

Grundwasserstandsbeobachtungen im Bereich von Uferwänden und Baugruben an der Elbe und Westküste Schleswig-Holsteins

Von HELMUT TEMMLER

Zusammenfassung

Der Ansatz von Bemessungswasserständen für Spundwände an Ufereinfassungen in einem gut durchlässigen sandigen Untergrund im Tidebereich nach der Empfehlung E 19 (EAU) liegt nach den vorliegenden wenigen Messergebnissen i.a. etwas auf der unsicheren, teils auch auf der sicheren Seite. Der Stauwasserspiegel in/über bindigen Weichschichten kann im Falle einer dichten Uferwand näherungsweise dem MThw gleichgesetzt werden. Bei vorhandenen Leckagen nähert sich der Grundwasserspiegel dem jeweiligen Tidewasserstand an. Die Dämpfung des gespannten Tiefengrundwassers korreliert innerhalb einer Bandbreite geradlinig mit dem Tidewasserstand und kann danach für das Bemessungshochwasser realistisch abgeschätzt werden.

Summary

Measurements of the ground water level from 23 case records of the Geological Survey Schleswig-Holstein, later Landesamt für Natur und Umwelt S-H, Dept. of Geology and Soil-sciences, show that recommendations of E 19 (EAU) in general somewhat underestimate the water pressure behind sheet pile walls within permeable sandy layers. The phreatic surface in an impermeable clay or in a permeable embankment over an impermeable soft stratum can be taken as nearly identical with the mean tide high water level (MThw). The attenuation of the confined groundwater correlates linearly with the tidal water level within certain margins and can thus be estimated reliably for determination of the design water level.

Inhalt

1. Einleitung	141
2. Ufereinfassungen	142
2.1 Durchlässige sandige Hinterfüllungen	142
2.2 Stauwasserspiegel auf schwer durchlässigen Weichschichten	147
2.3 Gespannter Grundwasserspiegel	159
3. Schlussfolgerungen	180
4. Danksagung	182
5. Schriftenverzeichnis	182

1. Einleitung

Während der Grundwasserspiegel normalerweise als Folge unterschiedlicher Witterungsbedingungen jahreszeitlichen kurz- und mittelfristigen Schwankungen unterliegt, kann er in Tidegebieten – abhängig vom Bodenaufbau, der morphologischen Situation und der Durchlässigkeit des Untergrundes – zusätzlich durch den unterschiedlichen Außenwasserstand beeinflusst werden (E58 EAU, 1996). Für die erdstatischen Bemessungen sind i.d.R.

Grenzwerte maßgebend, die bei Kenntnis der jeweiligen Schwankungsbreite zutreffender eingeschätzt werden können.

Die wechselnden Wasserstände erschweren eine genauere Beobachtung bei Aufschlussbohrungen, zumal im Küstengebiet neben einem oberen Grundwasserhorizont als Stauwasserspiegel auf oder in einem schwer durchlässigen Boden (Klei) – der sich erst nach einer Unterbrechung der Bohrarbeiten um mehrere Stunden auf seinen quasistationären Zustand einstellt – zumindest ein weiterer gespannter Grundwasserhorizont im tiefer gelegenen eiszeitlichen Sand vorhanden ist. Im offenen Bohrröhr bilden beide zusammen einen Mischwasserspiegel, der hinsichtlich seiner Höhenlage und zeitlichen Schwankungen für keinen der beiden echten Wasserspiegel repräsentativ ist.

Wegen der großen Bedeutung einer gesicherten Aussage über die wirklichen Grundwasserverhältnisse wurden bei der geotechnischen Begutachtung größerer Bauvorhaben durch den Verfasser vom Geologischen Landesamt Schleswig-Holstein, später Landesamt für Natur und Umwelt, Abt. Geologie und Boden, vielfach Peilbrunnen installiert und die Grundwasserschwankungen für die Beurteilung

- der Trockenlegung von Baugruben in Tidegebieten durch Grundwasserabsenkung,
- des Wasserdrucks auf Spundwandbauwerke in Tidehäfen und
- der Sicherheit gegen hydraulischen Sohlaufbruch bei tiefen Baugruben in bindigen Böden direkt gemessen. Einige Messdaten wurden von Ing.-Büros zur Verfügung gestellt. Nachfolgend werden die Ergebnisse von insgesamt 23 Fallstudien dargestellt.

2. Ufereinfassungen

2.1 Durchlässige sandige Hinterfüllungen

Hafen List/Sylt

Das dortige Hafengelände wurde in den 30er-Jahren bis auf die heutige Geländeoberfläche (NN +2,1 bis 4,6 m) aufgefüllt (Abb. 1). Unter der sandigen Aufschüttung stehen bis in große Tiefe Dünen-, Strand- und Meeressande an. Die Körnung reicht vom Kies führenden Mittel- und Grobsand bis zum schwach mittelsandigen, teilweise etwas Schluff haltigen

