



**BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU**

Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau

**BAW**



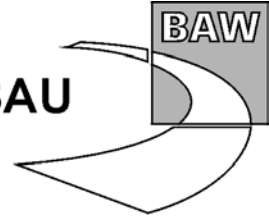
# GUTACHTEN

**Fahrrinnenanpassung der Unterweser**

**Fahrrinnenanpassung der Außenweser  
an die Entwicklungen im Schiffsverkehr sowie  
Tiefenanpassung der hafenbezogenen Wendestelle**

**Summationswirkung der Anpassungen  
von Unter- und Außenweser**

**Gutachten  
zur ausbaubedingten Änderung der  
Grundwasserverhältnisse**



**Fahrrinnenanpassung der Unterweser**  
**Fahrrinnenanpassung der Außenweser**  
an die Entwicklungen im Schiffsverkehr sowie  
Tiefenanpassung der hafenbezogenen Wendestelle

**Summationswirkung der Anpassungen von Un-  
ter- und Außenweser**  
**Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der  
Grundwasserverhältnisse**

Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven  
Wasser- und Schifffahrtsamt Bremen  
bremenports GmbH & Co. KG

Auftrag vom: 03.05.2004, Az.: 2/231.2/WAP 07/1

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. 5.02.10048.00 - 7

Aufgestellt von: Abteilung: Geotechnik  
Referat: Grundwasser G3  
Bearbeiter: Hector Montenegro

Karlsruhe, 24.03.2006

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



## **Zusammenfassung**

Die täglichen Tideschwankungen des Weserwasserstandes mit einem Tidehub von bis zu ca. 4 m wirken sich auf die Grundwasserdynamik aus. Die fluktuierenden Tidewasserstände im Fluss können sich unter gespannten Grundwasserverhältnissen noch in Entfernungen von bis zu einigen km im Grundwasser ausbreiten, allerdings handelt es sich hierbei um Druckwellen. Ein Wasseraustausch zwischen Fluss- und Grundwasser beschränkt sich auf den unmittelbaren Uferbereich. Im Hinblick auf die Auswirkungen der geplanten Ausbaumaßnahmen auf das Grundwasser sind daher die flussnahen Bereiche von Relevanz. Die geplanten Ausbaumaßnahmen bedingen eine Erhöhung des Tidehubs um maximal 9 cm, während das Tidemittelwasser um ca. 1 cm abgesenkt wird.

Auf Grundlage eines vertikal-ebenen 2D-Finite-Elemente Grundwassermodells wurden die komplexen Wechselwirkungen zwischen Fluss, Grabensystem und Grundwasser analysiert. Die Auswirkungen der geplanten Maßnahme auf das Grundwasser werden in Hinblick auf die Deichsicherheit, auf die Bauwerksstabilität, sowie auf Aspekte der Nutzung und von Naturfunktionen bewertet. Es zeigte sich, dass die ausbaubedingten Auswirkungen, selbst, wenn man die maximale Tidehubänderung von 9 cm auf das gesamte Gebiet ansetzt, keine nachteiligen Auswirkungen auf die Deichsicherheit und die Bauwerkstabilität haben. Bei der Bewertung der grundwasserrelevanten Nutzungen und der Naturfunktionen zeigte sich, dass die Tidehubänderung im Grundwasser den Bodenwasserhaushalt nicht verändert. In Hinblick auf die hydrochemischen Verhältnisse zeigte sich, dass im Ist- Zustand der von der Ausbaumaßnahme beeinflusste Grundwasserleiter fast vollständig versalzt ist und dass diese Versalzung daher als naturraumtypisch anzusehen ist. Die ausbau-bedingte geringfügige Zunahme des Austausches zwischen Grund- und Flusswasser wird diesen Zustand nicht nachteilig verändern.

## Inhaltsverzeichnis

## Seite

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Verwendete Unterlagen	2
3	Geplante Ausbaumaßnahmen	2
3.1	Geplante Ausbaumaßnahmen in der Außenweser	3
3.2	Geplante Ausbaumaßnahmen in der Unterweser	3
4	Untersuchungsraum	3
4.1	Naturräumlicher Überblick	4
4.2	Hydrogeologischer Aufbau	5
5	Untersuchungsmethodik	6
6	Modellierung Grundwasserdynamik unter Tideeinfluss	7
6.1	Modellkonzeption	7
6.2	Untersuchte Varianten	8
6.3	Diskussion der Modellergebnisse	9
6.3.1	Tideeinfluss auf das Grundwasser	9
6.3.2	Grundwasserdynamik	10
7	Vorhabensbedingte Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse	10
7.1	Mittlere Grundwasserverhältnisse	11
7.2	Grundwasserdynamik unter Tideeinfluss	11
7.3	Einfluss der räumlichen Variabilität der Modelparameter	12
7.4	Hydraulische Interaktion zwischen Fluss- und Grundwasser	13
7.5	Hydrochemische Verhältnisse	13
7.5.1	Vermischungszone	13
7.5.2	Salzkonzentration im oberflächennahen Grundwasser	14
7.6	Verlagerung der Brackwasserzone	14
8	Bewertung der vorhabensbedingten Änderungen	15
8.1	Grundwasser und Deichsicherheit	15
8.2	Grundwasser und Bauwerksstabilität	15
8.3	Grundwasserrelevante Nutzung	16
8.4	Grundwasserrelevante Naturfunktionen	16

## Tabellenverzeichnis

Seite

**Tabelle 1:** Prognostizierte maximale Veränderung der Tidekenngrößen für die Überlagerungsvariante (Maximalwerte im Bereich Bremen /1/)

6

## Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes
Anlage 2	Hydrogeologische Einheiten im Untersuchungsgebiet
Anlage 3	Lage der Grundwasseroberfläche im Untersuchungsgebiet
Anlage 4	Grundwassersenke im Untersuchungsgebiet (Ausschnitt)
Anlage 5	Hydrogeologischer Aufbau im Untersuchungsraum (Schematischer Querschnitt)
Anlage 6	Finite-Elemente Netz
Anlage 7	Modellstruktur
Anlage 8	Ganglinien der Flusswasserstände für den Untersuchten Zeitraum (Weser-km 39,195 li)
Anlage 9	Geländeoberkante und Grundwasserpotential im pleistozänen Sandaquifer (z=NN -12 m)
Anlage 10	Potentialverteilung bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser im Vergleichszustand (Überhöhung y:x = 5:1)
Anlage 11	Geschwindigkeitsfeld bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser im Vergleichszustand
Anlage 12	Differenzen zwischen Vergleichszustand und Überlagerungsvariante des Grundwasserpotentials im pleistozänen Sandaquifer (z=NN -12 m)
Anlage 13	Grundwasserdynamik im pleistozänen Sandaquifer in unterschiedlicher Entfernung zum Fluss (Vergleichszustand)
Anlage 14	Differenzen der Grundwasserstände im pleistozänen Sandaquifer zwischen Vergleichszustand und Überlagerungsvariante
Anlage 15	Dynamik des Grundwasserpotentials im Sandaquifer und in der Deckschicht im Vergleichszustand
Anlage 16	Differenzen des Grundwasserpotentials im Sandaquifer und in der Deckschicht zwischen Vergleichszustand und Überlagerungsvariante
Anlage 17	Versalzung im Grundwasser

## 1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Wasser- und Schifffahrtsämter Bremen und Bremerhaven, vertreten durch die Projektgruppe Weseranpassung (WAP), planen die **Fahrrinnenanpassungen der Unterweser und der Außenweser** an die Entwicklungen im Schiffsverkehr sowie die Tiefenanpassung der hafenbezogenen Wendestelle vor Bremerhaven. Für das Planfeststellungsverfahren ist im Auftrag der Projektgruppe Weseranpassung und bremenports (Schreiben vom 03.05.2004, Geschäftszeichen 2/231.2/WAP 07/1) von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) eine wasserbauliche Systemanalyse mit dem Ziel einer detaillierten Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der abiotischen Systemparameter zu erstellen. Aufgrund getrennter Planfeststellungsverfahren sind die Wirkungen der Unterweservertiefung und die Wirkung der Außenweseranpassung mit Tiefenanpassung der hafenbezogenen Wendestelle getrennt zu ermitteln und darüber hinaus auch die Summationswirkung (Überlagerung) aller geplanten Anpassungsmaßnahmen in Unter- und Außenweser zu untersuchen.

Aufgrund der umfangreichen Untersuchungen wurde von der BAW das folgende strukturierte Bearbeitungskonzept zur Ermittlung der Auswirkungen der Fahrrinnenanpassung zugrunde gelegt:

- **Tidedynamik und Salztransport**

Ermittlung der maßgebenden Kennwerte zur Tidedynamik und Salztransport auf der Basis einer hochauflösenden 3D HN-Modellierung eines Vergleichszustandes sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Kennwerte.

- **Sturmfluten**

Ermittlung der heutigen Sturmflutverhältnisse auf der Basis einer hochauflösenden HN-Modellierung eines Vergleichszustandes sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Scheitelwasserstände sowie des Verlaufs unterschiedlicher Sturmfluten.

- **Morphodynamik**

Beschreibung der heutigen Transportprozesse auf der Basis einer hochauflösenden 3D HN-Modellierung eines Vergleichszustandes sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Transportprozesse.

- **Schiffserzeugte Belastungen**

Beschreibung der heutigen schiffserzeugten Belastungen auf der Basis von Naturuntersuchungen und hydraulischen Modellversuchen und Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugter Belastungen.

- **Grundwasser**

Beschreibung der heutigen Grundwasserverhältnisse und Ermittlung ausbaubedingter Änderungen auf der Basis bestehender Erkenntnisse und wasserbaulicher Systemstudien einer geohydraulischen Modellierung.

Das vorliegende Gutachten behandelt ausschließlich die Untersuchungen zum Teilaspekt Grundwasser. In weiteren Gutachten der BAW werden die Teilaspekte Tidedynamik und Salztransport, Sturmfluten, Transportprozesse und Morphodynamik sowie schiffserzeugte Belastungen behandelt.

## 2 Verwendete Unterlagen

- /1/ BAW-Gutachten: Fahrrinnenanpassung der Unterweser. Fahrrinnenanpassung der Außenweser an die Entwicklungen im Schiffsverkehr sowie Tiefenanpassung der Hafenbezogenen Wendestelle. Summationswirkung der Anpassungen von Unter- und Außenweser. Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport. BAW-Nr.: 5.02.10048.00 – 1 - Februar 2006.
- /2/ Unterlagen zum Scoping-Termin nach §5 UVPG für das Vorhaben Fahrrinnenanpassung der Unterweser an die Entwicklungen im Schiffsverkehr. Projektgruppe Weseranpassung. WSA Bremerhaven und WSA Bremen. 2005.
- /3/ Unterlagen zum Scoping-Termin nach §5 UVPG für das Vorhaben Fahrrinnenanpassung der Außenweser an die Entwicklungen im Schiffsverkehr. Projektgruppe Weseranpassung. WSA Bremerhaven und WSA Bremen. 2005.
- /4/ BfG-Gutachten: Umweltverträglichkeitsuntersuchung. Anpassung der Fahrrinne der Außenweser an die weltweit gültigen Anforderungen der Containerschifffahrt. SKN – 14 m – Ausbau. BfG 0664. 1996.
- /5/ BfG-Gutachten: Umweltrisikoeinschätzung für Projekte an Bundeswasserstraßen. Teilbeitrag Unterweser, W01.01- BfG- 1284. Februar 2002.
- /6/ Umweltrisikoeinschätzung und FFH-Verträglichkeitseinschätzung für Projekte an Bundeswasserstraßen. Anpassung der Außenweser an Entwicklungen im Containerverkehr; Fahrrinnenanpassung für 13,50 m tiefgehende Containerschiffe der "S-Klasse". BfG-1386. 2003
- /7/ EG-WRRL Bericht 2005 Grundwasser. Stand 15.07.2004. Betrachtungsraum NI06 – Untere Weser/Hunte. Ergebnisse der Bestandsaufnahme. Aufgestellt Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), 2005.
- /8/ EG-WRRL Bericht 2005 Grundwasser. Stand 15.07.2004. Betrachtungsraum NI05 – Mittlere Weser. Ergebnisse der Bestandsaufnahme. Aufgestellt Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), 2005.
- /9/ Digitaler Atlas Hintergrundwerte. Herausgegeben vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, 2005.
- /10/ Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Zwischenbericht für das Land Bremen. Bestandsaufnahme und Erstbewertung im Land Bremen 2005. Berichtsteil Grundwasser. Erstellt im Auftrag des Senators für Bau, Umwelt und Verkehr durch das NLfB, das NLÖ und das NLWK.

## 3 Geplante Ausbaumaßnahmen

Um die quantitative und qualitative Leistungsfähigkeit der Wasserstraße zu erhöhen, sind diverse Ausbaumaßnahmen geplant. Eine detaillierte Beschreibung des Vorhabens befindet sich in /2/ und /3/. Im Folgenden wird ein Überblick über die geplanten Ausbaumaßnahmen in der Außen- und Unterweser gegeben. Formal werden diese Vorhaben in getrennten Verfahren behandelt. Da die Unter- und Außenweser als Teilräume eines Ästuars hydraulisch



miteinander verknüpft sind, bedingen Eingriffe in einem Wirkungsraum hydrologische und morphologische Auswirkungen in dem anderen. Im vorliegenden Gutachten wird nicht explizit auf die Maßnahmen in den einzelnen Teilräumen eingegangen. Es werden nur die Auswirkungen der Überlagerungsvariante für die Bewertung herangezogen. Dies ist begründet, weil die Überlagerungsvariante die kumulierten und daher maximal möglichen Veränderungen berücksichtigt. Sollte nur eine der beiden Varianten umgesetzt werden, so sind die zu erwartenden hydrologischen Auswirkungen deutlich geringer als die der Überlagerungsvariante und somit auch die Einwirkungen auf das Grundwasser.

### **3.1 Geplante Ausbaumaßnahmen in der Außenweser**

Die Ausbaumaßnahmen erstrecken sich über insgesamt rd. 52 km von Weser-km 68 bis etwa Weser-km 120. Im Rahmen dieser Maßnahmen soll im Teilabschnitt zwischen der Nordschleuse Bremerhaven und dem Unterfeuer Dwarsgat bei Weser-km 92,85 und im sich daran anschließenden Teilabschnitt die bestehende Fahrrinnensohle um bis zu ca. 1,2 m abgesenkt werden. Daneben sind in der äußeren Außenweser Veränderungen an den vorhandenen Fahrrinnenbreiten und am derzeitigen Verlauf der Fahrrinnenstrasse vorgesehen. So soll ab Weser-km 99 in Richtung See die Fahrrinnenbreite von derzeit 300 m auf 380 m vergrößert werden. Zudem ist zwischen Weser-km 99 und 110 eine Westverschwenkung der Fahrrinne um bis zu 500 m in Bereiche größerer natürlicher Wassertiefe vorgesehen.

