



Bericht

**Hydrogeologische Beurteilung der Auswirkungen der
geplanten Abgrabung Reeser Welle**

Datenanalyse und Grundwassermodell

Auftraggeber: Hülskens GmbH & Co. KG
Hülskensstraße 4-6
46483 Wesel

Auftragsdatum: 27.08.2020
Projektnummer: 530413
Abgabedatum: 22.03.2022

Lippe Wassertechnik GmbH
Brunnenstr. 37
45 128 Essen
Tel.: 0201 / 3610 - 0 (Sekretariat)
Fax: 0201 / 3610 – 100

Der vorliegende Bericht und die zugehörigen Untersuchungen wurden von folgenden Mitarbeitern der Lippe Wassertechnik GmbH (LW) ausgearbeitet:

Dipl.-Geol. Dr. Florian Werner	Projektleiter
Jonas Haase, M.Sc. Geow.	Grundwassermodellierung
Dipl. Geol. Dr. Johannes Meßer	Qualitätssicherung

Inhalt

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	2
2	Untersuchungsraum	3
3	Datenanalyse	4
3.1	Recherche.....	4
3.2	Geländebegehung.....	4
3.3	Geologische und hydrogeologische Verhältnisse	6
3.4	Grundwassersituation	10
3.5	Wechselwirkungen Grundwasser und Rheinwasserstand	12
3.6	Grundwasserneubildung	15
3.6.1	Verfahren zur Berechnung nach GWneu.....	17
3.6.2	GWneu im Modellgebiet	18
3.6.3	Seeverdunstung.....	20
4	Aufbau des numerischen Modells	23
4.1	Verwendete Software	23
4.2	Dreidimensionaler Aufbau	24
4.3	Hydraulische Durchlässigkeiten und effektive Porositäten.....	28
4.4	Randbedingungen.....	30
4.4.1	Vorbemerkung	30
4.4.2	Oberirdische Gewässer.....	30
4.4.3	Grundwasserneubildung und Zehrung	32
5	Modelltestung und Kalibrierung	33
5.1	Mittlere Strömungssituation (stationär)	33
5.2	Hochwasserereignis (instationär)	35
6	Simulationen	40
6.1	Mittlerer Strömungszustand (stationär).....	40
6.1.1	Abgrabungssee ohne Dichtschürze.....	40
6.1.2	Abgrabungssee mit Dichtschürze.....	41
6.2	Lastfall (1) Hochwasserereignis (instationär).....	43
6.2.1	Hochwasserereignis ohne Abgrabungssee	46
6.2.2	Hochwasserereignis mit Abgrabungssee und Dichtschürze	47
6.3	Lastfall (2) Hoher landseitiger Zustrom (stationär).....	51
6.4	Optimierung Dichtschürze	53
6.4.1	Auswirkung der Optimierung auf Lastfall 1 (instationär)	54
6.4.2	Auswirkung der Optimierung auf Lastfall 2 (stationär)	55
6.5	Hochwasserereignis während des Bauzustandes	57
6.5.1	Bauzustand ohne Maßnahmen	57
6.5.2	Bauzustand mit Maßnahmen (Bauzustand 1).....	59
6.5.3	Bauzustand mit Maßnahmen (Bauzustand 2).....	61
6.6	Ergebnisdiskussion	63
7	Zusammenfassung	65
8	Literaturverzeichnis	68

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Firma Hülskens GmbH & Co. KG plant gemeinsam mit der Holemans GmbH die Abgrabung *Reeser Welle* im Rheinvorland auf einer Fläche von rund 76 ha westlich der Stadt Rees. Die Abgrabung ist in zwei Teilgebieten vorgesehen, die einen Nord- und einen Südsee ergeben sollen. Gegen die im Gebietsentwicklungsplan (Abbildung 1) bereits dargestellte Abgrabung gibt es Vorbehalte in Bezug auf die Auswirkungen der Abgrabung auf das Grundwasser vor allem im Bereich der Ortslage Esserden. Die Lippe Wassertechnik GmbH (LW) wurde von der Firma Hülskens GmbH & Co. KG (AG) beauftragt, eine modellgestützte (numerische) Untersuchung zur Begleitung des Planfeststellungsantrags durchzuführen.

In einem ersten Arbeitsschritt wurde eine Datenanalyse und ein Modellkonzept erarbeitet und im zweiten Schritt ein dreidimensionales (3D) Grundwassermodell erstellt und angewendet. Zielsetzung der Modellierung ist die Prognose der Auswirkungen der Abgrabung auf das Grundwasser. Als wesentlicher Lastfall wurde ein Hochwasser im Rhein definiert, durch das die geplante Abgrabung überflutet würde. Dabei soll auch das Auftreten von Qualmwasser im Deichhinterland betrachtet werden. Die Druckverhältnisse im Grundwasserleiter sollen durch den Vergleich von Modellvarianten mit und ohne Abgrabung interpretiert bzw. bewertet werden. Ebenso soll die Wirkung einer Dichtschürze im Bereich der Abgrabung geprüft werden.

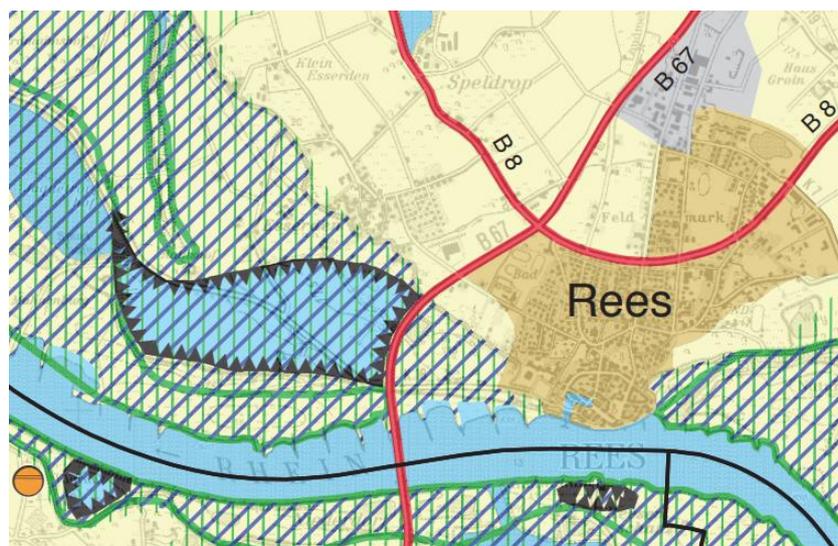


Abbildung 1: Lage der geplanten Abgrabung im Gebietsentwicklungsplan (Bez.-Reg. D. 2000). Hinweis: Abgrenzung der Abgrabung veraltet

2 Untersuchungsraum

Der Untersuchungsraum (Abbildung 2) liegt am Niederrhein (rechtsrheinisch) zwischen den Ortschaften Rees und Emmerich im Kreis Kleve. Es sind eine Reihe von oberirdischen Gewässern vorhanden, die sowohl als ehemalige Altarme des Rheins erhalten geblieben sind, als auch aus ehemaligen Abgrabungen resultieren. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich vom Rhein bis zum Millinger Meer (Altrhein), stromabwärts des Rheins reicht es über den Mahnensee (ehemalige Abgrabung) hinaus, bis zur ehemaligen Abgrabung südlich der Einmündung des Grietherorter Altrheins. Von Rees aus erstreckt es sich über die B67 bis in die Ortslagen Androp und Bienen. Im Norden bzw. Nordwesten bildet der Bienener Altrhein die Begrenzung des Untersuchungsraums. Die Geländehöhen liegen zwischen 11 und 26 m NHN, wobei Höhen über 20 m NHN nur vereinzelt im Südosten auftreten.



Abbildung 2: Lage der geplanten Abgrabung (Schraffur), Ortslage Esserden (rote Fläche) und Untersuchungsraum

3 Datenanalyse

3.1 Recherche

Von der Firma Hülskens wurden folgende Unterlagen bzw. Daten bereitgestellt:

- Grundwassermessstellen und Lattenpegel (Standorte, Messdaten)
- Schichtenverzeichnisse vorhandener Bohrungen (Tertiäroberkante, Mächtigkeit Auenlehm)
- Rohstoffkarte des Geologischen Dienstes
- Ergebnisse von Versickerungsversuchen
- CAD-Daten geplanter Kubaturen (Topographie, Seegrund, Dichtschürze)
- Ergebnisse von Pumpversuchen
- Sieblinien

Grundwassergleichen zu unterschiedlichen Rheinwasserständen, Informationen zu Grundwasserentnahmen, Gewässerhöhen (in Abhängigkeit vom Rheinwasserstand) bzw. Informationen zu Steuerungen standen nicht zur Verfügung.

Folgende weitere Daten wurden recherchiert:

- Geländemodell (1 m Raster)
- Grundwasserneubildung (mGROWA, gwneu)
- Informationen zum Wasserhaushalt
- Rheinwasserstände Pegel Rees
- Daten bzw. Kartenwerke des Geologischen Dienstes
- ELWAS-Daten des Landesgrundwasserdienstes
- Informationen zum Bienener Altrhein, Rosau und Millinger Meer sowie Grundwassermessungen des Naturschutzzentrums Kreis Kleve e.V. (Wasser- und Grundwasserstandsdaten)

Darüber hinaus erfolgten Begehungen des Untersuchungsraums.

3.2 Geländebegehung

Am 2. September 2020 wurde bei Trockenwetterbedingungen (niedrige Rheinwasserstände) eine Geländebegehung des geplanten Abgrabungsgebietes sowie aller Gewässer im Untersuchungsraum durchgeführt (Abbildung 3), um die Gewässersituation und die Verhältnisse am Deich in Esserden beurteilen zu können. Bei der Geländebegehung

wurde am Bienener Altrhein ein Lattenpegel, offensichtlich mit automatischer Messwertaufzeichnung, vorgefunden. Die Situation im Bereich des Abgrabungsgebietes (landwirtschaftliche Nutzflächen) ist auf dem Titelblatt des Berichtes dargestellt.



Abbildung 3: Situation im Untersuchungsgebiet (oben links: Bienener Altrhein, oben rechts: Millinger Meer, unten links: Mahnensee, unten rechts: Deich in Esserden)

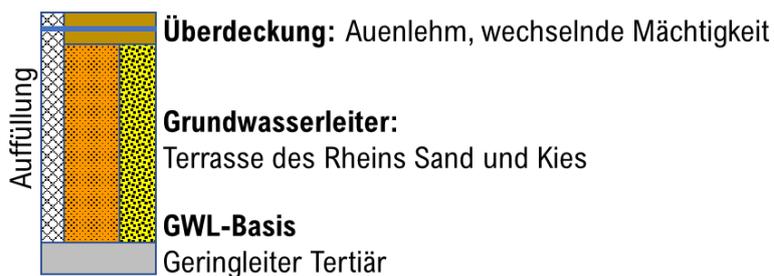
Eine weitere Geländebegehung wurde am 06.02.2021 bei einem Rheinhochwasser von etwa 17,40 m NHN (Pegel Rees) durchgeführt. Bei dieser Höhe waren bereits Teile der rheinnahen Aue überflutet. Der Anstieg in den Gräben Schleusengraben, Millinger Landwehr sowie ein Anstieg in Rosau und Bienener Altrhein konnte beobachtet werden. Austretendes Qualmwasser wurde nicht festgestellt.



Abbildung 4: Situation bei Hochwasser im Februar 2021. (oben links: südl. des Mahnensees, oben rechts: östlich des Mahnensees, unten links: Bienener Altrhein, unten rechts: Schleusengraben)

3.3 Geologische und hydrogeologische Verhältnisse

Für das Untersuchungsgebiet liegt eine Geologische Karte (wms-Layer) des Geologischen Dienstes vor (Abbildung 5). Darüber hinaus sind im geplanten Abgrabungsgebiet und dessen Umfeld eine Vielzahl von Bohrungen der Firma Hülskens abgeteuft und dokumentiert worden. Die Schichtenverzeichnisse (Abbildung 6) wurden an LW übergeben und ausgewertet. Danach kann der Untergroundaufbau wie folgt dargestellt werden:



Als wichtigste Unterlage zur flächenhaften Höhenlage der Schichtgrenzen dieser Einheiten lag die Rohstoffkarte (GD-NRW, 2006) vor. Aus den Karten für die Mächtigkeit des Auenlehms und der Basis des Quartärs (Abbildung 7) konnte in Verbindung mit der Geländeoberfläche das dreidimensionale Strukturmodell abgeleitet werden. Dem vorliegenden Kartenwerk wird aufgrund der dahinterliegenden intensiven geologischen Bearbeitung im Rahmen der Landesaufnahme ein hoher Stellenwert beigemessen. Zusätzlich wurden im Bereich der geplanten Abgrabung, die bis zum Tertiär abgeteufte Bohrungen, gemäß dem Anspruch verwendet, keine Informationen außer Acht zu lassen.

Die fast im gesamten Untersuchungsraum verbreiteten Auenlehme weisen stark wechselnde Mächtigkeiten zwischen 2 m und mehr als 6 m auf. Sie sind nach der Geologischen Karte Wesel (GD-NRW, 2001) gering durchlässig (d.h. im Bereich $k_f=1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ m/s), z.T. befindet sich das in den Messstellen ermittelte Potential im Grundwasser der darunter liegenden Terrasse bereits bei mittleren Verhältnissen innerhalb des Auenlehms. In den Karten sind mit Auenlehm gefüllte Altarmstrukturen erkennbar. Solche Anzeichen sind auch im Geländemodell (etwa unmittelbar vor dem Banndeich in Esserden) vorhanden. Die Altarme des Rheins, insbesondere der Bienener Altrhein, besitzen keine auffällig erhöhten Auenlehmmächtigkeiten. Nach Abbildung 7 (oben) zeigen diese Altarmstrukturen tendenziell sogar geringere Mächtigkeiten im Auenlehm an, welches im Modell Berücksichtigung gefunden hat. Somit geht von den Altarmen des Bienener Altrheins keine Hinderniswirkung für das Grundwasser, die mit Dichtschürzen zusammenwirken könnte, aus. Das Rheinvorland (vor dem Sommerdeich) ist in den Karten durchgehend als Auffüllung ausgewiesen. Hier besteht keine Auenlehmüberdeckung. Die Zusammensetzung des Grundwasserleiters ist durch Bohraufschlüsse bekannt.

Der Grundwasserleiter wird im übrigen Gebiet von den ca. 30 m mächtigen Sanden und Kiesen der Rheinterrasse gebildet. Diese Ablagerungen sind sehr gut durchlässig, was im Rahmen der Rohstofferkundung detailliert belegt wurde. Sie sind der Gegenstand der geplanten Rohstoffgewinnung. Eine durchgehende Schichtung innerhalb der Terrassenablagerungen wurde nicht festgestellt.

Die Basis des Grundwasserleiters bilden tertiäre Grundwassergeringleiter (tonige Schluffe des Miozäns).

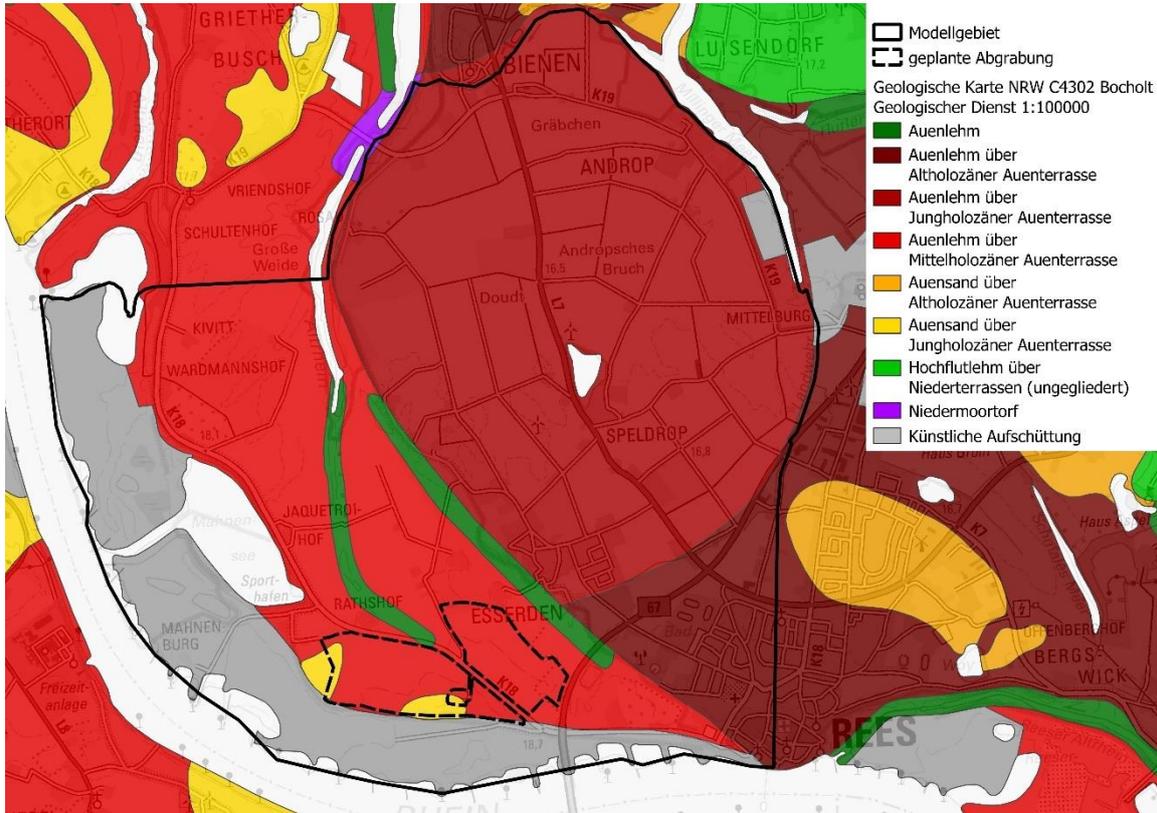


Abbildung 5: Geologische Karte NRW 1:100000 (C4302 Bocholt)

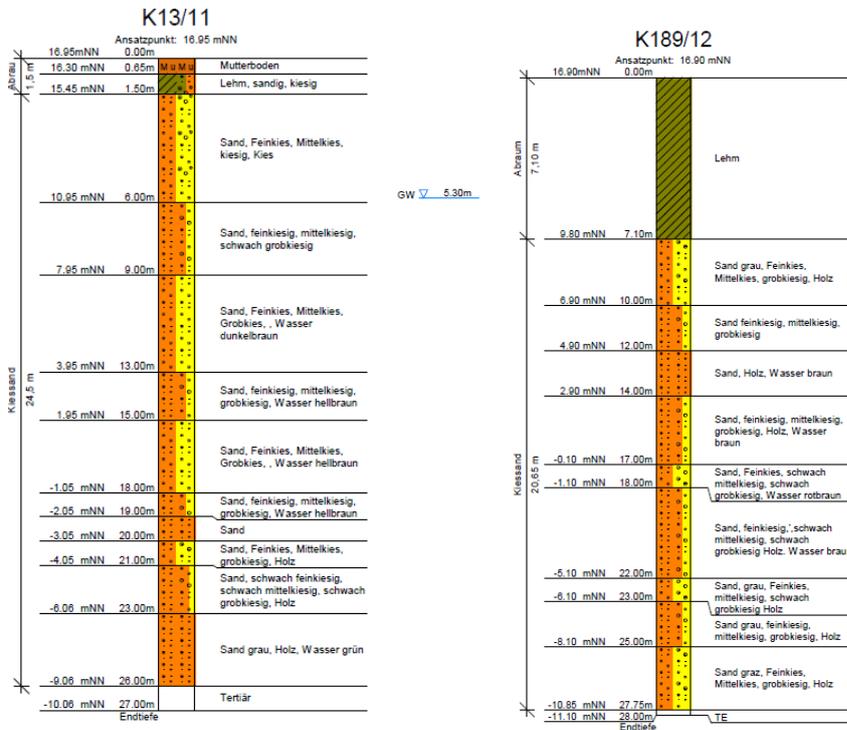


Abbildung 6: Beispielhafte Schichtenverzeichnisse im Untersuchungsgebiet

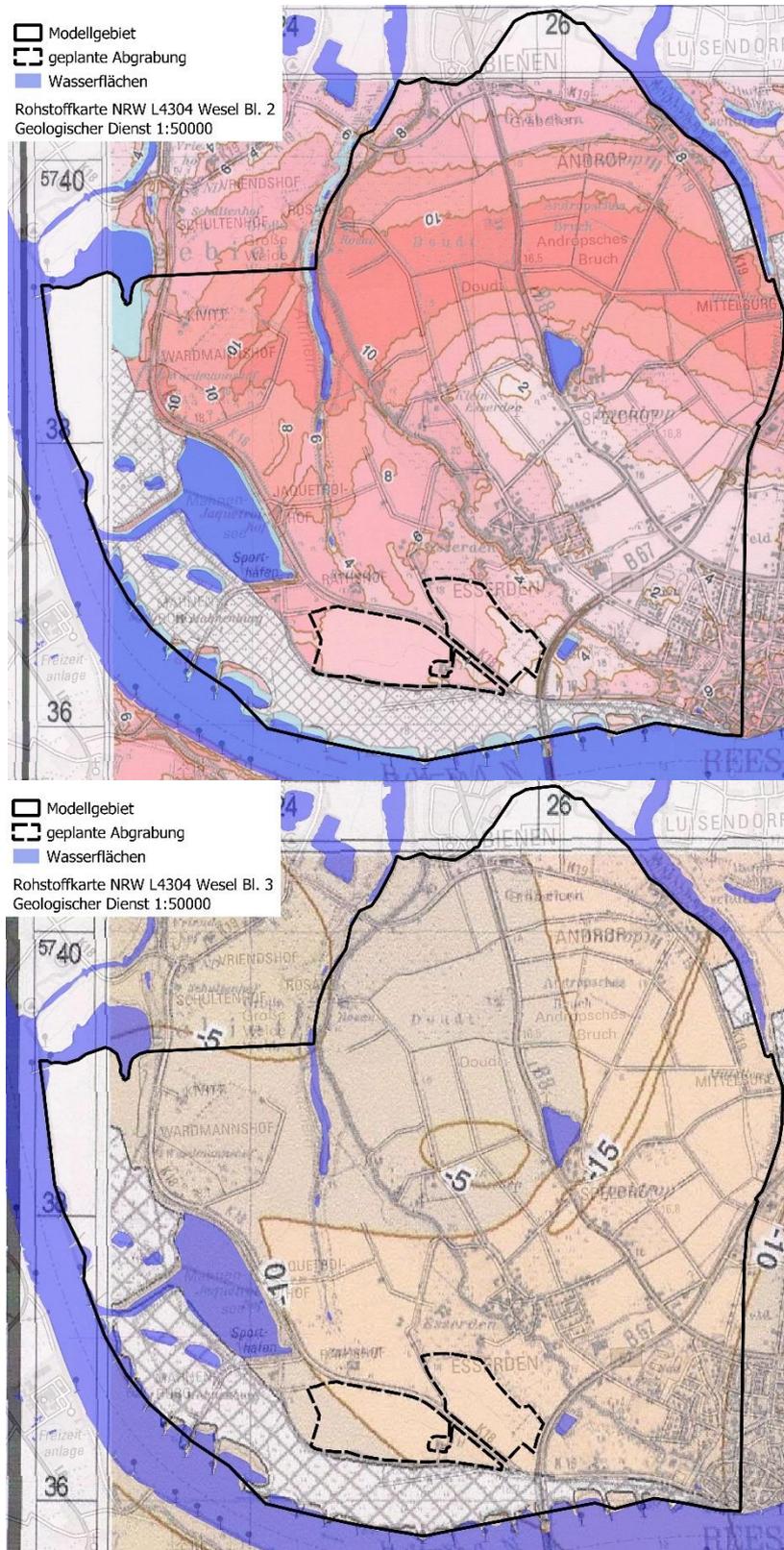


Abbildung 7: Mächtigkeit Auenlehm (oben) und Basis Quartär (unten)

3.4 Grundwassersituation

Zum allgemeinen Verständnis der verwendeten Begriffe Potenzial, Druckhöhe und Grundwasser Oberfläche erfolgt vorab eine kurze Erläuterung. Potenzial und Druckhöhe sind gleichbedeutend und werden in diesem Bericht auch synonym verwendet. Die Messwerte aus dem Grundwasserraum werden an Messstellen erhoben, die wie Brunnen einen Filter besitzen, über den das Grundwasser eindringen kann. Die Standrohrspiegelhöhe als Messwert (Grundwasserspiegel in der Messstelle) gibt das Mischpotential an, welches im Grundwasserraum über die Länge des Filters herrscht. Im Idealfall wäre ein Filter sehr kurz und unmittelbar an der Grundwasser Oberfläche angebracht. Da dies nicht praktikabel ist, muss in der Praxis immer davon ausgegangen werden, dass Messwerte aus verschiedenen Messstellen nicht immer die gleiche Information und vor allem nicht immer die Lage der Grundwasser Oberfläche anzeigen. Dennoch wird so vorgegangen, als ob die Messwerte genau dies zeigen würden. Die gemessenen Potentiale werden in Karten mit Linien gleicher (Druck-)Höhe dargestellt. Im Idealfall stellen diese Linien die Lage der Grundwasser Oberfläche dar. Neben den oben angesprochenen, kaum zu vermeidenden Problemen der exakten Messung kommt eine zweite Einschränkung hinzu, wenn ein Grundwasserleiter nach oben von einer gering durchlässigen Schicht begrenzt wird und als gespannt bezeichnet wird. Die die Strömung im Grundwasserleiter begrenzende Grundwasser Oberfläche liegt dann praktisch an der Grenze zur gering durchlässigen Schicht. Die gemessenen Potentiale sind die Höhe, bis zu der das Wasser in der Messstelle ansteigt, aber nicht die Höhe bis zu der das Grundwasser im Untergrund tatsächlich angestiegen ist.

Für das Modellgebiet und die nähere Umgebung standen 26 Grundwassermessstellen mit Messwerten zur Verfügung (Abbildung 8), die zur Ableitung einer mittleren Grundwassersituation verwendet werden konnten. Acht Grundwassermessstellen des AG wurden 2007 mit Datenloggern ausgestattet, die anfangs stündlich und ab Sommer 2008 täglich zwei Werte aufgezeichnet haben. Zehn weitere Grundwassermessstellen werden seit 1996 vom Naturschutzzentrum Kleve monatlich gemessen. Die verbliebenen Grundwassermessstellen hatten i.d.R. nur sehr wenig Messwerte, die zur Ableitung einer mittleren Grundwassersituation nicht ausreichend waren.

