6 | 0,19 | 0,57 | 14 | 354 | 104,73 | -3,24 | 3,24 | | 0 | | |
| 01.05.2018 | 7,1 | 10,07 | | | | 61,4 | 6,18 | 3,7 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 141,64 | -1,98 | 1,98 | | 0 | | |
| 02.05.2018 | 10 | 12,26 | | | | 63,3 | 7,76 | 13,5 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 295,87 | -2,41 | 2,41 | | 0 | | |
| 03.05.2018 | 11,4 | 13,45 | | | | 52,7 | 7,09 | 8,3 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 214,03 | -2,24 | 2,24 | | 0 | | |
| 04.05.2018 | 11 | 13,1 | 8,83 | 12,85 | 10,71 | 51,9 | 6,8 | 13,9 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 302,16 | 2,11 | -2,11 | -2,11 | 0 | 35,4 | 0 |
| 05.05.2018 | 13,6 | 15,54 | 11,1 | 15,19 | 13,25 | 54,4 | 8,45 | 14 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 303,74 | 2,34 | -2,34 | -4,45 | 0 | | |
| 06.05.2018 | 16,5 | 18,72 | 11,6 | 15,75 | 13,81 | 56,3 | 10,54 | 14,3 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 308,46 | 1,84 | -1,84 | -6,29 | 0 | | |
| 07.05.2018 | 17,7 | 20,2 | 13,37 | 17,9 | 15,79 | 55,3 | 11,17 | 14,2 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 306,89 | 2,33 | -2,33 | -8,62 | 0 | | |
| 08.05.2018 | 18,2 | 20,84 | 14,73 | 19,72 | 17,32 | 79,6 | 16,59 | 14,2 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 306,89 | 1,16 | -0,96 | -9,58 | 0,2 | 35,37 | -30 |
| 09.05.2018 | 20,1 | 23,46 | 16,18 | 21,84 | 18,95 | 71,3 | 16,73 | 13,3 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 292,72 | 1,8 | -1,8 | -11,38 | 0 | | |
| 10.05.2018 | 14,5 | 16,47 | 16,77 | 22,75 | 19,6 | 64,4 | 10,61 | 5,7 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 173,12 | 4,03 | -4,03 | -15,41 | 0 | | |
| 11.05.2018 | 14 | 15,95 | 16,83 | 22,85 | 19,67 | 74,2 | 11,83 | 4,1 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 147,93 | 3,65 | 6,85 | -8,55 | 10,5 | | |
| 12.05.2018 | 18 | 20,58 | 17,08 | 23,25 | 19,95 | 55,2 | 11,36 | 7,2 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 196,72 | 3,96 | -3,96 | -12,52 | 0 | | |
| 13.05.2018 | 18,6 | 21,37 | 17,23 | 23,49 | 20,12 | 48 | 10,26 | 8,8 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 221,9 | 4,42 | -4,32 | -16,83 | 0,1 | | |
| 14.05.2018 | 20,2 | 23,61 | 17,57 | 24,04 | 20,49 | 67,2 | 15,87 | 12,6 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 281,71 | 2,79 | -1,19 | -18,02 | 1,6 | | |
| 15.05.2018 | 19,2 | 22,19 | 17,42 | 23,79 | 20,33 | 73 | 16,2 | 10,6 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 250,23 | 2,59 | -2,59 | -20,61 | 0 | | |
| 16.05.2018 | 16,1 | 18,25 | 17,68 | 24,24 | 20,63 | 67,1 | 12,25 | 5,4 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 168,39 | 3,98 | -3,98 | -24,59 | 0 | | |
| 17.05.2018 | 10,8 | 12,93 | 17,15 | 23,36 | 20,03 | 68,8 | 8,9 | 2,2 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 118,03 | 4,76 | -4,76 | -29,35 | 0 | | |
| 18.05.2018 | 11,1 | 13,19 | 16 | 21,56 | 18,74 | 54,7 | 7,21 | 6,5 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 185,71 | 4,76 | -4,76 | -34,11 | 0 | | |
| 19.05.2018 | 11,7 | 13,72 | 14,85 | 19,89 | 17,45 | 43,5 | 5,97 | 6,1 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 179,41 | 4,61 | -4,61 | -38,72 | 0 | | |
| 20.05.2018 | 16,6 | 18,84 | 14,25 | 19,06 | 16,78 | 58,7 | 11,06 | 13,5 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 295,87 | 2,74 | -2,74 | -41,47 | 0 | | |