### **3.2 Geplante Ausbaumaßnahmen in der Unterweser**

Zur Steigerung der Leistungsfähigkeit in der Unterweser muss die Sollssole der Fahrrinne im Abschnitt km 58 – 40 entsprechend dem Ausbauziel streckenweise um bis zu 1,0 m und von km 40 – km 8 um bis zu 0,6 m tiefergelegt werden. Die Sohlbreiten der Fahrrinne sollen im Unterweserbereich unverändert bleiben, die Unterwasserböschungen werden sich an die neuen Tiefen anpassen. Die Fahrrinne im "Blexer-Bogen" (km 65 – 59) ist nach Osten in tiefere Flussbereiche zu verlagern. Hierzu erfolgt eine Verschwenkung der Fahrrinne um den Kurswechsel bei km 60,5.

## **4 Untersuchungsraum**

Die Unterweser erstreckt sich vom Bremer Weserwehr bis Bremerhaven, ab Bremerhaven geht sie in die Außenweser über. Die Unterweser wie auch die Außenweser unterliegen sowohl dem Einfluss der Tide als auch dem Einfluss des Oberwassers. Der Einfluss des Oberwassers nimmt seewärts ab, die Einwirkung der Tide nimmt zum Weserwehr hin zu. Stromab von Bremen münden am linken Ufer die Ochtum und am rechten Ufer die Lesum - nach Zusammenfluss von Wümme und Hamme - in die Weser. Mit einem Bogen umrundet die Unterweser die Ausläufer der Stader Geest und fließt dann nach Norden. In diesen Bogen mündet die Hunte, auf der folgenden Geraden fließen Drepte und Lune hinzu. Bei Bremerhaven geht die Unterweser über einen Bogen, unter Zufluss der Geeste, in den sich nach

Nordosten öffnenden Trichter der Außenweser über. In Anlage 1 ist das Untersuchungsgebiet dargestellt.

See- und Flussdeiche unterteilen die Landschaft in binnen- und außendeichs. Binnendeichs prägt ein von Gräben umschlossenes Mosaik aus Grünlandflächen die flache Kulturlandschaft. Außendeichs setzt sich teils das Grünland des Binnenlandes bis an die Grenze zu Meer oder Fluss fort, teils stellen Röhrichte und Wattflächen einen fließenden Übergang zum aquatischen Lebensraum dar. Von der noch vor 200 Jahren von Sandbänken und kleinen Inseln geprägten Unterweser sind heute drei langgestreckte Stromspaltungen erhalten geblieben: der Harriersand mit dem Rechten Nebenarm, die Strohauser Plate mit der Schweiburg sowie der Rönnebergersand und Warflether Sand mit Westergate und Warflether Priel /4/.

#### **4.1 Naturräumlicher Überblick**

Die für das Erdzeitalter des Quartärs typischen raschen Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten prägten die Landschaftsentwicklung auf vielfältige Weise. Skandinavisches Eis breitete sich in Schüben bis nach Norddeutschland aus und hinterließ Schichten aus Geschiebelehm oder -mergel. Die Schmelzwässer der Gletscher schütteten mächtige, aus Sand bestehende Sedimentkörper auf oder setzten im Stillwasser tiefer Seebecken ihre aus Schluff und Ton bestehenden Sedimentkörper ab. Die aus Kies und Sand aufgebauten Flussterrassen sind überwiegend in Kaltzeiten entstanden. Das Ansteigen des Meeresspiegels in den Warmzeiten und vor allem in der Nacheiszeit, dem Holozän, verkürzte die Unterläufe der Flüsse und wandelte diese zu Ästuaren um. Im Holozän kam es verstärkt zu einer gezeitenbeeinflussten Sedimentation, während der die vorhandenen glazio-fluviatilen Sedimente mit holozänen Marschen- und Moorbildungen überdeckt wurden.

Die Wesermarsch ist als Niederungsgebiet zum Schutz vor Überschwemmungen gegen die Unterweser abgedeicht. Das flussnahe Gelände liegt in weiten Bereichen zwischen NN +0 m und NN +2 m und würde bereits bei mittleren Tiden überflutet werden. Das ebene Gelände und die geringe Durchlässigkeit der Deckschichten erfordern ein dichtes Entwässerungssystem, das im Laufe der Jahrhunderte unter Einbeziehung von Sielen und Schöpfwerken weiter entwickelt wurde. In diesem Grabensystem werden jahreszeitlich angepasste Wasserstände gehalten, die eine an die Erfordernisse der Landwirtschaft ausgerichtete Ent- und Bewässerung gewährleisten [1]. Dieses künstlich angelegte Grabensystem hat einen nachhaltigen Einfluss auf die Wasserbilanz. So werden bedeutende Niederschlagsmengen gefasst und unmittelbar an die Vorflut weiter geleitet. Aufgrund der geringen Geländehöhen müssen in manchen Bereichen die Wasserstände im Grabensystem tief gehalten werden. Je nach Durchlässigkeit und Mächtigkeit der Deckschichten bewirken die niedrigen Grabenwasserstände eine Entnahme und Ableitung von Grundwasser im Grabensystem [1].

## 4.2 Hydrogeologischer Aufbau

Charakteristisch für das Untersuchungsgebiet ist eine oberflächennah vorliegende tonig-schluffige, holozäne Sedimentabfolge (Küstenholozän) über einem Sandaquifer. Anlage 2 gibt einen Überblick des hydrogeologischen Aufbaues im Untersuchungsgebiet wieder. Die Mächtigkeit der holozänen Schichten variiert räumlich von über 20 m im Küstenbereich bis auf wenige Dezimeter am Geestrand. Diese größtenteils tonig-schluffigen Sedimente weisen eine geringe bis sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit in der Größenordnung von  $1 \cdot 10^{-6}$  -  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s auf. Unterhalb der holozänen Deckschichten schließen sich pleistozäne Sande an, die mit größerer Tiefe eine etwas feinere Kornverteilung aufweisen (s. Hoffmann et al. in [1]). Diese Sande besitzen mit  $1 \cdot 10^{-3}$  -  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s eine deutlich größere Durchlässigkeit als die holozänen Deckschichten und bilden einen einheitlichen Grundwasserleiter, der allenfalls örtlich von bindigen Schichten unterbrochen wird [1]. Aufgrund des vorliegenden geologischen Aufbaues zweier Sedimentschichten von extrem unterschiedlicher Durchlässigkeit kann, vor allem in flussnahen Bereichen, von gespannten Grundwasserverhältnissen ausgegangen werden. Je nach Flusswasserstand, topographischen Bedingungen und Lage entlang des Flusslaufes befindet sich die Grundwasserdruckfläche einige Dezimeter unter und sogar über der Geländeoberfläche. Das Grundwassergefälle ist in Flussnähe gering. Die Lage der Grundwasseroberfläche im Untersuchungsgebiet ist in Anlage 3 dargestellt.

Aufgrund der geschilderten naturräumlichen Gegebenheiten, des hydrogeologischen Aufbaues und nicht zuletzt der intensiven wasserwirtschaftlichen Eingriffe durch das Grabensystem ergeben sich folgende für die Grundwasserverhältnisse im Untersuchungsraum charakteristische Merkmale:

- Der Grundwasserrandzustrom stammt aus der Geest, wo eine deutlich größere Grundwasserneubildung stattfindet als in der Marsch.
- Das Grundwasserregime im flussnahen Bereich wird durch die Flusswasserstandsentwicklung bestimmt.
- In flussnahen Bereichen herrschen gespannte bis artesische Grundwasserverhältnisse vor.
- In Flussnähe herrscht ein flaches Gefälle vor.
- Je nach Topografie und Wasserstand im Grabensystem kann in Flussnähe ein Zustrom von Uferfiltrat erfolgen.

In Anlage 4 sind für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebiets die Grundwassergleichen dargestellt. Durch das Grabensystem werden die Grundwasserstände unter NN gehalten, was zu influenten Bedingungen führt ( $M_{Thw} 91/2000 = NN + 2,06$  m). In Anlage 5 ist ein schematischer Schnitt senkrecht zum Fluss dargestellt. Diese Systemskizze gibt die typischen Verhältnisse südlich von Brake wieder, wo das Gelände in Flussnähe unterhalb des Mittelwasserstandes der Weser liegt. In dieser Skizze sind einige für das Untersuchungsgebiet charakteristische Gegebenheiten repräsentiert. Der Untergrund ist heterogen aufgebaut, örtlich können sich die bindigen und die sandigen Schichten in Form von Linsen und Rinnen

durchdringen. Der hydraulische Kontakt zwischen Fluss und Grundwasser erfolgt in dieser Systemskizze über die Flusssohle. An einem solchen System sollen im Folgenden die maßgebenden Wechselwirkungen zwischen Fluss und Grundwasser illustriert werden.

## 5 Untersuchungsmethodik

Die in /2/ und /3/ beschriebenen baulichen Maßnahmen zur Anpassung der Fahrrinne an die verkehrstechnischen Anforderungen werden in das gewässermorphologische sowie in das hydrologische Regime der Weser eingreifen. Die Auswirkungen der geplanten Maßnahmen wurden in umfangreichen Detailuntersuchungen bestimmt und sind im BAW-Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport /1/ dokumentiert. Wie in den Vorbemerkungen bereits erwähnt, wurden die Ausbaumaßnahmen an Unter- und Außenweser getrennt untersucht. Erwartungsgemäß ergeben sich die größten zu erwartenden Veränderungen aus der Überlagerung beider Varianten. Von Relevanz für das Grundwasserregime sind daher die Tidekenngrößen der Überlagerungsvariante, die in Tabelle 1 dargestellt sind.

**Tabelle 1:** Prognostizierte maximale Veränderung der Tidekenngrößen für die Überlagerungsvariante (Maximalwerte im Bereich Bremen /1/)

Überlagerungsvariante	Änderung der Tidekennwerte
Tidehub [cm]	+ 9 cm
Tidehochwasser [cm]	+ 3 cm
Tideniedrigwasser [cm]	- 6 cm
Tidemittelwasser [cm]	- 1 cm

Zu beachten ist hierbei, dass die Änderungen der Tidekenngrößen entlang des Flusslaufes variieren stromabwärts abnehmen (vgl. Tabelle 2 im BAW-Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport /1/). Die maximalen Veränderungen werden sich demnach an der Tidegrenze beim Wehr Bremen-Hemelingen einstellen. Die Änderung der Tidekenngrößen betrifft auch die an die Unter- und Außenweser angeschlossenen Nebenflüsse, denn ihre Wasserstände sind mit dem Weserästuar hydraulisch gekoppelt. Allerdings sind die Nebenflüsse in ihrem Oberlauf einer geringeren Tidedynamik ausgesetzt.

Maßgebend bei der Einschätzung der Auswirkungen der Ausbaumaßnahmen auf das Grundwasserregime sind die zu erwartenden Änderungen der Tidedynamik. Für die Einschätzung der hydrochemischen Veränderungen ist die künftige Lage der Brackwasserzone relevant. Die Analyse der hydraulischen Wechselwirkungen zwischen Fluss und Grundwasser in einem (über das Grundwasser) tidebeeinflussten Auensystem erfolgt auf Grundlage eines numerischen Modells. Mit dem Modell werden in einem nachfolgenden Schritt die ausbaubedingten Auswirkungen der Tidedynamik auf das Grundwasser untersucht.

Im Untersuchungsraum variieren nicht nur die Tidecharakteristik, sondern auch etliche Standortbedingungen wie die Mächtigkeit und Durchlässigkeit von Aquifer und Deckschichten, Entfernung der Deichlinie vom Fluss u.a.m. Eine explizite Berücksichtigung all der möglichen Parameterkombinationen wäre äußerst aufwendig, daher war es erforderlich, ein für den Untersuchungsraum repräsentatives Modellszenario aufzustellen, das die prinzipiellen Wirkungszusammenhänge aufzeigt. In einem zweiten Schritt war zu bewerten, wie sich etwaige Schwankungen der maßgebenden Kenngrößen gegenüber den im Modell verwendeten Parameter auf die prognostizierten Grundwasserverhältnissen auswirken. Im folgenden Kapitel werden die Kriterien zur Konzeption des Modells dargestellt. Bei der Diskussion der berechneten Auswirkungen auf das Grundwasserregime wird in Kapitel 7.3 auf den Einfluss von Abweichungen von den getroffenen Annahmen eingegangen.

## 6 Modellierung Grundwasserdynamik unter Tideeinfluss

Zur Analyse der Wechselwirkungen zwischen Fluss und Grundwasser in einem tidebeeinflussten Gewässer wurde ein numerisches Finite-Elemente Grundwassermodell aufgestellt. Bei der Modellbildung kam es darauf an, die für die Fluss-Grundwasser-Interaktion wesentlichen und für das Untersuchungsgebiet charakteristischen Einflüsse abzubilden. Voruntersuchungen zeigten, dass Veränderungen des Grundwasserregimes in der erwarteten Größenordnung weniger Zentimeter (s. /1/) nur in Gebieten mit geringen Flurabständen von Relevanz sind. Daher richtete sich das Augenmerk auf flussnahe Standorte. Des weiteren sollte der gebietstypische Aufbau eines gespannten Grundwasserleiters abgebildet werden. Ferner sind wasserbauliche Eingriffe, wie eine Eindeichung oder ein Grabensystem prägend für das gesamte Untersuchungsgebiet. Mit diesen Vorgaben wurde ein Querschnitt ausgewählt, das unmittelbar am Fluss eingedeicht ist und ca. 1 km Hinterland umfasst. Topografie, Grundwasserstände und Untergrundaufbau entsprechen dem hydrogeologischen Teilraum 01207 Unterweser Marsch. /7/ Die anzusetzende Tidedynamik richtete sich an den Gegebenheiten in der Mitte des Untersuchungsgebietes bei Weser-km 39,195 li (MThw= NN + 2,06 m, MTnw= NN - 1,82 m sowie MThb= 3,88 m; Untersuchungszeitraum 1991/2000, WSA Bremen). Als hydraulische Randbedingung am Flussrand wurden die für diesen Bereich von der BAW-DH berechnete Weserwasserstandsdynamik angesetzt /1/ (s. Anlage 9).

### 6.1 Modellkonzeption

Die Untersuchung eines dynamischen Systems bedingt eine instationäre Modellierung. Der geologische Aufbau bestehend aus Schichten stark unterschiedlicher Durchlässigkeit mit Übergängen von gespannten zu ungespannten Grundwasserverhältnissen kann mit einem vertikal-ebenen Modell hinreichend abgebildet werden. Die Finite-Elemente Diskretisierung des Modellgebiets ist in Anlage 6, der Schichtaufbau in Anlage 7 dargestellt. Das Gelände befindet sich in Flussnähe knapp unter NN und steigt zum Hinterland sanft an. Die holozäne Deckschicht ist am Ufer über 10 m mächtig und streicht mit zunehmender Entfernung vom Fluss aus. Die Durchlässigkeit der Deckschichten wurde zu  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s angesetzt, dem dar

unter befindlichen Sandaquifer wurde eine Durchlässigkeit von  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s zugewiesen. Die als undurchlässig angenommene Basis des Grundwasserleiters wurde bei NN - 30 m vorgegeben, was für die Untersuchung der oberflächennahen Prozesse ausreichend ist.