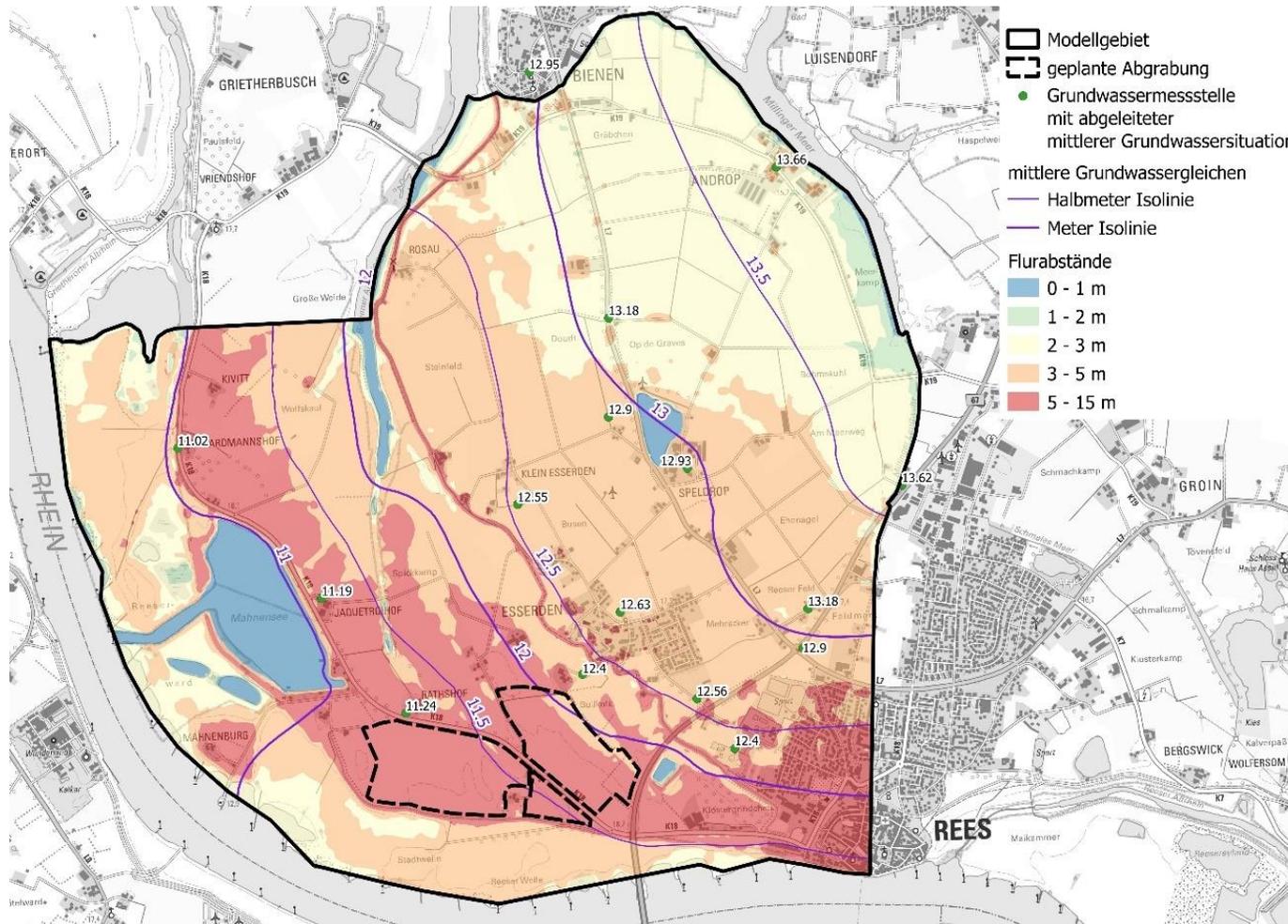


Abbildung 8: Mittlere Grundwassersituation im Modellgebiet

Bei allen Messstellen wurde eine Ganglinienanalyse vorgenommen, um einen mittleren Grundwasserstand ableiten zu können. Dabei wurde ein Zeitraum der letzten 10 Jahre betrachtet, da die Berücksichtigung von längeren Zeiträumen durch Trends in den Messwerten das heutige Bild der Grundwassersituation verzerren kann. Bei zu kurzen Zeiträumen fallen bei der Mittelwertbildung einzelne trockene oder nasse Jahre zu stark ins Gewicht.

Die höchste Belastbarkeit der Messwerte zeigten jene des Naturschutzzentrums Kleve, da sie nur wenig Datenlücken aufweisen und händisch über einen langen Zeitraum erhoben worden sind. Die Messwerte der Datenlogger haben den Vorteil, dass sie die Bewegung in kurzen Zeiträumen (praktisch kontinuierlich) aufzeichnen. Allerdings können durch Ausfälle oder eine Drift der Messsonden Ganglinien mit großen Datenlücken, sowie vereinzelt Sprünge, vorhanden sein. Vor allem die Datensprünge zeugen von unzuverlässigen Messwertrohdaten, die normalerweise vom Betreiber zeitnah korrigiert werden müssen. Eine rückwirkende Korrektur ist kaum möglich. Für 6 von 8 mit Datenloggern ausgestattete Messstellen konnten belastbare Mittelwerte abgeleitet werden. Die Abbildung 8 zeigt die Grundwassergleichen (Isopotenziallinien) und die 16 Grundwassermessstellen, die zur Konstruktion des Gleichenplans der mittleren Grundwassersituation verwendet wurden.

Der Rhein wurde mit seinem ZW-Wasserstand in der Interpolation berücksichtigt. Dies ist der häufigste gemessene Wasserstand (Medianwert), der erfahrungsgemäß besser zur mittleren Grundwassersituation passt als der Mittelwert. Der Grund dafür ist, dass der Mittelwert stark von den Extremwerten beeinflusst wird. Für das Grundwasser ist der Mittelwert der Messungen repräsentativ, da die Bewegungen wesentlich stärker gedämpft sind.

3.5 Wechselwirkungen Grundwasser und Rheinwasserstand

Für den Rhein liegen Tageswerte des Pegels in Rees seit 1990 vor (Abbildung 9). Das Rheingefälle entlang des westlichen Modellrands wurde aus Daten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung abgeleitet. Aus der Ganglinie ist das Hochwasser 1995 als höchstes Hochwasser der letzten 30 Jahre mit einem Scheitelwert von 19,2 m NHN zu erkennen. Für diesen Zeitraum liegen allerdings keine verwendbaren Grundwasserdaten vor, so dass auf andere, niedrigere Hochwasserereignisse zur Ermittlung der Reaktionen des

Grundwassers auf das Rheinhochwasser zurückgegriffen werden muss. Diese Informationen werden in der Modellkalibrierung benötigt. Das höchste Hochwasser, seit Beginn der automatischen Messwertaufzeichnung durch den AG, war im Januar 2011 mit einem Rheinpegelwert bei Rees von knapp 18 m NHN, also 1,2 m unter der Hochwasserspitze von 1995.

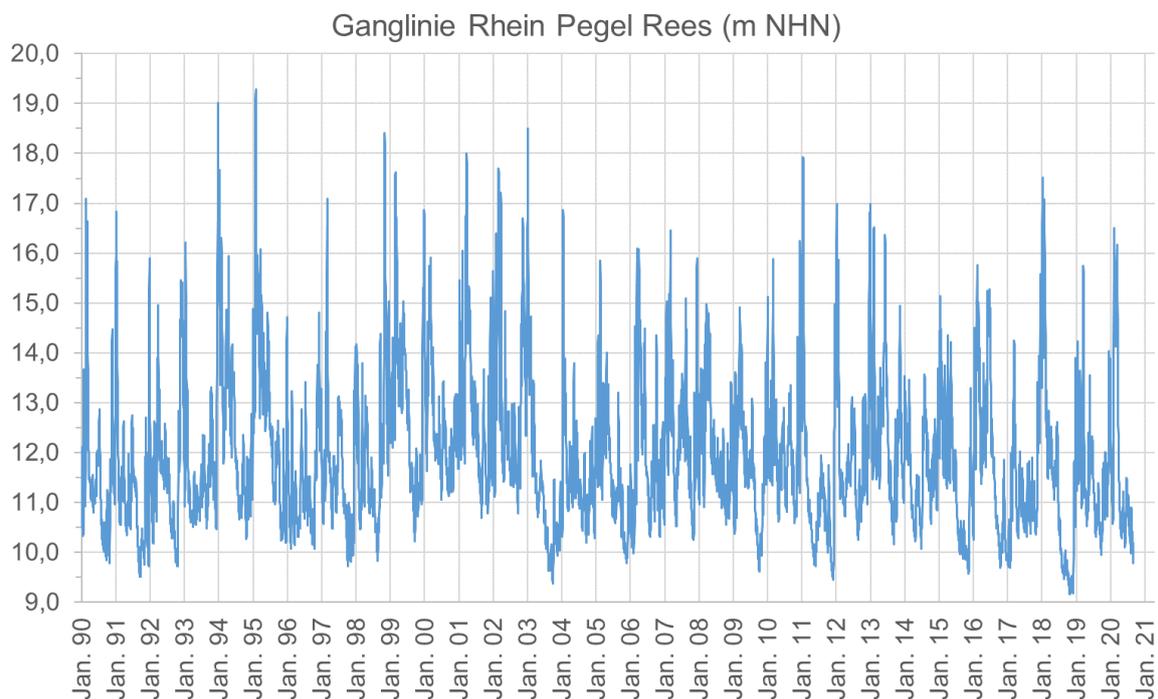


Abbildung 9: Ganglinie des Rheins am Pegel Rees

In Abbildung 10 ist ein Ausschnitt der Ganglinie für das Hochwasser im Januar 2011 für fünf Grundwassermessstellen in unterschiedlicher Entfernung zum Rhein dargestellt. Die Grundwassermessstelle am Mahnensee (VI) verläuft parallel zum Rheinwasserspiegel, da sie sich stromabwärts des Rheinpegels befindet, liegt sie unterhalb des Rheinwasserspiegels (es wurde hier keine Gefällekorrektur des Rheinpegels Rees vorgenommen).

Alle anderen Grundwassermessstellen weisen einen ähnlich verzögerten Scheitelwert der Grundwasserstände von wenigen Tagen auf. Dieser befindet sich ca. 3 m unterhalb des Hochwasserscheitels des Rheins.

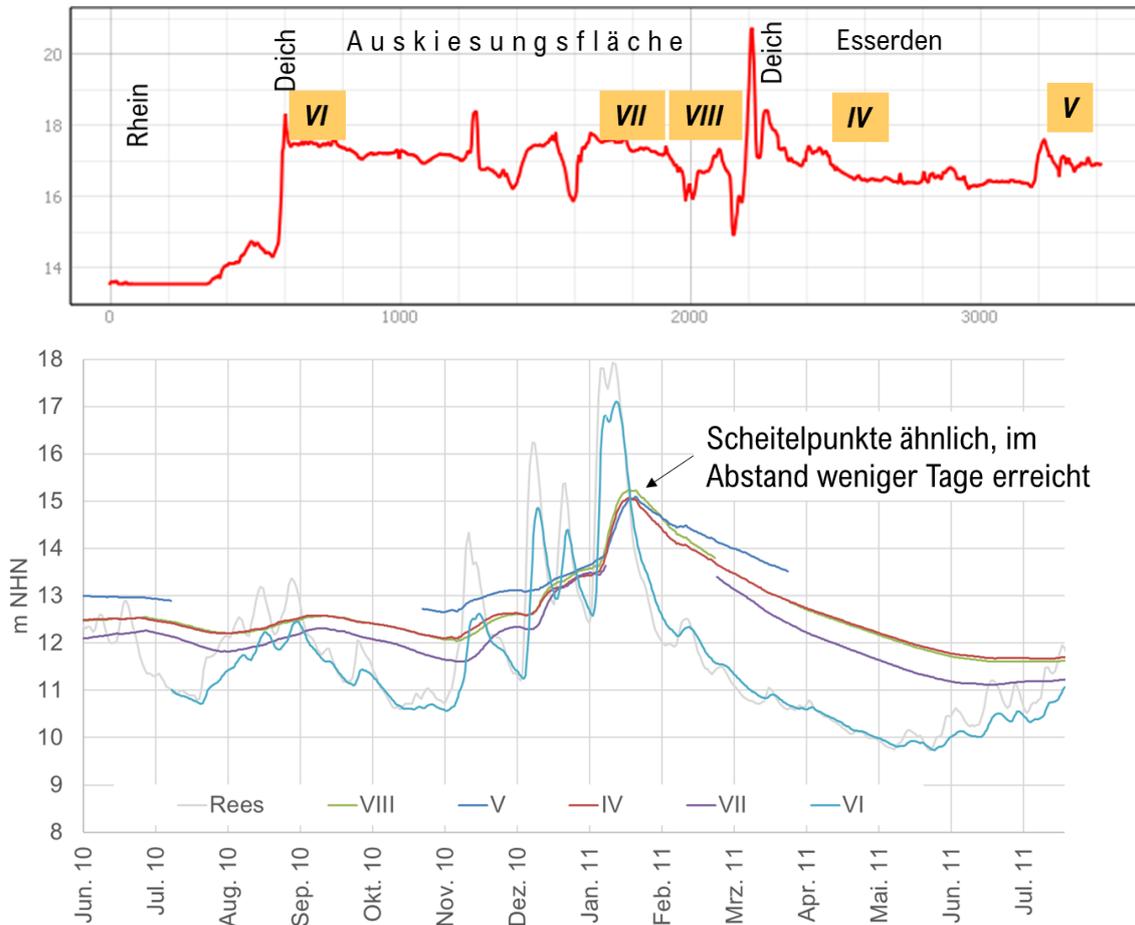


Abbildung 10: Ganglinie für 5 Grundwassermessstellen in unterschiedlicher Entfernung vom Rhein (oben: Lage der Messstellen entlang der Abbildung 11 dargestellten Schnittlinie (grün))

Der Hochwasserscheitel befindet sich knapp unter 18 m NHN. Auch wenn sich das Gelände vor dem Banndeich weitestgehend unterhalb dieser Höhe befindet, so wurde bei diesem Ereignis offensichtlich der Sommerdeich mit einer Höhe von 17,9 m NHN nicht überflutet. Zur Beurteilung des Worst-Case-Szenarios sind höhere Rheinwasserstände als die von 2011 erforderlich.

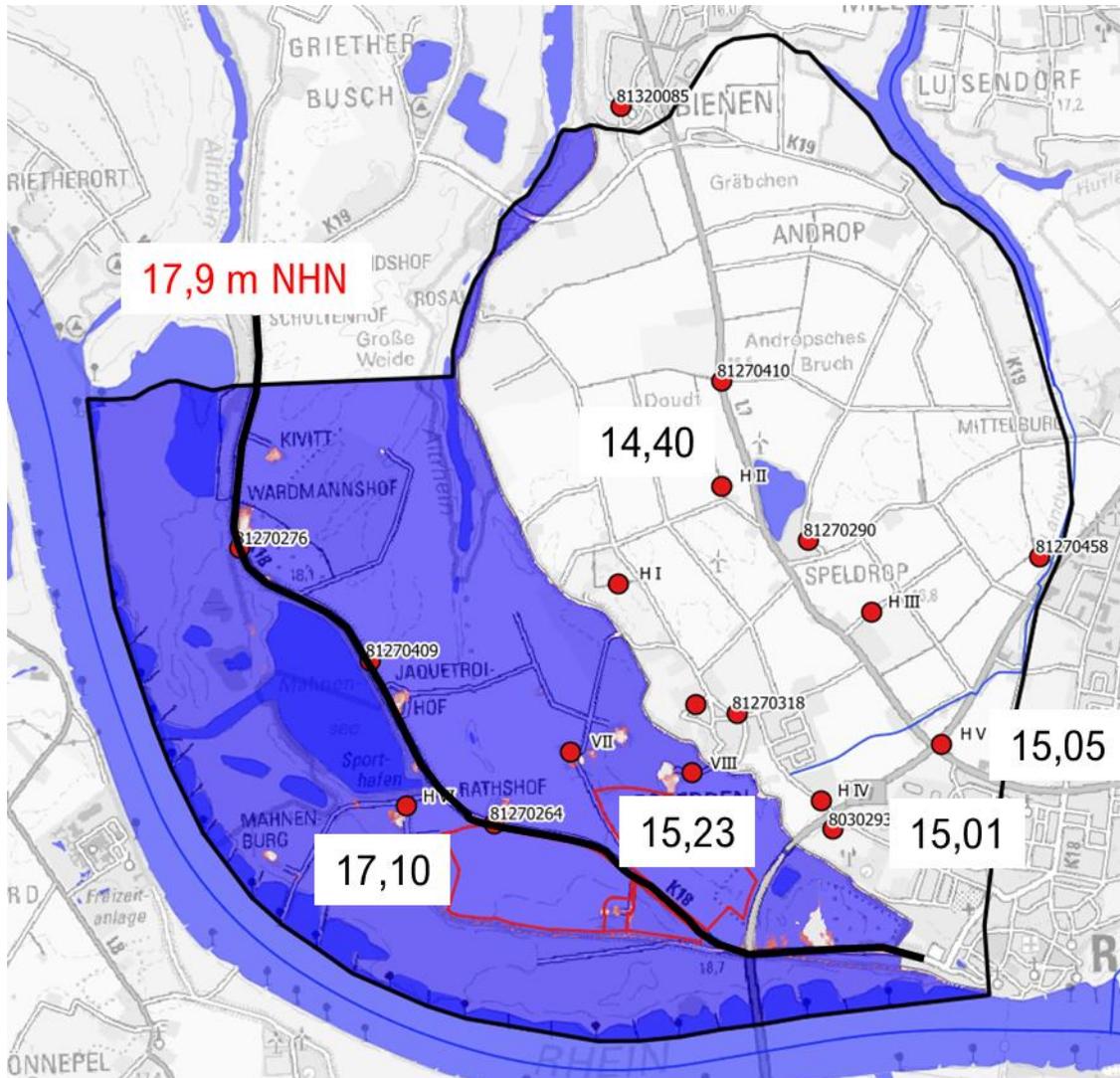


Abbildung 11: Scheitelwerte der Grundwasserstände Hochwasser Januar 2011 und Geländehöhen unterhalb 18 m NHN vor dem Banndamm (blaue Flächen)

3.6 Grundwasserneubildung

Für die Grundwasserneubildung im Modellgebiet standen Daten des Landes nach GROWA (Zeitraum 1971-2000, Rasterdaten im 100 m Raster) (Bogena, et al., 2003) und nach dem Verfahren GWneu (Meßer, 2013) zur Verfügung. Bei letzterem konnten die konkreten Eingangsdaten, wie die Flurabstände aus der aktuellen Grundwassersituation (Abbildung 8), verwendet werden. Hier wurde die Grundwasserneubildung für das 30-jährige Mittel 1981 bis 2010 gemäß der Klimadaten des DWD berechnet. In Abbildung 12

und Abbildung 14 sind die Berechnungsergebnisse dargestellt. Die mittlere Grundwasserneubildung im Modellgebiet beträgt bei GROWA (1971-2000) 170 mm/a und bei GWneu (1981-2010) 207 mm/a.

In größeren Teilen sind die Grundwasserneubildungsraten von 200 bis 300 mm/a auf den Ackerflächen vergleichbar. Ein deutlicher Unterschied ist vor allem östlich der L7 (Straße von Rees nach Bienen) erkennbar. Während hier nach GWneu die Grundwasserneubildung >200 mm/a beträgt, verringert sie sich bei GROWA großflächig auf unter 10 mm/a. Ein ebenso großer Unterschied besteht zwischen Rhein und Sommerdeich. Nach GWneu beträgt die Grundwasserneubildung bei den wieder verfüllten Abgrabungen über 300 mm/a und bei GROWA 130 bis 140 mm/a. Bei GWneu sind sowohl die Eingangsgrößen als auch die Berechnungsergebnisse für alle Wasserhaushaltsgrößen in den Berechnungsergebnissen enthalten, während für GROWA nur die Rasterdaten des Ergebnisses (Grundwasserneubildung) vorliegen. In den beiden genannten großflächigen Bereichen sind die geringen Grundwasserneubildungsraten nicht nachvollziehbar. Weder die Bodenverhältnisse noch die Flurabstände sind westlich und östlich der L7 unterschiedlich. Aus diesem Grund wurde für die Grundwassermodellierung auf die Grundwasserneubildung nach GWneu zurückgegriffen. Im Folgenden Abschnitt wird das Verfahren und die dazu verwendeten Eingangsgrößen kurz beschrieben, um die Ergebnisse nachvollziehbar zu machen.

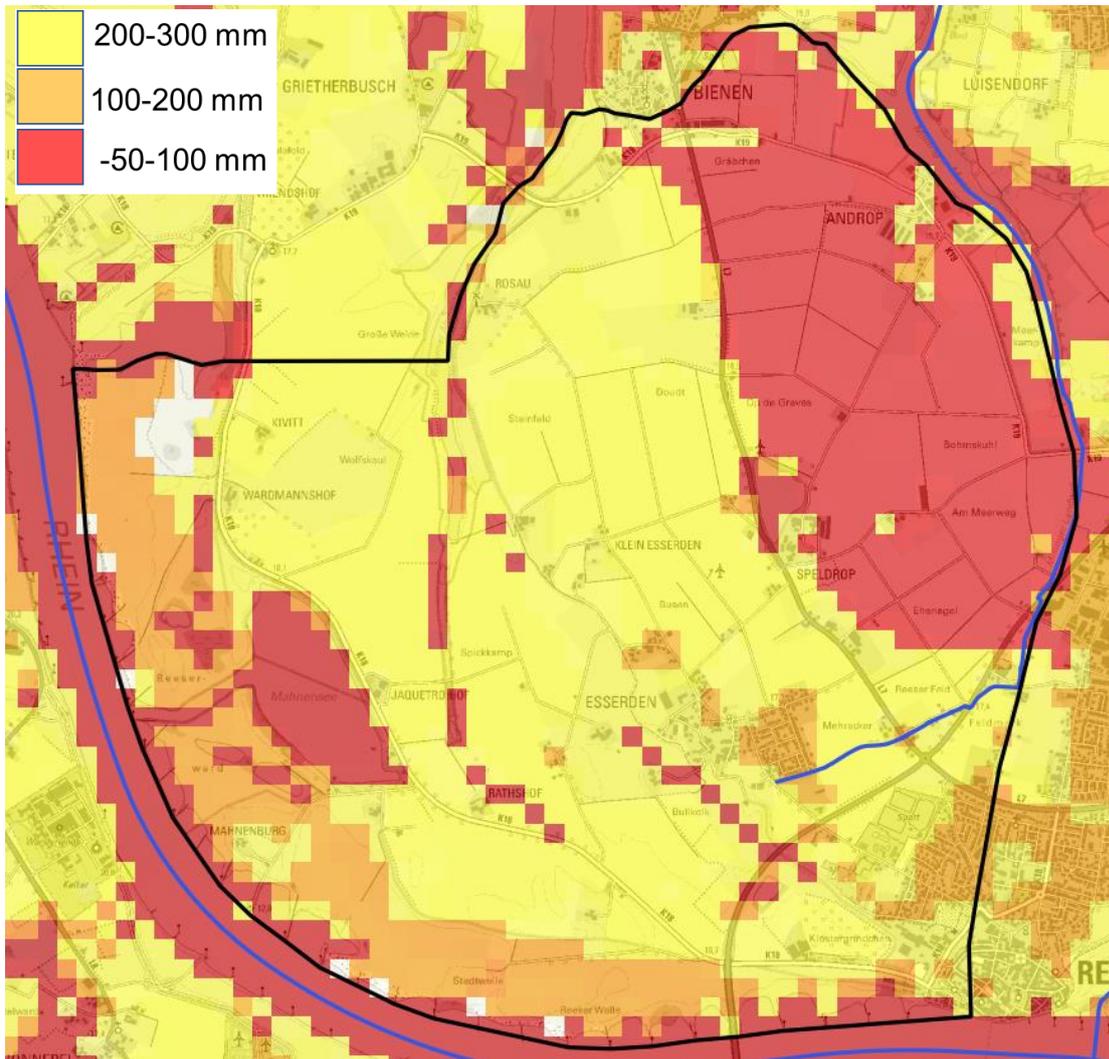


Abbildung 12: Grundwasserneubildung gemäß GROWA (1971-2000)

3.6.1 Verfahren zur Berechnung nach GWneu

Grundlage der Berechnungen für GWneu ist die Wasserhaushaltsgleichung. Diese wird für jede homogene Teilfläche gelöst. In Abbildung 13 sind die benötigten Eingangsdaten bzw. die verwendeten Grundlagen (eckige Rahmen) und die berechneten Größen (gerundete Rahmen) sowie die Beziehungen zueinander angegeben. Für die Berechnung von Verdunstung und Direktabfluss wird eine Flächenverschneidung der jeweils notwendigen Grundlagenparameter mit dem Programmsystem ArcInfo bzw. ArcView durchgeführt. Für jede in sich homogene Kleinfläche werden die beiden Größen berechnet.

Die Berechnung der Verdunstung erfolgt für die verschiedenen Kombinationen von Klimatopen, Boden, Flurabstand und Flächennutzung nach dem Verfahren BAGLUVA (Glugla, et al., 2003). Die Gras-Referenzverdunstung wurde vom Deutschen Wetterdienst übernommen. Der Gesamtabfluss ist die Differenz aus dem Niederschlag und der Verdunstung gemäß Wasserhaushaltsgleichung. Vom Gesamtabfluss wird im nächsten Schritt der Direktabfluss abgetrennt. Die Berechnung des Direktabflusses erfolgt über die Bestimmung des Anteils p am Gesamtabfluss, also an dem Wasser, das nicht verdunstet. Die sich je nach Flächennutzung/Befestigung, Boden, Flurabstand und Hangneigung ergebenden Anteile p des Direktabflusses am Gesamtabfluss können den Tabellen unter www.gwneu.de entnommen werden. Der Direktabflussanteil nimmt mit steigendem Flurabstand ab und ist bei bindigen Böden deutlich größer als bei nicht bindigen Böden. Es wird ferner davon ausgegangen, dass der Direktabflussanteil p am Gesamtabfluss von Acker- bzw. Grünland über Mischvegetation bis zum Wald abnimmt. Durch eine weitere Verschneidung der flächendifferenzierten Ergebnisse von Niederschlag, Verdunstung und Direktabfluss erhält man nach der Berechnung mit der Wasserhaushaltsgleichung die Grundwasserneubildung für jede in sich homogene Kleinfläche. Mit dem Verfahren werden langjährige Mittelwerte berechnet, eine Aufteilung auf die Monate ist möglich.

Für jede Einzelfläche können die verwendeten Grundlagen und Berechnungsgrößen im GIS eingesehen und auf Plausibilität geprüft werden. Das Verfahren ist im Zusammenhang mit dem Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD) geprüft worden (Neumann 2004) und für eine Vielzahl von Verfahren in NRW (z.B. für die Trinkwassergewinnung oder bei allen Grundwassermodellen von Emschergenossenschaft und Lippeverband) eingesetzt worden. Die grundsätzlichen Zusammenhänge und Einflussgrößen auf die Grundwasserneubildung können (Meßer, 2018) entnommen werden.

3.6.2 GWneu im Modellgebiet

Die klimatischen Grundlagendaten stammen aus Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes 1981-2010 (Niederschlag) bzw. 1991-2010 (potenzielle Verdunstung). Bei der Berücksichtigung der Flächennutzung wurde auf die aktuellen ATKIS-Daten der Landesvermessungsbehörden zurückgegriffen. Zur Berücksichtigung der Böden nach der entsprechenden Klassifizierung im Berechnungsverfahren wurde auf die BK50 des Geologischen Dienstes zurückgegriffen. Dieser Datensatz wurde im Hinblick auf die nutzbare Feldkapazität interpretiert. Die Berücksichtigung wiederverfüllter Abgrabungen, die in der BK50 nicht mit Bodenparametern belegt sind, erfolgte mit der Annahme, dass diese mit eher sandigem Material verfüllt wurden, als im ursprünglichen Zustand vorhanden waren

(Auenlehm). Die Flurabstände wurden für das Modellgebiet aus der Verschneidung von Geländeoberfläche und mittlerer Grundwasseroberfläche ermittelt und in der Klassifizierung gemäß Abbildung 13 verwendet. Letztere sind in Abbildung 8 dargestellt. Grundwasserabhängige Böden sind danach fast ausschließlich entlang der Altrheinarme vorhanden.