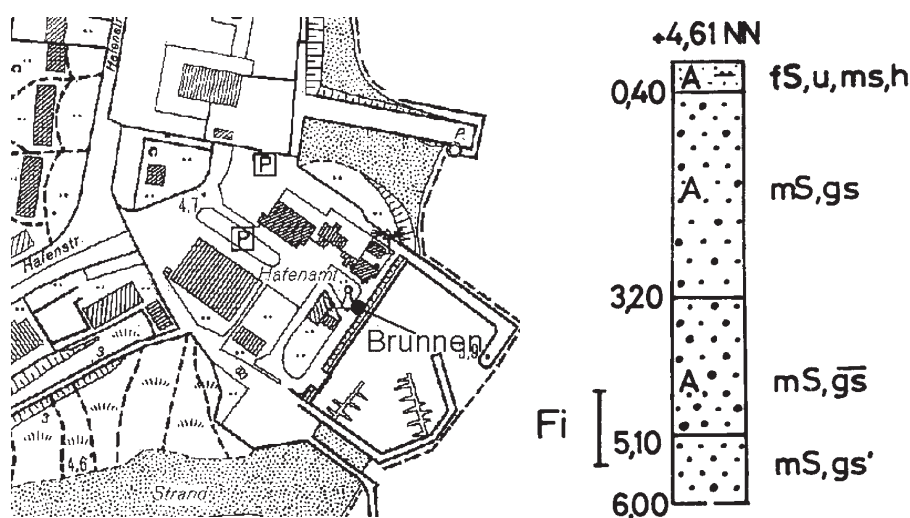


Abb. 1: Lageplan des Hafens List/Sylt mit Bohrprofil und Lage der Filterstrecke

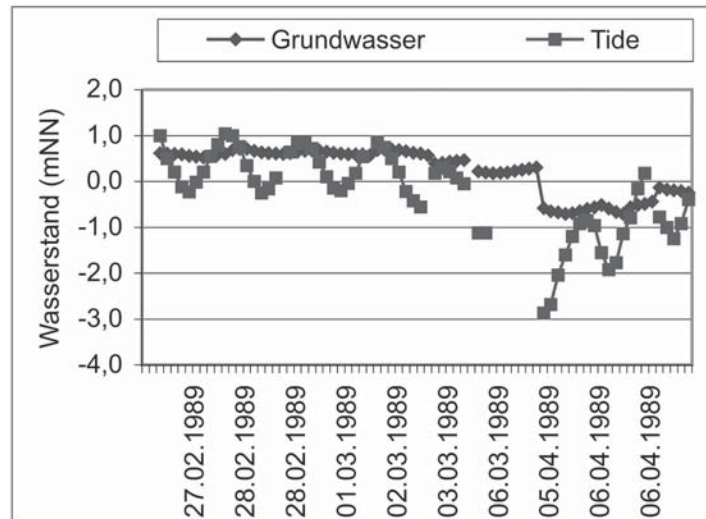


Abb. 2: Ganglinien vom Tide- und Grundwasserspiegel im Hafen List/Sylt

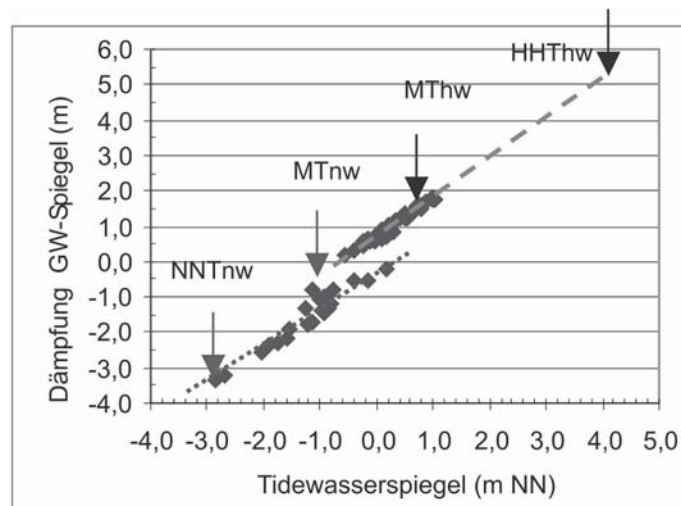


Abb. 3: Beziehung zwischen Dämpfung und Tidewasserspiegel im Hafen List

Feinsand mit vereinzelten Kleistreifen. Die in einem Peilbrunnen gemessenen Veränderungen des Grundwasserspiegels verlaufen gegenüber den Tideschwankungen gedämpft, jedoch im gleichen zeitlichen Rhythmus (Abb. 2).

Die Bemessungswasserstände mit der zugehörigen Dämpfung des Grundwasserspiegels im Hafen List sind

	m NN	Dämpfung
HHThw	+4,05	-4,00 m
MThw	+0,72	-1,50 m
MTnw	-1,03	+1,00 m
MSpTnw (= SKN)	-1,14	+1,60 m
NNTnw	-2,88	+3,45 m

Der rechnerische und gemessene Wasserüberdruck auf die Spundwand ergab sich wie folgt:

Tab. 1: Wasserüberdruck auf die Spundwand im Hafen List

Lastfall gem. E 18 (EAU)	Situation		Wasserüberdruck $h_{wü}$ (m)
	nach Bild E 19-2 (EAU)		nach Messdaten
1	3 a	1,29	1,60
2	3 b	1,86	2,55
3	3 c	2,05	1,10

Hafenbecken III Büsum

Die vorhandene Spundwand musste wegen der geplanten Vertiefung des Hafenbeckens III um 1,50 m durch einen Neubau ersetzt werden (Abb. 4). Unter rd. 6 m Schluffsand-Auffüllungen mit örtlichen Schlickeinsparungen stehen schwach schluffige Wattenfeinsande in großer Mächtigkeit an. Abb. 5 zeigt typische Ganglinien der Tide und des in einem Peilbrunnen gemessenen Grundwasserspiegels und die Abb. 6 die Dämpfung des Grundwasserspiegels als Spiegelhöhendifferenzen außen und innen für die Messzeiten vom 9.–13.12.1988, 5.1.–27.2.1989 und 5.–6.4.1989.

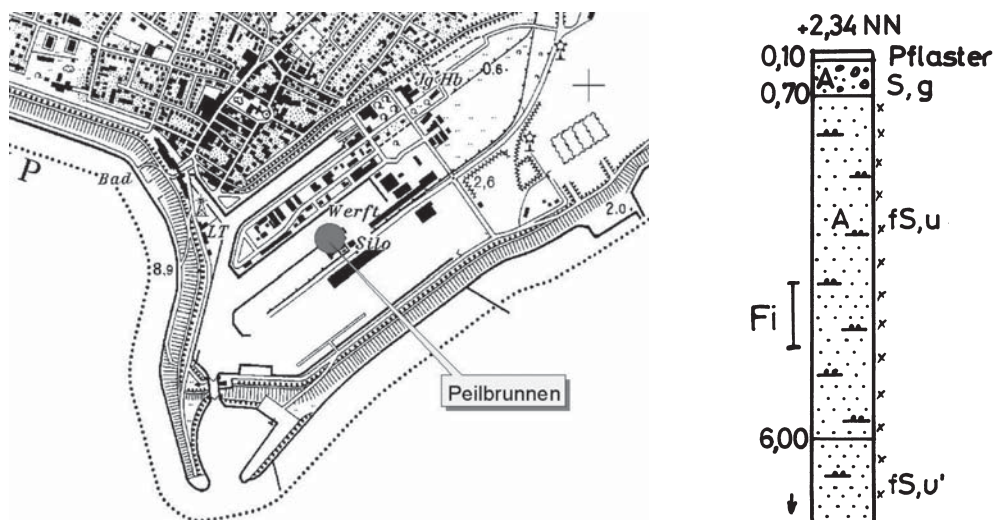


Abb. 4: Lageplan mit Bohrprofil Hafen Būsum

Die Bemessungswasserstände mit der zugehörigen Dämpfung des Grundwasserspiegels im Hafen Būsum sind

	m NN	Dämpfung
HHThw	(+5,15)*+2,20	(-3,65)*-1,20 m
MThw	+1,52	-0,55 m
MTnw	-1,70	+2,20 m
MSpTnw (= SKN)	-2,20	+2,50 m
NNTnw	-3,35	+3,45 m