Im betrachteten Modell befindet sich unmittelbar am Fluss ein Deich. Im Hinterland werden zwei Gräben, in denen ein konstanter Wasserstand auf NN -1 m gehalten wird, berücksichtigt (s. Anlage 6). Aufgrund der Mächtigkeit der Deckschicht binden die Gräben nicht in den durchlässigen Grundwasserleiter ein. Der zeitlich konstant angenommene Zufluss am landseitigen Modellrand wurde so gewählt, dass sich bei Mittelwasser ein für das Gebiet typisches geringes hydraulisches Grundwassergefälle zum Fluss von 0.001 einstellt. Die Vorgabe dieser Randbedingung ermöglicht einen zeitlich veränderlichen Grundwasserstand an diesem Rand, je nachdem, ob im Simulationsverlauf ein Rückstau infolge des Tideinflusses sich bis zu diesem Modellrand auswirkt. Die Grundwasserneubildung wurde im betrachteten Querschnitt vernachlässigt, was aufgrund der undurchlässigen Deckschichten begründet ist. Auf der gesamten Oberfläche wurde jedoch die Möglichkeit zur Exfiltration zugelassen. Sobald sich hydraulische Gradienten einstellen, die einen aufwärtsgerichteten Fluss bewirken, kann Grundwasser an der Oberfläche austreten, wenn auch, bedingt durch die geringe Durchlässigkeit, mit vergleichsweise geringer Intensität. An der Oberfläche wird angenommen, dass das Wasser sofort abfließt und sich nicht aufstaut. Reicht die Grundwasserdruckfläche während der Modellierung nicht bis an die Geländeoberfläche heran, kann kein Grundwasser austreten, die Geländeoberfläche wird im weiteren Verlauf der Berechnung wie ein geschlossener Rand behandelt. Würde man die Geländeoberfläche während der Simulation kontinuierlich als geschlossenen Rand behandeln, so würde man einen vollkommen gespannten Grundwasserzustand abbilden und die vertikalen Grundwasserabflüsse unter sowie die Ausbreitungsdynamik von Wasserstandsänderungen überschätzen. An der Flusssohle sowie an der Deichböschung wird ein veränderlicher Wasserstand, gemäß der Tidecharakteristik im Vergleichs- sowie im Ausbauzustand der Überlagerungsvariante, vorgegeben (s. Anlage 8).

## 6.2 Untersuchte Varianten

Der Simulationszeitraum des Grundwassermodells umfasste mit ca. 60 Stunden mehrere Tiden und ist ausreichend, um die Auswirkungen der Ausbaumaßnahmen auf die Grundwasserstandsdynamik zu illustrieren. In Anlage 8 sind beide Ganglinien für den untersuchten Zeitraum dargestellt, sowie die Differenz beider Zeitreihen. Die Ganglinien des Vergleichszustandes und der Überlagerung sind in dieser Darstellung nahezu identisch. Man beachte die vergrößerte Skalierung an der rechten Diagramm-Achse für die Differenzendarstellung. Es zeigt sich, dass der Verlauf der Differenzkurven nicht so harmonisch und "glatt" ist, wie bei den Tidekurven. Infolge der Ausbaumaßnahmen verkürzen sich die Laufzeiten, so dass Auf- oder Ablaufphasen nicht übereinstimmen. Reflexionen und Reibungswirkungen könnten für die sich überlagernden höher frequenten Schwingungen verantwortlich sein.

## 6.3 Diskussion der Modellergebnisse

Im Folgenden werden die Wechselwirkungen zwischen dem tidebeeinflussten Gewässer und dem Grundwasser heraus gearbeitet. Für die als maßgeblich erkannten Prozesse erfolgt ein Vergleich zwischen dem Vergleichs- und dem Ausbauzustand. Eine Bewertung der erkannten Auswirkungen der Ausbaumaßnahmen auf das Grundwasser erfolgt im Kapitel 8.

### 6.3.1 Tideeinfluss auf das Grundwasser

Aufgrund des tief liegenden Geländes und des geschichteten Bodenaufbaues liegen in Flussnähe gespannte und in Senkenbereichen artesische Grundwasserverhältnisse vor. In der Anlage 9 ist für den Vergleichszustand ein Querschnitt des Grundwasserstandes dargestellt. Dieser entspricht einer Auswertung von Grundwasserbeobachtungen mit einer Messstellenverfilterung unterhalb der holozänen Deckschicht in einer Tiefe von NN - 12 m. Der Einfluss des ca. 4 m großen Tidehubs auf das Grundwasser führt in einer Entfernung von ca. 700 m vom Ufer zu einer tidebedingten Potentialänderung mit einer Amplitude von ca. 10 cm. Am landseitigen Modellrand, in 1 km Entfernung vom Fluss, ist der Tidehub im Grundwasser auf ca. 5 cm abgeklungen. Die Reichweite des Tideeinflusses hängt generell von der Durchlässigkeit des Aquifers, vom Spannungszustand sowie vom Vorliegen eines hydraulischen Anschlusses zum Grabensystem ab. Würden die Gräben in den pleistozänen Grundwasserleiter einschneiden, würde über diesen hydraulischen Anschluss eine deutliche Dämpfung der tidebedingten Grundwasserstandsschwankungen erfolgen.

Eine Darstellung der Potentialverteilung im Grundwasser bei Tidehoch- ( $t=13,8$  h) und Tideniedrigwasser ( $t=20,8$  h) ist in Anlage 10 für den Vergleichszustand dargestellt. Die Potentiallinien weisen auf das unterschiedliche hydraulische Verhalten in den zwei Schichten hin. Im Sandgrundwasserleiter erfolgt ein nahezu lateraler Fluss. In den Senkenbereichen um die Gräben kann man die vertikal aufwärtsgerichteten Gradienten erkennen, die zu einem Grundwasseraustritt in den tiefliegenden Bereichen führen (s. Geländeoberkante in Anlage 9). Ein Ausschnitt des Strömungsfeldes für Tidehoch- und Tideniedrigwasser des Vergleichszustandes ist in Anlage 11 dargestellt. In dieser Abbildung ist der tidebedingte Wechsel von influenten zu effluenten Verhältnissen deutlich erkennbar. Ferner kann man sehen, dass der flächige Grundwasseraustritt an der Oberfläche mit der Zeit lediglich in der Intensität variiert (Größe der Abflussvektoren), er findet selbst bei Tideniedrigwasser statt, da das Gelände in der Umgebung des Grabens mit ca. 1,6 m unter NN relativ zum Flusswasserstand sehr tief liegt.

Im Überlagerungsfall lassen sich weder in den Darstellungen für die Potentialverteilung (Anlage 10) noch für das Geschwindigkeitsfeld (Anlage 11) Unterschiede zum Vergleichszustand feststellen. Aufschlussreicher ist eine Darstellung der Grundwasserstandsdifferenzen zwischen Vergleichs- und Überlagerungsfall im Querprofil bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser, wie in Anlage 12 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass zu den gewählten Zeitpunkten ( $t=13,8$  h und  $t=20,8$  h) die Grundwasserstandsunterschiede im Bereich weniger cm liegen

und dass die Unterschiede mit zunehmender Entfernung vom Fluss abklingen. In einem Abstand von weniger ca. 250 m vom Fluss sind die Wasserstandsunterschiede kleiner als 1 cm. Qualitativ kann man in dieser Darstellung die geringere Zunahme bei Tidehochwasser und die größere Abnahme bei Tideniedrigwasser erkennen.

### **6.3.2 Grundwasserdynamik**

Die Grundwasserdynamik in unterschiedlicher Entfernung vom Fluss ist für den Vergleichszustand in Anlage 13 dargestellt. Wie erwartet, erfolgt eine Dämpfung mit zunehmender Entfernung vom Fluss. In dieser Skalierung wäre der Unterschied zwischen Vergleichszustand und Überlagerungsvariante kaum erkennbar, daher wurden in Anlage 14 die Grundwasserstandsunterschiede zwischen Vergleichs- und Überlagerungsvariante dargestellt. In dieser Darstellung lässt sich die unsymmetrische Änderung des Tidehubs ablesen. Die tidebedingten Grundwasserstandschwankungen werden mit zunehmenden Fließweg abgedämpft, die Änderungen bleiben auf einen Korridor beiderseits des Flusses begrenzt. In einem Abstand von ca. 400 m vom Fluss sind die ausbaubedingten Änderungen der Grundwasserstände bereits geringer als 2 cm. Dieser Betrag entspricht in etwa der Messgenauigkeit und wäre somit im Feld kaum messbar.

Schließlich sei noch auf die zu erwartenden Veränderungen in den holozänen Deckschichten eingegangen. In Anlage 15 sind für den Vergleichszustand die Ganglinien des Potentials in einer Entfernung von knapp 400 m vom rechten Rand einmal für den Sandaquifer (Verfiltrierung in ca. NN – 12 m) sowie für die Deckschicht (in einer Tiefe von ca. NN – 4 m) dargestellt (in einem derart geringdurchlässigen Boden müsste das Grundwasserpotential mit einem Porenwasserdruckaufnehmer aufgezeichnet werden). Es ist auffallend, dass die Ganglinien des Grundwasserpotentials zeitlich eng miteinander korrespondieren. An diesem Standort kann man erkennen, dass die vertikalen Potentialgradienten bei auflaufender Flut nach oben ( $h_{\text{Sand}} > h_{\text{Deck}}$ ) und bei Ebbe nach unten ( $h_{\text{Sand}} < h_{\text{Deck}}$ ) gerichtet sind. Die Dämpfung des Scheitelwertes ergibt sich aufgrund des stärkeren Potentialabbaues bei Durchströmung der geringdurchlässigen Deckschicht. Ein Blick auf die Darstellung der ausbaubedingten Differenzen in Anlage 16 zeigt für diesen Standort Grundwasserpotentialunterschiede von ca. 1 cm, die messtechnisch kaum zu erfassen wären.

## **7 Vorhabensbedingte Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse**

Anhand des Modellszenarios konnten in Kapitel 6 die tidebeeinflussten Wechselwirkungen zwischen Fluss, Grabensystem und Grundwasser analysiert werden. In diesem Abschnitt werden die gewonnenen Erkenntnisse auf das Untersuchungsgebiet übertragen. Ferner finden sich Ausführungen zu ausbaubedingten Änderungen des hydraulischen Anschlusses zwischen Grundwasser und Fluss sowie zur Verlagerung der Brackwasserzone.

## 7.1 Mittlere Grundwasserverhältnisse

Im Untersuchungsraum wird das Grundwasserregime durch die Wasserstände der Weser, der Nebenflüsse und des Grabensystems sowie durch den Randzufluss bestimmt. Je nach hydrologischen Bedingungen variiert der Zustrom von Oberwasser und somit auch die Wasserstände in den Flüssen bzw. im Grabensystem. Diese Wasserstandsschwankungen wirken sich in Flussauen unmittelbar auf das Grundwasser aus und die Grundwasserstände bilden in etwa die jahreszeitlichen und mehrjährigen Schwankungen der Flusswasserstände ab. Durch das dichte Grabensystem findet jedoch im Untersuchungsraum eine Überprägung des Fluss-Grundwassersystems statt. Das weitgefächerte Grabensystem wurde gerade dazu angelegt, um Meliorationswasserstände an die jahreszeitlichen Erfordernisse der Landwirtschaft anzupassen. Durch Schöpfwerke kann das Wasser aus den Gräben in den Fluss abgeleitet werden. Bei Bedarf kann Flusswasser in das Grabensystem zugegeben werden. Je nach Wasserstandsunterschied in den Gräben und im pleistozänen Grundwasserleiter erfolgt ein vertikaler Austausch von Grundwasser und Oberflächenwasser. Bei Grundwasserständen oberhalb der Wasserstände in den Gräben ergibt sich ein Fluss vom Grundwasser in die Gräben (Entwässerungsbedingungen). Sind die Grundwasserstände unterhalb der Oberflächenwasserstände stellt sich eine Anreicherung des Grundwassers ein (Bewässerungsbedingungen). Diese Prozesse wurden modelliert und sind in den Bildern des Strömungsfeldes in Anlage 11 dargestellt. Wasserstandsabsenkungen im Grabensystem über einen längeren Zeitraum hinweg, erzeugen hydraulische Senken (s. Anlage 4). In diesen Gebieten erfolgt eine Grundwasserentlastung und als Folge eine Infiltration von Flusswasser. Je nach Randzufluss, nach Flusswasserstand und nach Entfernung zum Fluss kann der Anteil von Grundwasser und Uferfiltrat im Grabensystem variieren. Diese anthropogene Überprägung des Grundwassersystems wird am grundwasserbürtigen Anteil von 20%-60% am erfassten Gesamtabfluss eines Grabensystems in der Wesermarsch ersichtlich [1]. Eine Auswertung der Standrohrspiegelhöhen für Jahre unterschiedlicher Niederschlagsverhältnisse ergab lediglich geringe Abweichungen [1]. Hoffmann et al. folgerten in [1] hieraus: "Die Entwässerung mit weitgehend auf im zeitlichen Mittel konstantem Niveau gehaltenen Wasserständen erzeugt quasistationäre Bedingungen".

Die Ausbaumaßnahmen führen zu einer Absenkung des Tidemittelwassers von ca. 1 cm (s. Tabelle 1). Eine Absenkung des Tidemittelwassers in dieser Größenordnung ist gegenüber dem unveränderten Randzufluss und vor allem gegenüber den oben dargelegten landwirtschaftlichen Eingriffen im Grabensystem für die mittleren Grundwasserverhältnisse nicht von Relevanz.

## 7.2 Grundwasserdynamik unter Tideeinfluss

Neben den hydrologisch bedingten Hochwasser- und Niedrigwasserphasen weisen tidebeeinflusste Gewässer kurzzeitige Schwankungen auf, die grundsätzlich das Grundwassergehen beeinflussen. Allerdings wird die Reichweite dieser Einwirkung durch die verzögerte und gedämpfte Ausbreitung der Wasserstandsänderungen im Grundwasser räumlich be

schränkt (s. Anlage 13). Das Grundwasser hat ca. 6 Stunden Zeit auf den steigenden Flusswasserstand zu reagieren, bevor der Flusswasserspiegel zum nächsten Tideniedrigwasserstand strebt. Die tidebedingten Grundwasserschwankungen bleiben somit auf einen Korridor um den Flusslauf beschränkt, wie die Ergebnisse der Modellierung zeigen (s. Anlage 12). Bei einem guten hydraulischen Anschluss werden die Flusswasserstandsschwankungen auf das Grundwasser direkt übertragen und pflanzen sich im Grundwasserleiter fort. Wie intensiv die sich ausbreitende Wasserstandsänderung im Grundwasser verzögert und gedämpft wird, hängt von den Durchlässigkeits- und Speichereigenschaften (bzw. vom Spannungszustand) des Grundwasserleiters ab [3]. Grundsätzlich kann die Reichweite tidebedingter Grundwasserschwankungen mehrere km betragen. In den Aquifer einschneidende Oberflächengewässer, Gräben, bzw. ein Wechsel zu freien Grundwasserverhältnissen können allerdings eine deutliche Dämpfung oder gar eine Begrenzung der Ausbreitung von Wasserstandsschwankungen bewirken. Da das Grabensystem hydraulisch mit dem Flusswasserstand gekoppelt ist, kommt es zu überlagernden Effekten [2].