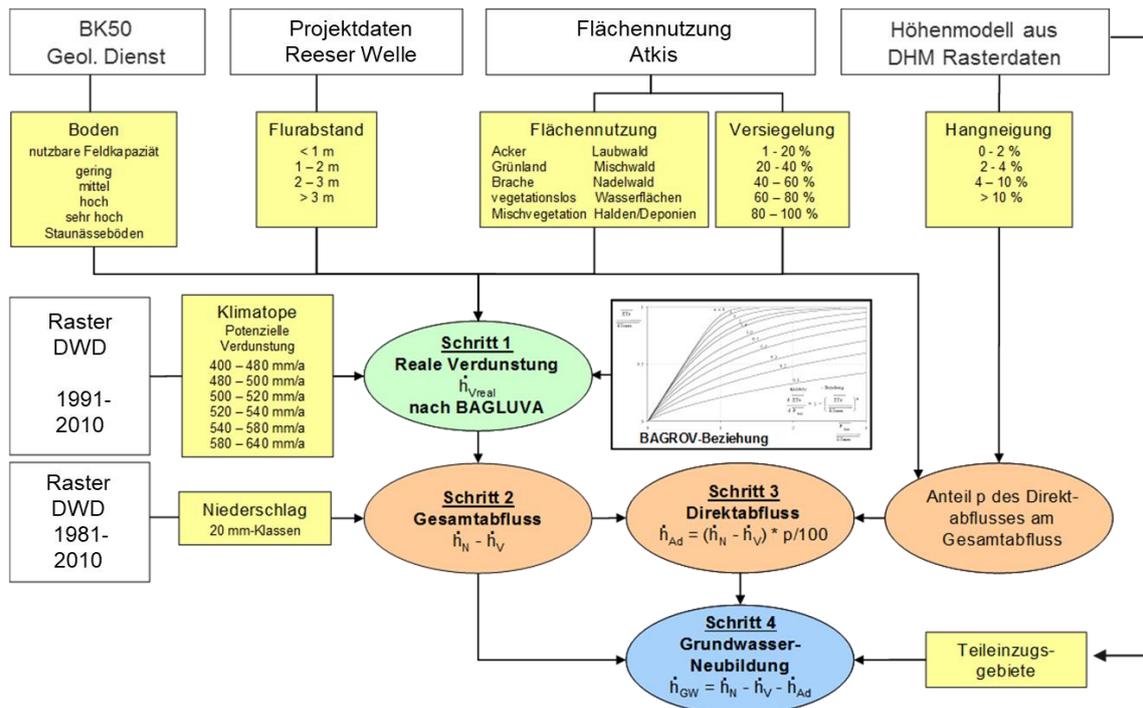


Abbildung 13: Verfahren GWneu und Eingangsdaten

Die Grundwasserneubildungsverteilung ist insgesamt plausibel (Abbildung 14). Über weite Flächen beträgt sie 200 mm/a bis 300 mm/a. Vor dem Sommerdeich wegen der sandigeren Böden über 300 mm/a. Geringere Grundwasserneubildungsraten zwischen 50 mm/a und 200 mm/a ergeben sich in bebauten Bereichen. In Bereichen mit grundwasserabhängigen Böden sind sie mit <150 mm/a noch einmal geringer, da hier die Verdunstung deutlich höher ist als bei terrestrischen Böden. Bei Werten <100 mm/a handelt es sich um grundwasserabhängige Böden mit Gehölzbewuchs (z.B. südlicher Teil des Bienener Altrheins) oder um Flächen mit großer Hangneigung (z.B. Deiche und Böschungen der Abgrabungsflächen). Die Grundwasserneubildung offener Wasserflächen wurde mit 0 angesetzt, welches detailliert im nachfolgenden Kapitel 3.6.3 beschrieben wird. Die Grundwasserneubildung beträgt im Gebietsmittel 207 mm/a, die Verdunstung 492 mm/a und der Direktabfluss 78 mm/a.

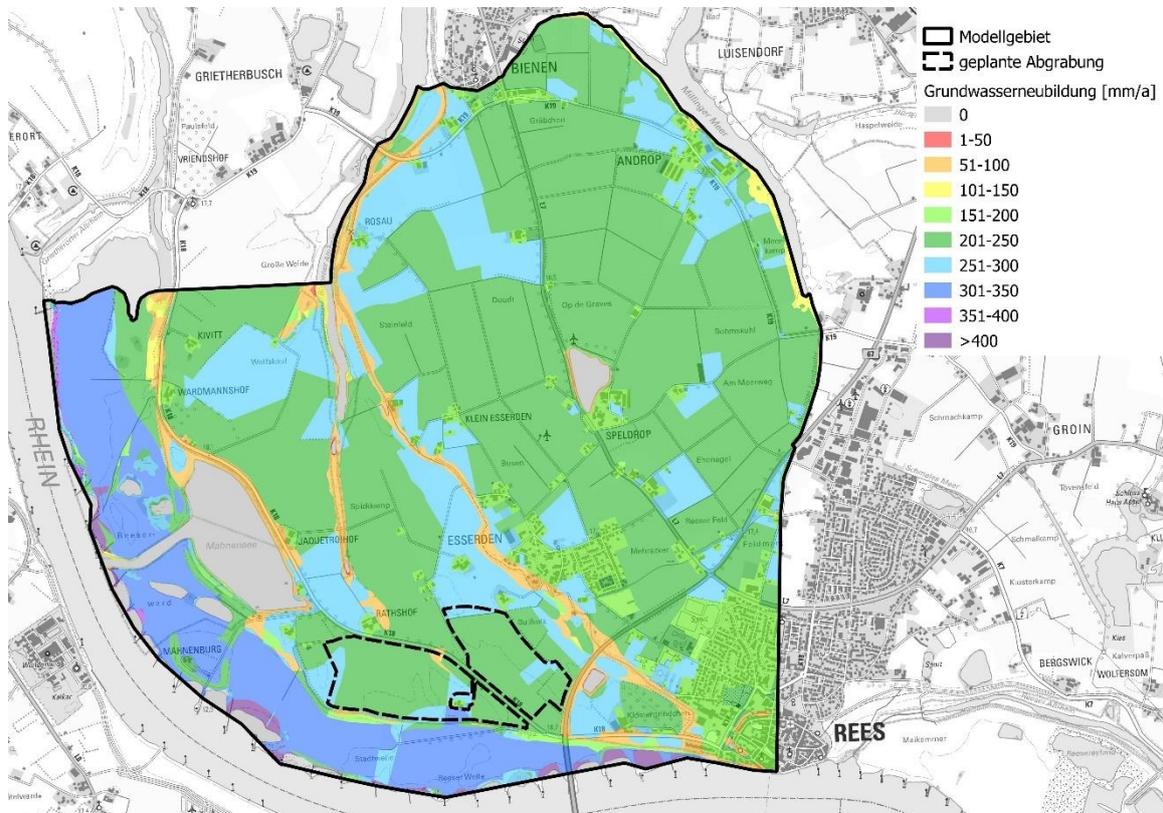


Abbildung 14: Grundwasserneubildung 1981-2010 in mm/a im Modellgebiet nach dem Verfahren GWneu

3.6.3 Seeverdunstung

Die Herstellung eines mit dem Grundwasser in Kontakt stehenden oberirdischen Gewässers durch eine Abgrabung im Grundwasserraum führt zu einer Veränderung des Wasserhaushalts des betroffenen Gebiets. Im vorliegenden Fall besteht das betroffene Gebiet heute aus einer Ackerfläche auf Auenlehmboden, das Gelände ist nicht geneigt. Durch die geänderte Nutzung verändert sich die Verdunstung und damit auch die Wasserbilanz der Fläche. Die vorherige Grundwasserneubildung auf der Ackerfläche ist der Bilanz von Niederschlag und Verdunstung der Seefläche gegenüberzustellen. Gemäß DVWK M238/1996 (siehe auch DWA Merkblatt M615) wurde die Seeverdunstung nach dem vereinfachten Kombinationsverfahren nach Richter 1984 für den Zeitraum 1981 bis 2010 auf Tagesbasis berechnet und zu Monatssummen zusammengefasst (Abbildung 15). Basis der Berechnung sind die Klimadaten der Station Düsseldorf des DWD, die für den Niederrhein als naturraumtypisch vorausgesetzt werden kann. In Abbildung 15 ist der Jah-

resgang der Verdunstung, der durch die Temperatur und andere Einflussgrößen beeinflusst wird, erkennbar. In den Sommermonaten treten maximale Verdunstungsraten von 140 bis 180 mm/Monat auf. Die niedrigsten Werte sind im Winter mit 10 bis 20 mm/Monat. Im 30-jährigen Mittel beträgt die Verdunstung 760 mm/a.

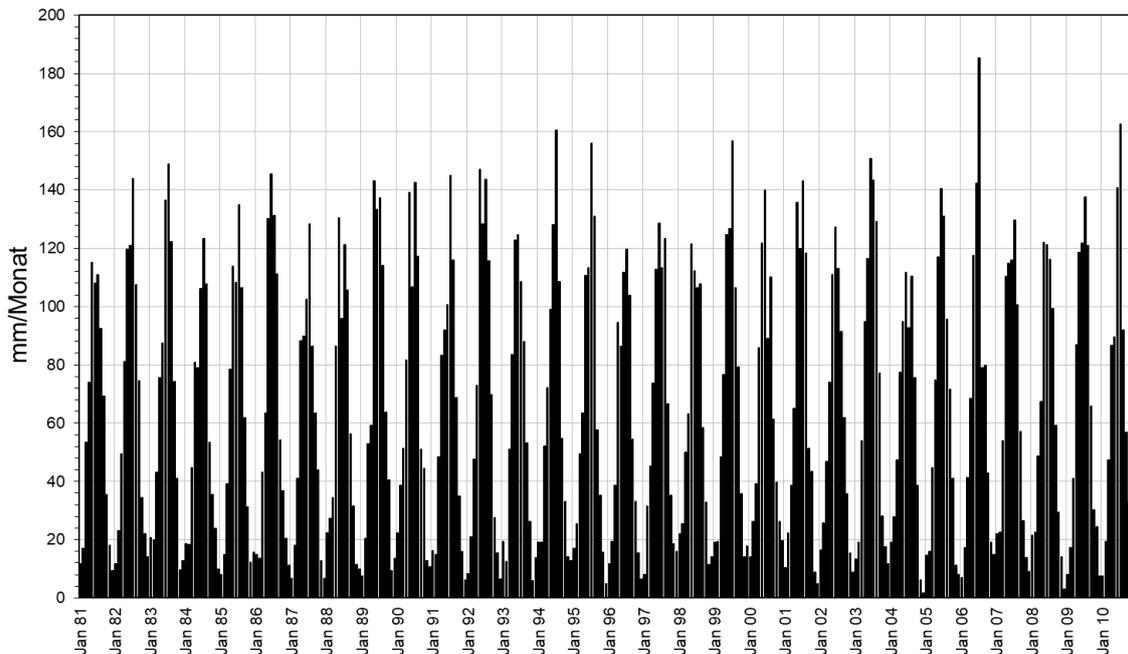


Abbildung 15: Monatliche Seeverdunstung nach DVWK M238/1996 (Klimadaten: Station Düsseldorf DWD)

Da die Niederschläge mehr oder weniger unregelmäßig über das Jahr verteilt sind, ergibt sich auch bei der Bilanz aus Niederschlag und Verdunstung ein Jahrgang aus sommerlichen Phasen mit einem Defizit und winterlichen Phasen mit einem Überschuss (Abbildung 16). Die Überschüsse erreichen Werte zwischen 80 und 140 mm/Monat und die Defizite -80 bis -160 mm/Monat. Bei einem langjährigen Niederschlag von 798 mm/a ergibt sich für die Station Düsseldorf des DWD ein Überschuss von 37 mm/a. Der langjährig mittlere Niederschlag im Raum Rees beträgt (gerundet) 790 mm/a und ist damit ähnlich groß. In den 30 Jahren treten sowohl Jahre mit deutlichem Überschuss (1998: 271 mm/a) als auch Jahre mit deutlichem Defizit (2003: -290 mm/a) auf. Bei GROWA werden für den Zeitraum 1971-2000 im Raum nördlich Rees für Wasserflächen Werte zwischen -20 mm/a und -6 mm/a angegeben. Im Grundwassermodell wird für alle offenen Wasserflächen die Bilanz aus Niederschlag und Verdunstung auf null gesetzt.

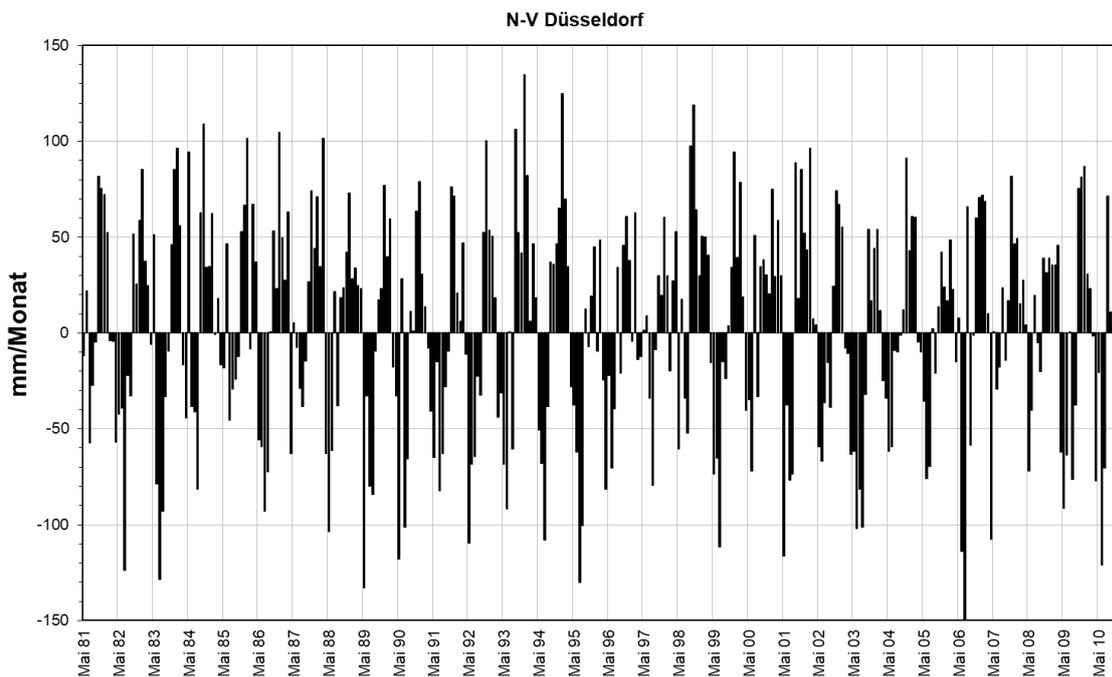


Abbildung 16: Monatliche Bilanz aus Niederschlag und Verdunstung (Daten: Klimastation Düsseldorf DWD)

Für die geplante Abgrabungsfläche beträgt der 30-jährige Mittelwert der Grundwasserneubildung bei Ackernutzung in weiten Teilen 219 mm/a, in Randbereichen 299 mm/a. Bei einer Abgrabungsfläche von 78 ha reduziert sich das zum Rhein abströmende Grundwasserdargebot um 171.000 m³/a (bei Ansatz von 0 mm/a auf der Wasserfläche) bzw. 142.000 m³/a (bei +37 mm/a auf der Wasserfläche).

Diese Dargebotsabnahme ist für den Rhein nicht relevant und die Grundwasserflurabstände im Umfeld der Abgrabung werden weniger durch die Grundwasserneubildung auf der Abgrabungsfläche als vielmehr durch die Nähe zum Rhein und die Seeflächen der Abgrabungsseen bzw. die Ausspiegelung auf der freien Seefläche bestimmt.

Durch die Reduzierung der Grundwasserneubildung auf 0 mm/a werden die Einflüsse in der stationären Simulation mit dem Grundwassermodell berücksichtigt.

4 Aufbau des numerischen Modells

4.1 Verwendete Software

Für das numerische Modell wurde die Software SPRING 4.3 (delta h, 2018) verwendet. Es ist ein Finite-Elemente (FE) Programm zur Berechnung der gesättigten und ungesättigten Strömung im Grundwasserraum. Es erlaubt die lagetreue Abbildung von Ortspunkten als Modellknoten. Somit wurden alle relevanten Merkmale der Fläche im FE-Netz berücksichtigt. Dies sind:

- Abgrabungsfläche
- Deiche (Sommer- und Banndeiche)
- Fließgewässer
- Seen und Teiche
- Grundwassermessstellen

Der Knotenabstand im rund 18,6 km² großen Modellgebiet beträgt ca. 50 m. Eine feinere Diskretisierung wurde in den Bereichen der geplanten Abgrabung (15 m) sowie im Ort Esserden (13 m) erstellt. Dadurch kann in diesen Bereichen eine hohe Auflösung erzielt werden. Der vertikale Knotenabstand beträgt bei 8 Schichten im Mittel ca. 5 m.

Ein großer Teil des Pre- und Postprocessing der Daten wurde mit dem GIS-Werkzeug QGIS durchgeführt, mit dem alle verwendeten Eingangsdaten und Berechnungsergebnisse überlagert werden können.

Für die Auswertung der über 1000 Sieblinien zur Berechnung der ortsbezogenen k_f -Werte wurde ein Script in der Programmiersprache Python erstellt. Ebenso erfolgte die Erstellung der Ganglinien der einzelnen oberirdischen Gewässer für die Hochwasserbetrachtung sowie das Datenhandling der zeitbezogenen Rheinwasserstände über ein dafür erstelltes Script.

Die Grundwasserneubildung wurde mit dem Werkzeug GWneu berechnet, welches ebenfalls eine GIS-gestützte Programmierung darstellt.

4.2 Dreidimensionaler Aufbau

Auf Grundlage der im Abschnitt Datenanalyse beschriebenen Lithologie im Modellgebiet, erfolgt der 3D-Aufbau des Modells. Die oberen zwei Modellschichten bilden den Auenlehm ab. Die Kiesterrasse des Rheins im Liegenden wird mit 6 Schichten im Grundwassermodell berücksichtigt. Die Modellbasis bilden die gering durchlässigen tertiären Ablagerungen.

Die Mächtigkeit des Auenlehms resultiert aus den vorhandenen Mächtigkeitskarten des Auenlehms sowie aus den zusätzlich vorhandenen Bohrungen, die sich überwiegend im Bereich der geplanten Abgrabung befinden. Die räumliche Verteilung der Auenlehmmächtigkeit zeigt die Abbildung 17. Die Schichten 1 und 2 teilen die Gesamtmächtigkeit dieser Schicht jeweils in gleich mächtige Teile. Die anthropogenen Aufschüttungen, wie beispielsweise die Deiche oder die Aufschüttung an der Reeser Landstraße, sind Bestandteil der Schicht 1 und wurden nicht näher differenziert.

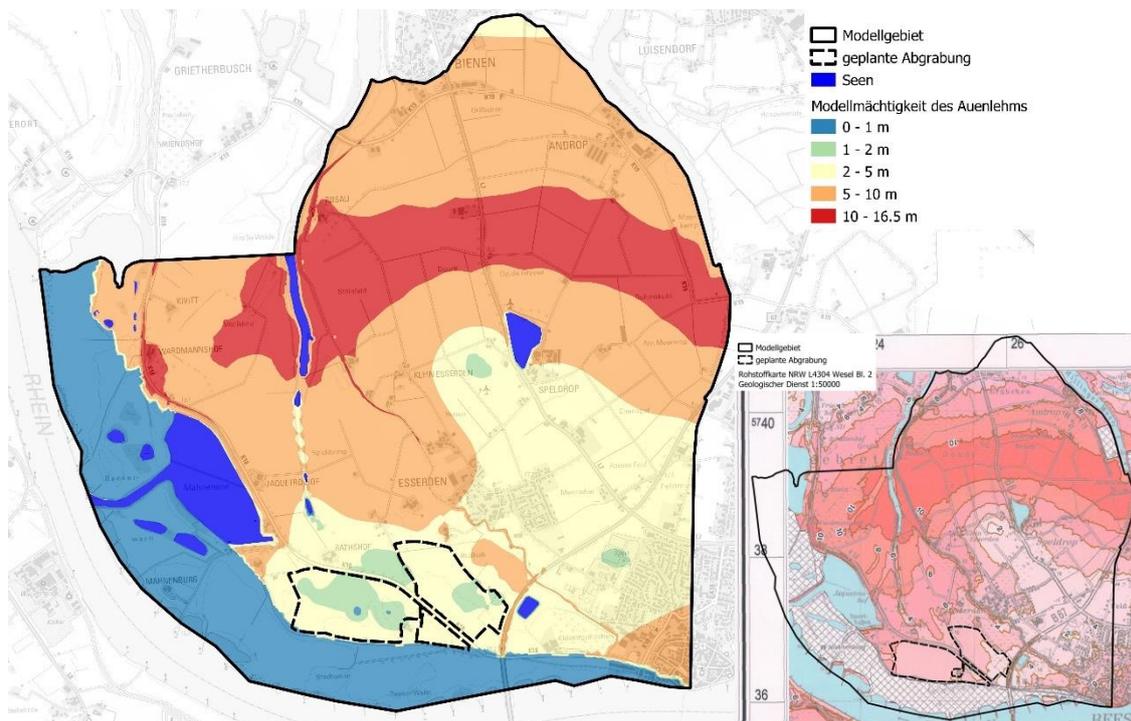


Abbildung 17: Gesamtmächtigkeit des Auenlehms im Grundwassermodell
(Schicht 1 und 2) auf Grundlage der Rohstoffkarte NRW L4304 B. 2

Die Gesamtmächtigkeit der Kies- und Sandterrasse wurde ebenfalls aus den vorliegenden Karten zur Quartärbasis und den vorliegenden Bohrungen im Bereich der Abgrabung erstellt. Es wurde der Ansatz verfolgt, die vorliegenden Daten vollständig zu nutzen, auch wenn es die große Datenfülle im Bereich der Abgrabung ermöglicht hätte, diese ausdünnen. Die räumliche Verteilung im Modellgebiet zeigt die Abbildung 20. Im Modell wird die Terrasse durch die Modellschichten 3 bis 8 repräsentiert. Da in den vorliegenden Bohrungen keine durchgehende Schichtung erkennbar war, wurden die Schichtunterkanten mit fester Höhe und einer Mächtigkeit von 5 m definiert. Die Schichtmächtigkeit von 5 m wird im Liegenden und Hangenden angepasst, wo die Terrasse an den Auenlehm oder die Quartärbasis grenzt. Ein Vertikalschnitt durchs Modell vom Rhein bis nach Esserden (Abbildung 21) zeigt diesen Schichtaufbau.

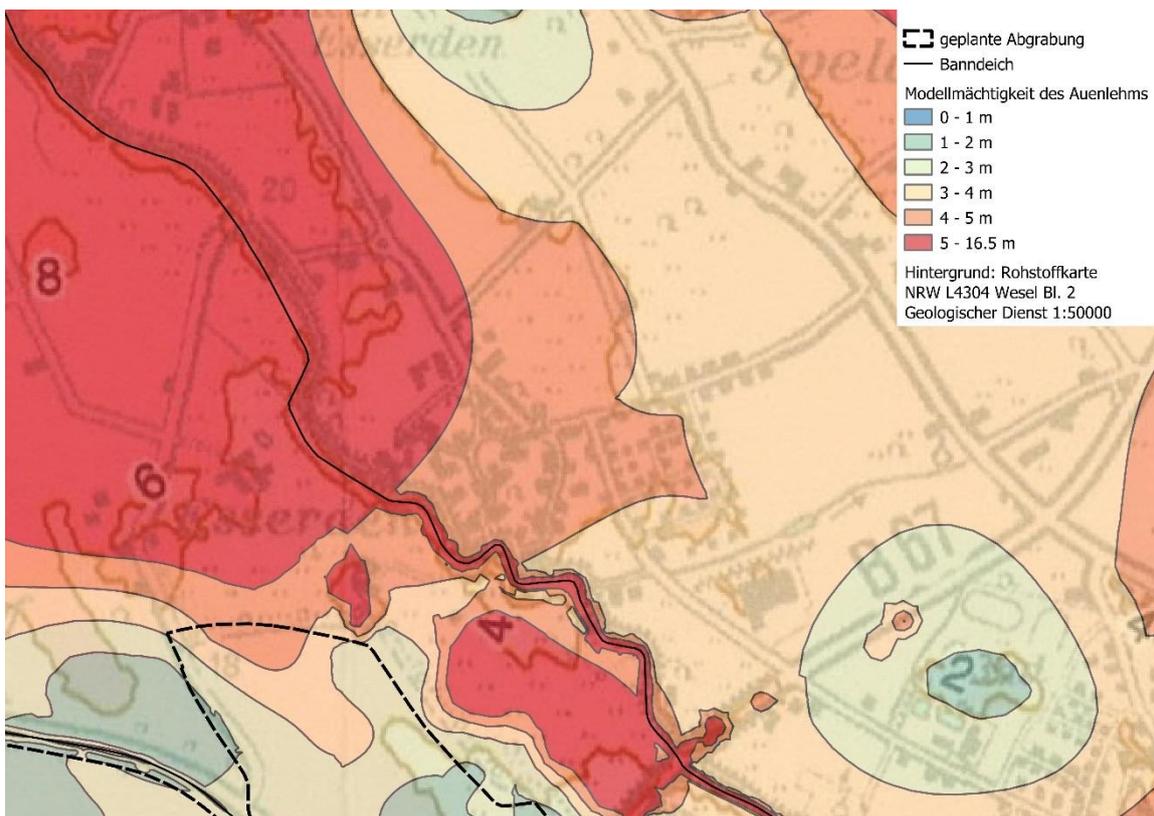


Abbildung 18: Gesamtmächtigkeit des Auenlehms im Grundwassermodell in Esserden

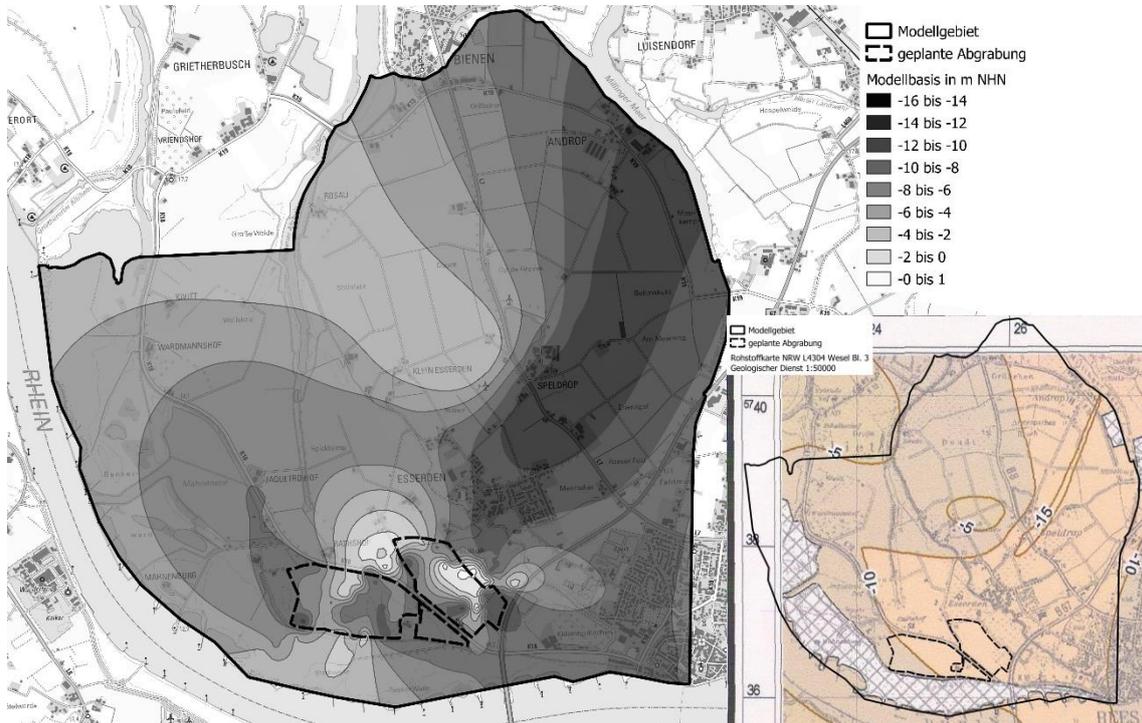


Abbildung 19: Quartärbasis des Modells aus der Rohstoffkarte NRW L4304 B. 3 abgeleitet