* bei geschlossenem Schleusen-Fluttor

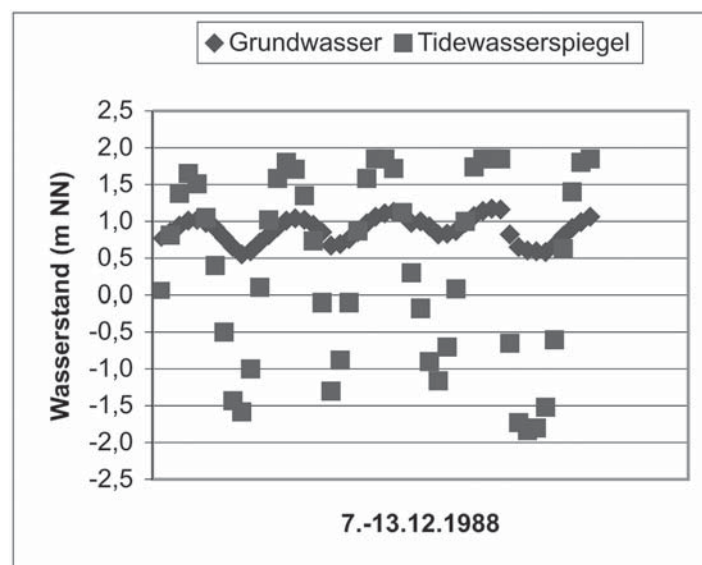


Abb. 5: Ganglinien von Tide- und Grundwasserspiegel im Hafen Büsum

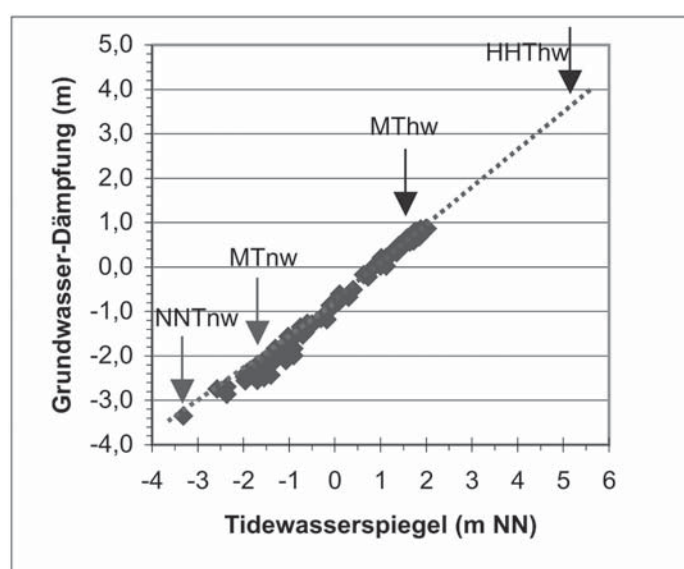


Abb. 6: Beziehung zwischen Tide- und Grundwasserspiegel im Hafen Büsum

Die Vergleichsuntersuchungen mit der EAU ergaben

Tab. 2: Wasserdruck auf die Spundwand im Hafen Büsum

Lastfall gem. E 18 (EAU)	Situation		Wasserüberdruck $h_{wü}$ (m)
	nach Bild E 19-2 (EAU)		nach Messdaten
1	3 a	2,21	2,50
2	3 b	3,22	3,45
3	3 c	3,42	2,85

Elbehafen Brunsbüttel

Im Zuge der Standsicherheitsbeurteilung der vorhandenen Uferwand des Elbehafens durch die Grundbauingenieure STEINFELD u. PARTNER (Bericht Nr. 07328 v. 1.10.1996) wurden die im Juli 1996 in einem Peilbrunnen und der Elbe gemessenen Wasserstände ausgewertet (Abb. 7: Lage der Untersuchungsstelle mit dem Bohrprofil des Brunnens). Die Beziehung zwischen dem Grund- und Elbewasserspiegel bei Tideniedrigwasser ist in der Abb. 8 dargestellt. Die allgemeine Situation am Elbehafen lässt sich wie folgt beschreiben:

- Oberkante Umschlagfläche +6,60 m NN
- Sohllentiefe Hafen Westabschnitt -16,0 m NN, Ostabschnitt -15,0 m NN
- Uferwand aus tiefreichenden Tragbohlen PSp 900 und 600, Rohr (Δ 914,4 mm) mit zwischen- stehenden, bis -21,5 m NN geramten PSt-Füllbohlen
- Bodenersatz bis i.M. -22,0 m NN wasserseitig der Kaje auf rd. 30 m Breite, landseitig ca. 75 m Breite mit allseits anschließenden, unter 1:3 geneigten Böschungen

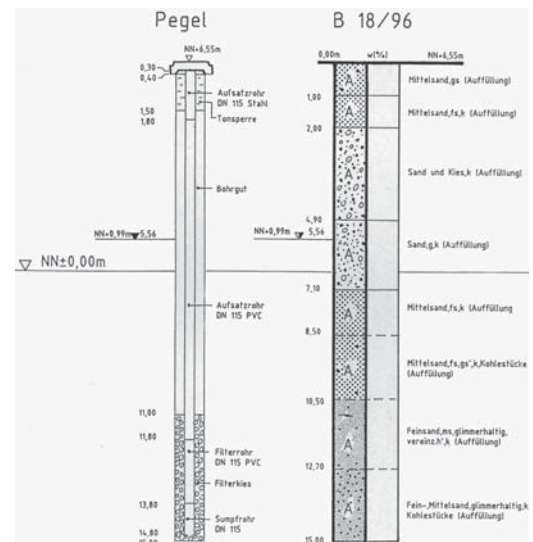
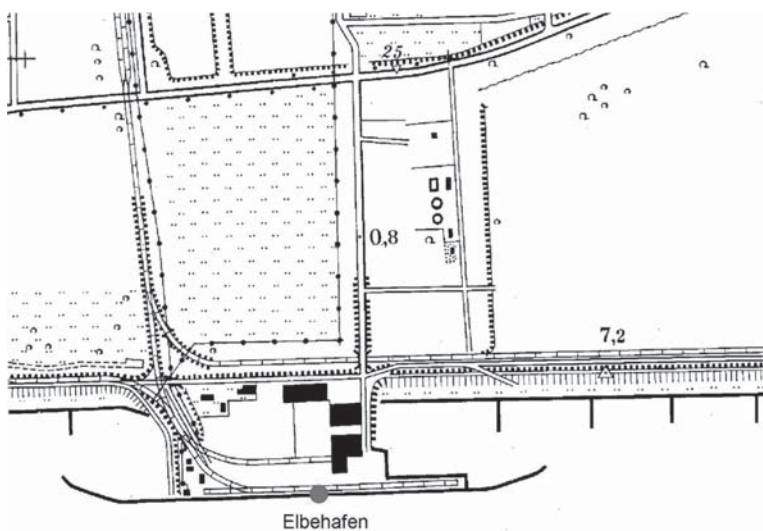