Die ausbaubedingte Tidehubänderung setzt sich aus der Absenkung des Tideniedrigwassers und der Erhöhung des Tidehochwassers zusammen, wobei letztere betragsmäßig etwas geringer ausfällt, wie aus Tabelle 1 zu entnehmen ist. Bei diesen Betrachtungen ist zu beachten, dass am Ort der größten Änderungen, beim Wehr Bremen-Hemelingen, dem Tidehub von ca. 4 m eine maximale Tidehubänderung von lediglich ca. 9 cm gegenüber steht. Die Erhöhung der Scheitelwerte von Tidehoch- und Niedrigwasser wirkt sich auf die weser-nahen Ex- und Infiltrationsgradienten (s. Anlage 9) aus und führt zu einem etwas intensiveren Wasseraustausch (s. Anlage 10 und 11). Berücksichtigt man die größeren Änderungen des Tideniedrigwassers gegenüber dem Tidehochwasser sowie die Asymmetrie von Ebbe- und Flutdauer, wird per Saldo während einer Tideperiode rechnerisch etwas mehr Grundwasser exfiltrieren als im Ist-Zustand. Gegenüber den großen grundwasserbürtigen Abflüssen, die im derzeitigen Grabensystem abgeführt werden, ist die zusätzliche Grundwasserexfiltration infolge des um einige cm niedrigeren Tideniedrigwasserstandes jedoch vernachlässigbar.

### **7.3 Einfluss der räumlichen Variabilität der Modelparameter**

In Kapitel 6 wurden auf Grundlage eines für den Untersuchungsraum typischen Modells die Wechselwirkungen zwischen Fluss und Grundwasser analysiert. Das gewählte Modell bildet ein realistisches und für den Untersuchungsraum charakteristisches Szenario ab. Allerdings würde man bei Ansatz anderer Parameter, z. B. andere Durchlässigkeitsverhältnisse, etwas andere Ergebnisse erhalten. Aus der Kenntnis der in Kapitel 7 dargestellten prinzipiellen Wirkungszusammenhänge lassen sich jedoch die möglichen Variationen ableiten. In Kapitel 7.1 konnte festgestellt werden, dass die Absenkung des Tidemittelwassers von ca. 1 cm (s. Tabelle 1) für die mittleren Grundwasserverhältnisse nicht von Relevanz ist. Maßgebend für die Bewertung der Auswirkungen auf das Grundwasserregime ist die Tidehubänderung. Diese beträgt für das gewählte Szenario (Weser-km 39) ca. 7 cm, wie aus dem Gutachten /1/ zu entnehmen. Maximal sind jedoch 9 cm zu erwarten (Weserwehr Bremen, s. /1/). Des

weiteren könnte die Durchlässigkeit des pleistozänen Aquifers etwas höher sein. Dies hätte zur Folge, dass die Dämpfung der Grundwasserdynamik nicht nach ca. 400 m auf unter 2 cm abgeklungen wäre, sondern erst nach einer längeren Strecke. Eine entgegengesetzte Auswirkung ergibt sich, wenn die Deckschicht etwas durchlässiger oder geringmächtiger wäre, da der vertikale Wasseraustausch zu einer Entspannung führt und somit zu einer deutlichen Dämpfung der Wasserstandsänderungen [3]. Bei der in Kapitel 8 vorgenommenen Bewertung wird auf der sicheren Seite liegend vom maximalen Tidehub ausgegangen, wobei die Dämpfung im Grundwasser mit zunehmender Entfernung vom Ufer vernachlässigt wird. Bei der Bewertung der ausbaubedingten Änderungen werden also an jedem Ort, unabhängig von seiner Lage entlang des Flusslaufes sowie von seiner Entfernung zum Fluss, die maximale Tidehubänderungen des Untersuchungsgebiets angesetzt.

#### **7.4 Hydraulische Interaktion zwischen Fluss- und Grundwasser**

Die Intensität der hydraulischen Interaktion zwischen Fluss und Grundwasser hängt vor allem von der örtlichen Durchlässigkeit der Flusssohle ab. Bei den geplanten Baggerungen zur Sohlvertiefung liegen in der Riffelstrecke überwiegend sandige Sedimente vor. Lediglich im Bereich Nordenham kommen feinkörnigere Sedimente vor. Die Ablagerung partikulären Materials im Porenraum der Sohle eines Gewässers wird als Kolmation bezeichnet. Kolmationsvorgänge an der Sohle sind aufgrund der in schneller Folge wechselnden In- und Exfiltrationsbedingungen, durch Sohlenerosion während starken Hochwässern sowie durch gelegentliche Unterhaltungsbaggerungen unwahrscheinlich. An der Sohle wird sich der ursprüngliche Zustand in einem überschaubaren Zeitraum wieder einstellen. Von den geplanten Ausbaumaßnahmen sind daher keine nachteiligen Auswirkungen auf den hydraulischen Anschluss zwischen Fluss- und Grundwasser zu erwarten.

#### **7.5 Hydrochemische Verhältnisse**

Während die tidebedingten Wasserstandsschwankungen bis zu mehreren km weit im Landesinneren feststellbar sind (s. Kapitel 6.3.2), ist die Vermischungszone zwischen landseitig zufließendem Grundwasser und flussbürtigem Uferfiltrat auf einen ufernahen Bereich begrenzt. Ursache hierfür ist der gespannte Zustand des Grundwasserleiters, der eine sehr schnelle Ausbreitung von Wasserstandsänderungen begünstigt.

##### **7.5.1 Vermischungszone**

Bei einer raschen Ausbreitung des hydraulischen Potentials erfolgt eine rasche Vergleichmäßigung des hydraulischen Gradienten an der Schnittstelle zwischen Fluss und Grundwasser. Hierdurch können sich lediglich vergleichsweise geringe Fließgeschwindigkeiten einstellen. Konzeptionell kann man sich eine Eindringtiefe vorstellen, die den maximalen Weg angibt, den ein Wasserteilchen während einer Schwankungsperiode vom Flussrand in den Aquifer zurück legt, bevor es die Strömungsrichtung umkehrt. Da die hydraulischen Gradienten sich tidebedingt nach ca. 6 Stunden umkehren, kann man von einer vergleichsweise

geringen Eindringtiefe von Flusswasser in den Grundwasserleiter ausgehen. Für einfache Fälle existieren analytische Lösungen, die über die Auswertung des hydraulischen Gradienten am Flussrand und einer Integration der Abstandsgeschwindigkeit einen Ausdruck für Eindringtiefe liefern. Es kann gezeigt werden, dass die Eindringtiefe von den Speicher- und Durchlässigkeitseigenschaften sowie vom Tidehub abhängt. Die Speicher- und Durchlässigkeitseigenschaften können von Ort zu Ort variieren, sie werden jedoch nicht durch den Ausbau beeinflusst. Da die Eindringtiefe linear mit dem Tidehub zusammenhängt, kann man folgern, dass die ausbaubedingte Vergrößerung des Tidehubs zu einer proportionalen Vergrößerung der Eindringtiefe führen wird. Geht man von einem maximalen Tidehub von 4 m und einer Tidehubänderung von maximal 9 cm aus, ergibt sich eine Vergrößerung der Eindringtiefe um den Faktor  $(4 + 0,09)/4 = 1,023$ . Die ausbaubedingte Vergrößerung des Tidehubs wird also die Vermischungszone zwischen Fluss- und Grundwasser um ca. 2% vergrößern. Man beachte, dass die Abmessungen der Vermischungszone nur in einem statistischen Kontext bestimmbar sind. Die tatsächlichen Eindringtiefen variieren nämlich infolge hydrologischer Ereignisse oder jahreszeitlicher Gegebenheiten.

Neben dem Pfad über die Flusssohle wird außendeichs, bedingt durch die höheren Thw-Stände, grundsätzlich eine größere Fläche überflutet und periodisch mit Flusswasser eingestaut. Über diesen zusätzlichen Randstreifen kann, je nach Durchlässigkeit des Bodens, mehr Flusswasser infiltrieren, was die Vermischungszone vergrößert.

### **7.5.2 Salzkonzentration im oberflächennahen Grundwasser**

Eine Grundwassernutzung ist bereits jetzt, bedingt durch hohe Chloridgehalte, eingeschränkt oder gänzlich unmöglich. Anlage 17 zeigt im gesamten Planungsraum einen mehrere km breiten Korridor, in dem das Grundwasser fast vollständig versalzt ist. Die hohen Chloridkonzentrationen im Grundwasser wurden durch intrudierendes Meerwasser (Küstenversalzung), durch den Aufstieg versalzter Grundwässer, die hochreichende Salzstöcke auslaugen, sowie durch die Infiltration salzhaltigen Oberflächenwassers verursacht. Die Konzentration fällt von ca. 12 g/l im Küstenbereich auf weniger als 250 mg/l in der Gegend von Brake. Die Chloridkonzentration im oberen Bereich des pleistozänen Grundwasserleiters weist hierbei keine ausgeprägte Salz-Süßwassergrenze auf [1]. Die hohe Salzkonzentration im oberflächennahen Grundwasser in einem mehrere km breiten Korridor kann als naturraumtypisch angesehen werden.

### **7.6 Verlagerung der Brackwasserzone**

Ausbaubedingt erfolgt eine Verlagerung der Brackwasserzone nach Oberstrom um maximal 1000 m [1]. Bei influenten Verhältnissen wird in diesem Bereich die Salzkonzentration im Grundwasser zunehmen. Diese Erhöhung wird sich auf die Vermischungszone beschränken (s. Kapitel 7.5.1). Man kann davon ausgehen, dass die am derzeitigen Rand der Brackwasserzone vorherrschenden hydrochemischen Grundwasserverhältnisse sich um maximal 1000 m nach Oberwasser verlagern werden. Aufgrund der bereits vorhandenen hohen Salz

konzentrationen im Grundwasser ist nicht von einer spürbaren Verschlechterung der Grundwasserbeschaffenheit im mit maximal 1000 m ohnehin geringen Verlagerungsbereich auszugehen.

## **8 Bewertung der vorhabensbedingten Änderungen**

Im folgenden Kapitel werden die ausbaubedingten Auswirkungen auf diverse, mit dem Grundwasser eng verknüpfte Zusammenhänge erörtert. Man beachte, dass bei der folgenden Bewertung auf der sicheren Seite liegend von einem maximalen Tidehub von weniger als 1 dm (s. Kapitel 5) ausgegangen wird und die Dämpfung der Wasserstandsänderungen im Grundwasser mit zunehmender Entfernung vom Ufer vernachlässigt wird (s. Kapitel 7.3). Bei der Bewertung der ausbaubedingten Änderungen wird also an jedem Ort, unabhängig von seiner Lage entlang des Flusslaufes sowie von seiner Entfernung zum Fluss, die maximale Tidehubänderung des Untersuchungsgebiets angesetzt.

### **8.1 Grundwasser und Deichsicherheit**

Maßgebend für die Bewertung der Deichstandsicherheit ist aus geotechnischer Sicht eine etwaige Veränderung des mittleren Grundwasserstandes im Bereich der Aufstandsfläche. Die ausbaubedingte Absenkung des Mittelwasserstandes um ca. 1 cm wird keinerlei Änderung der Tragfähigkeit in der Aufstandsfläche oder im Deichkörper bewirken. Setzungen wären nur bei Vorliegen eines entsprechend setzungsempfindlichen Untergrundes sowie bei einer langandauernden Grundwasserabsenkung von einigen dm zu erwarten. Die bereits vorhandene tidebeeinflusste Grundwasserdynamik an der Aufstandsfläche hat auf die Standsicherheit der Deiche keine nachteilige Wirkung, weil der Zeitraum für Setzungen zu kurz ist.

### **8.2 Grundwasser und Bauwerksstabilität**

Entsprechendes gilt für jedes Bauwerk im Einflussbereich der vorhabensbedingten Grundwasserstandsänderungen. Maßgebend für die Standsicherheit der Bauwerke ist der mittlere Grundwasserstand im Bereich der Gründungssohle. Dieser wird sich jedoch durch die Ausbaumaßnahme kaum verändern. Eine Absenkung des mittleren Grundwasserstandes von ca. 1 cm wird insbesondere keinerlei Setzungen bewirken. Infolge der geringfügigen Veränderung des Tidehubs im Grundwasser in der Größenordnung von kleiner 1 dm ist ebenfalls keine Veränderung der Standsicherheit zu erwarten. Für Setzungen wäre, je nach Untergrund, eine *langandauernde* Grundwasserabsenkung von einigen dm erforderlich. Die geringfügigen periodischen Anstiege des Grundwasserpotentials im Bereich weniger cm werden zu keinen zusätzlichen Vernässungserscheinungen führen.

Anlage 9 illustriert die Grundwasserströmung in Flussnähe. Die lediglich ein paar Stunden währende Erhöhung der flusswärts gerichteten hydraulischen Gradienten ist im Vergleich zu



den bestehenden hydraulischen Gradienten derart gering (ca. 2%, s. Kapitel 7.5.1), dass ein daraus resultierender grundwasserinduzierter Materialtransport oder gar Böschungsrutschungen im Uferbereich ausgeschlossen sind.

### **8.3 Grundwasserrelevante Nutzung**

Das oberflächennahe Grundwasser weist im Ist-Zustand bereits eine vergleichsweise hohe Salzkonzentration im Grundwasser auf (s. Anlage 17). Aus diesem Grund ist die Grundwassernutzung im Bereich der Flusssufer bereits jetzt sehr eingeschränkt. Die ausbaubedingte geringfügige Vergrößerung der Vermischungszone zwischen Fluss- und Grundwasser (s. Kapitel 7.5.1) wird die bestehenden Verhältnisse hinsichtlich der Grundwasserbeschaffenheit kaum verändern.