| 21.05.2018 | 18,4 | 21,11 | 14,12 | 18,88 | 16,63 | 47,5 | 10,03 | 14,8 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 316,33 | 3,03 | -3,03 | -44,5 | 0 | | |
| 22.05.2018 | 18,4 | 21,11 | 14,5 | 19,4 | 17,06 | 59,5 | 12,56 | 6,1 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 179,41 | 2,3 | -2,3 | -46,8 | 0 | | |
| 23.05.2018 | 19,9 | 23,17 | 16,02 | 21,59 | 18,76 | 52,7 | 12,21 | 7,5 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 201,44 | 3,14 | -3,14 | -49,94 | 0 | | |
| 24.05.2018 | 19,1 | 22,05 | 17,35 | 23,68 | 20,25 | 46,3 | 10,21 | 6,6 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 187,28 | 4,47 | -4,47 | -54,42 | 0 | 35,29 | -110 |
| 25.05.2018 | 21,3 | 25,26 | 18,95 | 26,44 | 22,04 | 61,4 | 15,51 | 5,7 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 173,12 | 3,63 | -3,63 | -58,05 | 0 | | |
| 26.05.2018 | 21,9 | 26,21 | 19,83 | 28,07 | 23,03 | 61 | 15,99 | 13,6 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 297,44 | 4,08 | -4,08 | -62,13 | 0 | | |
| 27.05.2018 | 20,8 | 24,5 | 20,23 | 28,84 | 23,48 | 59,9 | 14,68 | 9,7 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 236,07 | 4,73 | 3,87 | -58,26 | 8,6 | | |
| 28.05.2018 | 23,4 | 28,7 | 21,07 | 30,51 | 24,41 | 77,1 | 22,13 | 14,4 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 310,03 | 2,87 | -2,87 | -61,13 | 0 | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|-----|--------|------|-------|---------|------|-------|------|
| 29.05.2018 | 24,3 | 30,3 | 21,8 | 32,04 | 25,24 | 68,8 | 20,85 | 10,8 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 253,38 | 3,76 | -3,76 | -64,89 | 0 | | |
| 30.05.2018 | 22 | 26,37 | 22,28 | 33,08 | 25,78 | 81,8 | 21,57 | 6,2 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 180,98 | 3,83 | -3,83 | -68,72 | 0 | | |
| 31.05.2018 | 22,8 | 27,68 | 22,53 | 33,64 | 26,06 | 86,9 | 24,05 | 10,5 | 0,19 | 0,57 | 15,9 | 439 | 248,66 | 3,24 | -3,24 | -71,96 | 0 | | |
| 01.06.2018 | 21,2 | 25,11 | 22,42 | 33,38 | 25,93 | 78,8 | 19,79 | 6,6 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 193,9 | 4,52 | -4,52 | -76,47 | 0 | | |
| 02.06.2018 | 17,8 | 20,33 | 21,92 | 32,29 | 25,37 | 83,4 | 16,96 | 0 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 91,01 | 5,03 | -5,03 | -81,5 | 0 | | |
| 03.06.2018 | 18,4 | 21,11 | 21,08 | 30,54 | 24,43 | 68,8 | 14,52 | 5,2 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 172,07 | 5,3 | -5,3 | -86,8 | 0 | | |
| 04.06.2018 | 17,1 | 19,45 | 19,88 | 28,17 | 23,09 | 58,3 | 11,34 | 0,4 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 97,25 | 5,52 | -5,52 | -92,32 | 0 | | |
| 05.06.2018 | 17,6 | 20,07 | 19,15 | 26,8 | 22,27 | 46 | 9,23 | 8,8 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 228,19 | 5,83 | -5,83 | -98,16 | 0 | | |
| 06.06.2018 | 20,3 | 23,75 | 18,73 | 26,05 | 21,8 | 59,5 | 14,13 | 15,2 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 327,96 | 4,04 | -3,24 | -101,4 | 0,8 | 35,18 | -220 |
| 07.06.2018 | 23,3 | 28,53 | 19,08 | 26,68 | 22,19 | 65,3 | 18,63 | 14,8 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 321,72 | 2,77 | -2,77 | -104,17 | 0 | | |
| 08.06.2018 | 21,9 | 26,21 | 19,77 | 27,95 | 22,96 | 80,4 | 21,07 | 6,2 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 187,66 | 2,32 | 0,08 | -104,09 | 2,4 | | |
| 09.06.2018 | 22,9 | 27,85 | 20,52 | 29,4 | 23,8 | 65,8 | 18,33 | 7,5 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 207,93 | 3,7 | -3,7 | -107,79 | 0 | | |