Abb. 7: Lageplan mit Bohrprofil und Peilbrunnenausbau am Elbehafen Brunsbüttel
(aus STEINFELD et al., 1996)

Die Bemessungswasserstände mit der zugehörigen Dämpfung des Grundwasserspiegels sind

	m NN	Dämpfung
HHThw	+5,42	-4,65 m
MThw	+1,43	-1,07 m
MTnw	-1,30	+1,30 m
MSpTnw (= SKN)	-1,48	+1,50 m
NNTnw	-3,70	+3,42 m

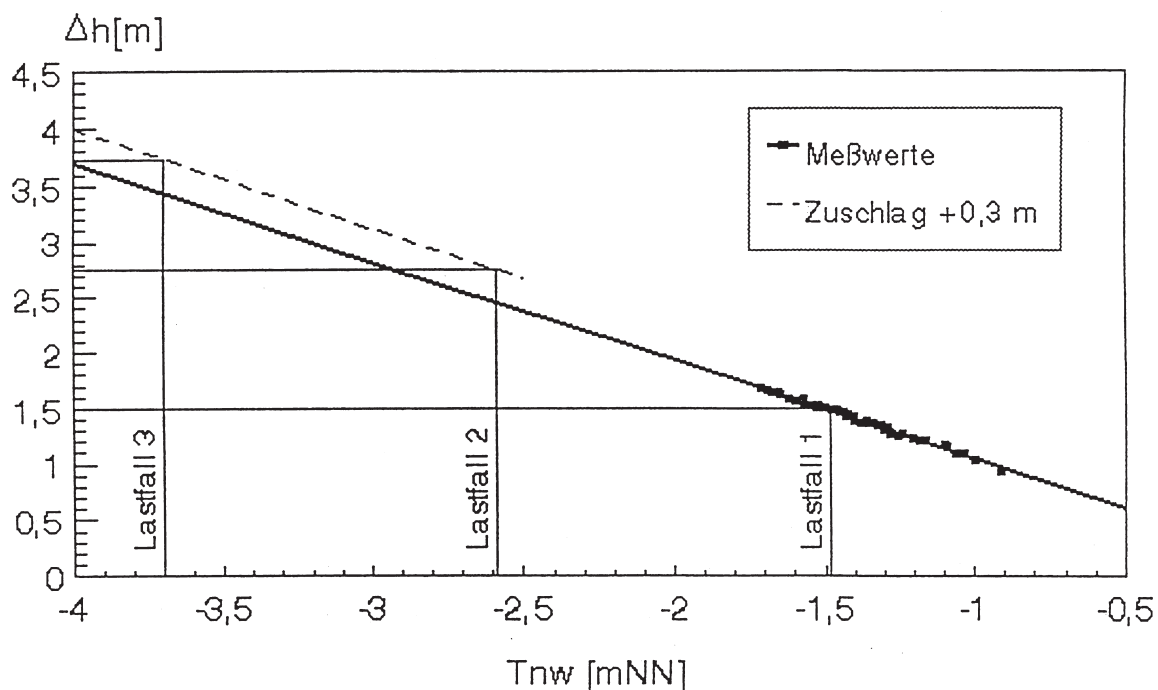


Abb. 8: Beziehung zwischen Grund- und Tidewasserspiegel am Elbehafen Brunsbüttel
(aus STEINFELD et al., 1996)

Die Vergleichsuntersuchungen mit der EAU ergaben

Tab. 3: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Wasserdrücken am Elbehafen

Lastfall gem. E 18 (EAU)	Situation		Wasserüberdruck $h_{wü}$ (m)
	nach Bild E 19-2 (EAU)		nach Messdaten
1	3 a	1,85	1,40 m
2	3 b	3,80	3,42 m
3	3 c	3,03	2,07 m

Der dem Dämpfungsmaß entsprechende Wasserdruck im LF 2 auf die Uferwand liegt am Hafen List um 37 % und im Hafen Büsum um 33 % über dem nach der Empfehlung E 19 der EAU 1996 berechneten Zahlenwert, am Elbehafen Brunsbüttel jedoch um 35 % darunter.

2.2 Stauwasserspiegel auf schwer durchlässigen Weichschichten

Binnenhafen Husum

Bei der Baugrunduntersuchung zur Sanierung der über 100-jährigen Kaimauern im Husumer Binnenhafen (Abb. 9) wurden im Abstand von 240 m zwei jeweils 4 m tiefe Bohrungen als Kleinbrunnen ausgebaut und mit Schreibpegeln versehen (Abb. 10).