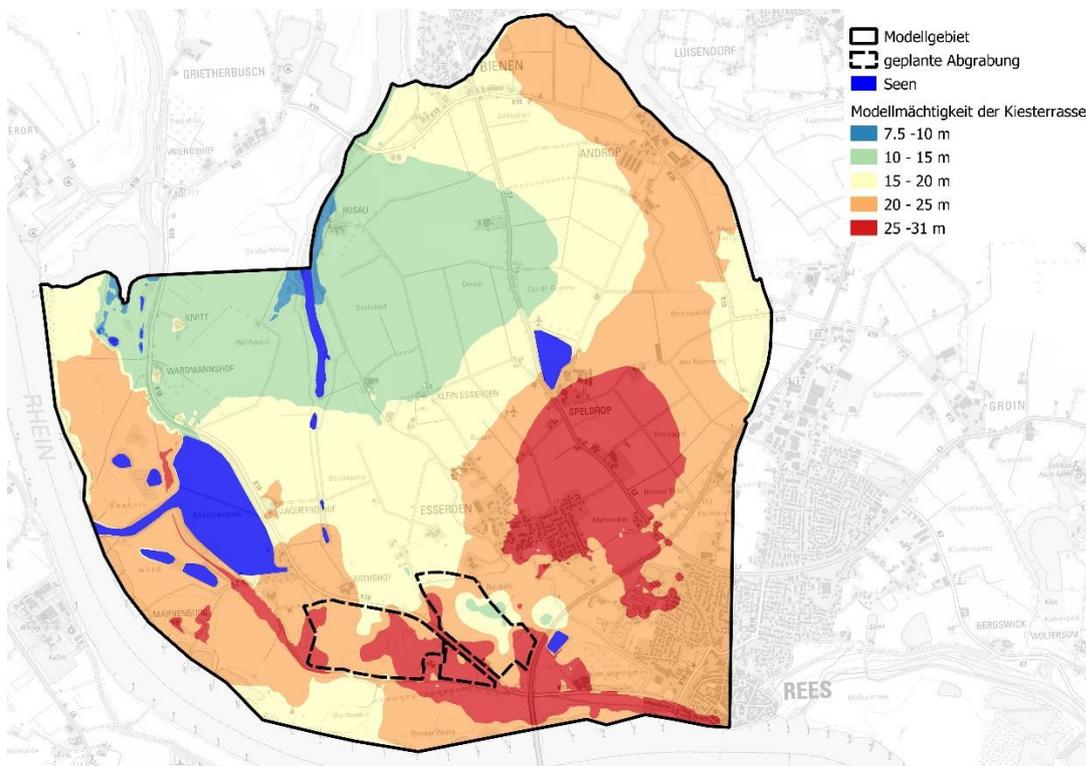


Abbildung 20: Gesamtmächtigkeit der Kiesterrasse im Grundwassermodell (Schicht 3 bis 8), resultiert aus der Auenlehmmächtigkeit (Abbildung 17) und der Höhe der Quartärbasis (Abbildung 19)

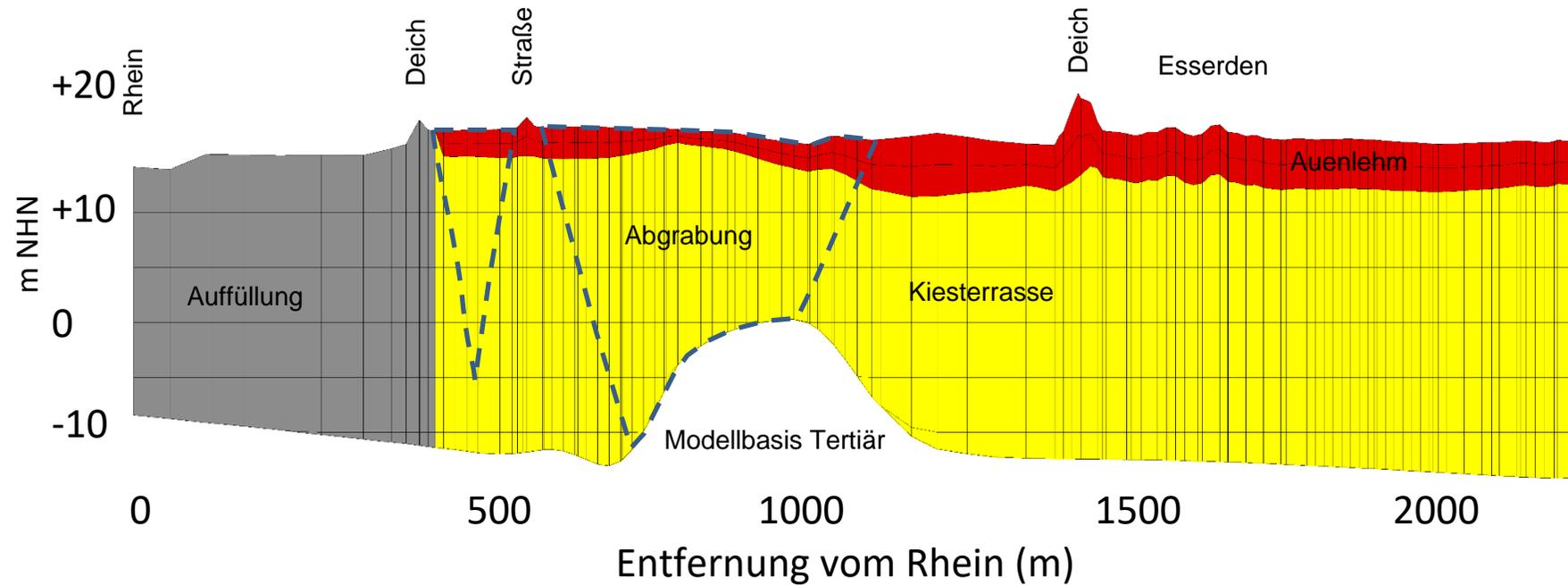


Abbildung 21: Modellschnitt vom Rhein bis nach Esserden mit dem ausgekiesten Rheinufer (grau), der Auenlehmbedeckung (rot, Schicht 1 und 2), der Kiesterrasse (gelb, Schicht 3 bis 8) und der geplanten Abgrabung (blau gestrichelt)

4.3 Hydraulische Durchlässigkeiten und effektive Porositäten

An 3 Grundwassermessstellen (VI, VII, VIII) in nächster Nähe zur Abgrabung sowie an einer Grundwassermessstelle im Hinterland bei Esserden (H III) lagen Ergebnisse aus Pumpversuchen zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit vor. Diese lieferten k_f -Werte von 1,25 bis $2,34 \times 10^{-3}$ m/s. Diese Werte wurden auf die gesamte Kiesterrasse an diesem Ort bezogen. Eine vertikale Differenzierung von Durchlässigkeiten konnte nur im Bereich der geplanten Abgrabung vorgenommen werden. Allerdings ohne, dass eine charakteristische durchgehende Schichtung identifiziert werden konnte (s.o.). Für das restliche Modellgebiet wird eine vertikal undifferenzierte hydraulische Durchlässigkeit angesetzt.

Im Bereich der Abgrabung lagen 1020 Siebanalysen aus 46 Bohrungen in jeweils Meter-schritten vor. Diese wurden nach BEYER (1964) ausgewertet und für die Modellschichten in 5 m-Abschnitte zusammengefasst. Um diese Erkundungsdichte im Bereich der Abgrabung zu erhalten, wurden die dort angesetzten Durchlässigkeiten während der Kalibrierung nicht mehr angepasst.

Aus den Siebanalysen und den Pumpversuchen wurde eine Durchlässigkeitsspanne abgeleitet, die für die Anpassung in der Kalibrierung verwendet wurde. Diese Durchlässigkeitsspanne liegt zwischen 3×10^{-4} und 3×10^{-3} m/s für die Kiesterrasse.

Für den überlagernden Auenlehm wurde eine Durchlässigkeit von 3×10^{-7} m/s angesetzt (GD-NRW 2001 und Erfahrungswerte des AG). Es wurde keine räumliche Anpassung dieses Wertes vorgenommen.

In den entsprechenden Modellsimulationen wird die Abgrabung mit einem hohen k_f -Wert (von 1×10^{-1} m/s) berücksichtigt, der zu einer Ausspiegelung der Grundwasseroberfläche innerhalb der Abgrabung führt. Die nutzbare Porosität wurde in der Abgrabung auf 1 gesetzt, um bilanztreue bei Ein- und Austritt von Grundwasser zu gewährleisten.

Die Dichtschürze wurde in den Simulationen an der Nordböschung des Nordsees, entsprechend der Abbildung 22 im Modell über die gesamte Tiefe der Abgrabung, berücksichtigt. Sie wurde als 40 m breite Zone im Modell, als hydraulische Entsprechung der auf 80 m Böschungsbreite schräg geschütteten Schürze, erstellt.

Die Dichtschürze soll nach den Planungsunterlagen im Vergleich zur Kies-Sand-Ablagerungen der Rheintrasse um ca. zwei Zehnerpotenzen geringer durchlässig sein. Es wurde für die Dichtschürze zunächst ein k_f -Wert von 5×10^{-6} m/s (Kap. 6.1.2) und in der

anschließenden Optimierung ein k_f -Wert von 1×10^{-6} m/s (Kap. 6.4) angesetzt. Die Dichtschürze ist damit etwa um den Faktor 17 (bzw. 3) durchlässiger als der anstehende Auenlehm ($k_f = 3 \times 10^{-7}$ m/s), aus dem sie hergestellt werden soll.

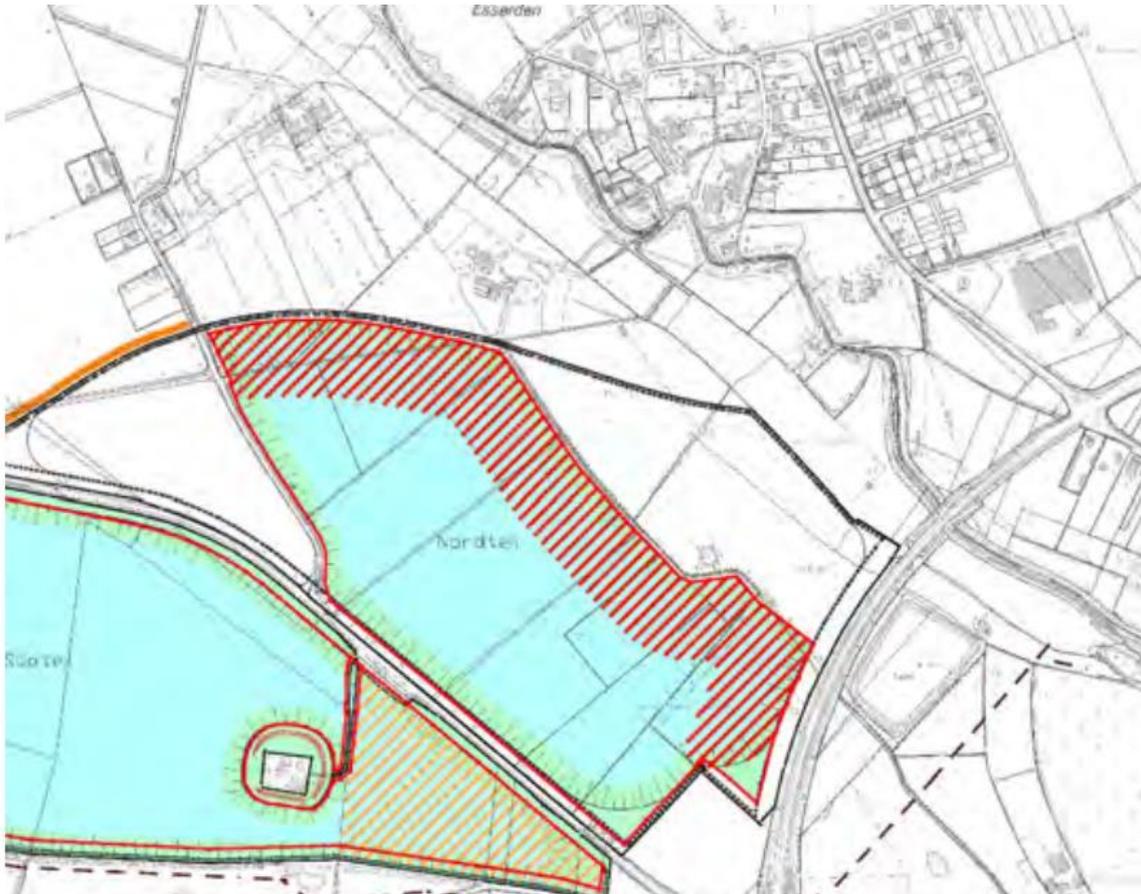


Abbildung 22: Lage der Dichtschürze aus den Planungsunterlagen (Hülskens, 2018)

Die entwässerbaren Porositäten der Terrassensedimente (des Grundwasserleiters) wurden nach der Hennig-Formel (Hennig, 1966) aus dem k_f -Wert für jedes Modellelement berechnet:

$$n_e = 0,05 \times \log_{k_f} + 0,4$$

Die Startwerte der effektiven Porosität für die Kalibrierung liegen somit zwischen 0,22 bis 0,27 für die Kiesterrasse und bei 0,07 für den Auenlehm.

4.4 Randbedingungen

4.4.1 Vorbemerkung

An den Rändern des Modells müssen Randbedingungen (RB) vorgegeben werden, um eine Potenzialverteilung im Modellraum berechnen zu können. Neben den äußeren RB können innere RB vorgegeben werden, um Entnahmen z.B. über Brunnen zu berücksichtigen. Den Behörden sind keine durch Wasserrechte belegten Entnahmen im Modellgebiet bekannt. Die äußeren Ränder liegen überwiegend entlang von oberirdischen Gewässern. Diese wurden durch eine RB 3. Art abgebildet, bei der ein Wasserstand und ein Übergangswiderstand (Leakeagekoeffizient) angegeben werden. Die übrigen äußeren Ränder liegen parallel zu Stromlinien, so dass für diese ein Nullstromrand (Strom über den Rand gleich Null) angesetzt werden konnte (siehe Abbildung 23). Eine solche RB 2. Art mit vorgegebenen Stromraten stellt auch die Grundwasserneubildung dar.

4.4.2 Oberirdische Gewässer

Der Rhein bildet den Modellrand im Süden und im Westen und stellt die am stärksten wirksame Randbedingung im Modell dar. Er wirkt unmittelbar auf die gesamte Mächtigkeit der Terrassenablagerungen. Die für den mittleren Zustand angesetzten Rheinwasserstände stellen ZW-Werte dar, die dem am häufigsten anzutreffenden Wasserstand entsprechen. Der ZW-Wasserstand liegt rund 70 cm unter dem mittleren Wasserstand (MW). Die Passfähigkeit von ZW-Werten im Rhein und mittleren Grundwasserständen im Gebiet ist im Abschnitt 3.4 erläutert und entspricht der Beobachtung und Erfahrung aus anderen Untersuchungen. Ausgangspunkt für die Zuweisung der Wasserstände entlang des Rheins ist der Pegel Rees. Aus dem mittleren Gefälle zwischen den Pegeln Rees und Emmerich (8,5 cm/km im Zeitraum 2000-2010) wurde die Belegung der von Rees stromabwärts gelegenen Randknoten berechnet. Der ZW-Wert am Pegel Rees beträgt 11,33 m NHN. An der Stelle, an der der Rhein das Modellgebiet verlässt (südlich der Einmündung des Grietherorter Altrheins beträgt der ZW-Wert 10,74 m NHN. Im Verlauf des Hochwassers werden die ZW-Werte um den Hochwasserbetrag aufgehört (ebenfalls auf den Pegel Rees bezogen).

In gleicher Weise wurde mit den Gewässern Bienener Altrhein, Rosau und Millinger Meer verfahren. Die Datenlage zu zeitlichen Veränderungen des Wasserstands in diesen Gewässern ist allerdings nicht durch Landesmessstellen gestützt. Das Naturschutzzentrum Kleve hat halbstündliche Pegeldaten des Bienener Altrheins, der Rosau und des Millinger Meeres, sowie Hinweise zum Betrieb der Dornicker Schleuse, aus dem Projekt Lebendige

Röhrriete, zur Verfügung gestellt (Abbildung 27). Die Messdaten liegen von Dezember 2019 bis einschließlich August 2020 vor. Daraus konnte zum einen die mittlere Gewässerhöhe abgeleitet werden, die zur mittleren Grundwassersituation (Abschnitt 3.4) passt. Zum anderen konnte das Anstieg- und Absinkverhalten von Bienener Altrhein und Rosau für ein Hochwasser im Februar 2020 beobachtet und ausgewertet werden, welches bei der späteren instationären Kalibrierung Berücksichtigung fand. Die Messdaten für das Millinger Meer zeigen, dass hier erst signifikante Anstiege zu berücksichtigen sind, wenn ein Hochwasser des Rheins über mehrere Wochen anhält. Denn dann kommt es zu einem zunehmenden rückstauenden Effekt des Grundwassers im Hinterland und infolgedessen auch zum Pegelanstieg im Millinger Meer. Eine direkte Einwirkung des Rheins durch oberirdische Gewässer kann anhand der Daten ausgeschlossen werden.

Südlich des Millinger Meeres liegt das kleine Fließgewässer Millinger Landwehr welches als Oberflächenabflussgraben in Esserden beginnt. Der Graben verläuft zunächst in nordöstlicher Richtung, bis er an der Straße zum Lohr nach Norden abknickt, die Reeser Landstraße unterquert und abschließend ins Millinger Meer mündet. Nachdem er die Reeser Landstraße unterquert hat, führt das Gewässer im mittleren Zustand ausreichend Wasser, um Einfluss auf das Grundwasser nehmen zu können. Der Gewässerabschnitt infiltriert ins Grundwasser, nicht zuletzt, weil ein weiterer Gewässerabschnitt von Osten in die Millinger Landwehr mündet.

Im Modellgebiet gibt es zahlreiche ehemalige Abgrabungen. Die zwei größten sind der Mahensee und der Baggersee nördlich von Esserden. Der Mahensee hat eine direkte Verbindung zum Rhein und folgt diesem daher mit seinem Wasserstand. Alle anderen Seen und Teiche im Modell werden durch den Grundwasserstand gesteuert, da sie den Auenlehm durchörtern und im hydraulischen Kontakt zur Kiesterrasse stehen. Bei Schwankungen der Grundwasserpotenziale passen sich diese Grundwasserblänken den berechneten Potenzialen an.

Abbildung 23 gibt eine Übersicht zu den verwendeten Randbedingungen des Modellrandes. Die Anbindung des Rheins, sowie des Mahensees haben als Hauptvorfluter den stärksten Einfluss auf die Grundwassersituation im Modellgebiet. Ebenfalls Vorfluter sind die Rosau und der Bienener Altrhein. Das Millinger Meer gibt durch Infiltration von Grundwasser das Grundwasserpotenzial am nordöstlichen Modellrand vor.

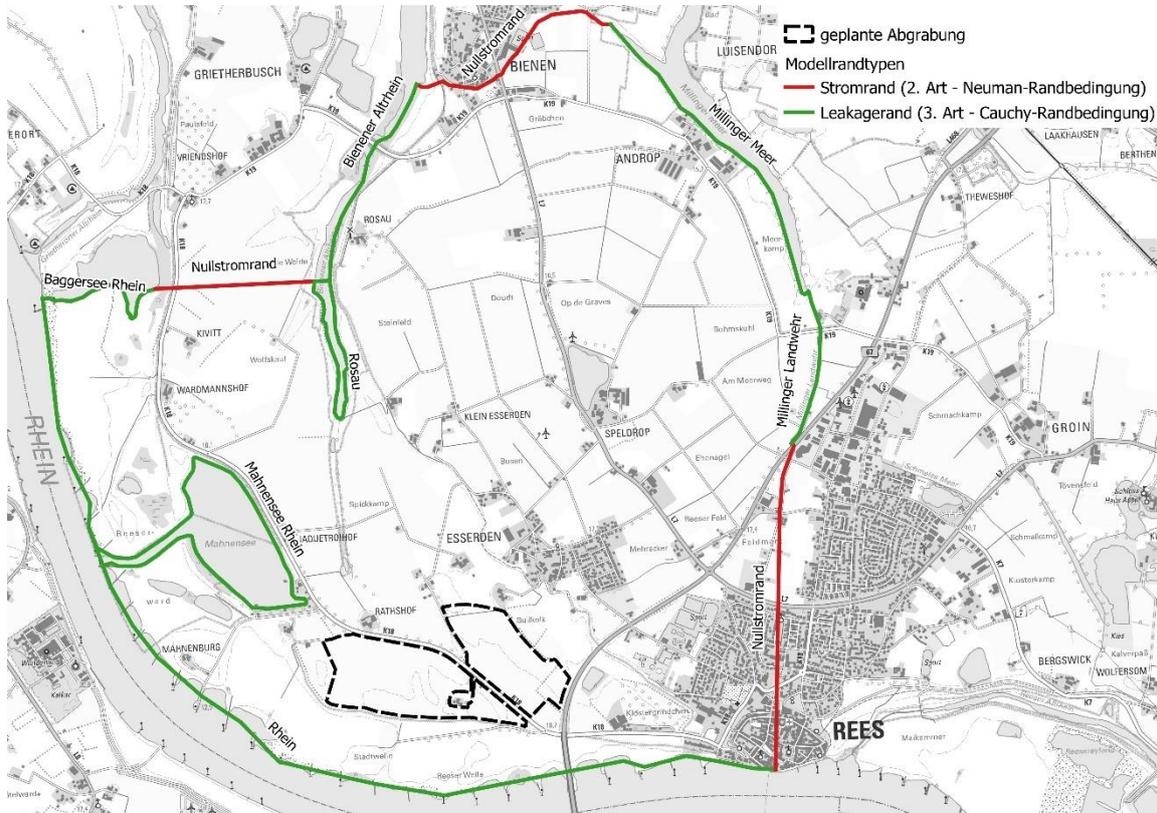


Abbildung 23: Übersicht der Randbedingungen auf dem Modellrand

4.4.3 Grundwasserneubildung und Zehrung

Es wurden die mit GWneu berechneten Werte (siehe Abschnitt 3.6) verwendet. Für die Wasserflächen wurde eine im Mittel ausgeglichene klimatische Wasserbilanz (Niederschlag gleich Verdunstung, $q=0$) angesetzt.

5 Modelltestung und Kalibrierung

Mit dem Grundwassermodell wurden umfangreiche Tests, Prüfungen und Auswertungen durchgeführt, um einen fehlerfreien Betrieb sicherzustellen. Wo es möglich war, wurde die Plausibilität der Aussagen anhand von Vergleichen und Überschlägen geprüft. Im Rahmen der Kalibrierung wurde ein Vergleich von gemessenen und berechneten Potenzialen durchgeführt. Um diese bekannten Zustände mit dem Modell bestmöglich abzubilden, wurden Parameter in sinnvollen Wertebereichen angepasst. Mit der stationären Berechnung wird der mittlere Strömungszustand abgebildet, der somit zeitlich unabhängig ist. Dabei wurden die Modellparameter hydraulische Durchlässigkeit und Gewässeranbindungen (Leakage) zum Ausgleich räumlich natürlicher Inhomogenitäten variiert, bis die berechneten Grundwasserstände mit den gemessenen Grundwasserständen an den Messstellen möglichst gut übereinstimmen.

Bei der anschließenden Kalibrierung der instationären, d.h. zeitlich abhängigen Berechnungen wird zusätzlich eine veränderliche Speicherung von Grundwasser im Strömungsraum berücksichtigt. Die durch die Randbedingungen aufgeprägten Schwankungen werden im Grundwasserraum gedämpft und über die Charakteristik der berechneten und gemessenen Ganglinien verglichen. Angepasst wurde die Porosität, die als Startwert aus dem k_f -Wert (Kap. 4.3) abgeleitet wurde. Die Trennung in die zwei nachfolgend beschriebenen Schritte erfolgt, um die Anpassungen im Modell methodisch zu vereinfachen und besser nachvollziehbar zu machen.

5.1 Mittlere Strömungssituation (stationär)

Die ständigen Schwankungen des Rheins unterbinden eine stabile stationäre Grundwasserströmung im Modellgebiet. Es handelt sich also bei der stationären Betrachtung um einen idealisierten mittleren Strömungszustand des natürlichen Systems als Momentaufnahme.

Der Modellaufbau entspricht den im Kapitel 4 beschriebenen Modelleingangsparametern. Durch die hochaufgelösten Erkundungsergebnisse (1020 Siebanalysen) im Bereich der Abgrabungsfläche, wurde darauf verzichtet, die Durchlässigkeiten in diesem Bereich im Rahmen der Kalibrierung anzupassen. Ebenfalls wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte an den Orten der Pumpversuche während der Kalibrierung nicht verändert.

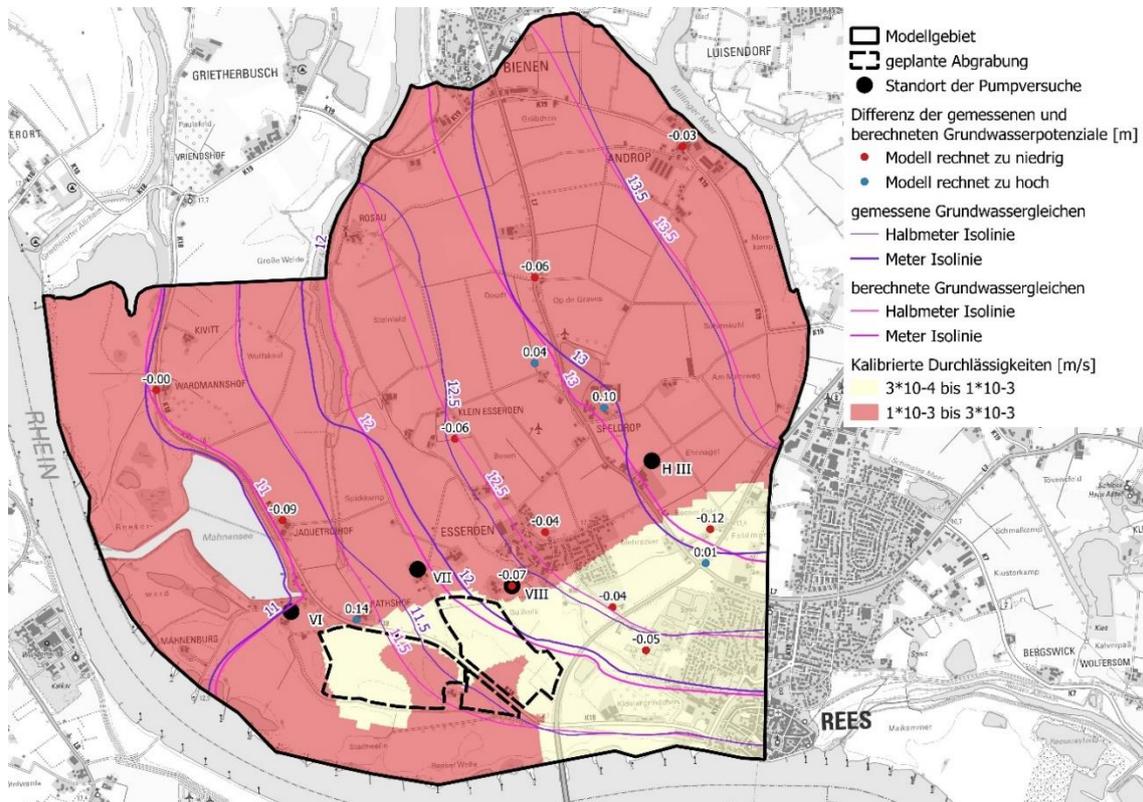


Abbildung 24: Ergebnis der stationären Kalibrierung mit der Verteilung der Durchlässigkeiten der Kiesterrasse

Das Ergebnis der stationären Kalibrierung ist in Abbildung 24 dargestellt. Die maximale Abweichung an den 14 für die Kalibrierung verwendbaren Messtellen innerhalb des Modellgebietes beträgt 14 cm. Die mittlere Abweichung liegt bei 7 cm. Die im Abschnitt 3.3 festgelegte Grenze der Durchlässigkeiten für die Kiesterrasse von 3×10^{-4} bis 3×10^{-3} m/s konnte in der Kalibrierung bestätigt werden (Abbildung 24). Das Ergebnis der stationären Modellkalibrierung ist als gut zu bewerten. Die Strömungssituation im Vertikalschnitt vom Rhein bis nach Esserden zeigt Abbildung 25.

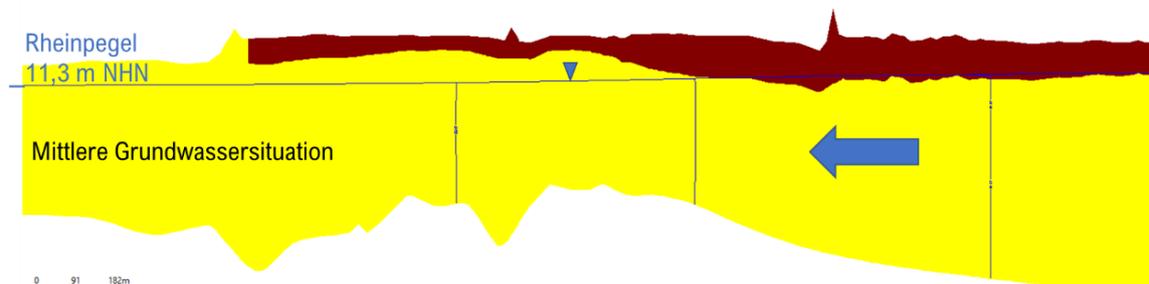


Abbildung 25: Strömungssituation im mittleren Zustand

5.2 Hochwasserereignis (instationär)

Zur instationären Kalibrierung wurde ein Hochwasser von 2010/2011 verwendet, da es das höchste Hochwasser war (bis rund 18 m NHN), welches ausreichend durch Messwerte dokumentiert war. Für ältere Ereignisse hätte kein ausreichender Vergleich mit Messwerten durchgeführt werden können.