| 10.06.2018 | 18,6 | 21,37 | 20,77 | 29,9 | 24,08 | 70,7 | 15,11 | 2,8 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 134,66 | 4,87 | -4,87 | -112,66 | 0 | | |
| 11.06.2018 | 17,2 | 19,57 | 20,7 | 29,76 | 24 | 70,9 | 13,88 | 9,8 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 243,78 | 5,29 | -5,29 | -117,96 | 0 | | |
| 12.06.2018 | 14,6 | 16,58 | 19,75 | 27,91 | 22,94 | 75 | 12,44 | 2,2 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 125,31 | 5,1 | -2,3 | -120,25 | 2,8 | | |
| 13.06.2018 | 14 | 15,95 | 18,2 | 25,11 | 21,2 | 67,7 | 10,8 | 1,6 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 115,95 | 4,71 | -4,71 | -124,96 | 0 | 35,13 | -270 |
| 14.06.2018 | 15,3 | 17,34 | 17,1 | 23,28 | 19,97 | 63 | 10,92 | 7,9 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 214,16 | 4,12 | -1,22 | -126,19 | 2,9 | | |
| 15.06.2018 | 18,6 | 21,37 | 16,38 | 22,15 | 19,17 | 69,1 | 14,77 | 4,4 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 159,6 | 2,47 | -2,47 | -128,65 | 0 | | |
| 16.06.2018 | 20 | 23,32 | 16,62 | 22,51 | 19,43 | 76,7 | 17,89 | 7 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 200,13 | 1,59 | -1,19 | -129,84 | 0,4 | | |
| 17.06.2018 | 17 | 19,33 | 16,58 | 22,46 | 19,39 | 80,4 | 15,54 | 4 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 153,37 | 2,31 | -2,31 | -132,15 | 0 | | |
| 18.06.2018 | 17,2 | 19,57 | 17,02 | 23,14 | 19,88 | 69,7 | 13,64 | 0,7 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 101,92 | 3,13 | 2,77 | -129,38 | 5,9 | | |
| 19.06.2018 | 18 | 20,58 | 17,68 | 24,24 | 20,63 | 76,7 | 15,78 | 0,3 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 95,69 | 2,78 | -2,28 | -131,66 | 0,5 | | |
| 20.06.2018 | 21,4 | 25,42 | 18,7 | 25,99 | 21,76 | 75,4 | 19,17 | 10,2 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 250,02 | 2,33 | 2,07 | -129,59 | 4,4 | 35,08 | -320 |
| 21.06.2018 | 14,1 | 16,05 | 17,95 | 24,69 | 20,92 | 72 | 11,56 | 6 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 184,54 | 4,36 | 7,84 | -121,75 | 12,2 | | |
| 22.06.2018 | 12,8 | 14,75 | 16,75 | 22,72 | 19,58 | 87,5 | 12,91 | 4,8 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 165,84 | 3,27 | -1,77 | -123,52 | 1,5 | | |
| 23.06.2018 | 13,4 | 15,34 | 16,15 | 21,79 | 18,91 | 77,5 | 11,89 | 2,1 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 123,75 | 3,27 | -3,17 | -126,69 | 0,1 | | |
| 24.06.2018 | 12,8 | 14,75 | 15,42 | 20,7 | 18,09 | 83 | 12,24 | 0,1 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 92,57 | 2,78 | -1,78 | -128,47 | 1 | | |
| 25.06.2018 | 15,5 | 17,57 | 15 | 20,1 | 17,62 | 67,5 | 11,86 | 4,8 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 165,84 | 2,75 | -2,75 | -131,22 | 0 | | |
| 26.06.2018 | 14,1 | 16,05 | 13,78 | 18,44 | 16,26 | 59,3 | 9,52 | 2,1 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 123,75 | 2,95 | -2,95 | -134,17 | 0 | | |
| 27.06.2018 | 18,2 | 20,84 | 14,47 | 19,35 | 17,02 | 64,1 | 13,36 | 10,8 | 0,19 | 0,55 | 16,9 | 479 | 259,37 | 2,07 | -2,07 | -136,24 | 0 | 35,05 | -350 |

Anhang 14

Vergleich der erstellten Grundwassergleichenkarte des 25.06.2018 mit der Grundwasserkarte des LBEG (2008).



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Außerdem versichere ich, dass ich die allgemeinen Prinzipien wissenschaftlicher Arbeit und Veröffentlichung, wie sie in den Leitlinien guter wissenschaftlicher Praxis der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg festgelegt sind, befolgt habe.

Datum, Unterschrift