### **8.4 Grundwasserrelevante Naturfunktionen**

Durch die Absenkung des Mittelwassers um maximal 1 cm ist eine geringfügige Zunahme der Grundwasserexfiltration zu erwarten. Das Grundwasser wird im Untersuchungsgebiet jedoch durch ein flächendeckendes künstliches Grabensystem weitgehend beeinflusst. Aus diesem Blickwinkel ist die zu erwartende Zunahme der Exfiltration infolge der ausbaubedingten Senkung des Mittelwasserstandes gegenüber dem erheblichen grundwasserbürtigen Abfluss, der durch das Grabensystem derzeit abgeführt wird, als unbedeutend einzuordnen.

Änderungen der Grundwasserdynamik in der Größenordnung von weniger als 1 dm sind für den Bodenwasserhaushalt irrelevant. Diese periodischen Grundwasserstandsänderungen bewirken Porenwasserdruck-/Saugspannungsänderungen von wenigen hPa. Diese Druckänderungen pflanzen sich lediglich im Bereich hoher Sättigungen (Kapillarsaum) fort. Bei größeren Flurabständen bewirken Porenwasserdruckfluktuationen von wenigen Zentimetern in der teilgesättigten Bodenzone kaum Änderungen im Wassergehalt und beeinflussen auch nicht die (ungesättigte) Durchlässigkeit des Bodens. Weder der kapillare Aufstieg noch die Grundwasserneubildung werden durch die vorhabensbedingt veränderte Tidedynamik beeinflusst. Veränderungen des Bodenwasserhaushalts sind daher nicht zu erwarten.

Bundesanstalt für Wasserbau

Karlsruhe, 24. März 2006

Im Auftrag

Bearbeiter

gez. Dr.-Ing. B. Odenwald

gez. Dr.-Ing. H. Montenegro



## Literatur

- [1] Schuchard, Bastian / Schirmer, Michael (Hrsg.): Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion. Springer Verlag 2005.
- [2] Sauer, Michael: Umweltgeowissenschaftliche Untersuchungen der Wesermarsch im Bereich der Hafenschlickspülfelder in Bremen-Niedervieland. Münster (Westfalen), Univ., Diss., 1995.
- [3] Montenegro, H., Holfelder, T., Wawra, B. 1999 : Modellierung der Grundwasserdynamik in Flussauen. Tagungsband der Fachtagung Elbe „Dynamik und Interaktion von Fluss und Aue“ vom 04.-07.05.1999 in Wittenberge: 160-164. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe.

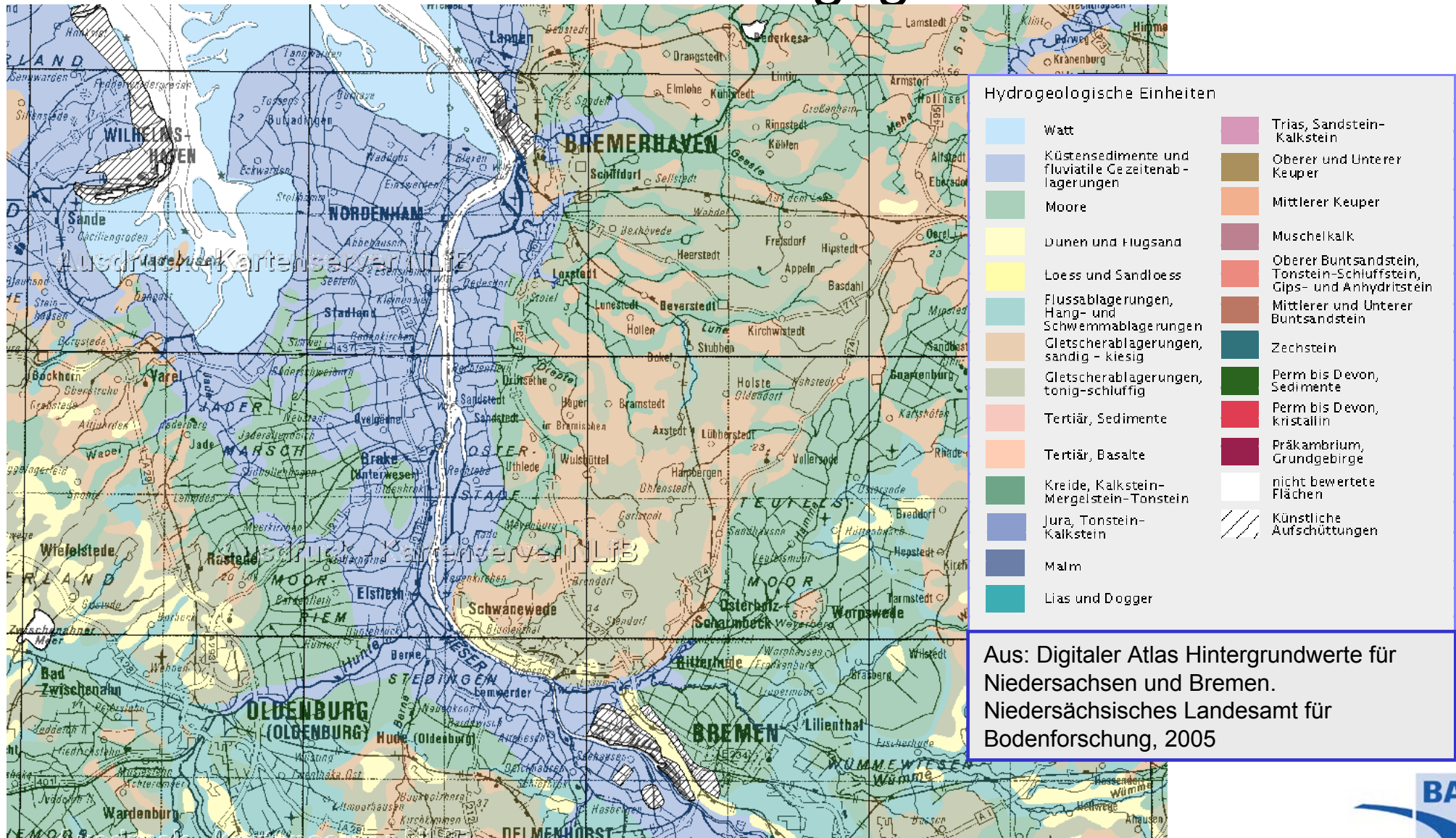
## Anlagen

- Anlage 1 Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes
- Anlage 2 Hydrogeologische Einheiten im Untersuchungsgebiet
- Anlage 3 Lage der Grundwasseroberfläche im Untersuchungsgebiet
- Anlage 4 Grundwassersenke im Untersuchungsgebiet (Ausschnitt)
- Anlage 5 Hydrogeologischer Aufbau im Untersuchungsraum (Schematischer Querschnitt)
- Anlage 6 Finite-Elemente Netz
- Anlage 7 Modellstruktur
- Anlage 8 Ganglinien der Flusswasserstände für den Untersuchten Zeitraum (Weser-km 39,195 li)
- Anlage 9 Geländeoberkante und Grundwasserpotential im pleistozänen Sandaquifer (z=NN -12 m)
- Anlage 10 Potentialverteilung bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser im Vergleichszustand (Überhöhung y:x = 5:1)
- Anlage 11 Geschwindigkeitsfeld bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser im Vergleichszustand
- Anlage 12 Differenzen zwischen Vergleichszustand und Überlagerungsvariante des Grundwasserpotentials im pleistozänen Sandaquifer (z=NN -12 m)
- Anlage 13 Grundwasserdynamik im pleistozänen Sandaquifer in unterschiedlicher Entfernung zum Fluss (Vergleichszustand)
- Anlage 14 Differenzen der Grundwasserstände im pleistozänen Sandaquifer zwischen Vergleichszustand und Überlagerungsvariante
- Anlage 15 Dynamik des Grundwasserpotentials im Sandaquifer und in der Deckschicht im Vergleichszustand
- Anlage 16 Differenzen des Grundwasserpotentials im Sandaquifer und in der Deckschicht zwischen Vergleichszustand und Überlagerungsvariante
- Anlage 17 Versalzung im Grundwasser

# Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes



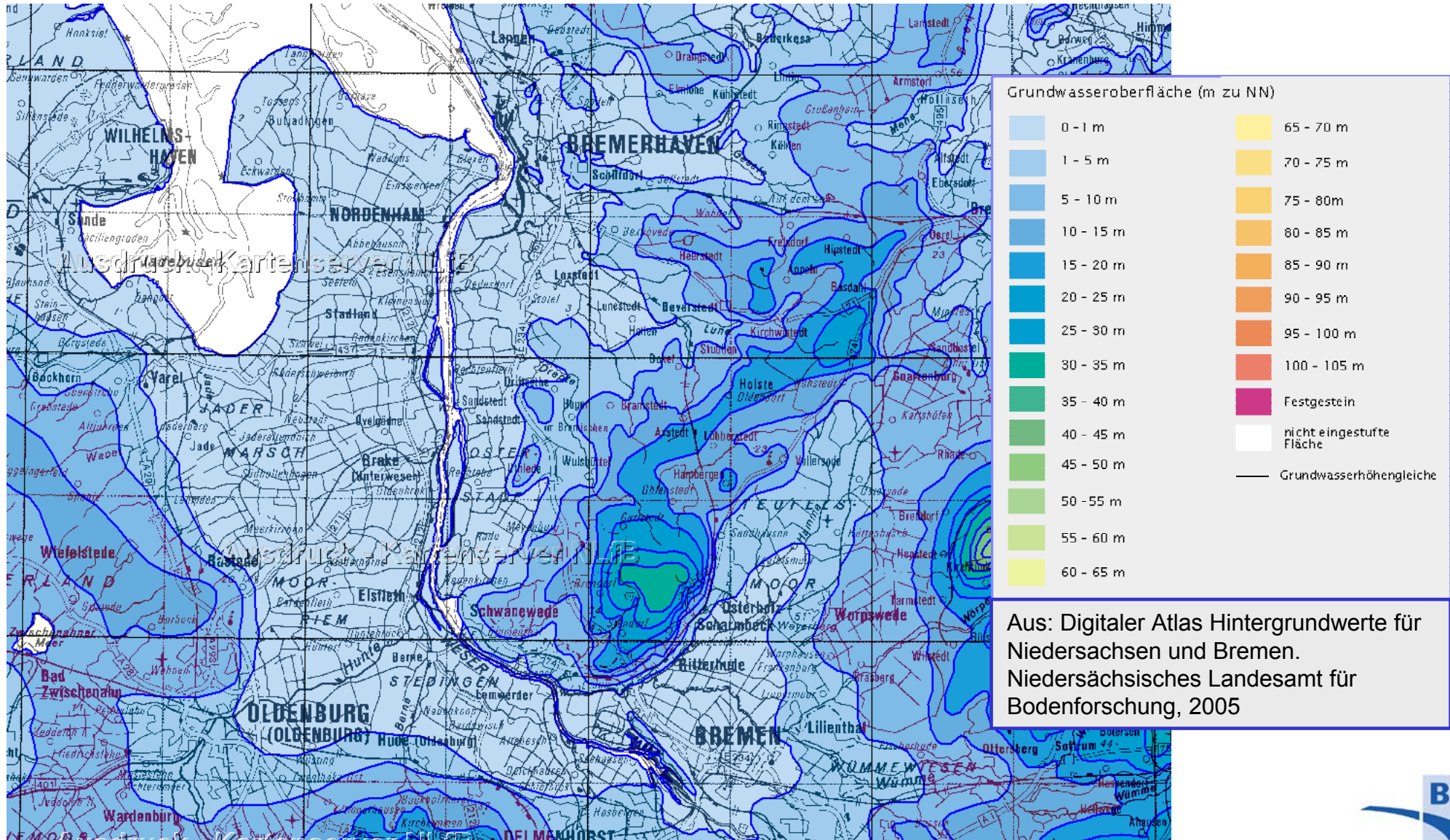
# Hydrogeologische Einheiten im Untersuchungsgebiet



Aus: Digitaler Atlas Hintergrundwerte für Niedersachsen und Bremen.  
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 2005



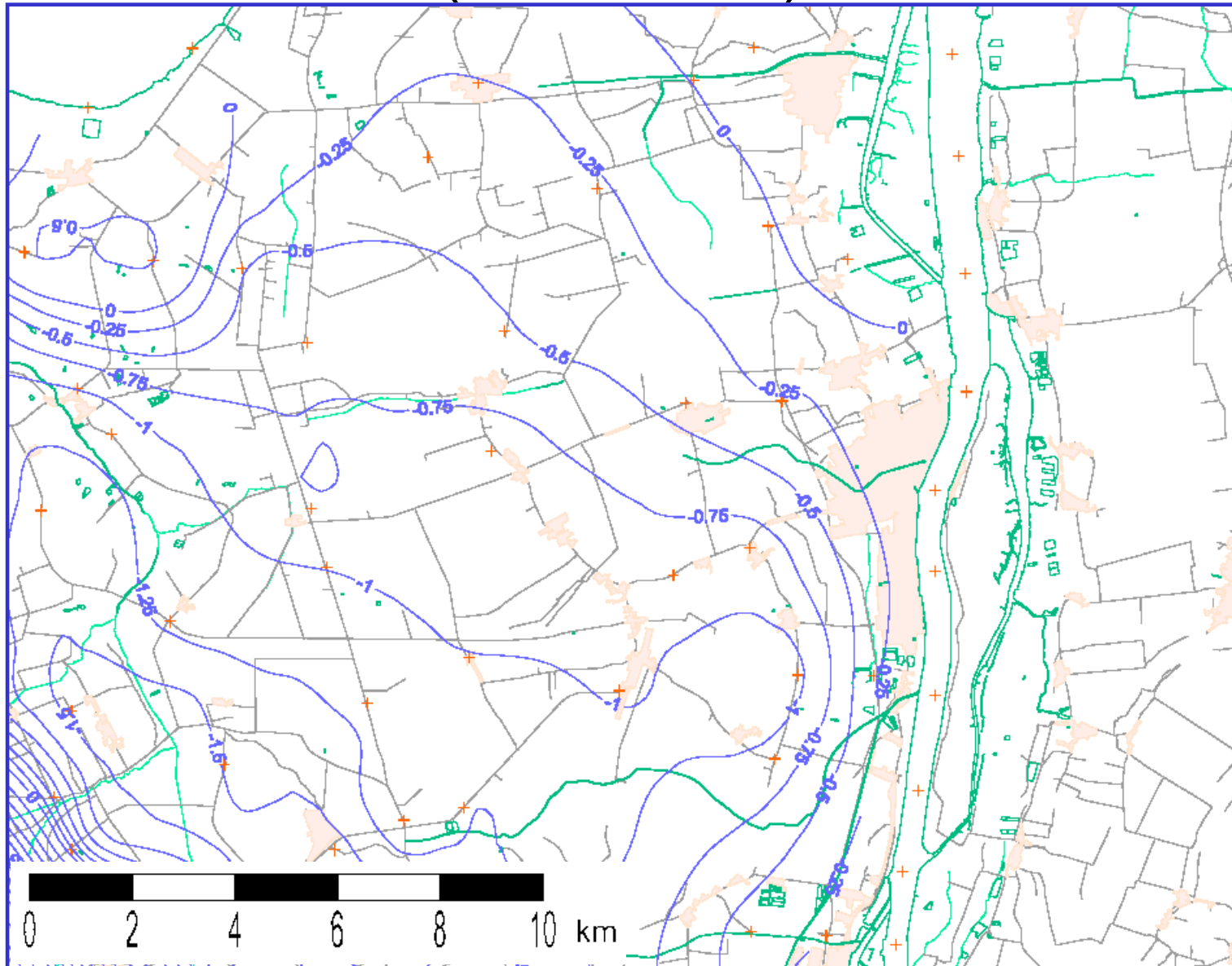
# Lage der Grundwasseroberfläche im Untersuchungsgebiet