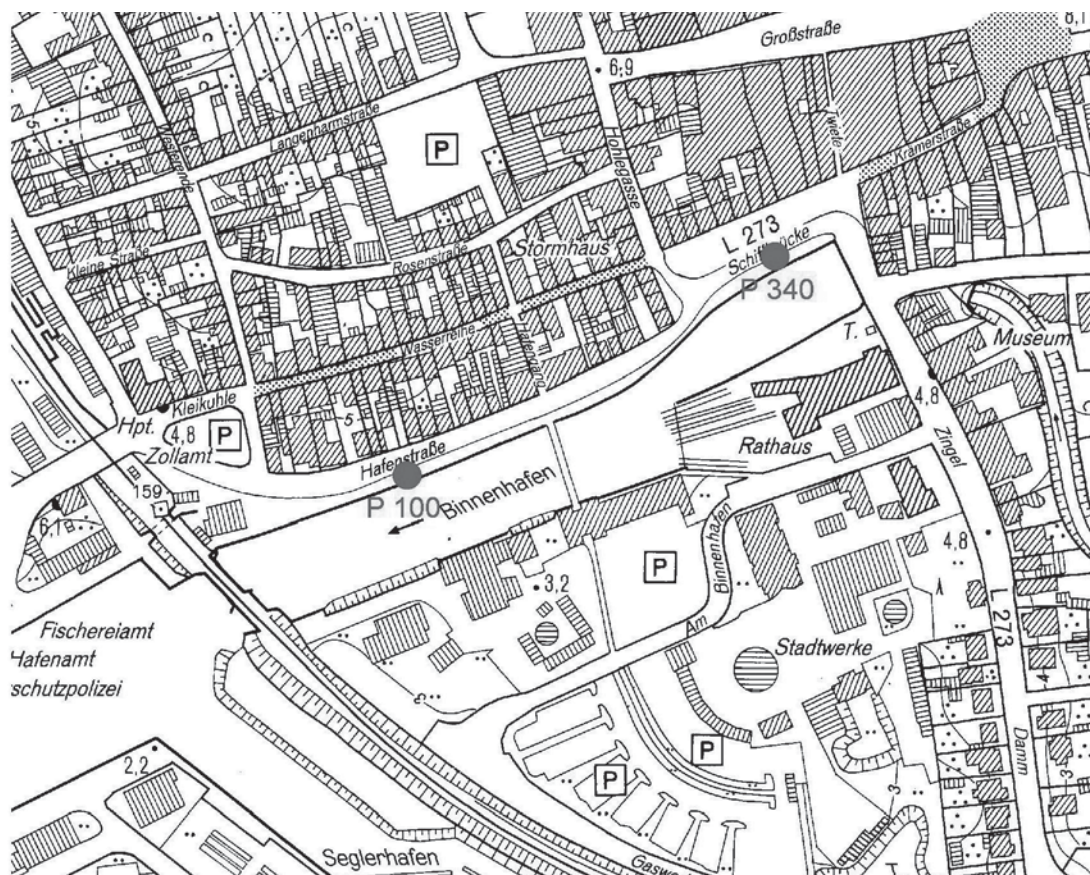


Abb. 9: Lageplan Binnenhafen Husum

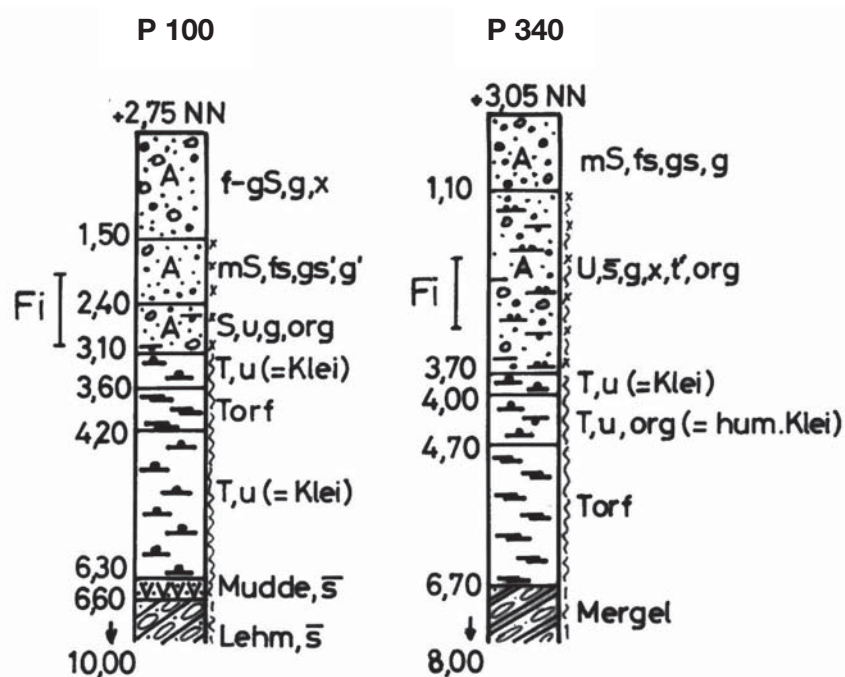


Abb. 10: Bohrprofile der Peilbrunnen mit Lage der Filterstrecken im Binnenhafen Husum

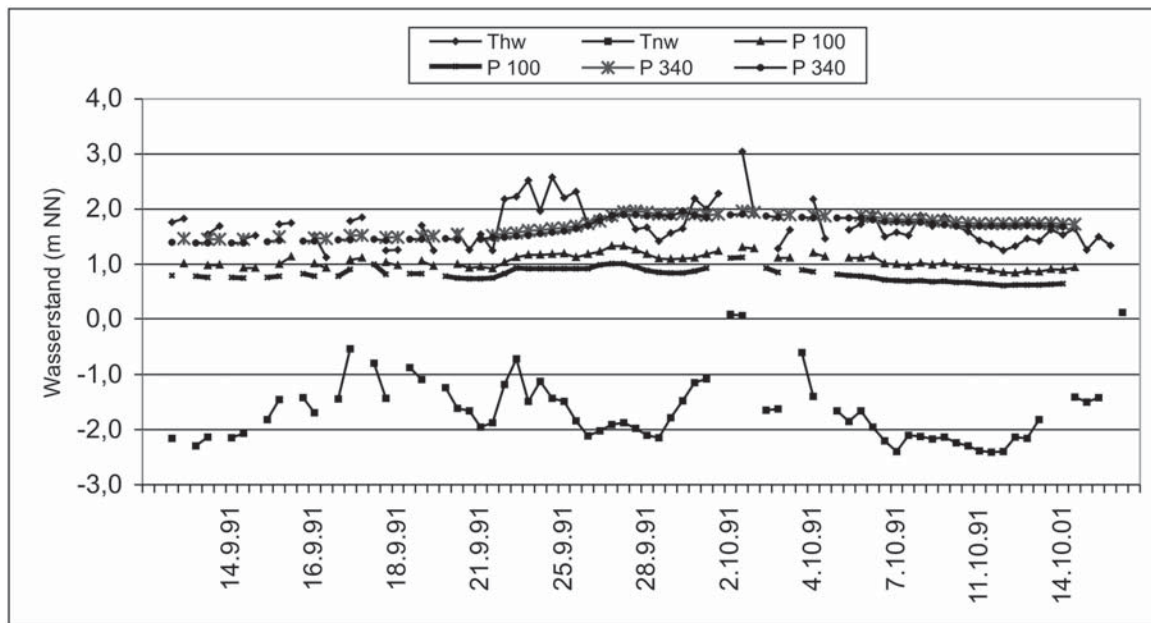


Abb. 11: Zeitlicher Verlauf des Tide- und Grundwasserstandes im Binnenhafen Husum

In den aufgefüllten Deckschichten ist ein oberflächennaher, mit der Tide schwankender Grundwasserhorizont vorhanden. Bei dem westlichen, bei Stat. 100 in der Hafenstraße gelegenen Brunnen schwanken die Amplituden benachbarter Grundwasserhöchst- und -tiefstände zwischen 23 und 32 cm; beim Peilbrunnen im innersten Hafenbereich bei Stat. 340 nur noch zwischen 5 und 10 cm. Diese täglichen tidebedingten Grundwasserschwankungen werden von flachwelligen Spiegeländerungen überlagert, deren Zyklen in der Größenordnung zwischen einer und mehreren Wochen liegen. Ihre Amplituden sind deutlich größer als die tidebedingten Schwankungen (Abb. 11). Die Dämpfung des Grundwasserspiegels korreliert nur geringfügig (Peilbr. 100) oder gar nicht (Peilbr. 340) mit dem Hafenwasserstand (Abb. 13 u. 14). Die Grundwasserstandsmaxima und -minima treten gegenüber den Tideschwankungen im benachbarten Binnenhafen um 1,5 bis 2,5 Stunden zeitverzögert ein.