Die zeitliche Veränderung der Modellrandbedingungen bewirkt eine Reaktion im Grundwasserraum. Der wichtigste Modellrand ist dabei der Rhein, dessen Schwankungen während der Hochwassersituation in Abbildung 26 dargestellt sind. Ab einem Rheinwasserstand von >17 m NHN wurde eine Überflutung der Aue bis an den Sommerdeich angesetzt.

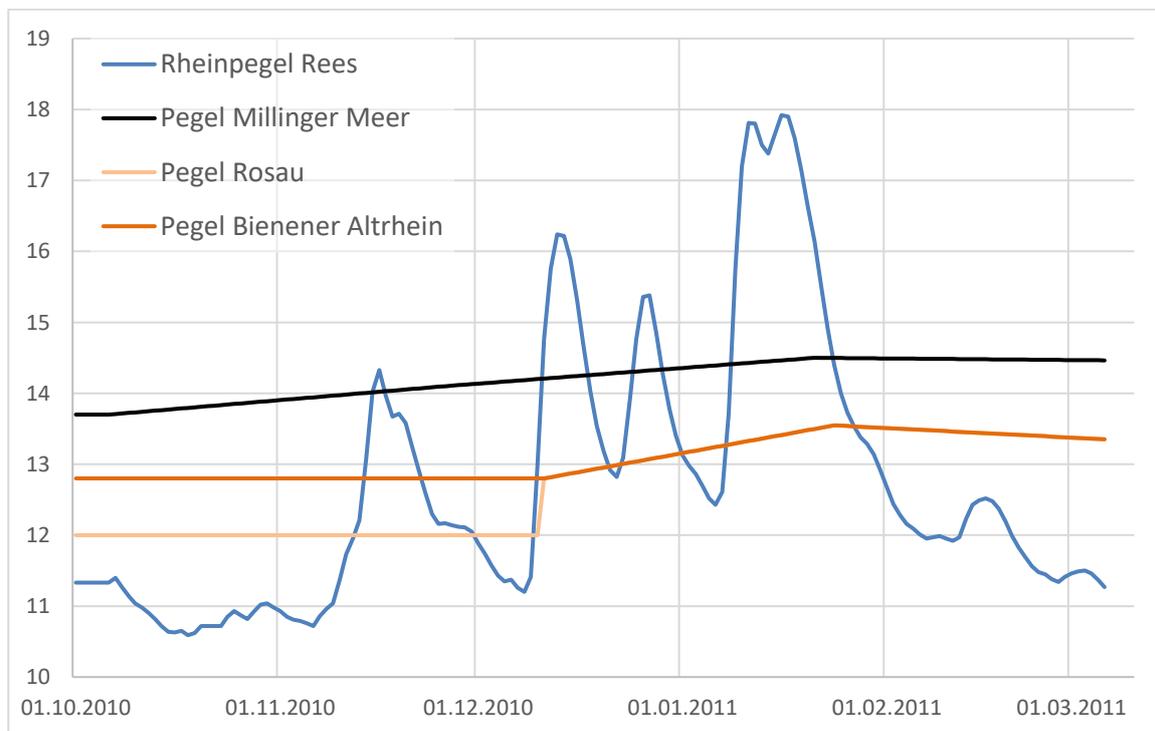


Abbildung 26: Rhein am Pegel Rees und Steuerung der Randbedingungen für die Hochwassersituation von 2010/2011 bei der instationären Kalibrierung

Aus den Beobachtungen des Naturschutzzentrums Kreis Kleve für das Verhalten der Pegel Bienener Altrhein, Rosau und Millinger Meer bei einem kleinen Hochwasser im Frühjahr 2020 (Abbildung 27), konnte auf ein Randbedingungsszenario (Ganglinien) für das Verhalten dieser Gewässer im Zeitraum der instationären Kalibrierung geschlossen werden. Dieses Verhalten ist nachfolgend kurz beschrieben.

Mit Schließen der Dornicker Schleuse beim Hochwasserfall staut sich die Rosau bis auf die Auflandungshöhe von 12,8 m NN an (im vorliegenden Bericht werden die Angaben von m NN mit denen von m NHN gleichgesetzt. Der geringe Unterschied wird für die vorliegende Betrachtung als unerheblich eingeschätzt). Im weiteren Aufstau verhalten sich der Bienener Altrhein und die Rosau annähernd identisch. Beim Hochwasser 2020 steigen beide bis etwa 13,5 m NN und fallen anschließend über einen längeren Zeitraum gemeinsam ab. Dieses Verhalten mit vergleichbaren Steigungen wurde auch für die Steuerung der Randbedingung berücksichtigt (Abbildung 26).

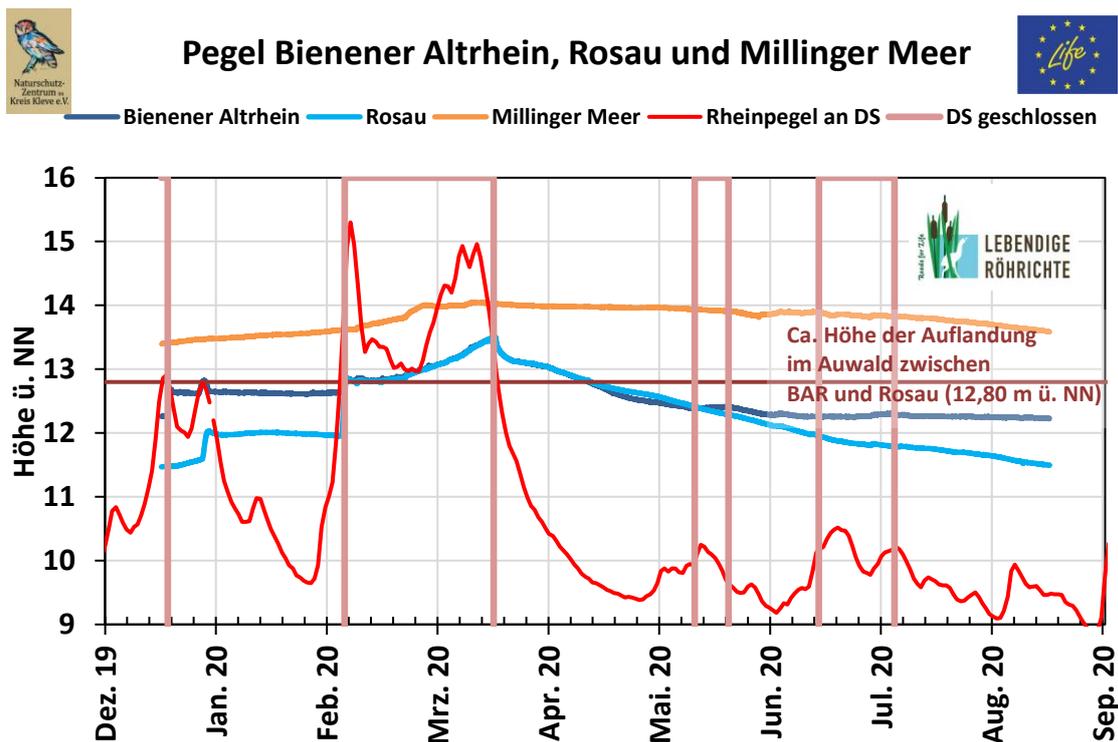


Abbildung 27: Pegeldokumentation von Bienener Altrhein, Rosau und Millinger Meer im Jahr 2020 (NZ Kleve, 2020)

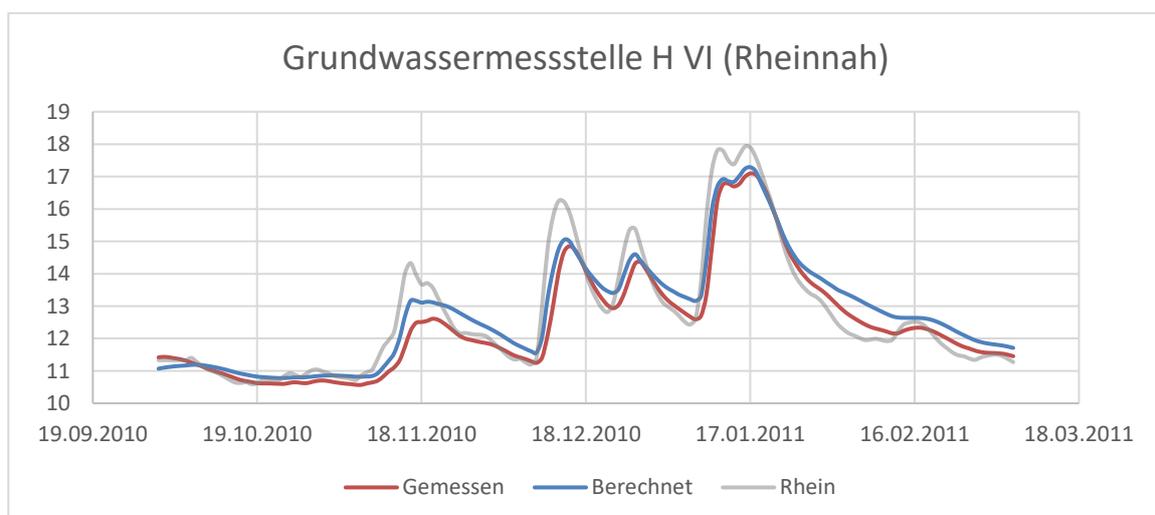
Das Millinger Meer zeigt beim Hochwasser von 2020 (Abbildung 27) ebenfalls einen Anstieg. Dieser wird durch einen Grundwasserrückstau im Rheinhinterland aufgrund der hohen Durchlässigkeiten, des hohen Rheinpegels und durch hohe Grundwasserstände im Anstromgebiet verursacht. Beim Hochwasser von 2020 steigt das Millinger Meer auf etwa 14 m NHN, welches bei der instationären Kalibrierung berücksichtigt wurde (Abbildung 26).

Die Ergebnisse der instationären Kalibrierung zeigen beispielhaft die nachfolgenden 4 Diagramme der Abbildung 28. Sie zeigen zwei rheinnahe GWM (am Mahnensee) und zwei rheinferne GWM (u.a. eine in der Ortslage Esserden).

Im Verlauf des Hochwasserereignisses wurden folgende Randbedingungen angepasst:

- Rhein und Mahnensee, gemäß Rheinpegel,
- Bienener Altrhein, Rosau und Millinger Meer, gemäß der dokumentierten Zusammenhänge extrapoliert auf die betrachteten Zeiträume und
- Berücksichtigung einer Überflutungszone bis zum Sommerdeich, der nicht überflutet wird.

Im Rahmen der Kalibrierung wurden die Anbindung der Gewässer (Leakage) und die entwässerbaren/effektiven (durchströmten) Porositäten in der Terrasse angepasst. Dabei wurde der aus dem k_f -Wert berechnete Wert der effektiven Porosität nicht bereichsweise angepasst, sondern für den gesamten Modellraum um einen Faktor von 15 % erhöht.



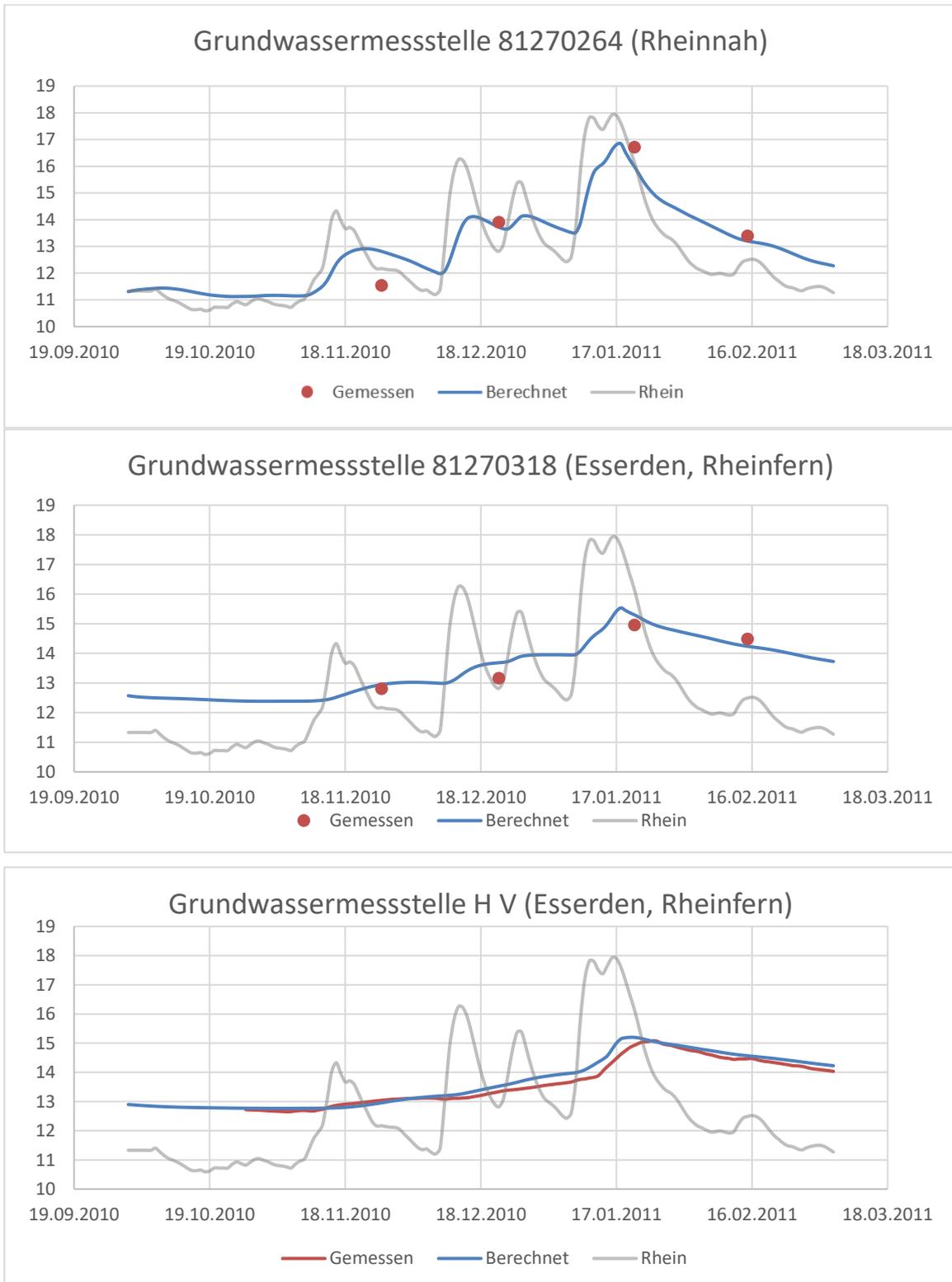


Abbildung 28: Vergleich von berechneten und gemessenen Grundwasserpotenzialen in der instationären Kalibrierung

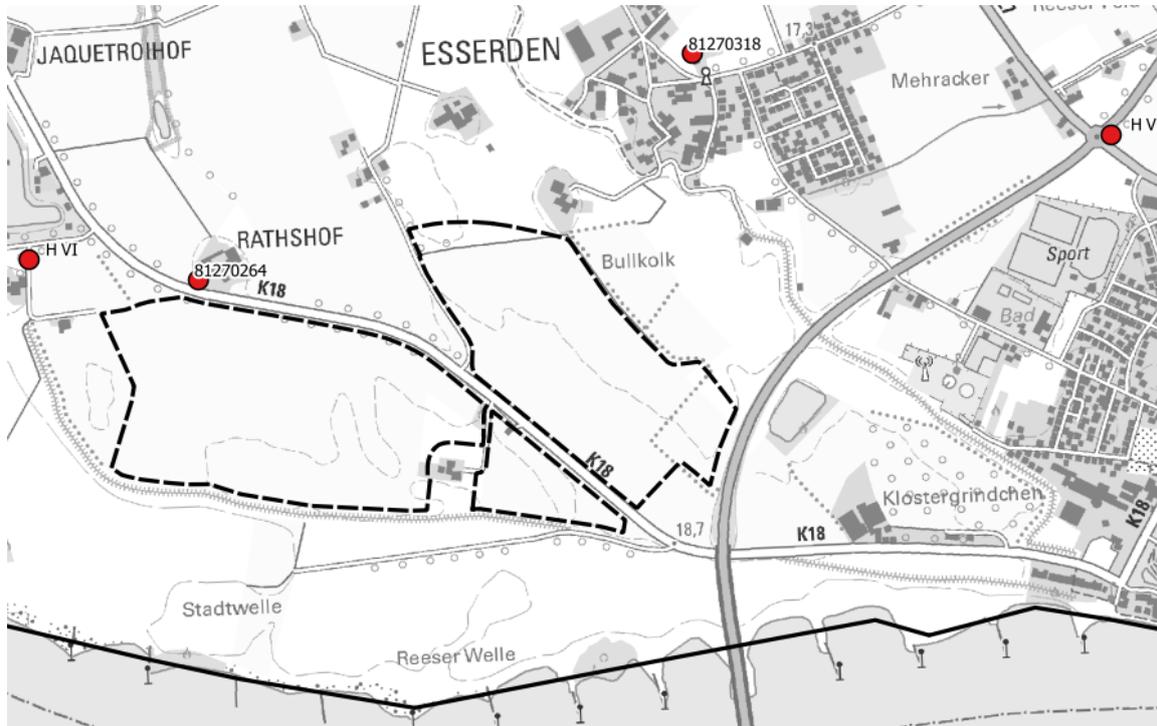


Abbildung 29: Lage der für den Vergleich gemessener und berechneter Potenziale dargestellten Grundwassermessstellen

Insgesamt konnte im Rahmen der instationären Kalibrierung eine gute Übereinstimmung von gemessenen zu berechneten Potenzialen erzielt werden, sodass ein Vertrauen in die Prognosefähigkeit des Modells zur Bearbeitung der Fragestellungen gegeben ist. Auch im Vergleich zu einem Forschungsprojekt mit vergleichbarer thematischer und räumlicher Ausrichtung (DBU, 2020) kann die Anpassung als gut betrachtet werden. Insbesondere die Steigungen der gemessenen Ganglinien sowie die Minima und Maxima werden gut getroffen.

6 Simulationen

6.1 Mittlerer Strömungszustand (stationär)

Der mittlere Strömungszustand im heutigen Istzustand (ohne geplante Abgrabung) wurde im Abschnitt 5.1 dargestellt. Die nachfolgenden Vergleiche beziehen sich auf diesen Zustand.

6.1.1 Abgrabungssee ohne Dichtschürze

Die geplanten Abgrabungsbereiche südwestlich von Esserden wurden in das Modell eingebaut. Die Ergebnisse dieser Simulation, die noch keine Dichtschürze berücksichtigt, wird in Abbildung 30 dargestellt.

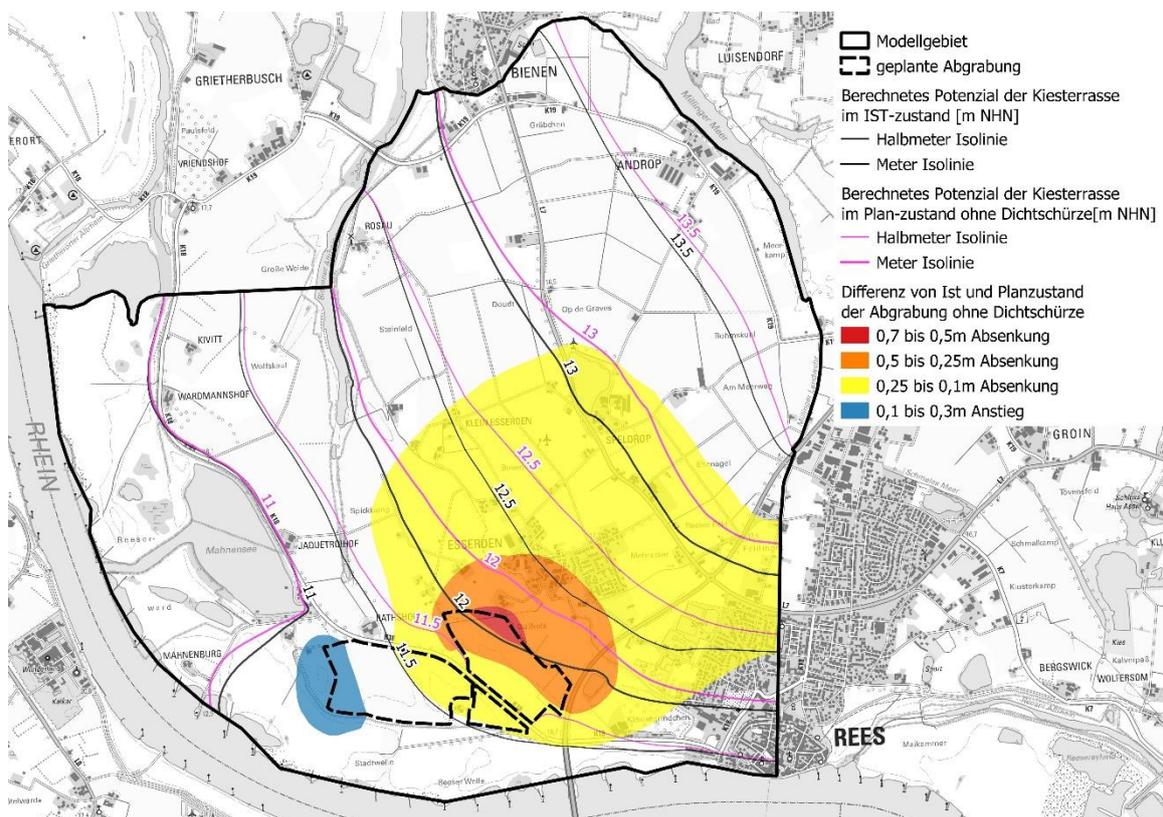


Abbildung 30: Simulation der Abgrabung ohne Dichtschürze und Darstellung der sich ergebenden Druckdifferenzen in der Kiesterrasse im Vergleich zum Istzustand

Die Ausspiegelung der Wasserflächen in den Bereichen der Abgrabungsseen hätte bei einer mittleren Grundwassersituation zur Folge, dass die Potenziale im Grundwasserzuströmbereich (NE der Seen) absinken und im Grundwasserabstrombereich (SW der Seen) ansteigen. In der Kiesterrasse unter Esserden würden die Potenziale daher abnehmen. Im Großteil der Ortslage von Esserden würde es zu einer Absenkung der Drücke von <math><30\text{ cm}</math> kommen. Im Abstrom zum Rhein kommt es bei der südlichen Abgrabung zu einem Grundwasseranstieg von bis zu 20 cm im Vergleich zum Istzustand.

6.1.2 Abgrabungssee mit Dichtschürze

Für diese Simulation wurde eine Dichtschürze mit einem k_f -Wert von 5×10^{-6} m/s angesetzt. Abbildung 31 zeigt die Auswirkungen der Dichtschürze bei mittlerer stationärer Grundwasserströmung. Landseitig findet ein Aufstau von Grundwasser von bis zu 20 cm im Vergleich zum Istzustand statt.

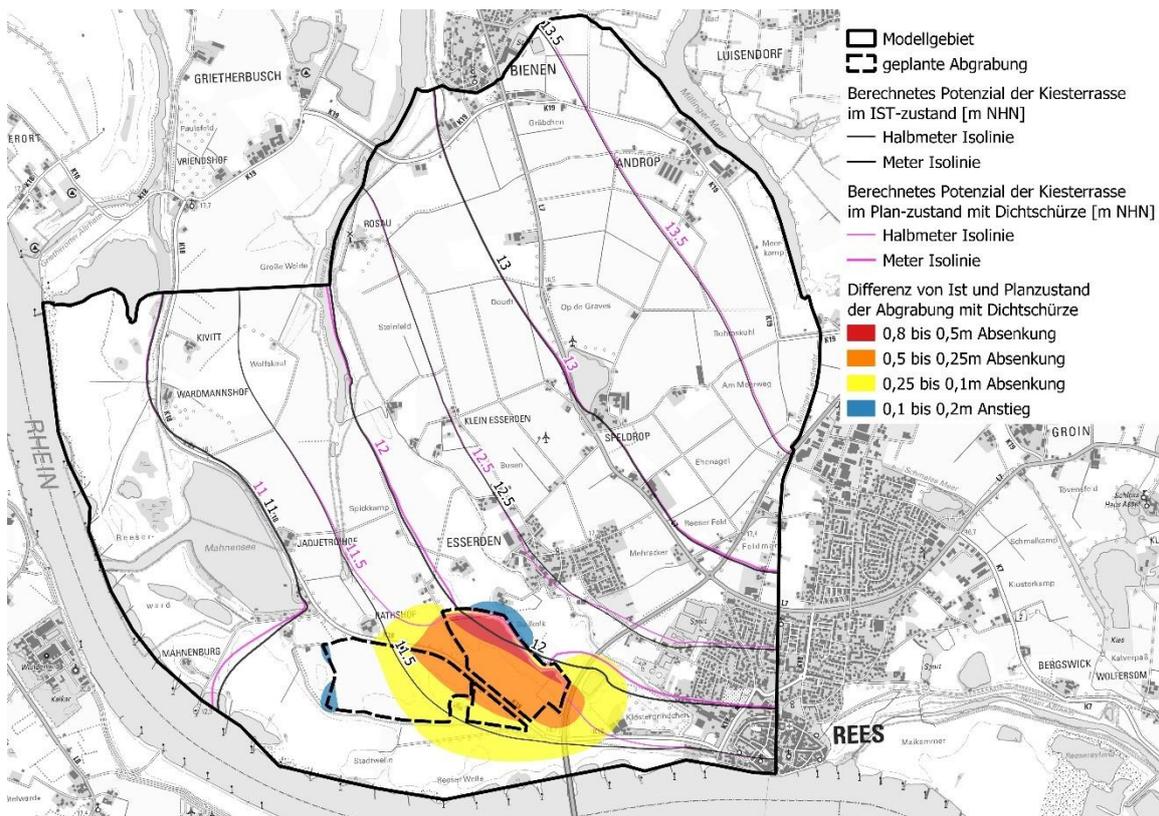


Abbildung 31: Simulation der Abgrabung mit Dichtschürze und Darstellung der sich ergebenden Druckdifferenzen in der Kiesterrasse im Vergleich zum Istzustand

Die Anstiege sind sehr kleinräumig im Nahbereich der Dichtschürze (Deichvorland vor dem Banndeich), sodass die Potenziale im Grundwasser unter dem Ort Esserden im Vergleich zum Istzustand nicht verändert sind. Absenkungen von bis zu 80 cm treten nur im Bereich der geplanten Wasserfläche auf, wobei der sich hier einstellende Seewasserspiegel (Plan) mit dem Grundwasserstand (Ist) verschnitten wurde. Im Abstrombereich südwestlich der Seen ist das Potenzial im Grundwasser um bis zu 20 cm angehört.

Abbildung 32 zeigt das Strömungsfeld mittels sogenannter Schlieren, die parallel zu den Stromlinien verlaufen und für den Zustand der mittleren Grundwassersituation bei erfolgter Abgrabung mit eingebauter Dichtschürze darstellt sind.

Hohe Grundwasserstände, im Bild mit lila/blauen Farben gekennzeichnet, führen zu einer Strömung in südwestliche Richtung durch Esserden auf die Dichtschürze zu. Vor der Dichtschürze biegen die Schlieren nach beiden Seiten ab und deuten damit die Umströmung an. Wenige Schlieren laufen auch mit steilem Gefälle durch die Dichtschürze hindurch (Farbwechsel von hellblau im Anstrom der Dichtschürze über grün zu gelb hinter der Dichtschürze). Damit zeigt sich, dass diese lediglich eine hemmende und nicht völlig abdichtende Wirkung auf das Grundwasser hat. Innerhalb der Abgrabung sind die Schlieren ohne Aussage, da sich dort das Freiwasser der Seen befindet. Im Abstrom der Seen ist die Strömungsrichtung auf den Rhein gerichtet.