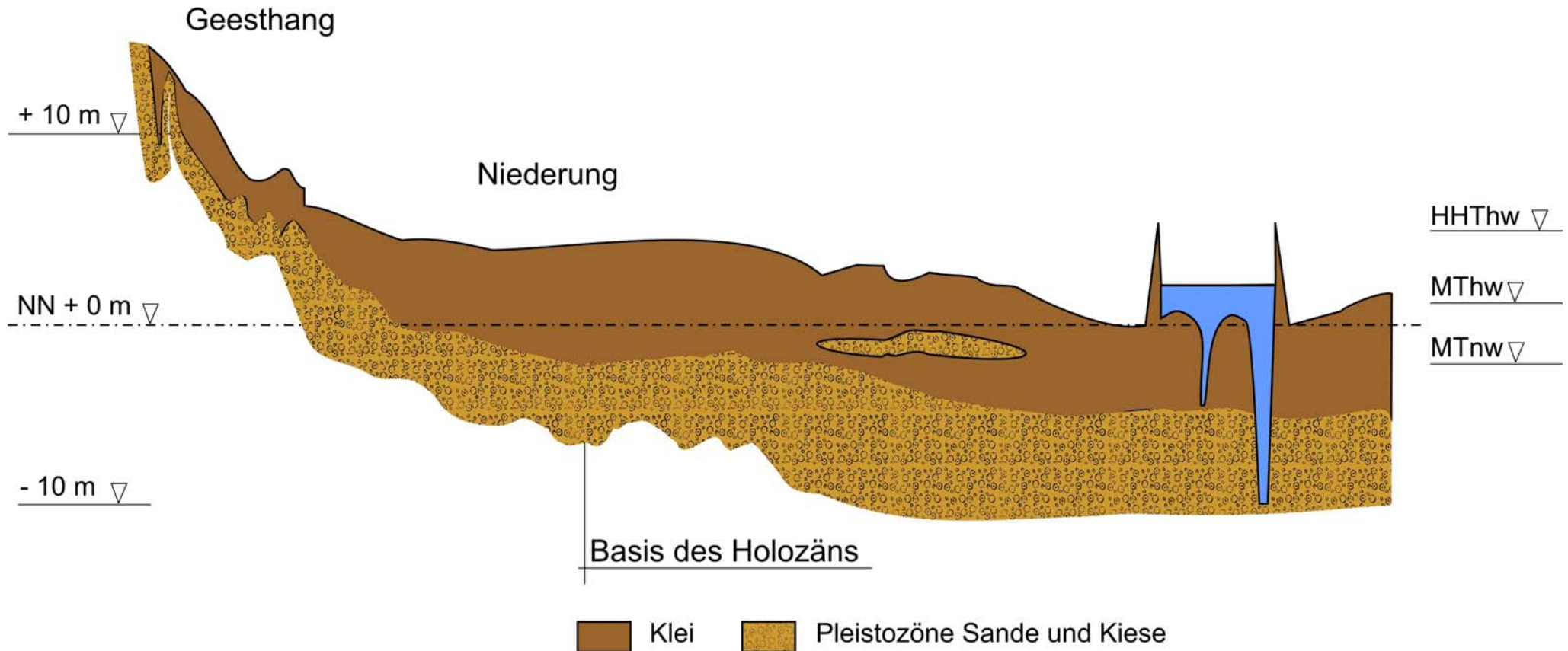
Aus: Digitaler Atlas Hintergrundwerte für Niedersachsen und Bremen.  
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 2005



# Grundwassersenke im Untersuchungsgebiet (Ausschnitt)

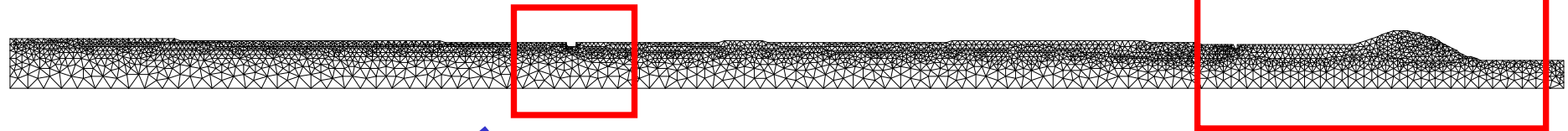
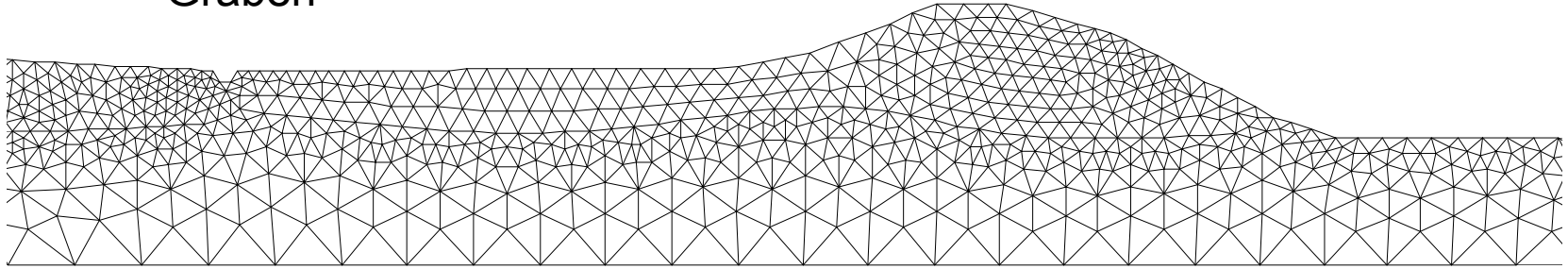