Die beiden Messstellen am Binnenhafen Husum liegen abweichend von allen anderen genannten Beispielen in unmittelbarer Nähe zur etwas höher gelegenen Geest mit teilweise durchlässigem Untergrund und einem offensichtlich bedeutenden Grundwasserzufluss zur Mühlenau und zum Binnenhafen mit seinen um 1890 gemauerten, inzwischen undichten, teilweise unterläufigen Uferwänden. Auch wechselt die Zusammensetzung innerhalb der aufgefüllten Deckschichten auf kürzeste Entfernungen beträchtlich. Alle diese Einflüsse sind nicht genau zu quantifizieren und die Messergebnisse vom Binnenhafen Husum deshalb für Grundwasserstände hinter Uferwänden nicht repräsentativ.

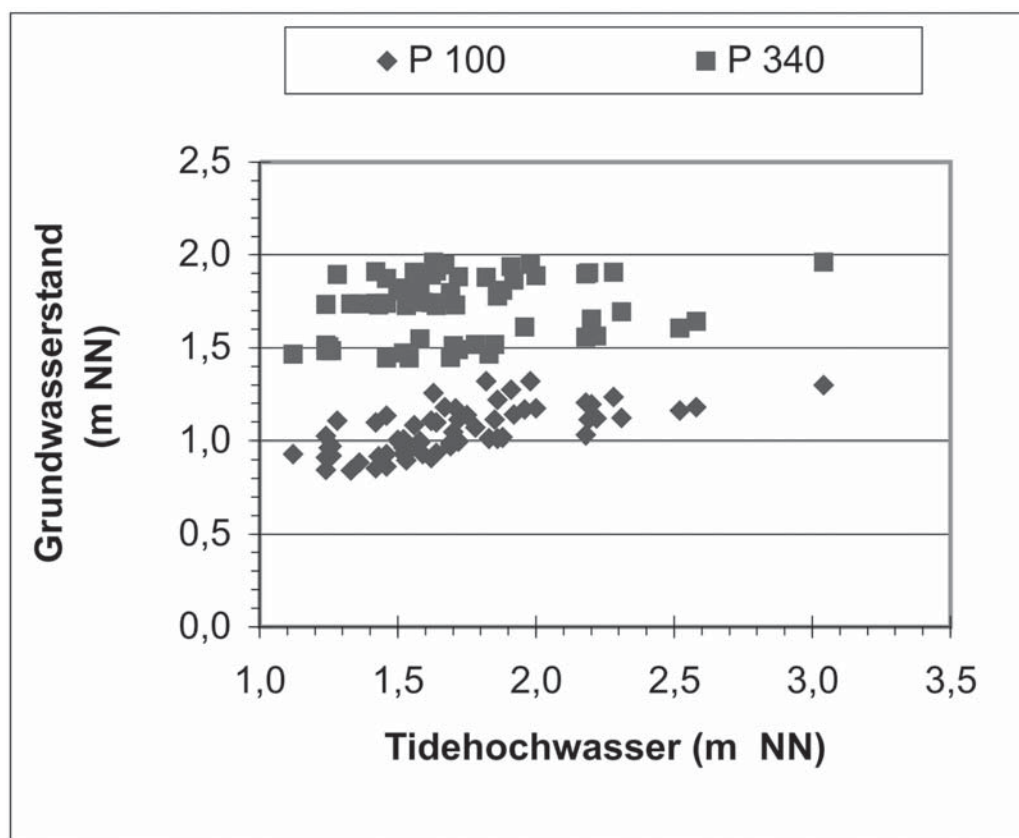


Abb. 12: Grundwasserstandsveränderungen am Binnenhafen Husum

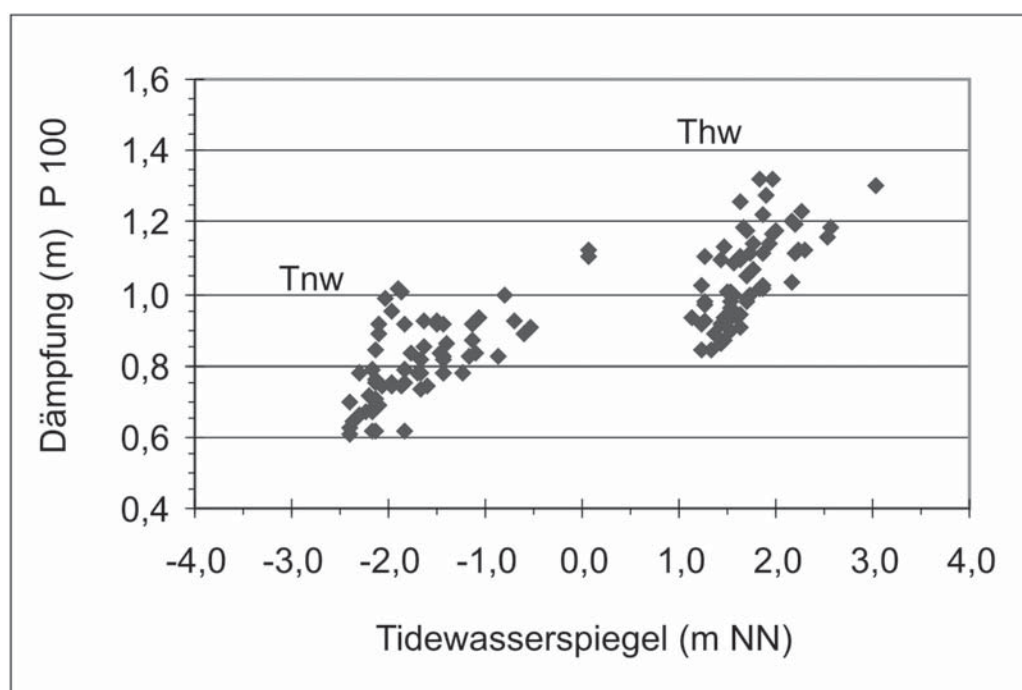


Abb. 13: Dämpfung des Grundwasserspiegels im Peilbrunnen 100 im Binnenhafen Husum