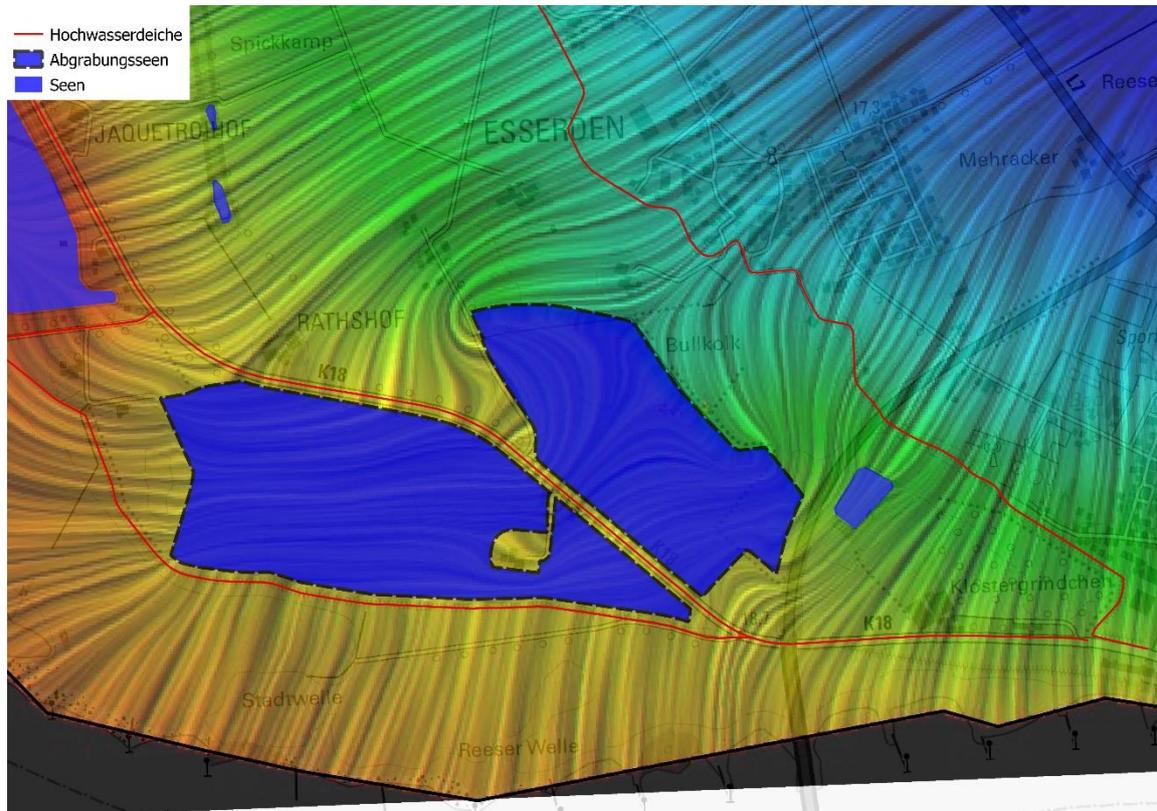


Abbildung 32: Strömungsfeld mit Wirkung der Dichtschürze an der Flanke der nördlichen Abgrabung bei mittlerer Strömungssituation. Der farbliche Verlauf der Strömungsschlieren spiegelt die Höhe der Grundwasserpotenziale von lila/blau (hoch), bis gelb/rot (niedrig) wider

6.2 Lastfall (1) Hochwasserereignis (instationär)

Als maßgeblicher Lastfall für ein Hochwasserereignis wurde das Hochwasser aus dem Jahr 1995 mit einem auf die Höhe der Deichbemessung erhöhten Scheitelwert angesetzt. Der Scheitelwert von 20,3 m NHN für den Pegel Rees ergibt sich für die in der Bemessung verwendeten Abflüsse bei Hochwasser (BHQ). Als Grundlage der Simulation wurde das Hochwasser aus dem Jahr 1995 verwendet, da es zum einen seit 1990 das höchste dokumentierte Hochwasserereignis war und zum anderen nicht zu weit in der Vergangenheit liegt, sodass keine Änderungen in den Modelleingangsgrößen (Geländemodell, Verteilung von Seeflächen aus Abgrabungen etc.) zu erwarten sind. Dieses Vorgehen wurde vorab mit dem Kreis Wesel und der Bezirksregierung Düsseldorf abgestimmt.

Abbildung 33 zeigt die Steuerung der Randbedingungen während der Simulation. Die Daten des Rheins am Pegel Rees stammen vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt und liegen als Tagesmittelwerte vor. Die Ganglinie des Rheins für den unterstromigsten Punkt

im Modellgebiet ist als grau-gestrichelte Linie in der Abbildung 33 dargestellt. Die Ganglinien der anderen oberirdischen Gewässer (Rosau, Bienener Altrhein und Millinger Meer) wurden analog zur Vorgehensweise bei der Kalibrierung aus dem dokumentierten Verhalten beim Hochwasser 2020 (Abbildung 27) angesetzt.

Bei Hochständen im Rhein von über etwa 13 m NHN schließt die Dornicker Schleuse (Abbildung 27), was zu einem Aufstau führt. Ab einer Höhe von 12,8 m NHN in der Rosau, erreicht sie das Niveau des Bienener Altrheins, so dass beide Gewässer in der Folge gemeinsam ansteigen. Mit der ersten Hochwasserwelle zum Jahreswechsel 1994/95 (Abbildung 33) werden im Rhein 13 m NHN überschritten, sodass die Dornicker Schleuse geschlossen wird. Es wird davon ausgegangen, dass die wenigen Tage im Januar 1995 mit niedrigen Rheinwasserständen nicht ausreichen, um ein relevantes Absinken in den Nebengewässern des Rheins zu erzeugen. Bei Rheinwasserständen unter 13 m NHN wird eine Stagnation der Wasserstände angesetzt, bei über 13 m NHN ein Anstieg. Ab dem 27.01.1995 steigt der Rheinwasserstand über das Niveau des Sommerdeichs, so dass das komplette Rheinvorland bis zum Banndeich bei Esserden überflutet wird. Diese Überflutung führt dazu, dass Rosau und Bienener Altrhein ebenfalls sprunghaft ansteigen. Sie folgen der Höhe des Rheins, wobei die Höhe am „Modellende“ (gestrichelte Linie) maßgeblich ist, bis zum 04.02.1995, wenn der Rheinwasserstand die Sommerdeichhöhe wieder unterschreitet. Anschließend geht die Überflutung der Aue zurück. Die Wasserstände in den Altarmen sinken zunächst sehr schnell und verlangsamen sich mit zunehmender Dauer.

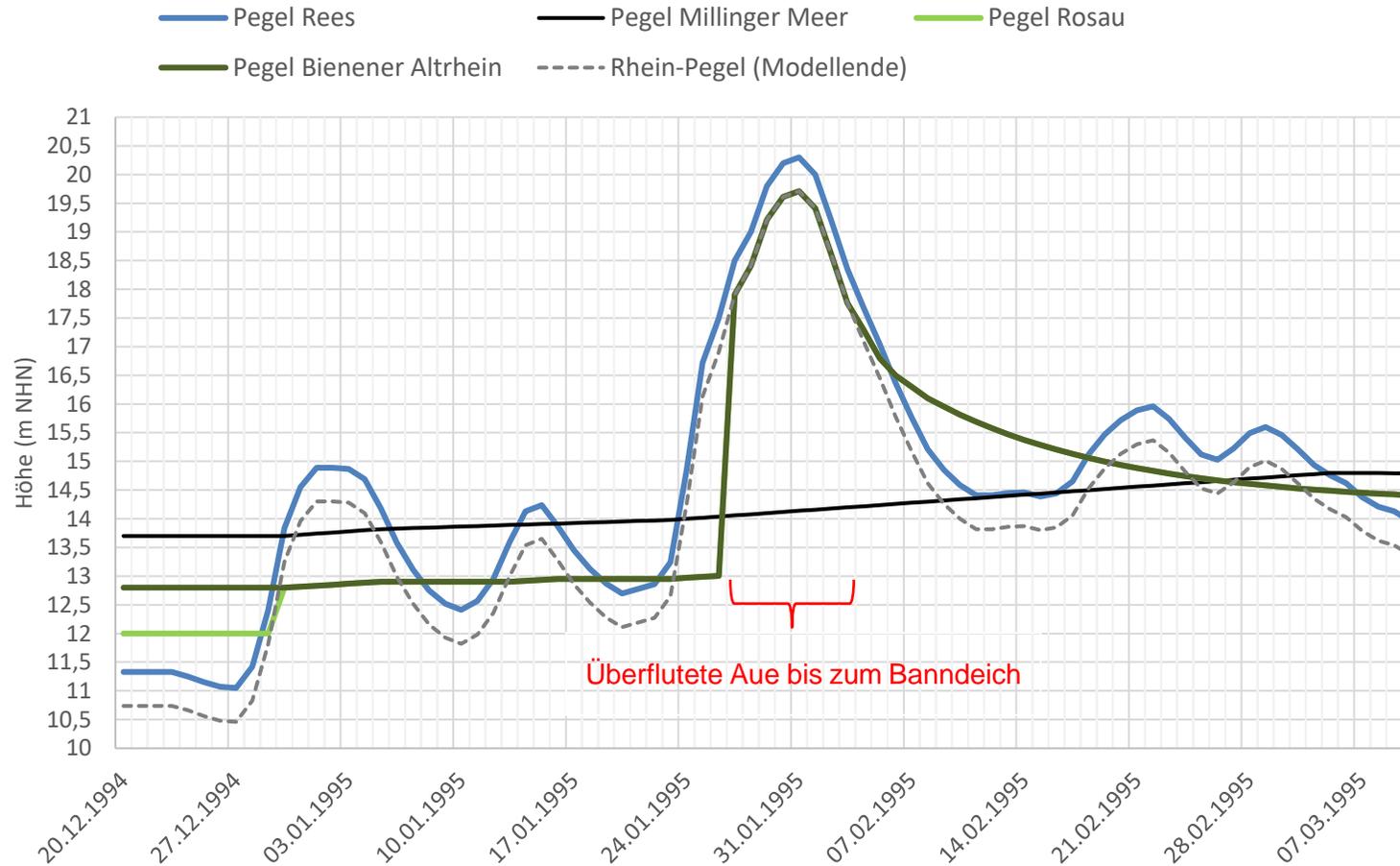


Abbildung 33: Instationäre Simulation des Hochwassers von 1995 mit Erhöhung auf BHQ - Steuerung der Randbedingungen

Das Millinger Meer zeigt hingegen ein etwas anderes Verhalten, da es nicht direkt vom Rhein beeinflusst wird. Deshalb reagiert das Millinger Meer verzögert auf Wasserstandsänderungen im Rhein. Der Anstieg vom Millinger Meer wurde aus Abbildung 27 abgeleitet und beginnt erst wieder zu sinken, als der Rheinwasserstand dauerhaft einige Meter unterhalb dem des Millinger Meeres liegt.

6.2.1 Hochwasserereignis ohne Abgrabungssee

Zum Hochwasserscheitelpunkt treten auch die höchsten Potenziale im Grundwasser auf. Abbildung 34 zeigt zu diesem Zeitpunkt das Potenzial in der Kiesterrasse relativ zur Geländehöhe an. Im Bereich der blau eingefärbten Fläche liegt das Potenzial (der Druck in der Terrasse) über dem Gelände. Es liegen artesische Druckverhältnisse vor. Dies ist nicht gleichbedeutend mit einem Grundwasseraustritt an der Geländeoberfläche, da hierzu das Grundwasser erst durch die Auenlehmschicht hindurchströmen muss. Würde ein Loch in den Auenlehm gebohrt werden, dann würde dort Grundwasser an der Geländeoberfläche austreten. Doch solange der Auenlehm in der ausgewiesenen Mächtigkeit und Durchlässigkeit (siehe Abschnitt 3.3) verbreitet ist, kommt es im Verlauf des angesetzten Hochwassers nicht zu artesischen Grundwasseraustritten. Es sind im Modellgebiet und speziell in Esserden neben den ehemaligen Abgrabungsbereichen keine Fehlstellen des Auenlehms bekannt.

In Abbildung 34 ist ersichtlich, dass große Teile des Modellgebietes, insbesondere im Norden hinter dem Banndeich, einen artesischen Druck bei Hochwasser aufweisen. In diesen Bereichen liegen auch die höchsten Auenlehmmächtigkeiten vor (siehe Abbildung 17), die einem Grundwasseraustritt an der Oberfläche entgegenwirken. Ein solcher Grundwasseraustritt an der Oberfläche bei Hochwasser wird auch Qualmwasser genannt. Für die Ortslage von Esserden zeigt sich, dass der überwiegende Teil der Flächen bzw. der Bebauung nahezu vollständig bei Hochwasser nicht von artesischen Drücken betroffen sind. Kleine Bereiche mit Ackerflächen bilden eine Ausnahme dieser Beobachtung.

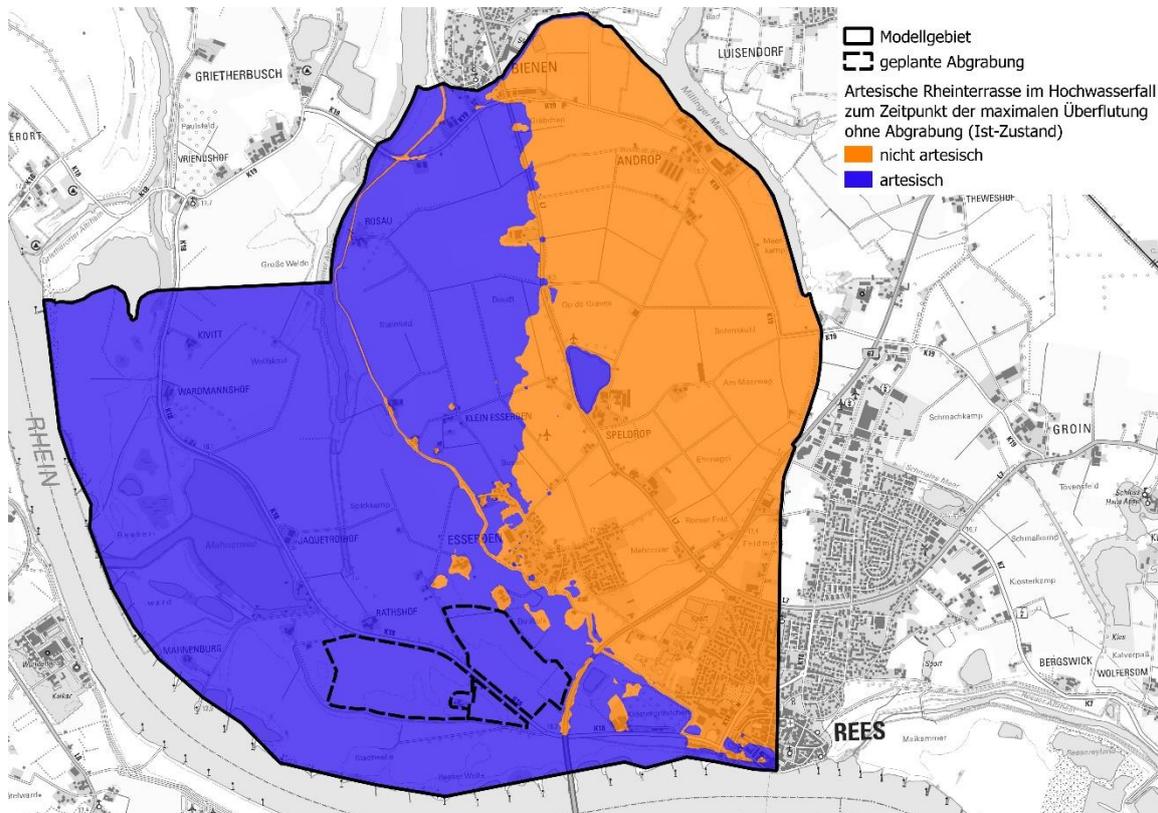


Abbildung 34: Grundwasserpotenzial in der Kiesterrasse zum Zeitpunkt der maximalen Überflutung, der über der Geländeoberfläche liegt (ohne Abgrabung)

6.2.2 Hochwasserereignis mit Abgrabungssee und Dichtschürze

Analog zur Betrachtung der mittleren Zustände wurde auch für die Betrachtung des Hochwassers dasselbe hydraulische Szenario für jeweils die Modellvariante ohne und mit Abgrabung untersucht. Die Grundwasserneubildung auf der Fläche des Abgrabungssees wurde, wie in Abschnitt 4.4.3 beschrieben, auf 0 gesetzt.

Die Abbildung 35 zeigt die Auswertung und Gegenüberstellung der Potenzialentwicklung in der Kiesterrasse an der GWM 81270318 in Esserden zwischen den Simulationen ohne und mit Abgrabung. Es liegen während der gesamten Simulation gespannte Grundwasserhältnisse vor.

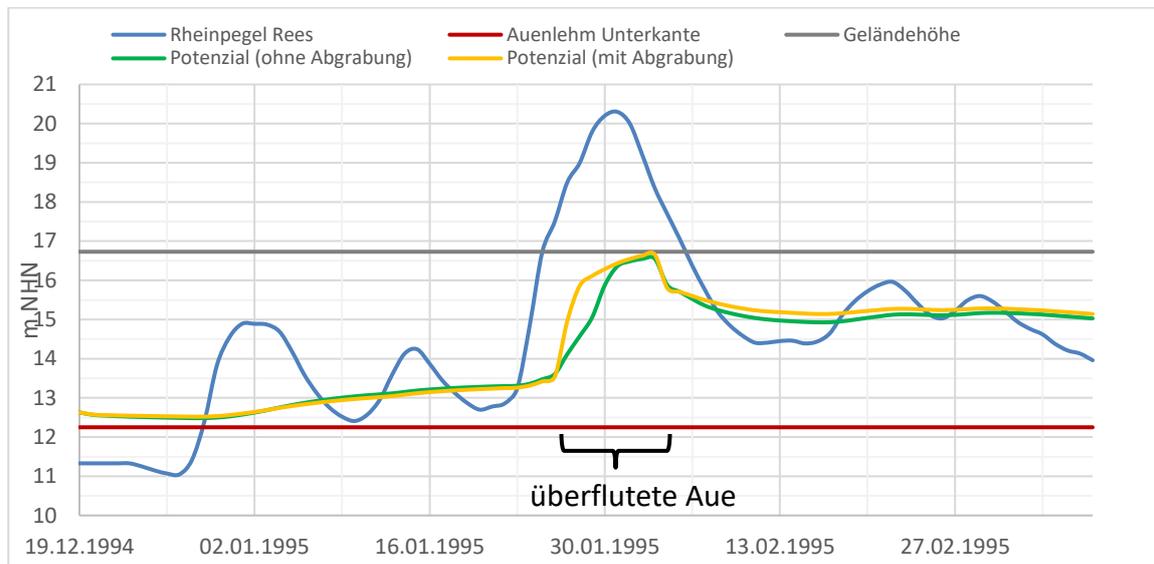


Abbildung 35: Grundwasserganglinie an der GWM 81270318 in Esserden in der Simulation ohne und mit Abgrabung

Im ersten Abschnitt der in Abbildung 35 dargestellten Ganglinien (etwa bis zum Jahreswechsel 1994/95) liegen nahezu identische Grundwasserpotenziale vor. Der schnellere Anstieg im Modellszenario mit Abgrabung erfolgt mit Beginn der Überflutung der Abgrabungsseen bei einem Rhein-Wasserstand von über 18 m NHN, wenn die Aue bis zum Bändeich überflutet wird. In beiden Szenarien erfolgt ein starker Anstieg der Grundwasserpotenziale in der Kiesterrasse, etwa ab dem 30.01.1995 laufen die beiden Ganglinien wieder fast deckungsgleich.

Der Rheinwasserstand unterschreitet am 04.02.1995 die Höhe von 18 m NHN, sodass die Überflutung der Aue zurückschreitet. Zu diesem Zeitpunkt liegt das Druckpotenzial aus der Simulation mit Abgrabung 13 cm bis maximal 17 cm höher als im Vergleichsszenario. Es erreicht zu keinem Zeitpunkt der Simulation artesische Druckverhältnisse am Ort der Messstelle. Der Wegfall der Überflutung resultiert innerhalb eines Tages in einem starken Abfall der Potenziale in der Kiesterrasse. Im Anschluss gehen die Potenziale in der Kiesterrasse leicht zurück, obwohl ein hoher Wasserstand im Rhein verbleibt. In diesem Abschnitt der Ganglinien zeigen sich leichte Unterschiede zwischen den Szenarien, die auf der dämpfenden Wirkung (Speichereffekt) der Abgrabung beruhen.

Die Abbildung 36 zeigt ebenfalls einen Vergleich der beiden Szenarien in einem Modellschnitt durch die Aue vom Rhein bis nach Esserden. Im unteren Bild (mit Abgrabung) wird das Potenzial der Überflutungsfläche im Bereich der Abgrabung durch den nicht mehr vorhandenen Auenlehm direkt auf die Terrasse übertragen.

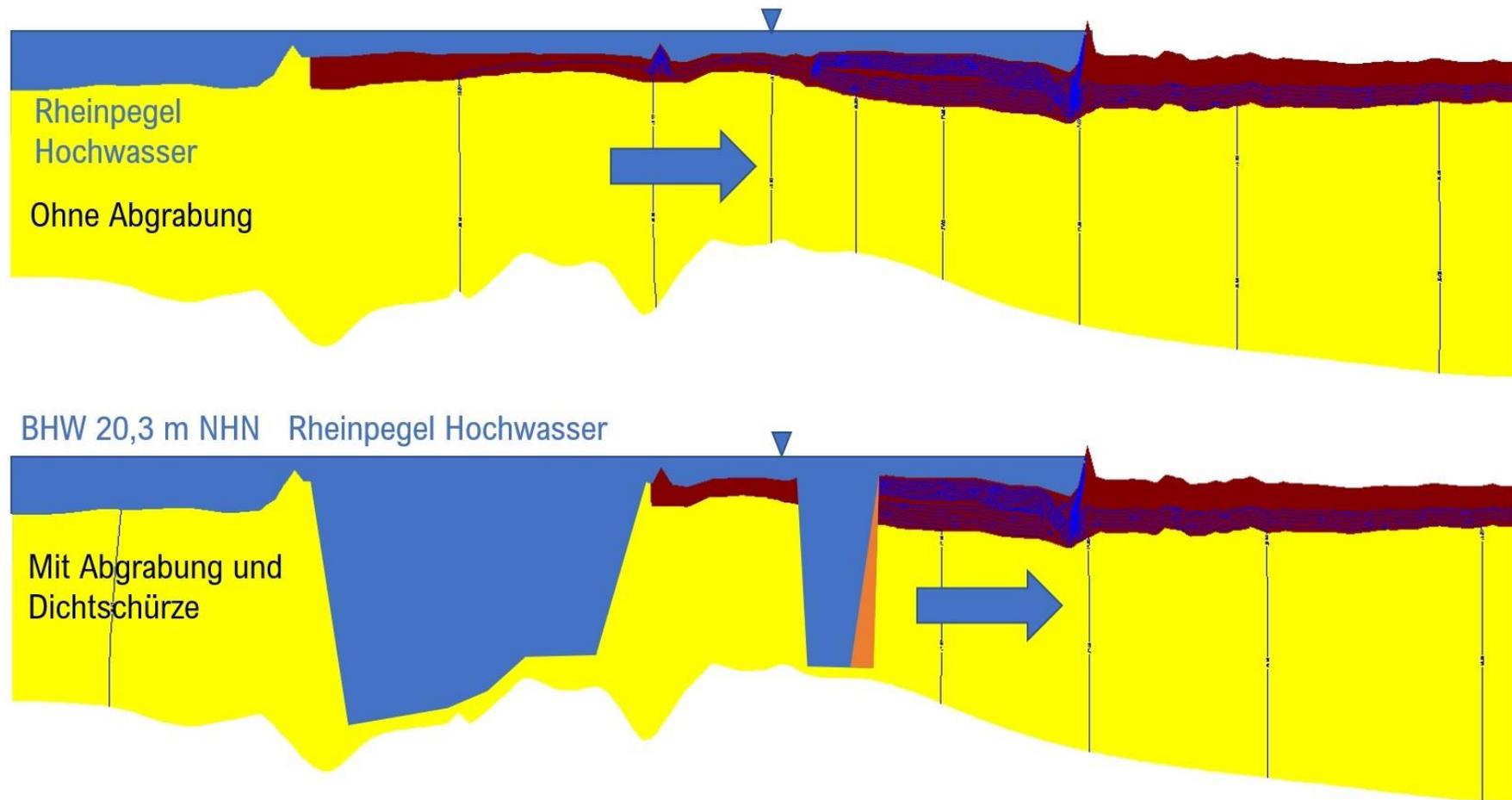


Abbildung 36: Modellschnitt durch die Abgrabungen bis nach Esserden zum Zeitpunkt der maximalen Überflutung

In diesem Szenario ergeben sich die Druckanstiege von maximal 30 cm im östlichen Esserden. Für den Großteil des Ortes beträgt der Druckanstieg 10 cm bis <20 cm. Änderungen <10 cm sind im Südwesten der Ortslage am Banndeich zu erwarten.

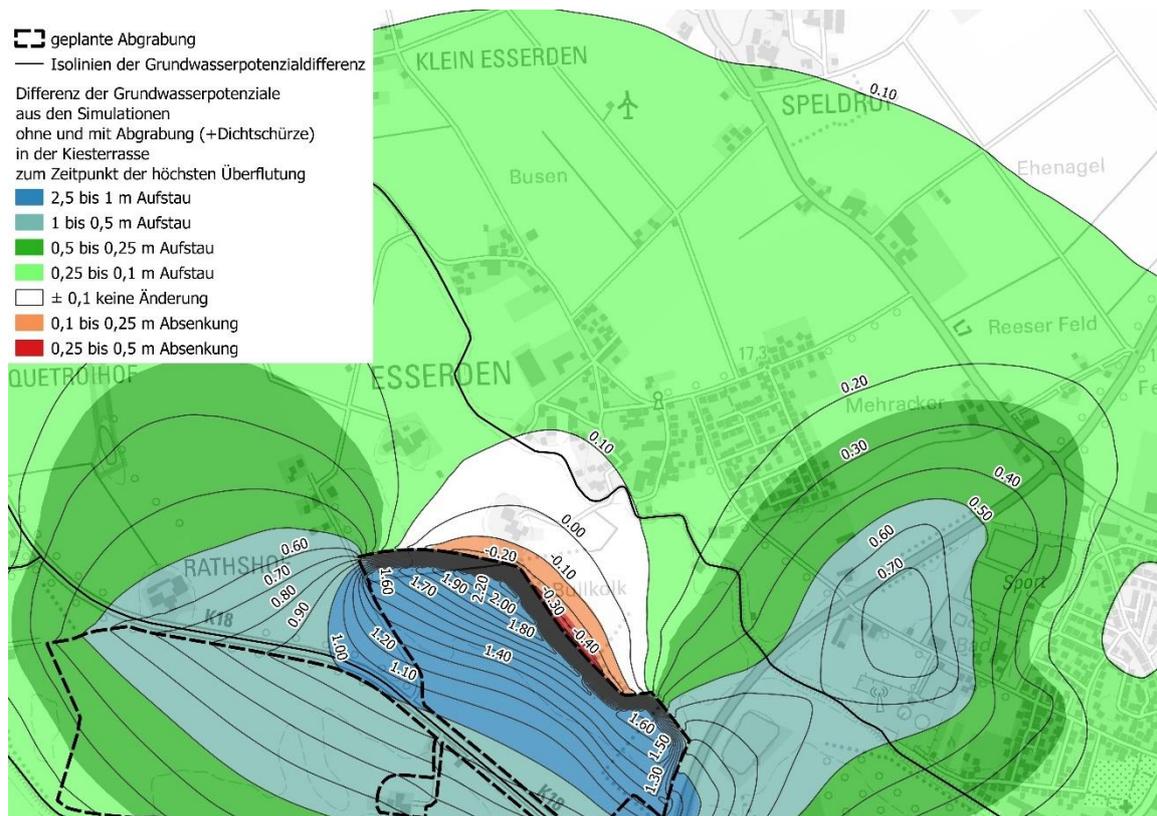


Abbildung 38: Differenz der Grundwasserpotenziale aus den Simulationen (ohne/mit Abgrabung) in der Kiesterrasse zum Zeitpunkt der maximalen Überflutung in Esserden

6.3 Lastfall (2) Hoher landseitiger Zustrom (stationär)

Für den Lastfall 2 werden die Randhöhen des Grundwassers im nördlichen Modellgebiet und die Grundwasserneubildung erhöht, um Grundwasserhochstände zu erzeugen. Das Millinger Meer und das Millinger Landwehrs werden angehoben. Rosau und Bienener Altrhein werden ebenfalls, wenn auch geringer angehoben. Um diesen landseitigen Grundwasserhochstand bemessen zu können, wurde die Ganglinie der Grundmessstelle Androp (Abbildung 39) verwendet.