# Hydrogeologischer Aufbau im Untersuchungsraum (Schematischer Querschnitt)

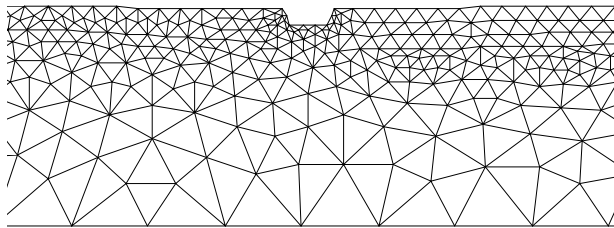


# Finite-Elemente Netz

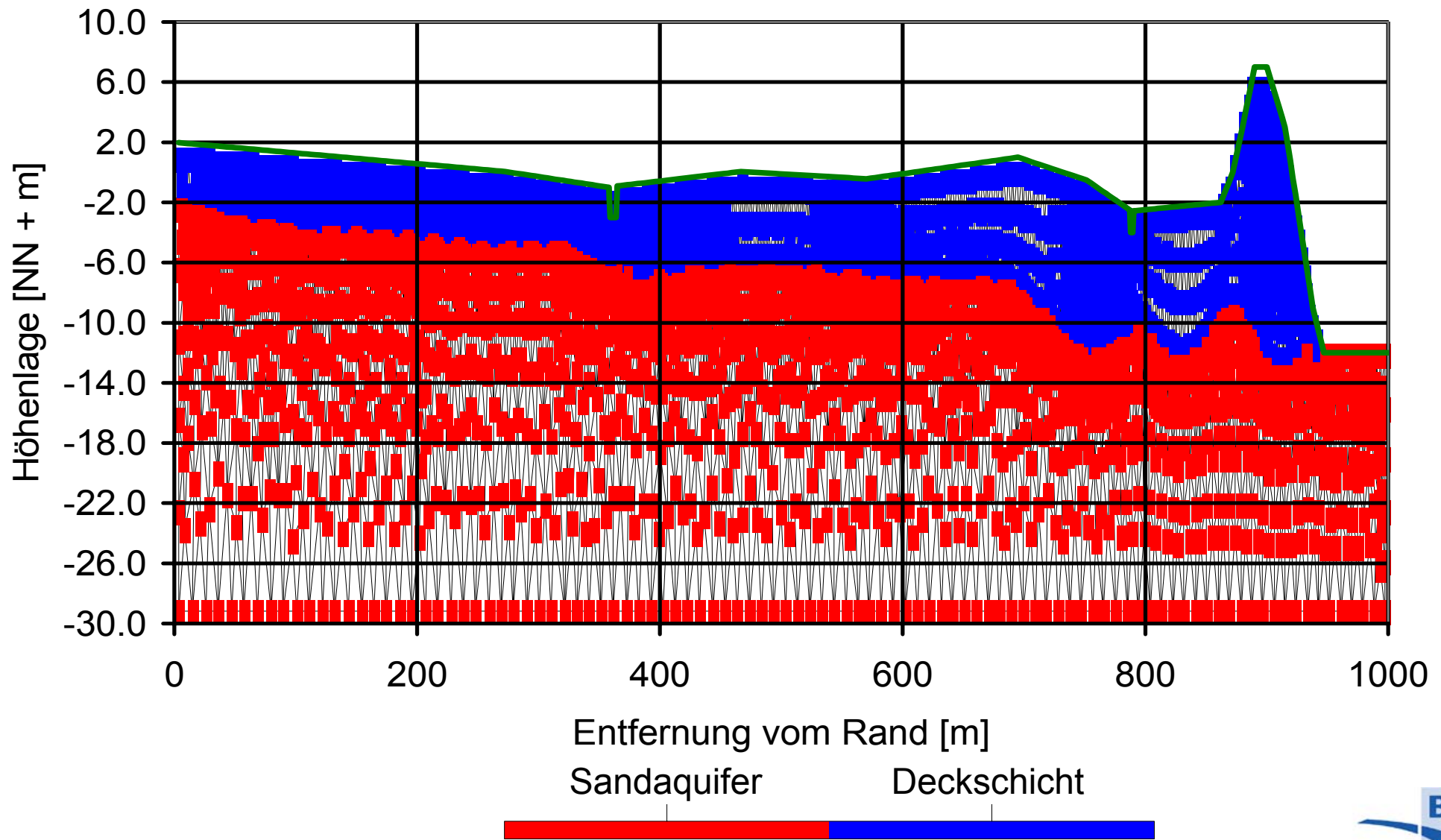
Graben



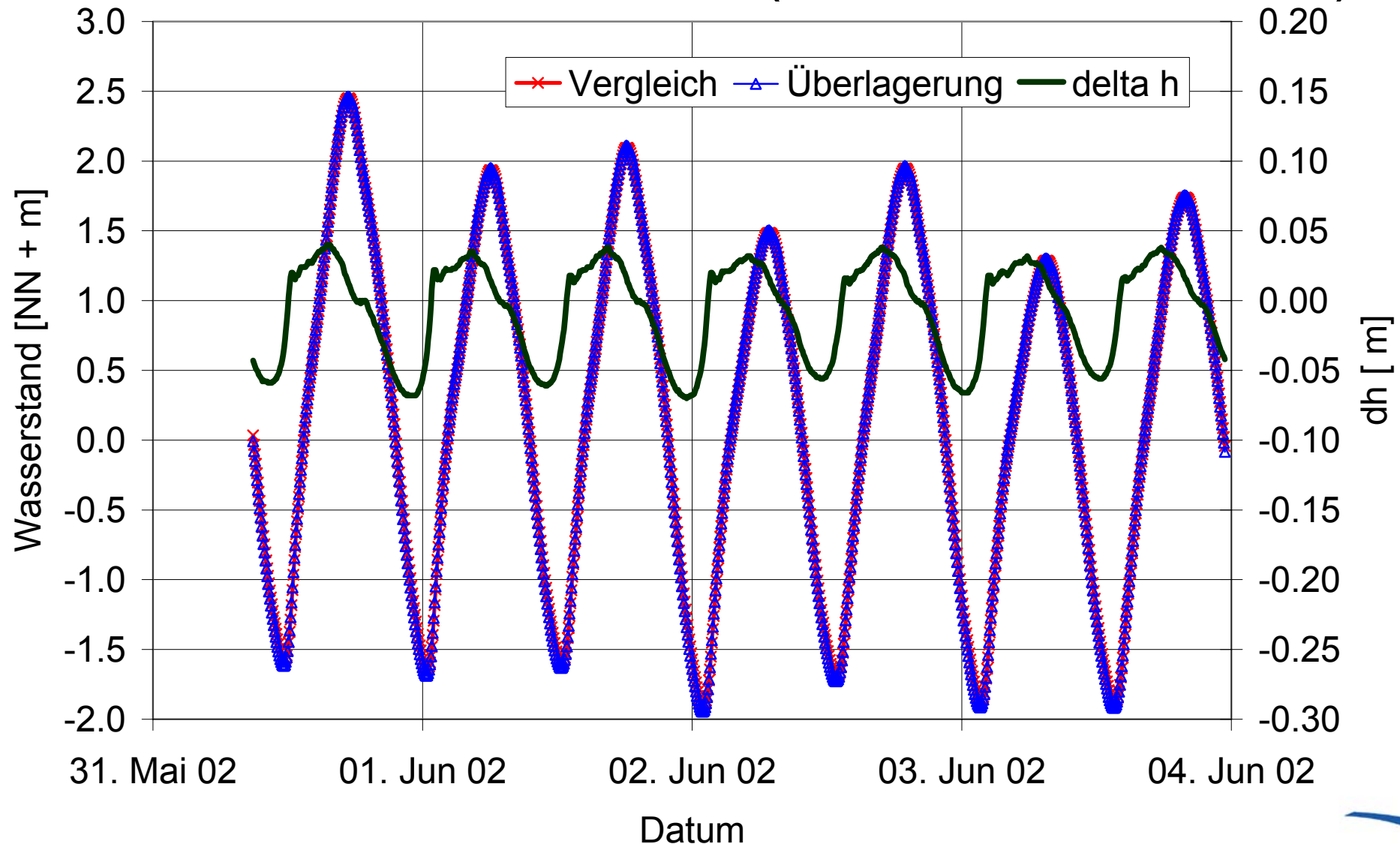
Graben



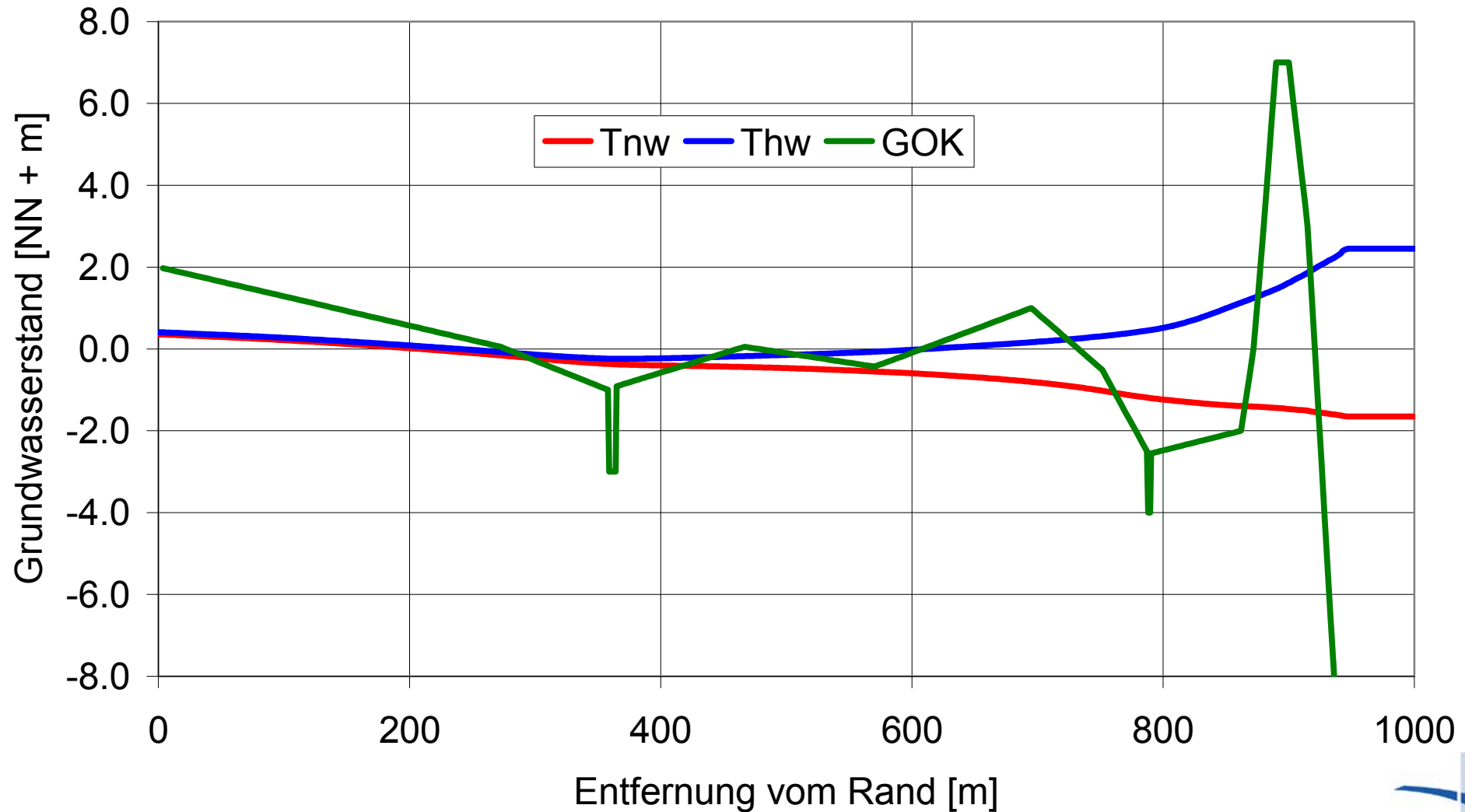
# Modellstruktur



# Ganglinien der Flusswasserstände für den Untersuchten Zeitraum (Weser-km 39,195 li)

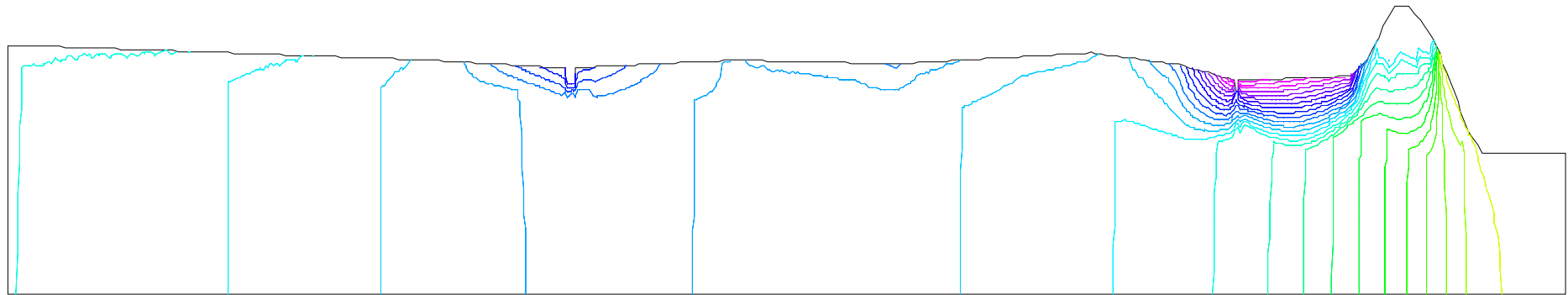


# Geländeoberkante und Grundwasserpotential im pleistozänen Sandaquifer (z=NN -12 m)

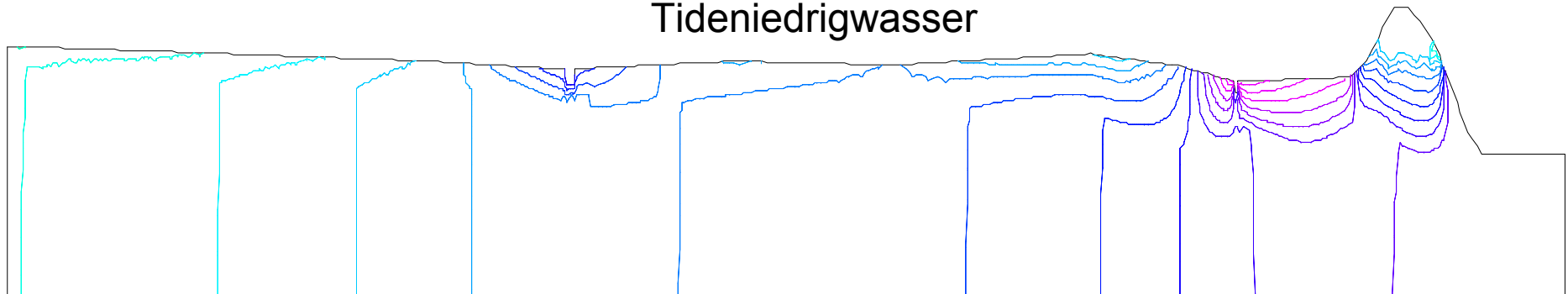


# Potentialverteilung bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser im Vergleichszustand (Überhöhung 5:1)

Tidehochwasser



Tideniedrigwasser



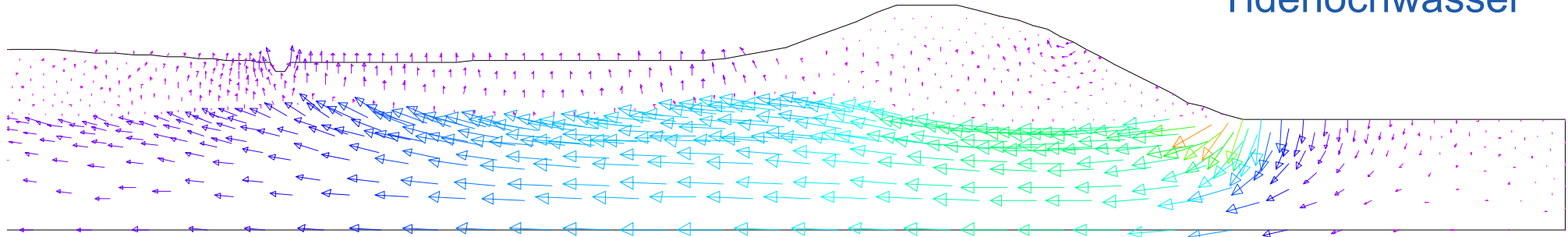
-2                      -1                      0                      1                      2                      3                      4