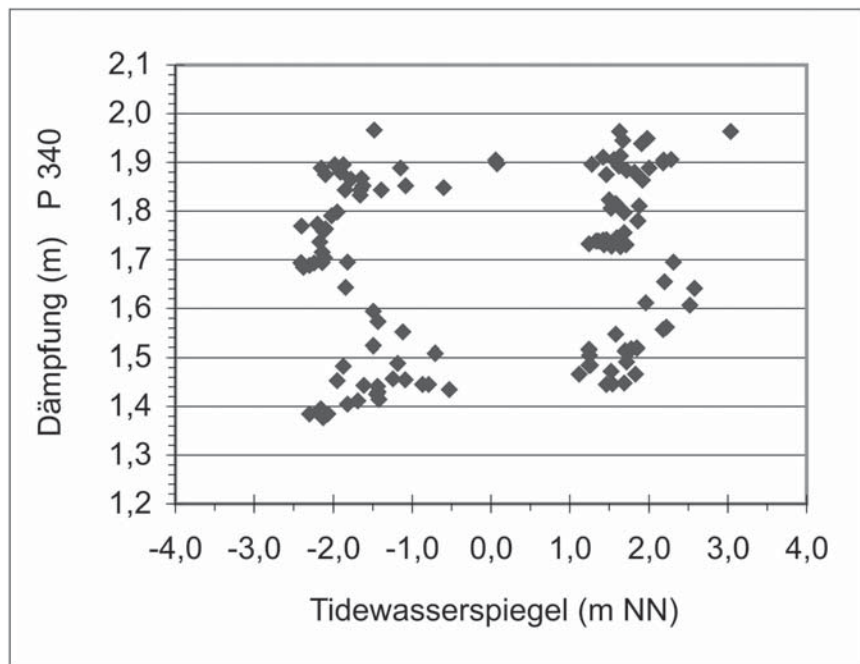


Abb. 14: Dämpfung des Grundwasserspiegels im Peilbrunnen 340 im Binnenhafen Husum

Fischereikaje Außenhafen Husum

Die vorhandene Kajenwand wurde seinerzeit gemäß E 19 (EAU) = +0,07 m NN statisch bemessen. Baugrunduntersuchungen für einen Neubau (Abb. 15) ergaben einen Stauwasserspiegel bei +1,60 m NN. Zur Überprüfung der Sachlage wurden direkt hinter der Uferwand zwei Peilbrunnen installiert und die Grundwasserstände mit dem zugehörigen Tidewasserstand im Hafen über einen Monat täglich gemessen (Abb. 16).

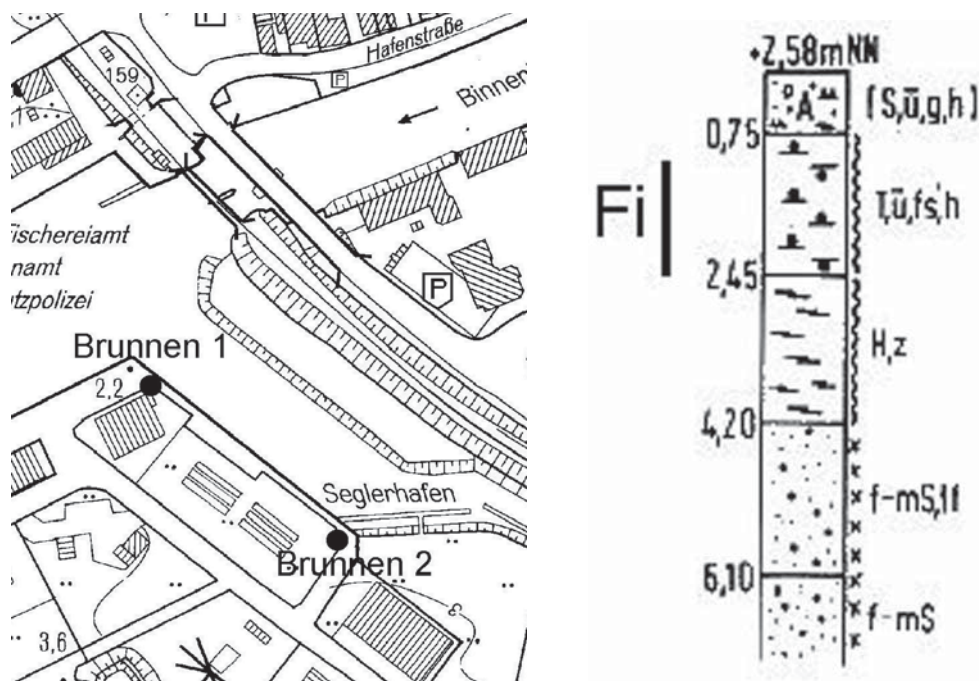


Abb. 15: Lageplan mit Bohrprofil an der Fischereikaje Husum

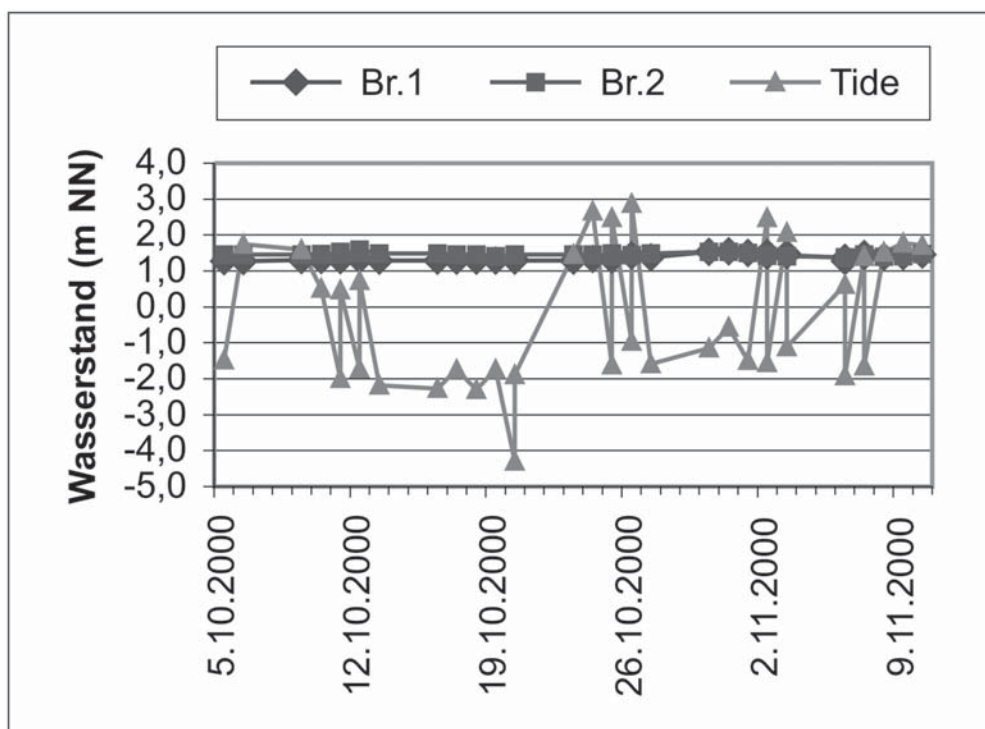


Abb. 16: Verlauf der gemessenen Wasserstände an der Fischereikaje im Außenhafen Husum

Zwischen dem gemessenen Grundwasserspiegel und dem stark schwankenden Tide-niveau existiert keinerlei Beziehung.