Die Ganglinien in Abbildung 39 zeigen einen kausalen Zusammenhang von Hochwasserständen im Rhein und hohen Grundwasserständen im Hinterland. Dieser besteht über

einen Rückstauereffekt, wenn Grundwasser bei hohen Rheinwasserständen erschwert aus dem Hinterland ablaufen kann. Dies findet in der Randbedingungsfestlegung für Lastfall 1 Berücksichtigung.

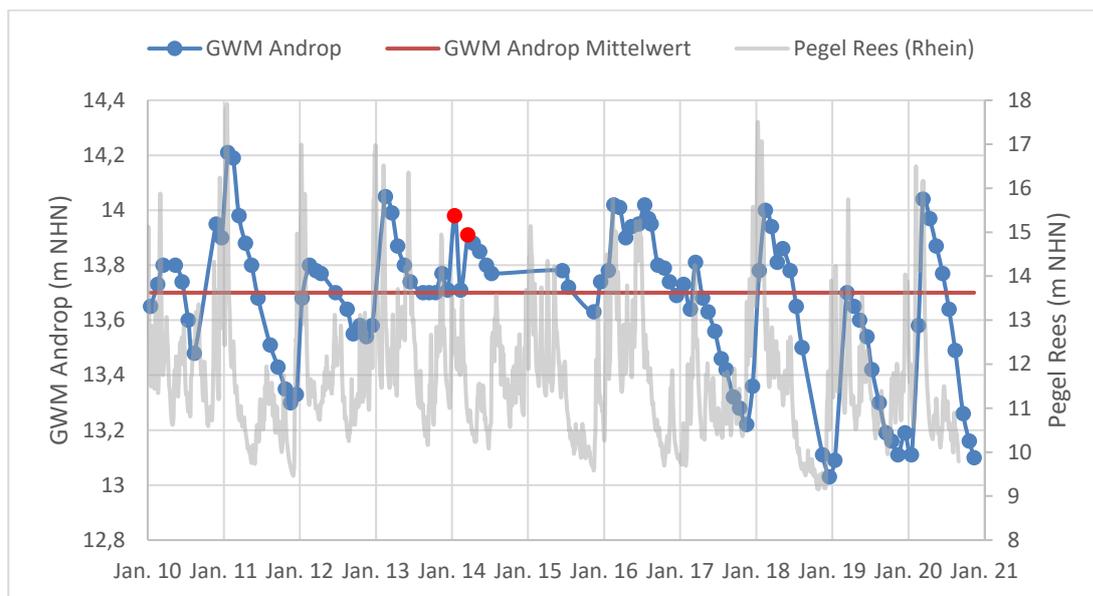


Abbildung 39: Grundwasserganglinie der Messstelle Androp am Millinger Meer mit in rot markierten Zeitpunkten von landseitig hohen GW-Ständen

Darüber hinaus können durch eine erhöhte Grundwasserneubildung auch unabhängig vom Rhein Grundwasserhochstände auftreten. Für die zwei in rot markierten Meßwerte liegen Grundwasserhochstände im Hinterland bei gleichzeitig mittleren bis niedrigen Rheinwasserständen am Pegel Rees vor. Demnach wird ein Wasserstand von 14 m NHN im Millinger Meer, welcher einer Erhöhung von 30 cm im Vergleich zum mittleren Zustand entspricht, als realistisch hoher landseitiger Grundwasserhochstand betrachtet.

Um den Lastfall mit einer maximalen Last auszustatten, wurde stattdessen der gemessene Höchstwert von 14,2 m NHN angesetzt, welches einer Anhebung von 50 cm im Vergleich zur mittleren Strömungssituation darstellt. Der Bienener Altrhein und die Rosau wurden entsprechend um die Hälfte (0,25 cm) angehoben, während der Rhein bei seinem mittleren Wasserspiegel belassen worden ist. Die Grundwasserneubildung wurde für das gesamte Modellgebiet um 33 % erhöht. Große Bereiche der Grundwasserneubildung auf dem Auenlehm erhöhen sich damit von 220 auf 290 mm/a.

Die Auswertung dieses Lastfalls erfolgte durch den Vergleich der Szenarien ohne und mit Abgrabung inklusive Dichtschürze. Das Ergebnis zeigt die Abbildung 40. Im Lastfall 2 liegen (in Strömungsrichtung) vor der Abgrabung 20 bis 25 cm höhere Grundwasserpotenziale als im Istzustand vor. Die Abgrabung bewirkt einen Grundwasseranstieg von bis zu 25 cm, welcher sich nur unmittelbar vor der Dichtschürze einstellt. Für den Bereich von Esserden kann kein schädlicher Grundwasseranstieg festgestellt werden, da die Anstiege vor dem Bandedich kleiner als 0,1 cm liegen und keine praktische Relevanz besitzen.

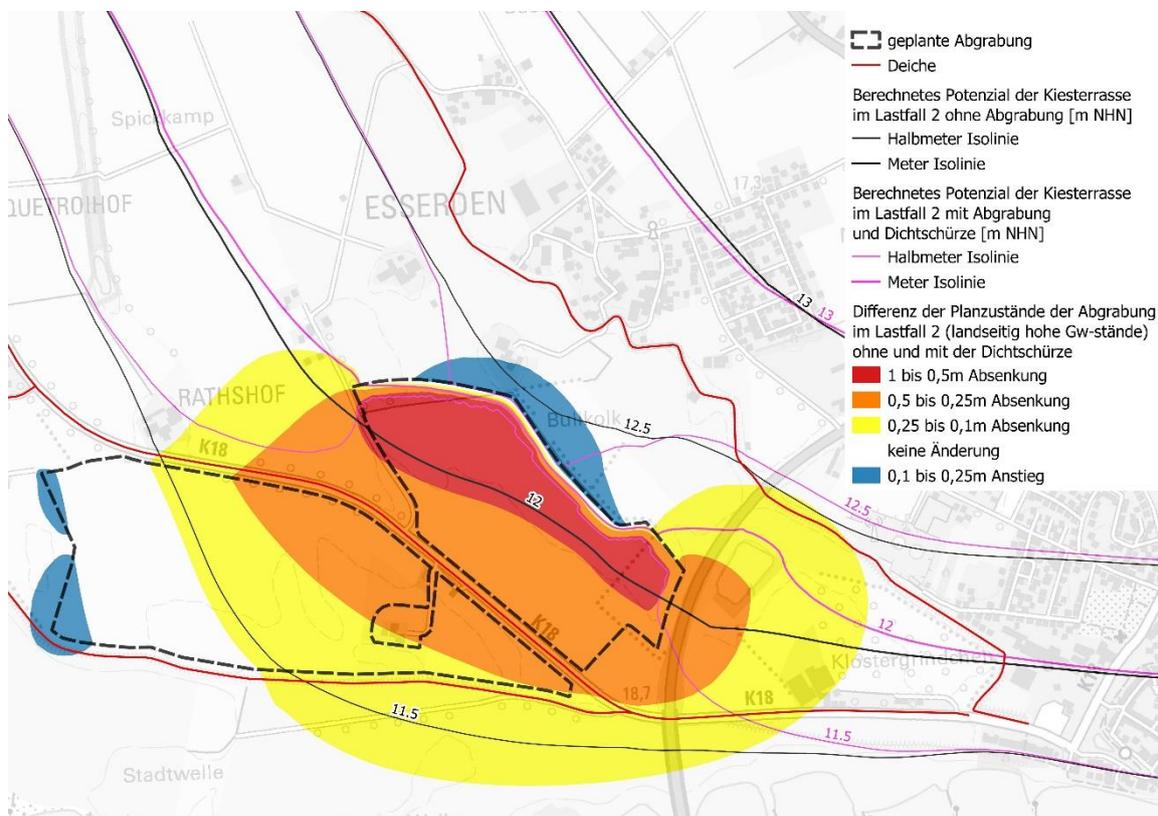


Abbildung 40: Differenz der Grundwasserpotenziale im Lastfall 2 ohne und mit Abgrabung inklusive Dichtschürze

6.4 Optimierung Dichtschürze

Die Dichtschürze wird bei den vorangegangenen betrachteten Lastfällen aus zwei entgegengesetzten Richtungen durchströmt (vom Rhein aus, Lastfall 1 und vom Hinterland aus, Lastfall 2). Weil mit der stärkeren Dichtwirkung aber auch ein verstärkter Aufstau vor der

Dichtwand einhergeht, gibt es eine optimale Dichtwirkung, die so stark ist, um das Rheinhochwasser effektiv abzuwehren, aber nicht so stark, um bei landseitigen Grundwasserhochständen einen schädlichen Aufstau für Esserden zu bewirken. Die in mehreren iterativen Schritten durchgeführte Optimierung der Durchlässigkeit der Dichtwand führte zum Ansatz einer Durchlässigkeit von $k_f = 1 \times 10^{-6}$ m/s. Nach Auskunft des Auftraggebers (Firma Hülskens) kann die Dichtschürze mit einer Durchlässigkeit von 1×10^{-6} m/s hergestellt werden. Dies entspricht der geforderten Durchlässigkeit der Dichtschürze aus dem Planfeststellungsbeschluss eines vergleichbaren Projektes des Auftraggebers in Mehrum, wo die geforderte Durchlässigkeit mit Feldtests nachgewiesen werden konnte.

Zusätzlich wird die Dichtschürze im östlichen Bereich der nördlichen Abgrabung bis zur Wardstraße auf dem Sommerdeich verlängert und umfasst damit die vollständige Nord- und Ostflanke der nördlichen Abgrabung. Damit sollen die Drücke in der Kiesterrasse während des Hochwassers im östlichen Esserden weiter vermindert werden (Kap. 6.4.1).

6.4.1 Auswirkung der Optimierung auf Lastfall 1 (instationär)

Das Szenario wurde bis auf die angepasste Durchlässigkeit in der Dichtwand, wie im Kapitel 6.2.2 geschildert, aufgebaut. Es wurden identische Randbedingungen angesetzt. Das Ergebnis ist in Abbildung 41 dargestellt.

In der Abbildung zeigt sich fast der gesamte Ortsbereich von Esserden unbeeinflusst (im Vergleich zum Szenario ohne Abgrabung). Dies wird auch durch den Vergleich der Abbildung 38 mit der Abbildung 41 deutlich. Für das östliche Esserden reduziert sich das Druckpotenzial in der Kiesterrasse um etwa 10 cm durch die optimierte Dichtschürze. Die nun verbliebenen etwa 20 cm Grundwasseranstieg, gegenüber dem Zustand ohne Abgrabung während des Hochwassers (Abbildung 41), werden als geringfügig eingeschätzt.

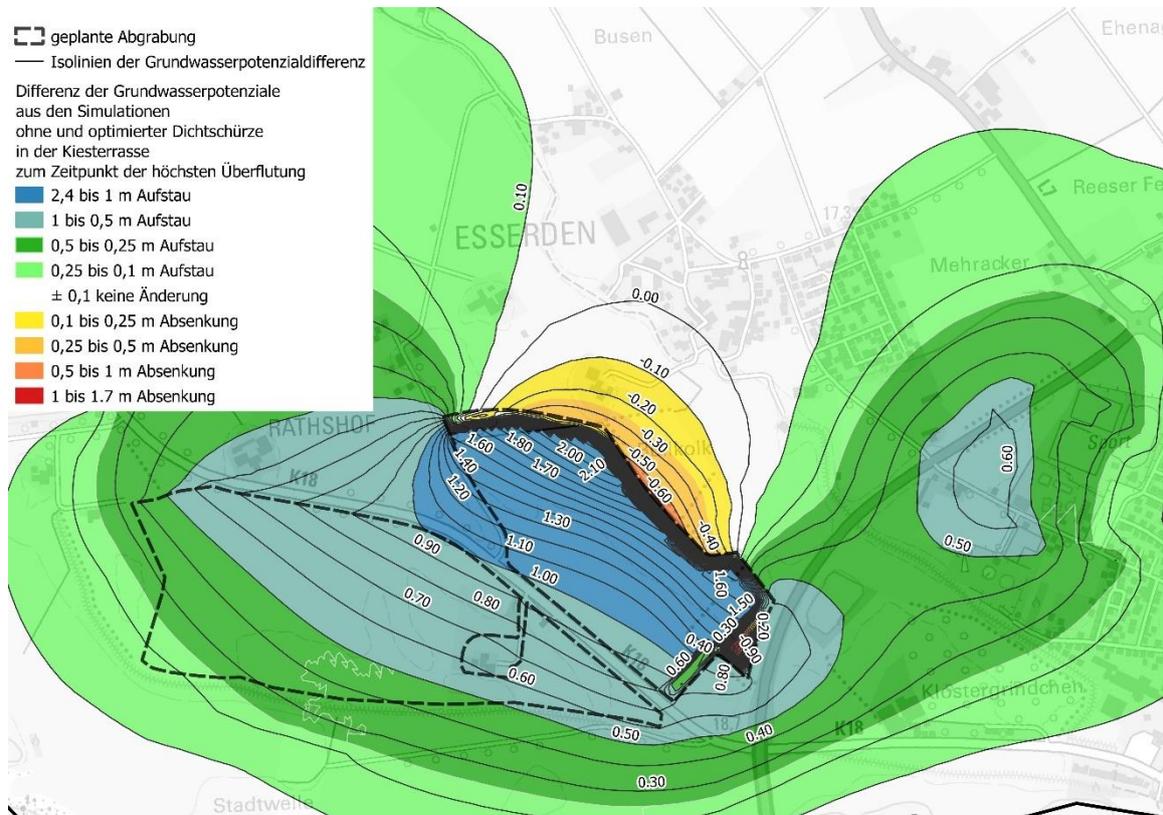


Abbildung 41: Differenz der Grundwasserpotenziale aus den Simulationen (ohne/mit Abgrabung) in der Kiesterrasse zum Zeitpunkt der maximalen Überflutung

6.4.2 Auswirkung der Optimierung auf Lastfall 2 (stationär)

Das Szenario wurde bis auf die angepasste Durchlässigkeit in der Dichtwand, wie im Abschnitt 6.3 geschildert, aufgebaut. Es wurden identische Randbedingungen angesetzt. Das Ergebnis ist in Abbildung 42 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Auswirkungen der aufstauend wirkenden Dichtschürze im Lastfall 2 (landseitig hohe GW-Stände) nicht bis nach Esserden reichen.

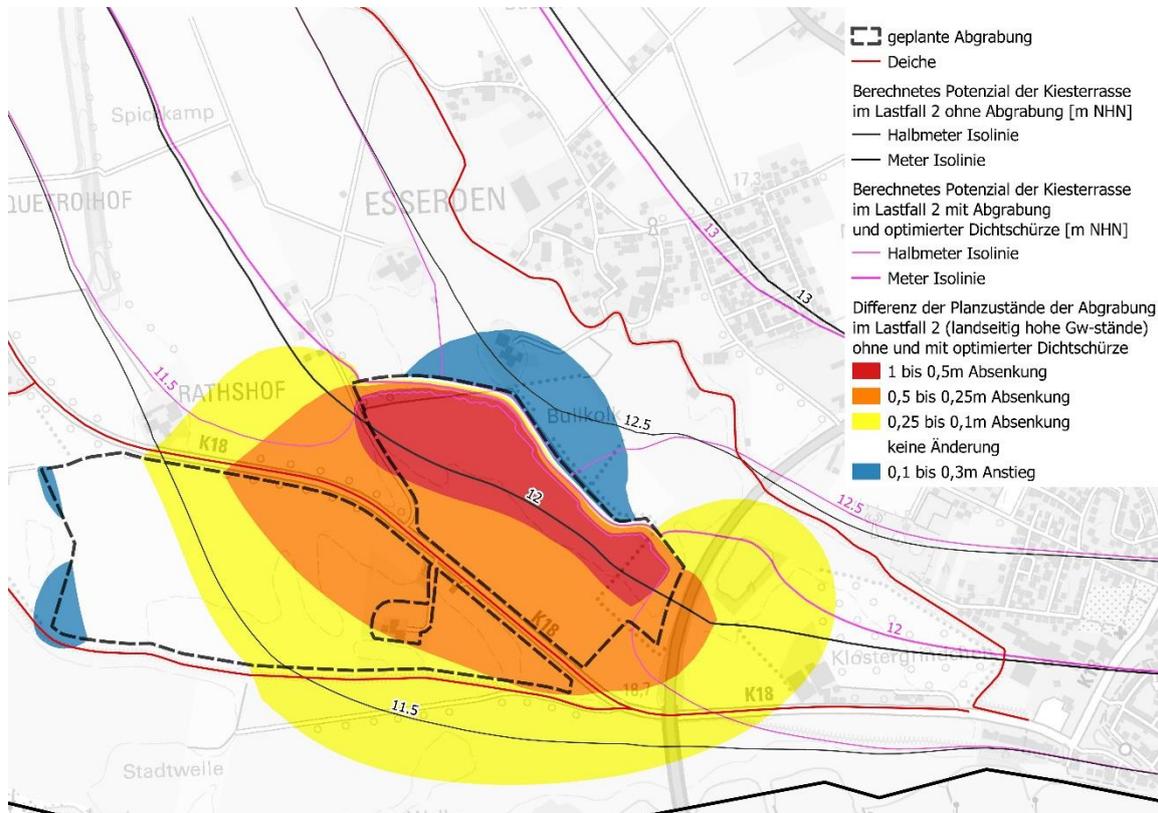


Abbildung 42: Differenz der Grundwasserpotenziale des Lastfall 2 ohne und mit Abgrabung für das Szenario mit optimierter Dichtschürze

Abbildung 42 zeigt die Auswirkungen auf die Grundwasserströmung bei Ansatz der optimierten Dichtschürze. Dabei sind die Auswirkungen des aufstauenden Effektes nach Norden gering. Die Grenze von 10 cm aufstauender Wirkung reicht jetzt etwa 75 m weiter nach Norden bis über die Alte Schulstraße, als vor der durchgeführten Optimierung der Dichtschürze (vgl. Abbildung 40). Die aufstauende Wirkung reicht jedoch nicht bis zum Banndeich und Esserden, selbst bei landseitig hohen Grundwasserständen nicht. Durch die östliche Verlängerung der Dichtschürze verringert sich auch die absenkende Wirkung hinter der Dichtschürze im Bereich der Abgrabung.

6.5 Hochwasserereignis während des Bauzustandes

6.5.1 Bauzustand ohne Maßnahmen

Mit der geplanten Dichtschürze am Ufer der Abgrabung Nordsee werden für den Hochwasserfall die Auswirkungen der Abgrabung auf das Grundwasser minimiert. Da die Herstellung der Dichtschürze aus technischen Gründen der Abgrabung zeitlich und örtlich versetzt nachläuft, ist von einem ca. 250 m breiten Uferabschnitt auszugehen, der während des Bauzustands ohne Dichtschürze vorhanden sein kann.

Dieser Fall wurde konstruiert, um die größten zu erwartenden Auswirkungen mit einer Simulation untersuchen zu können. Dazu wurde das Eintreten des Bemessungs-Hochwassers (Kap. 6.2) auf einer teilweise hergestellten Abgrabungsfläche bei nur teilweise hergestellter Dichtschürze untersucht.



Abbildung 43: Aufbau des Szenarios zum Bauzustand ohne Maßnahmen

Es wurde angenommen, dass die Dichtschürze im nördlichen Abgrabungssee von Osten nach Westen hergestellt werden wird. In einem 250 m breiten Uferabschnitt in unmittelbarer Nähe zur Ortschaft Esserden, fehlt die Dichtschürze zum Zeitpunkt des Hochwassers (Abbildung 43). Zusätzlich wurde davon ausgegangen, dass auf einer großen Fläche

der Auenlehm (zur Massengewinnung für die Dichtschürze) bereits abgetragen ist. Auch auf dieser Fläche kann bei der Überflutung durch Hochwasser eine Infiltration in das Grundwasser erfolgen. Die Differenzen zwischen Istzustand ohne Abgrabung und diesem Bauzustand für den Zeitpunkt der maximalen Überflutung zeigt die Abbildung 44.

In diesem Fall kann das Grundwasserpotenzial in der Kiesterrasse unterhalb von Esserden um etwa 0,7 bis 1,1 m ansteigen. Für das westliche und mittlere Esserden steigen die Grundwasserpotenziale in der Kiesterrasse über die Geländeoberfläche an (artesische Verhältnisse). Zu Grundwasseraustritten an der Geländeoberfläche kommt es im Modell jedoch nicht, da die Auenlehmschicht Esserden vor Schäden bewahrt. Da Fehlstellen im Auenlehm in der Realität nicht ausgeschlossen werden können (meist durch Bautätigkeiten wie Keller oder Brunnen), kann es kurzfristig (für die Dauer des Hochwassers von wenigen Tagen) zu Austritten an solchen Fehlstellen kommen.

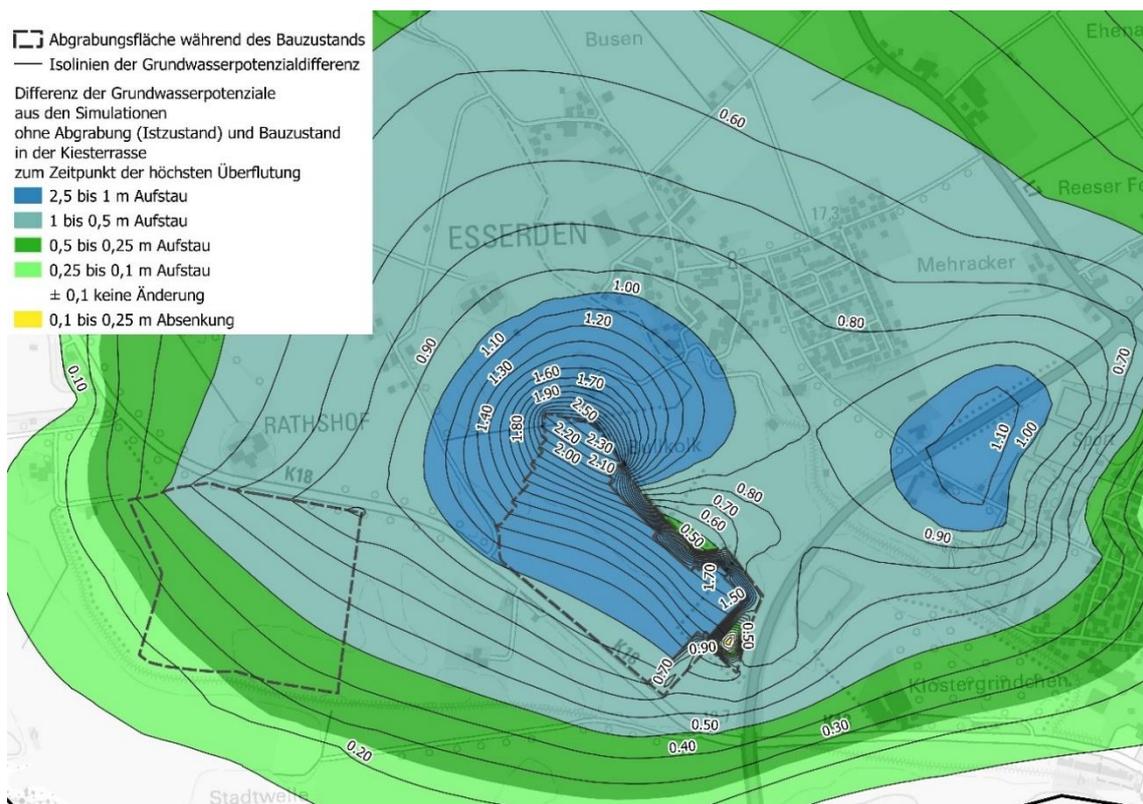


Abbildung 44: Differenz der Grundwasserpotenziale aus den Simulationen ohne Abgrabung und dem ungünstigsten Bauzustand ohne Maßnahmen zum Zeitpunkt der maximalen Überflutung

6.5.2 Bauzustand mit Maßnahmen (Bauzustand 1)

Um die dargestellten negativen Auswirkungen während des Bauzustandes auszuschließen, sollen durch eine hydraulische Maßnahme (Betrieb einer Brunnenanlage im Verlauf des Hochwassers) die Druckanstiege auf das Maß reduziert werden, das mit der vollständig errichteten Dichtschürze erreicht wird. Als möglicher Standort der Brunnenanlage stehen die angrenzenden Flächen der Abgrabung zur Verfügung. Der Vorzugsstandort für die Brunnenanlage ist das auf einer Hochfläche gelegene Gehöft Lembourskath an der Nordseite des geplanten Nordsees (Abbildung 45).

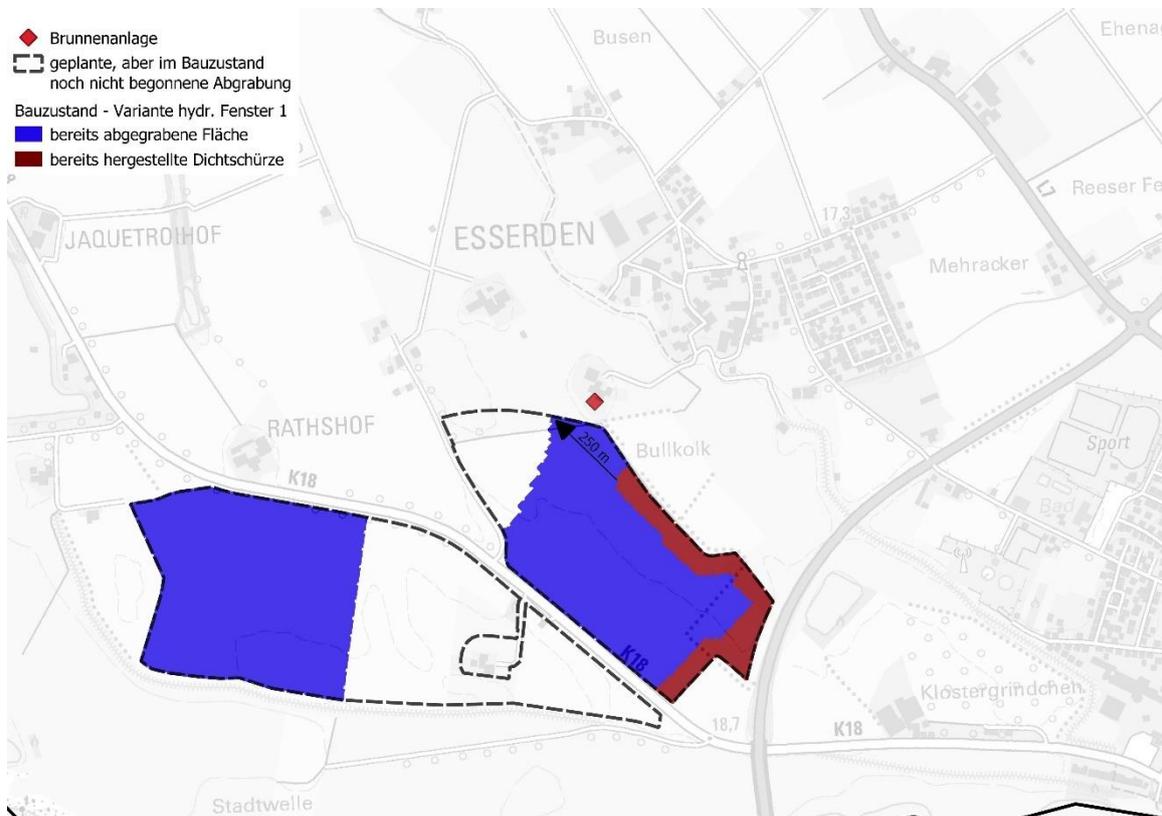


Abbildung 45: Aufbau des Szenarios Bauzustand 1 mit Betrieb einer Brunnenanlage

Bei der Berechnung wurde parallel zum ansteigenden Hochwasser die Brunnenentnahme so gesteuert, dass mit den ansteigenden Drücken im Grundwasserleiter auch die Entnahmeraten gesteigert werden. Nach diesen Modellberechnungen ist eine Brunnenanlage mit einer maximalen Entnahmerate von $1.300 \text{ m}^3/\text{h}$ erforderlich, um die Druckwasseranstiege zu kompensieren. Die Druckdifferenz zum Istzustand für den Zeitpunkt der maximalen Überflutung ist in Abbildung 46 dargestellt.