Potentialhöhenbezogen auf NN

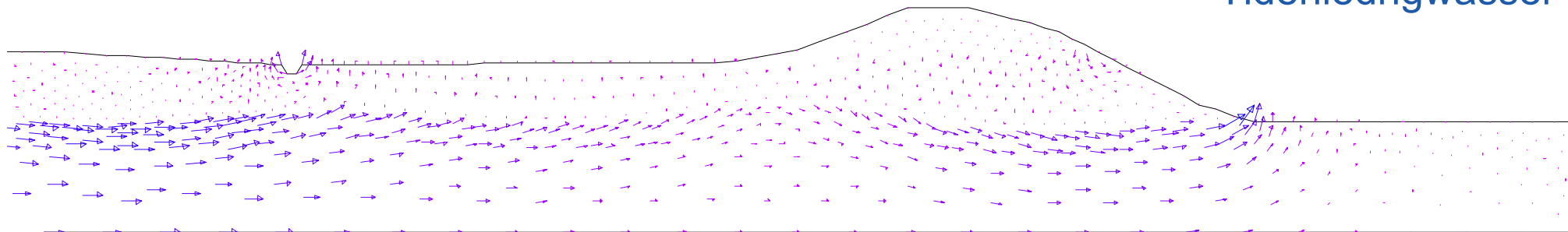


# Geschwindigkeitsfeld bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser im Vergleichszustand

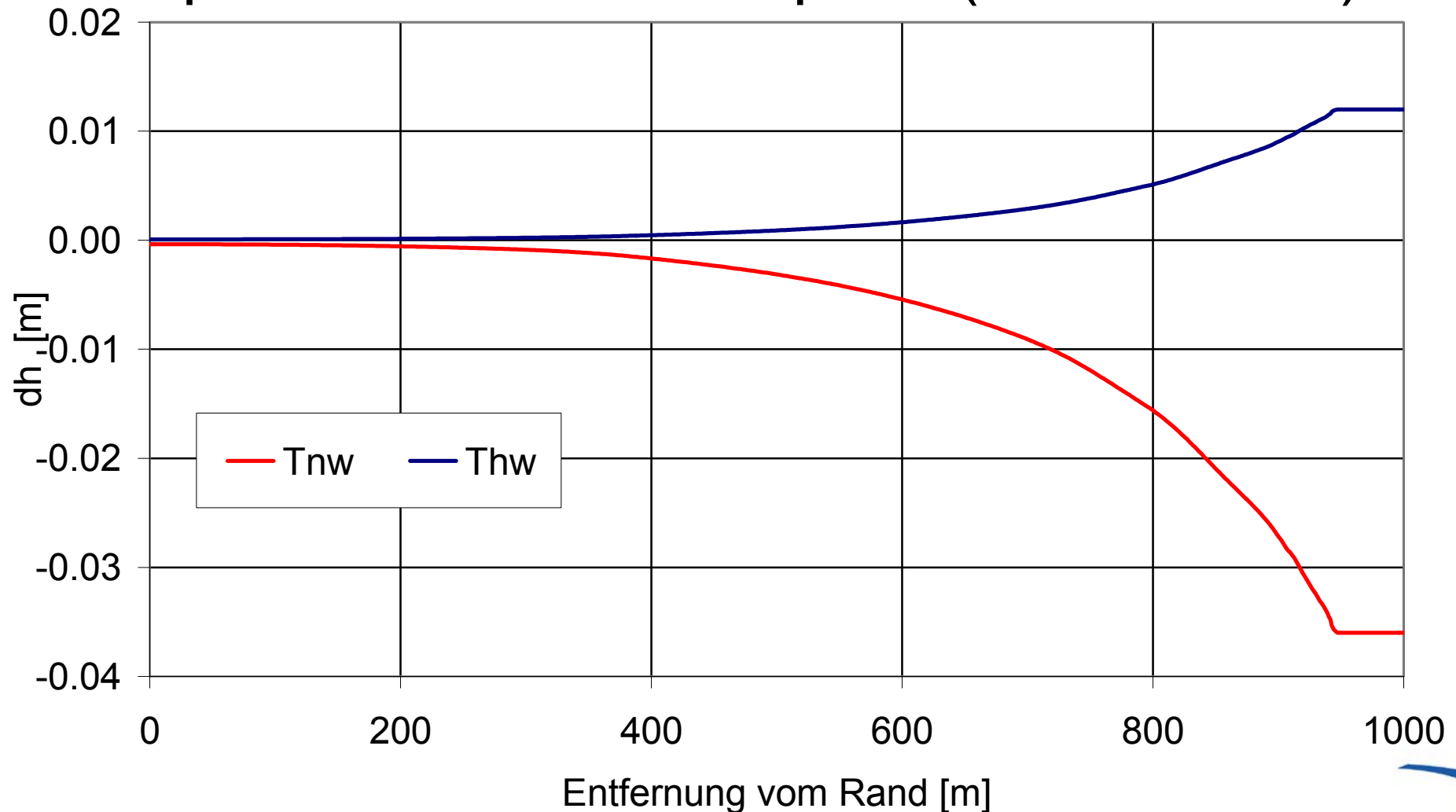
Tidehochwasser



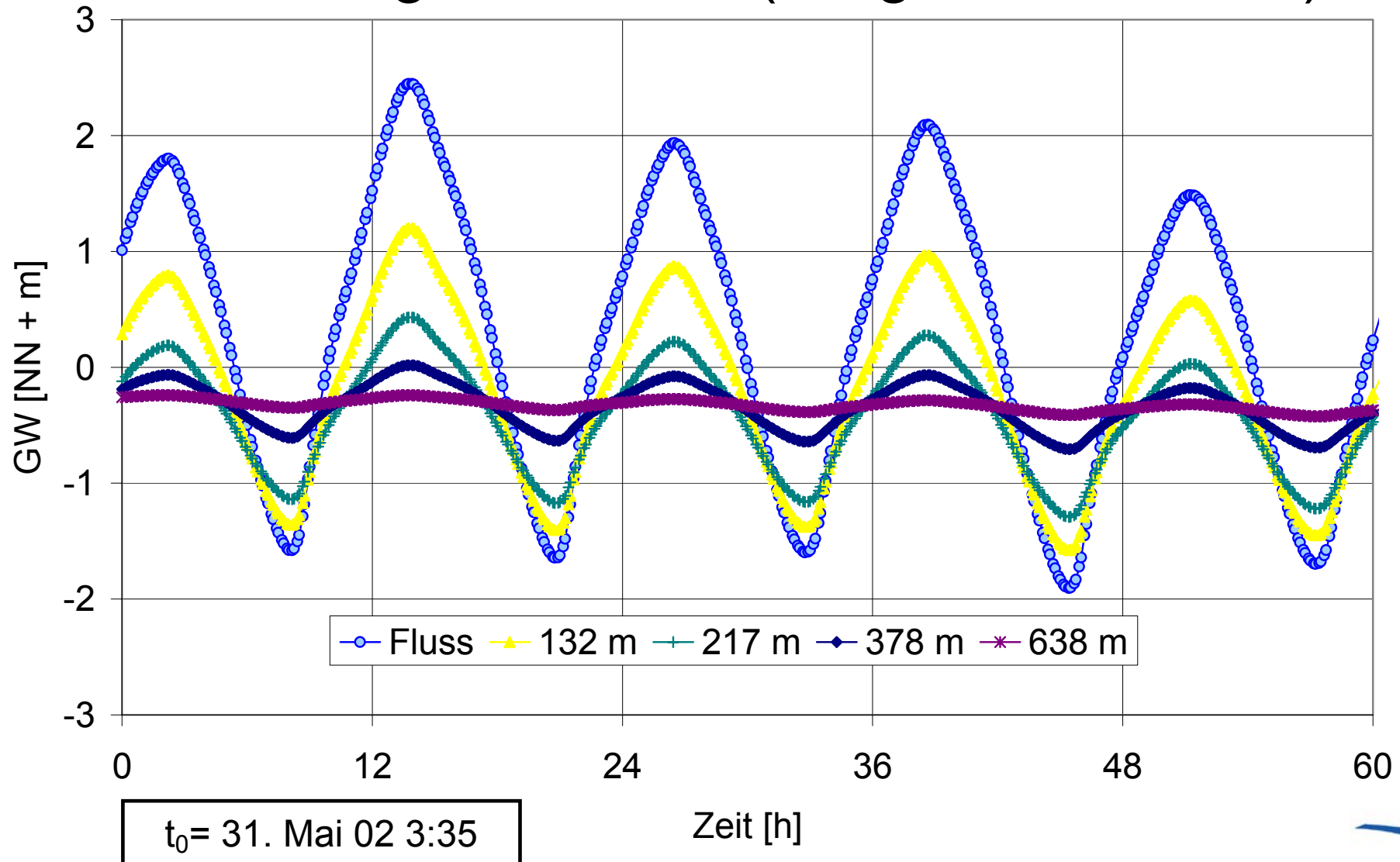
Tideniedrigwasser



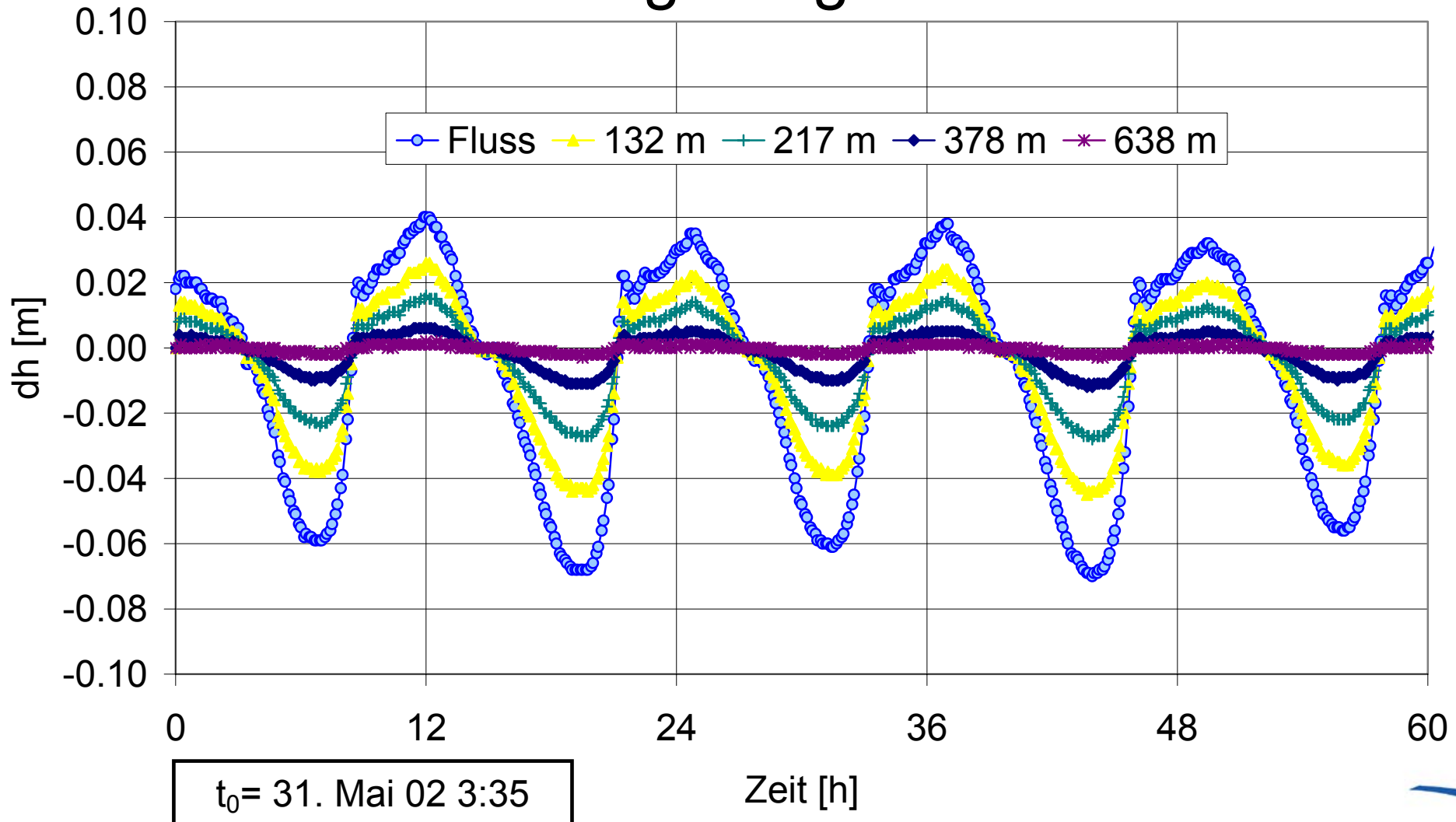
# Differenzen zwischen Vergleichszustand und Überlagerungsvariante des Grundwasserpotentials im pleistozänen Sandaquifer (z=NN -12 m)



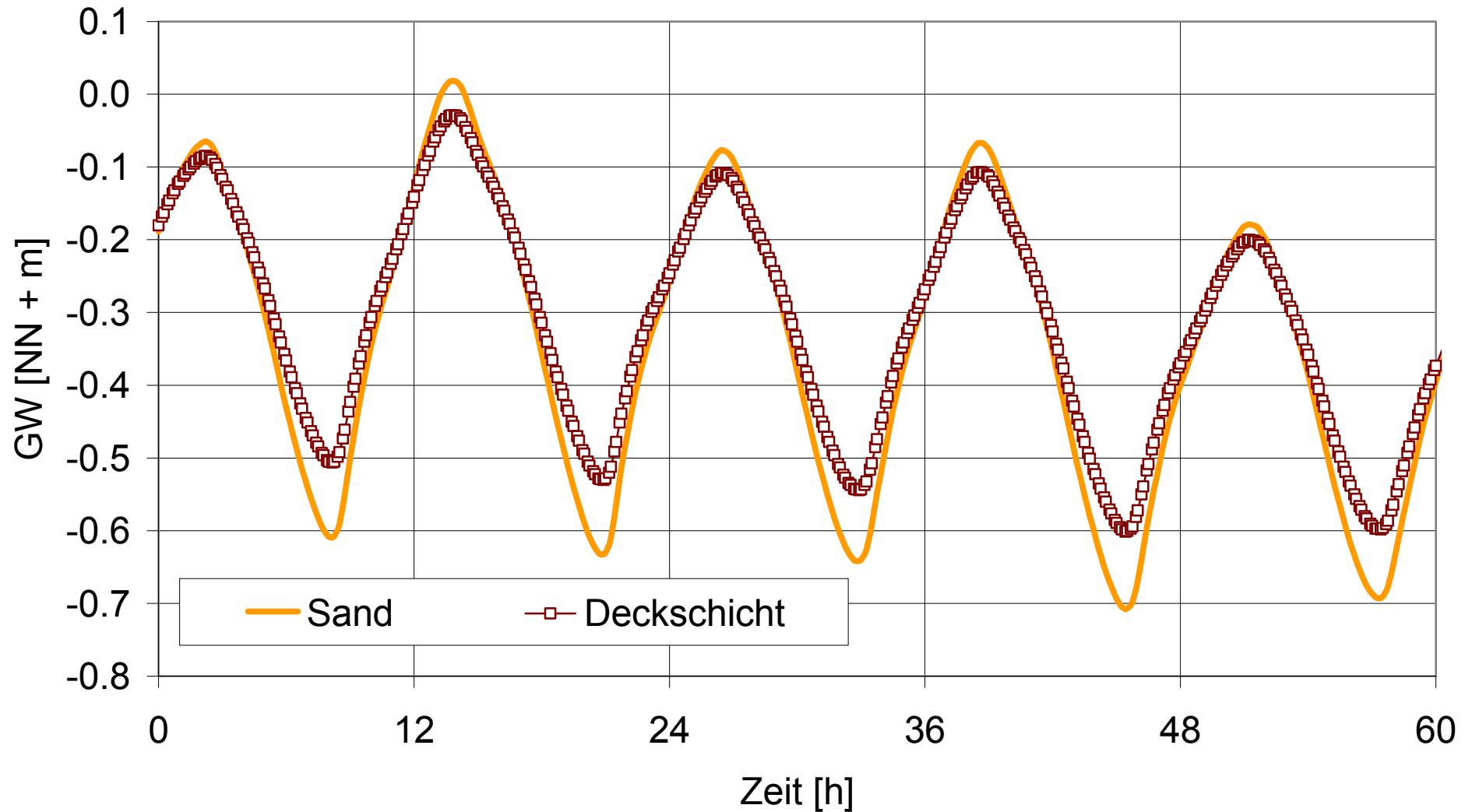
# Grundwasserdynamik im Sandaquifer in unterschiedlicher Entfernung zum Fluss (Vergleichszustand)



# Differenzen der Grundwasserstände im pleistozänen Sandaquifer zwischen Vergleichszustand und Überlagerungsvariante

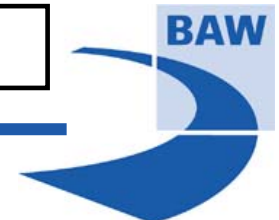


# Dynamik des Grundwasserpotentials im Sandaquifer und in der Deckschicht im Vergleichszustand

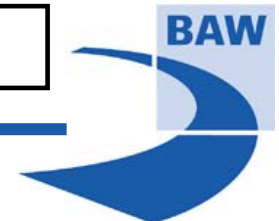
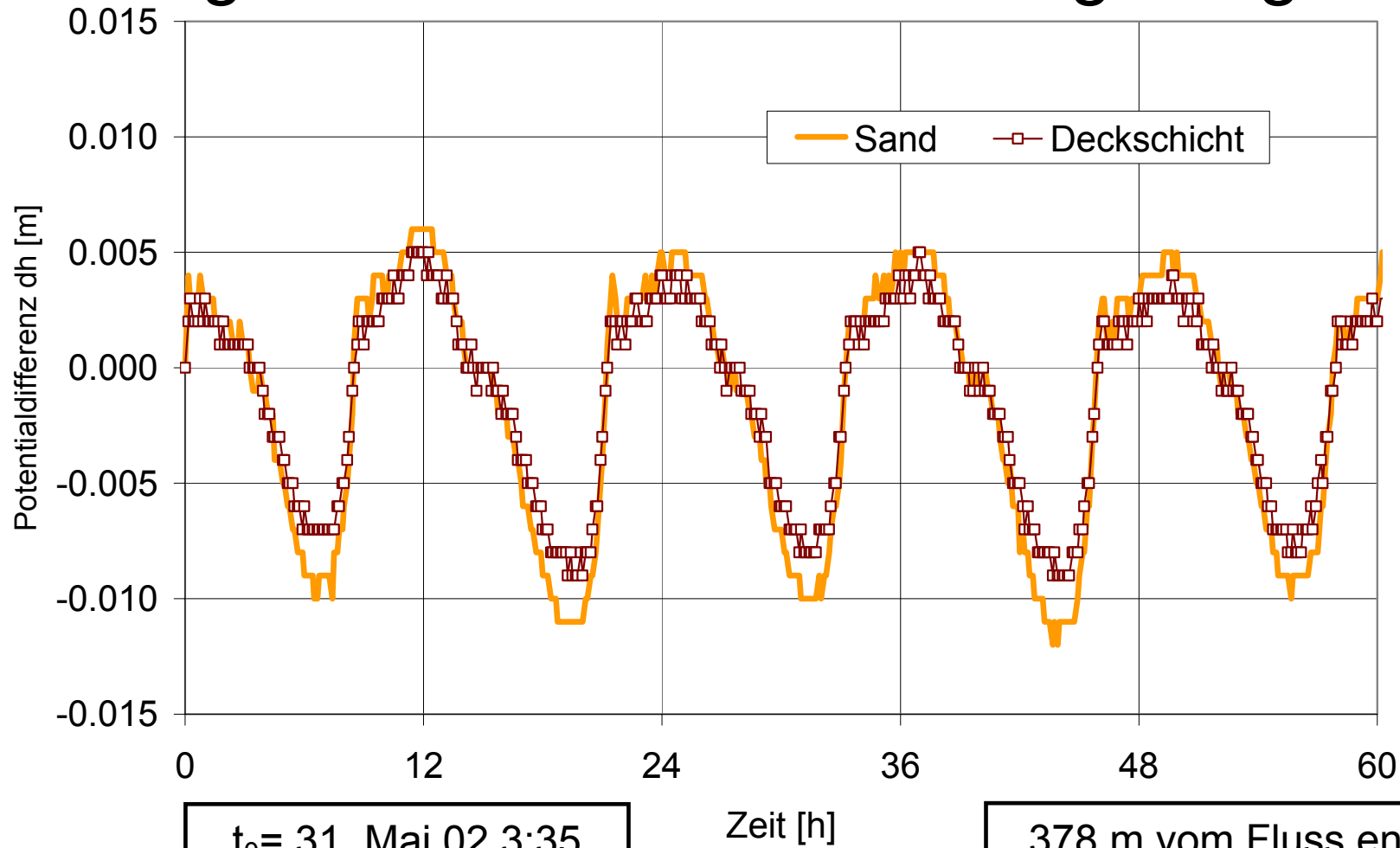


$t_0 = 31. \text{ Mai } 02 \text{ 3:35}$

378 m vom Fluss entfernt



# Differenzen des Grundwasserpotentials im Sandaquifer und in der Deckschicht zwischen Vergleichszustand und Überlagerungsvariante



# Versalzung im Grundwasser