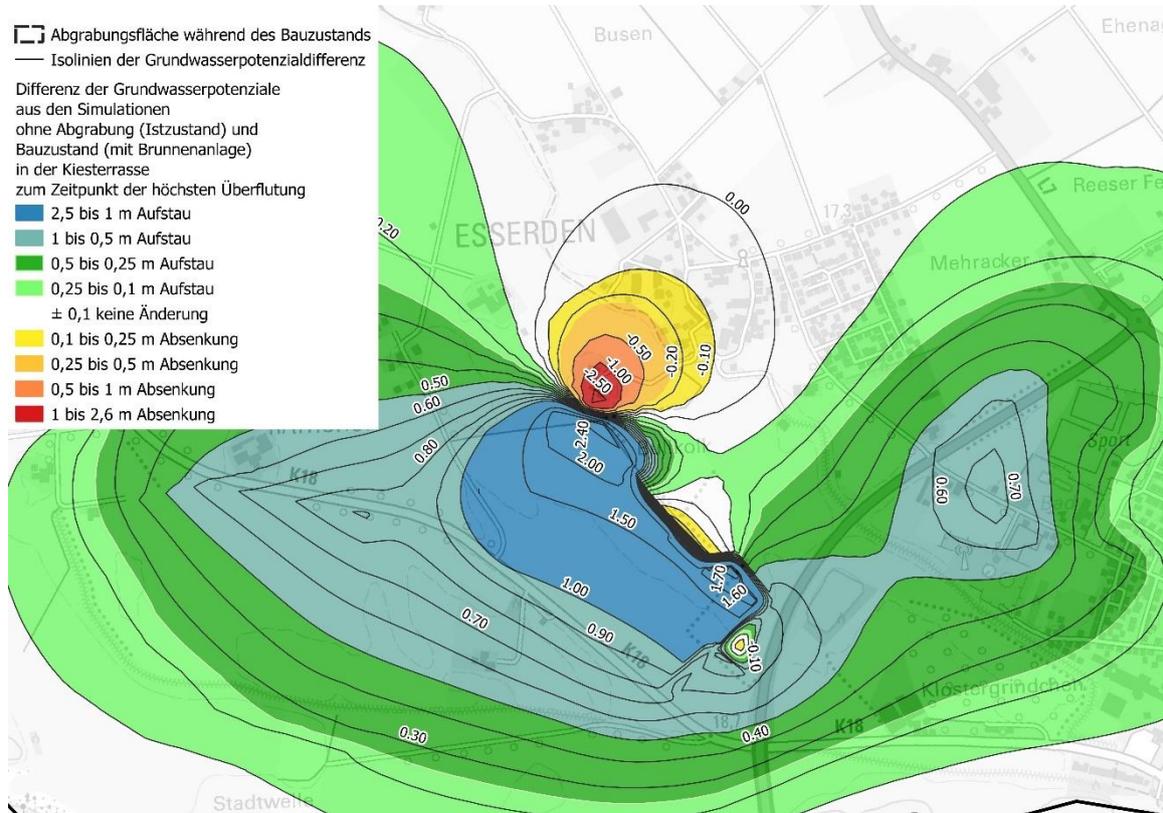


Abbildung 46: Differenz der Grundwasserpotenziale aus den Simulationen ohne Abgrabung und dem Bauzustand mit dem hydraulischen Fenster (Bauzustand 1) mit der Brunnenanlage zum Zeitpunkt der maximalen Überflutung

Die maximale Absenkung durch die Brunnenanlage beträgt rund 2,5 m im Vergleich zur Hochwassersituation ohne Abgrabung (Istzustand). Die Druckwasseranstiege in Esserden können kompensiert werden, sodass im Vergleich zum Istzustand im Verlauf eines Hochwassers keine erhöhten Drücke im Grundwasserleiter auftreten.

Zur Bewertung der technischen Umsetzung einer Brunnenanlage mit einer Förderleistung von 1.300 m³/h wurde das Fassungsvermögen (Q_f) einer solchen Anlage nach den Regeln der Technik (DVGW, 2005; Bieske, 1992 und Langguth & Voigt, 1980) mit folgendem Ansatz überschlagen:

$$Q_f = 2 \times r \times \pi \times h \times \frac{\sqrt{k_f}}{15}$$

- Q_f = Fassungsvermögen eines Brunnens (m³/s)
- r = wirksamer Brunnenradius (m)
- h = Durchströmte Mächtigkeit GWL am Brunnen (m)
- k_f = Durchlässigkeitsbeiwert des GW-Leiters (m/s)

Unter den am Standort gegebenen Durchlässigkeitsbeiwerten von $1 \cdot 10^{-3}$ m/s, einer durchströmten Mächtigkeit des Grundwasserleiters am Brunnen von 20 m und einem Bohrradius von 0,6 m ergibt sich eine Entnahmerate von rund 570 m³/h (0,16 m³/s). Demnach wären je nach Bohrdurchmesser 2 bis 3 Brunnen erforderlich, um die erforderliche Förderrate gewährleisten zu können. Wenn nur ein Brunnen errichtet werden soll, so müsste dieser bei gegebenen Parametern einen wirksamen Brunnenradius von etwa 1,5 m aufweisen, um die erforderliche Förderrate leisten zu können.

6.5.3 Bauzustand mit Maßnahmen (Bauzustand 2)

Mit dem Bauzustand 1 wurde die ungünstige Lage eines hydraulischen Fensters in unmittelbarer Nähe zur Ortslage Esserden betrachtet. Dadurch, dass für die Positionierung der Brunnenanlage eine vorhandene Hochlage genutzt werden kann, stellt sich die Frage, ob dieser Standort auch für alle anderen, während des Bauzustands auftretenden Zustände, geeignet ist. Deshalb wurde noch ein zweiter Bauzustand betrachtet, bei dem das hydraulische Fenster maximal weit vom Standort der Brunnenanlage entfernt ist.

Dieses zweite hydraulische Fenster ist mit seinen weiteren Rahmenbedingungen in Abbildung 47 dargestellt. Die Brunnenanlage wurde im Modell identisch zur Variante des ersten betrachteten hydraulischen Fensters (Bauzustand 1) angesetzt. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 48 dargestellt.

Abbildung 48 zeigt, dass die hydraulische Maßnahme zur Zeit des Scheitelpunktes des Hochwassers die Druckwasseranstiege in Esserden auch für den Bauzustand 2 kompensieren kann. Die Entnahmerate liegt nun bei etwa 500 m³/h. Mit den Entnahmeraten von Bauzustand 1 und 2 ist die Bandbreite der erforderlichen Entnahmen ausgewiesen.

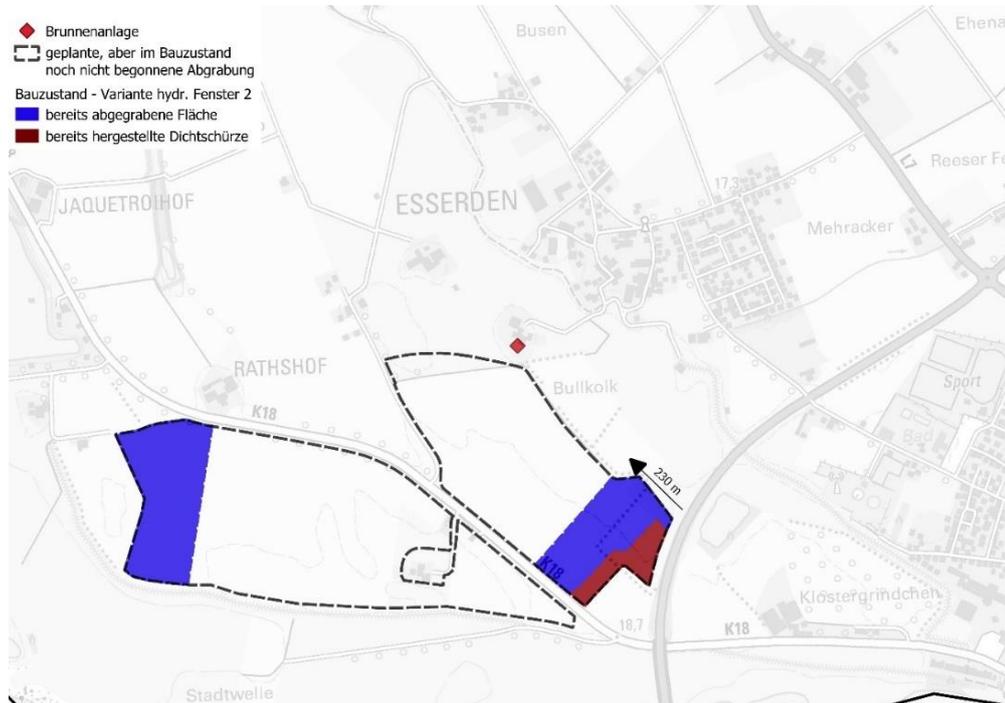


Abbildung 47: Aufbau des Szenarios Bauzustand 2 mit Betrieb einer Brunnenanlage

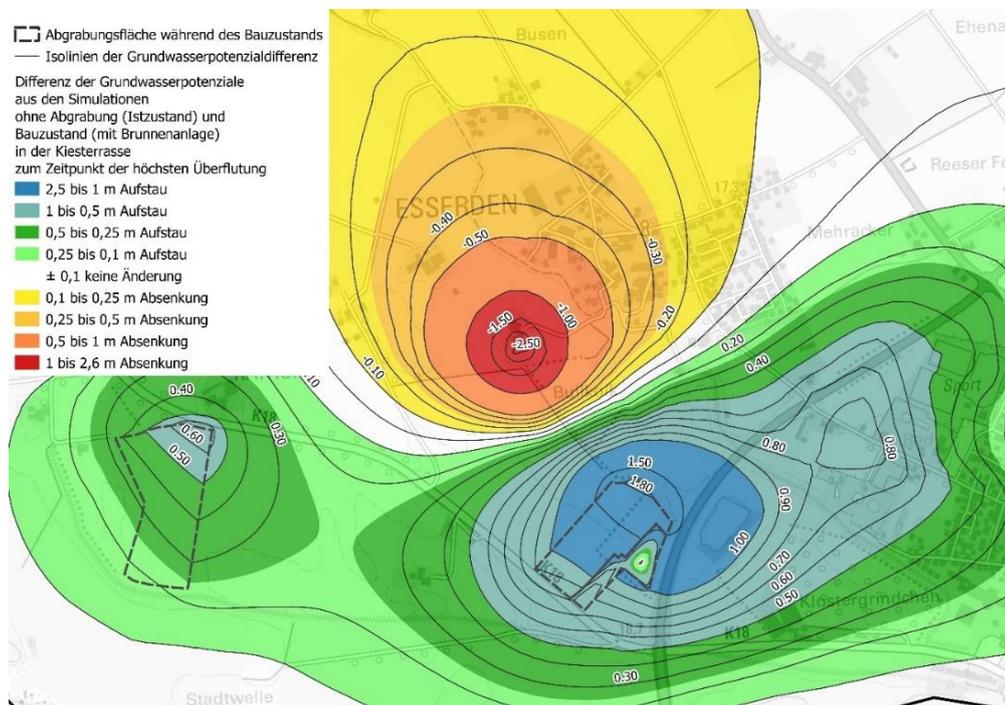


Abbildung 48: Differenz der Grundwasserpotenziale aus den Simulationen ohne Abgrabung und dem Bauzustand mit dem hydraulischen Fenster (Bauzustand 2) mit der Brunnenanlage zum Zeitpunkt der maximalen Überflutung

6.6 Ergebnisdiskussion

Die Ergebnisse der Simulationen bestätigen und quantifizieren die mit der Datenanalyse gewonnene Systemkenntnis. Sie können die Übergänge von einer freien Grundwasseroberfläche in der Kiesterrasse in gespannte und sogar artesische Verhältnisse belegen. Die Grundfälle der Grundwasserströmung im Modellgebiet lassen sich folgendermaßen beschreiben:

1) Mittlere Verhältnisse und Niedrigwasser im Rhein

Bei mittleren Rheinwasserständen und vor allem bei den für diese Situation als repräsentativ angesehenen ZW-Wasserständen (den häufigsten anzutreffenden Wasserständen) wirkt der Rhein als Vorfluter für das Grundwasser. Die Grundwasseroberfläche ist weitgehend als „freie Oberfläche“ ausgebildet. In Richtung Hinterland geht diese Situation schon im Bereich der Ortslage von Esserden in gespannte Verhältnisse über. In Abbildung 25 ist dies durch ein „Anstoßen“ der Grundwasseroberfläche an die Basis des Auenlehms ersichtlich.

2) Übergangszustände

Durch die veränderlichen Wasserstände in Rhein können die unterschiedlichsten Situationen auftreten. Mit einem Absinken an einer Stelle, kann bereits wieder ein Anstieg an anderer Stelle einhergehen. Beim Anstieg des Rheins geht der gesamte Grundwasserleiter in einen gespannten Zustand über, d.h. die Grundwasseroberfläche steigt bis an die Basis des Auenlehms. Dann kann vom Porenraum des Grundwasserleiters so gut wie kein weiteres Grundwasser mehr aufgenommen werden. Die Grundwasseroberfläche geht in eine Druckfläche über, die innerhalb des Auenlehms steht und, wenn sie über die Geländeoberfläche steigt, zur artesischen Druckfläche wird.

3) Hochwasserereignisse und Überflutung der Aue

Im Verlauf von Hochwasserereignissen fehlt dem Grundwasser eine Vorflut, d.h. der natürliche Abfluss in den Rhein ist temporär unterbunden. Dadurch steigen auch die Grundwasserstände bzw. Drücke, im Hinterland, ohne dass Wasser aus dem Rhein bis dorthin vordringen muss. Die Aue wird überflutet und es entsteht eine abwärts gerichtete Strömungskraft, da die Druckhöhe im Grundwasserleiter geringer ist als die Oberfläche der Überflutungsfläche. Diese Druckunterschiede sind allerdings gering, da die Terrassenablagerungen hoch durchlässig sind. Hinter dem Deich kehrt sich die treibende Kraft der Strömung um, die Druckhöhen in

der Terrasse sind lokal höher als die Lage der Geländeoberfläche an der wieder atmosphärische Drücke herrschen.

Aus diesen geohydraulischen Grundfällen kann nun nicht unmittelbar eine Aussage zur räumlich/zeitlichen Durchströmung der Auenlehmschicht abgeleitet werden. Diese Aussagen können mit dem Modell nur für konkrete Orte und Zeiten ausgewiesen werden. In den untersuchten und beschriebenen Simulationen konnte kein Austreten von Qualmwasser im Bereich der Ortschaft Esserden ermittelt werden. Selbst im Kapitel 6.5 betrachteten Worst-Case-Szenario des Bauzustandes findet kein Qualmwasseraustritt statt. Die Wirkung der Abgrabung auf die Drücke im Grundwasser ist im Bereich der Ortschaft gering. Aufgrund der Mächtigkeit der Auenlehmschicht von mehreren Metern und der geringen Durchlässigkeit dringt im Verlauf eines Hochwasserereignisses zwar Grundwasser von der Terrasse in den Auenlehm ein, durchströmt diesen aber nicht. In längeren Zeiträumen kann die Auenlehmschicht mit geringen Raten durchsickert werden, was für die Grundwasserneubildung auch der Fall ist.

Für die konkrete Betroffenheit einzelner Gebäude müssen nicht nur die Geländeoberfläche, sondern auch die Sohle von Kellern betrachtet werden. Ebenso ist das Vorhandensein von offenen Brunnen in der Lage Gefährdungen zu verursachen. Hierzu lagen keine Informationen vor und waren nicht Bestandteil der Betrachtung.

Zusätzlich zeigte sich, dass mit einer groß dimensionierten Brunnenanlage auf der Hochlage an der Nordseite des geplanten Nordsees die Druckanstiege in Esserden im Fall eines Hochwassers kompensiert werden können. Darüber hinaus wird der Hochwasserschutz, gegenüber dem Istzustand ohne Abgrabung, sogar verbessert. Dies gilt sowohl für hydraulische Fenster in nächster Nähe von Esserden (Bauzustand 1), als auch für entfernte hydraulische Fenster (Bauzustand 2).

Bei der Bewertung der in den Abbildungen 38, 41, 46 und 48 dargestellten möglichen Anstiege der Potenziale muss berücksichtigt werden, dass die oftmals größten Anstiege östlich des Ortszentrums von Esserden (im Bereich der B6) von rund 70 cm in einem Bereich stattfinden, bei dem es trotz dieser Anstiege nicht zu einem Austritt von Grundwasser an der Oberfläche kommen kann. Die Ursache dafür ist das höhere Gelände, die geringere Auenlehmmächtigkeit und der dadurch höhere GW-Flurabstand in diesem Bereich, der auch bei einem temporären Anstieg noch rund 2 m beträgt. Artesische Verhältnisse treten hier nicht auf.

7 Zusammenfassung

Die Firma Hülskens GmbH & Co. KG plant gemeinsam mit der Holemans GmbH die Abgrabung Reeser Welle im Rheinvorland auf einer Fläche von rund 76 ha westlich der Stadt Rees. Die Abgrabung ist in zwei Teilgebieten vorgesehen, die einen Nord- und einen Südsee ergeben sollen. Die Prognose von Auswirkungen der Abgrabungen auf die Grundwassersituation, insbesondere auf die benachbarte Ortslage Esserden, sind Gegenstand dieses Berichts. Es wurde dazu ein numerisches 3D-Grundwasserströmungsmodell erstellt, mit dem verschiedene Szenarien untersucht werden konnten.

Das hydrogeologische Modell wird durch einen hochdurchlässigen Grundwasserleiter der kiesigen Rheinterrasse, eine gering durchlässige Auflage aus Auenlehm und den direkten Einfluss des Rheins charakterisiert. Außerdem sind weitere oberirdische Gewässer und deren mögliche Überflutungsflächen für die Grundwasserströmung relevant.

Mit der Finite-Elemente-Software *SPRING* (Vers. 4.32) wurde ein dreidimensionales Modell erstellt, welches in den Bereichen der Abgrabung und in Esserden eine hohe Auflösung aufweist.

Die Aussagekraft des Modells wurde durch den Vergleich gemessener und berechneter Werte im Rahmen einer Kalibrierung nachgewiesen. Dazu wurde die Grundwassersituation in einem ersten Schritt durch eine mittlere Situation als stationärer zeitlich unveränderlicher Zustand abgebildet. Dafür wurden aus den vorliegenden Messdaten an GWM plausible Mittelwerte abgeleitet, die mit dem Modell stationär nachgerechnet wurden. Dabei beträgt die maximale Abweichung an den insgesamt 14 Grundwassermessstellen 14 cm und die mittlere Abweichung 7 cm.

Anschließend wurden in der instationären Kalibrierung berechnete und gemessene Zeitreihen verglichen. Dazu wurde das Hochwasser von 2010/2011 nachgerechnet, da es sehr gut mit Messwerten belegt ist. Der Rheinwasserstand sowie die Wasserstände in den Fließgewässern wurden als Randbedingungen im Zeitverlauf den Messwerten entsprechend dem Modell vorgegeben. Es wurden rheinnahe und rheinferne Grundwassermessstellen ausgewählt, für die monatliche oder quasi-kontinuierliche Messwerte (aus Datenloggern) vorlagen. Das Modell konnte die Messwerte in ihrem zeitlichen Verlauf gut abbilden, sowohl die Extremwerte als auch die Steigungen beim Ansteigen und Sinken.

Im Anschluss an die Kalibrierung wurden verschiedene Szenarien betrachtet und ausgewertet. Die Auswertung erfolgte über Vergleiche zwischen den Grundwassersituationen mit Abgrabung (ohne und mit einer Dichtschräge) mit dem Istzustand. Für das Szenario

ohne Dichtschürze zeigte sich, dass die Abgrabung eine absenkende Wirkung auf das Grundwasserpotenzial in der Kiesterrasse unterhalb von Esserden hätte. Diese positive Wirkung würde sich im Hochwasserfall jedoch umkehren und eine Vernässungsgefahr darstellen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass für den mittleren Fall (GW-Strömung auf den Rhein gerichtet) die Auswirkungen auf das Nahfeld der Abgrabung beschränkt sind. Es erfolgt im Anstrom der Dichtschürze ein geringer Aufstau und hinter der Dichtschürze eine Absenkung durch die Ausspiegelung der Potenziale im Bereich der Abgrabungsseen. Es ergibt sich kein Druckanstieg unterhalb von Esserden.

Der untersuchte Lastfall 1 repräsentiert ein Rhein-Hochwasser. Dazu wurde das stärkste Hochwasserereignis der letzten 30 Jahre im Raum Rees (1995) zu Grunde gelegt. Der Maximalwasserstand wurde auf die Bemessungshöhe des Deiches (Wasserstand bei BHQ) auf 20,3 m NHN erhöht. Dieses Szenario wurde ohne und mit Abgrabung (inklusive Dichtschürze) aber ansonsten mit identischem Modellaufbau (inklusive Randbedingungen) berechnet. Es zeigten sich in der Kiesterrasse durch die Abgrabung verursachte erhöhte Potenziale zwischen 10 und 30 cm unterhalb von Esserden. Da das Grundwasser die Kiesterrasse dann vollständig bis zur Unterkante des Auenlehms aufsättigt, sind die genannten Beträge Druckanstiege und keine Anstiege einer freien Oberfläche.

Um der Befürchtung von schädlichen Grundwasseranstiegen durch einen Aufstau an der Dichtschürze im Falle von landseitig hohen Grundwasserständen nachzugehen, wurde der Lastfall 2 untersucht. Dieses Szenario wurde auf der Basis gemessener maximaler Grundwasserstände (mit erhöhter GW-Neubildung) im Hinterland konstruiert. Es zeigte sich, dass es vor der Dichtschürze zu einem stärkeren Aufstau als bei einer mittleren Grundwassersituation kommt, dieser aber nicht bis zum Banndeich und bis nach Esserden reicht. Folglich geht für diesen Lastfall keine Vernässungsgefahr für die Ortslage Esserden aus.

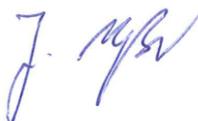
Die Auswertung der Lastfälle zeigt, dass die Dichtschürze in Abhängigkeit von der vorherrschenden Strömungssituation unterschiedliche Auswirkungen hervorbringt und es daher möglich ist, diese zu optimieren. Eine Optimierung bedeutet auf der einen Seite, stärkere Anstiege vor der Dichtschürze zu zulassen (Lastfall 2), um im Gegenzug die Auswirkungen der Abgrabung während eines Hochwassers auf Esserden (Lastfall 1) zu reduzieren. Gegenstand der Optimierung war zum einen die hydraulische Durchlässigkeit (definiert durch den k_f -Wert) und zum anderen die Länge bzw. Lage der Dichtschürze an ei-

nem Teil des Ufers der Abgrabungsseen. Beide Aspekte sind nur im eng begrenzten Rahmen der örtlichen Gegebenheiten variierbar. Die geringsten Auswirkungen erfolgten bei einer das komplette Nord- und Ostufer umschließenden Schürze mit einer Durchlässigkeit von 1×10^{-6} m/s. Im Vergleich zum Basisszenario (Dichtwand mit $k_f = 5 \times 10^{-6}$ m/s) verringert sich der Potenzialanstieg um etwa 10 cm für ganz Esserden. Für den Großteil der Ortslage bedeutet das, dass keine signifikanten Auswirkungen (Druckanstiege) mehr ermittelt wurden. Für den östlichen Ortsbereich von Esserden verbleibt ein Druckanstieg in der Kiesterrasse von etwa 20 cm, welcher aufgrund des geringen Betrages und der dort etwas höheren Grundwasserflurabstände als nicht schädlich eingeschätzt wird.

Die mehrere Meter mächtige Auenlehmschicht verhindert durch ihre geringe Durchlässigkeit eine Durchströmung von unten nach oben im Verlauf eines Hochwasserereignisses. Es dringt zwar Grundwasser von der Terrasse in den Auenlehm ein, durchströmt diesen im Zeitraum der Überflutung aber nicht. Dies gilt ebenfalls für das abschließend betrachtete Worst-Case-Szenario eines Bauzustandes. Obwohl der Abgrabungsbereich in diesem Szenario in nächster Nähe zu Esserden nicht durch die Dichtschürze geschützt wird und sich die Drücke unterhalb von Esserden um 0,7 bis 1,1 m in der Kiesterrasse erhöhen, kommt es nicht zu Grundwasseraustritten an der Geländeoberfläche. In längeren Zeiträumen kann die Auenlehmschicht mit geringen Raten durchsickert werden, was beispielsweise für die Grundwasserneubildung auch der Fall ist.

Es wurde eine Betrachtung zum Auftreten eines Hochwassers im Verlauf des Baus durchgeführt, um eine hydraulische Maßnahme (Brunnenanlage) zu konzipieren, mit der die nachteilige Wirkung einer noch nicht erstellten Dichtwand kompensiert werden kann. Diese zeigt, dass eine Brunnenanlage auf der Hochlage am nördlichen Seeufer in der Lage ist, die Druckwasseranstiege im Grundwasserleiter in Esserden während der Auskiesung im Hochwasserfall zu kompensieren.

Essen, den 22.03.2022



ppa. Dr. J. Meßer



i.V. Dr. F. Werner

8 Literaturverzeichnis

- Beyer, W. 1964.** *Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve.* Wasserwirtschaft und Wassertechnik (WWT) 14, Heft 6. 1964.
- Bieske, E. 1992.** *Bohrbrunnen.* München, Wien : Oldenbourg, 1992.
- Bez.-Reg. D. 2000:** (Bezirksregierung Düsseldorf) *Gebietsentwicklungsplan für den Regierungsbezirk Düsseldorf (GEP 99),* 141 S., – Düsseldorf.
- Bogena, H., Kunkel, R., Schöbel, T., Schrey, H.-P., Wendland, F. 2003.** *Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen.* Jülich : Schriften des Forschungszentrums Jülich - Reihe Umwelt/Environment - Band 37, 2003. ISBN 3-89336-329-7.
- DBU. 2020.** (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) *Auswirkungen von Überschwemmungen, Hochwasserpoldern und Starkregen auf das Grundhochwasser.* Campus Kleve - Eigenverlag, 2020. abgerufen von: <https://www.dbu.de/media/0508201013261jsp.pdf>.
- DVGW. 2005.** *Bemessung von Vertikalfilterbrunnen - Arbeitsblatt W 118.* Bonn: 2005.
- GD-NRW. 2001.** *Geologische Karte 1:25000 Blatt 4305 Wesel mit Erläuterungen.* Krefeld : Geologischer Dienst von Nordrhein-Westfalen, 2001. ISBN 3-86029-103-3.
- GD-NRW. 2006.** *Rohstoffkarte 1:50000 L4304 Wesel.* Krefeld : Geologischer Dienst NRW, 2006.
- Glugla, G., Jankieicz, P., Rachimow, C., Lojek, K., Richter, K., Fürtig, G., Krahe, P. 2003.** *BAGLUVA – Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses.* Koblenz : Bundesanstalt für Gewässerkunde: BfG-Bericht Nr. 1342: 102 S., 2003.
- Hennig, G. 1966.** *Hydrogeologische Tabellen.* VEB Projektierung- und Konstruktionsbüro Kohle (Ministerium für Grundstoffindustrie). Berlin , 1966.
- Hülskens, 2018.** (Hülskens GmbH & Co. KG.) *Pressekonferenz zum neuen Antrag des Abgrabungsprojektes Reeser Welle.* Rees/Wesel , 14. September 2018.
- Langguth, H. & Voigt, R. 1980.** *Hydrogeologische Methoden.* Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1980.
- Meßer, J. 2018.** *Grundwasserneubildung - Prozesse und Einflussgrößen.* Ausgabe 11-2018, bbr, 2018.
- Meßer, J. 2013.** Ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung in Mitteleuropa. [Online] EWLW, 2013. <http://gwneu.de/>.
- NZ, Kleve. 2020.** (Naturschutzzentrum Kreis Kleve e.V.) Projekt: Lebendige Röhrichte - Reeds for LIFE. Rees, Abgefragt im Dezember 2020