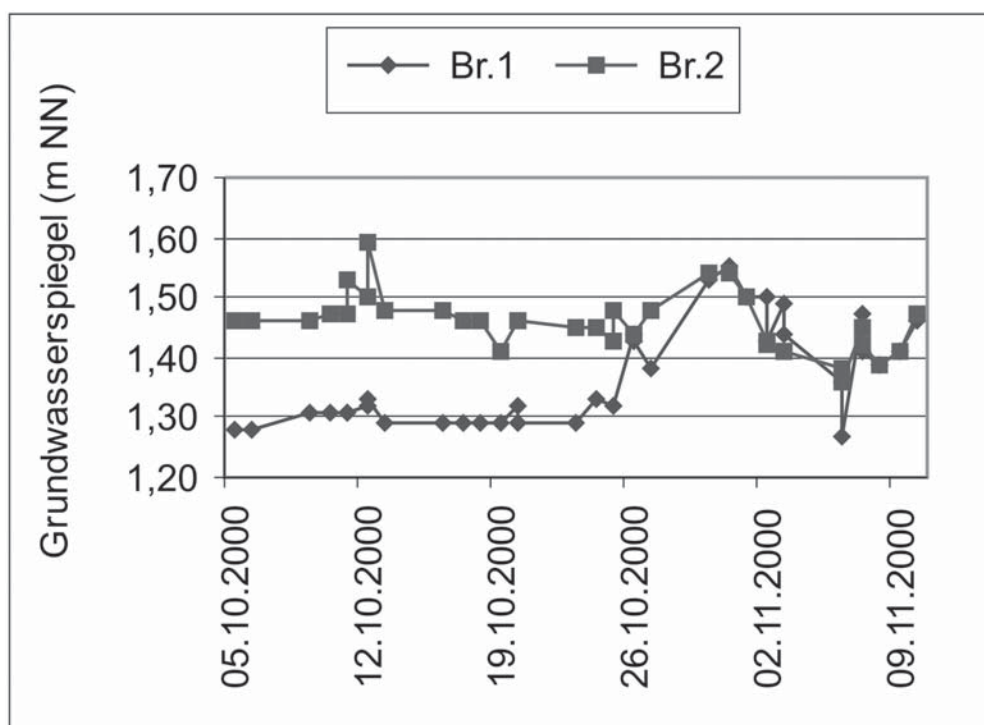


Abb. 17: Zeitliche Veränderungen des Grundwasserstandes in der Fischereikaje am Außenhafen Husum

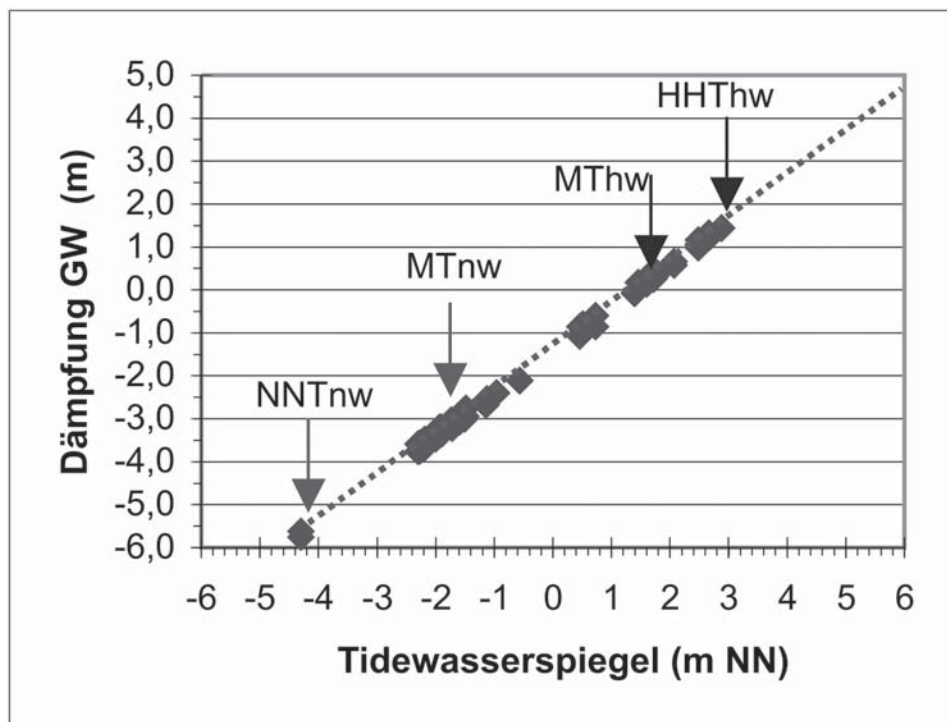


Abb. 18: Dämpfung des Grundwasserspiegels an der Fischereikaje am Außenhafen Husum

Die Bemessungswasserstände mit der zugehörigen Dämpfung des Grundwasserspiegels sind

	m NN	Dämpfung
HHThw	(+5,42) +2,90*	(-4,20) -1,45 *m
MThw	+1,67	-0,20 m
MTnw	-1,80	+3,20 m
MSpTnw (= SKN)	-2,20	+3,65 m
NNTnw	-4,30	+5,75 m

* bei geschlossenem Schleusen-Fluttor

Im Peilbrunnen 2 wurde zunächst ein etwas höherer Grundwasserstand als im Brunnen 1 registriert. Später näherten sich beide Wasserstände auf einen Mittelwert von +1,45 m NN (ca. 20 cm unter MThw) an; dies ist gleichzeitig der Bemessungswert für das gesamte Tidespektrum (Abb. 18).

Hafen Tönning

Bei der Baugrunduntersuchung zur Sanierung schadhafter Spundwände im Tönninger Hafen wurde bei einem im Einzelnen sehr unregelmäßigen Bodenaufbau das oberflächennahe Grundwasser auf der Hafennordseite bei etwa +1,10 m NN angetroffen (Abb. 19). Zur Absicherung der Grundwasserverhältnisse wurde eine 4 m tiefe Rammkernsondierbohrung als KleinfILTERbrunnen ausgebaut.

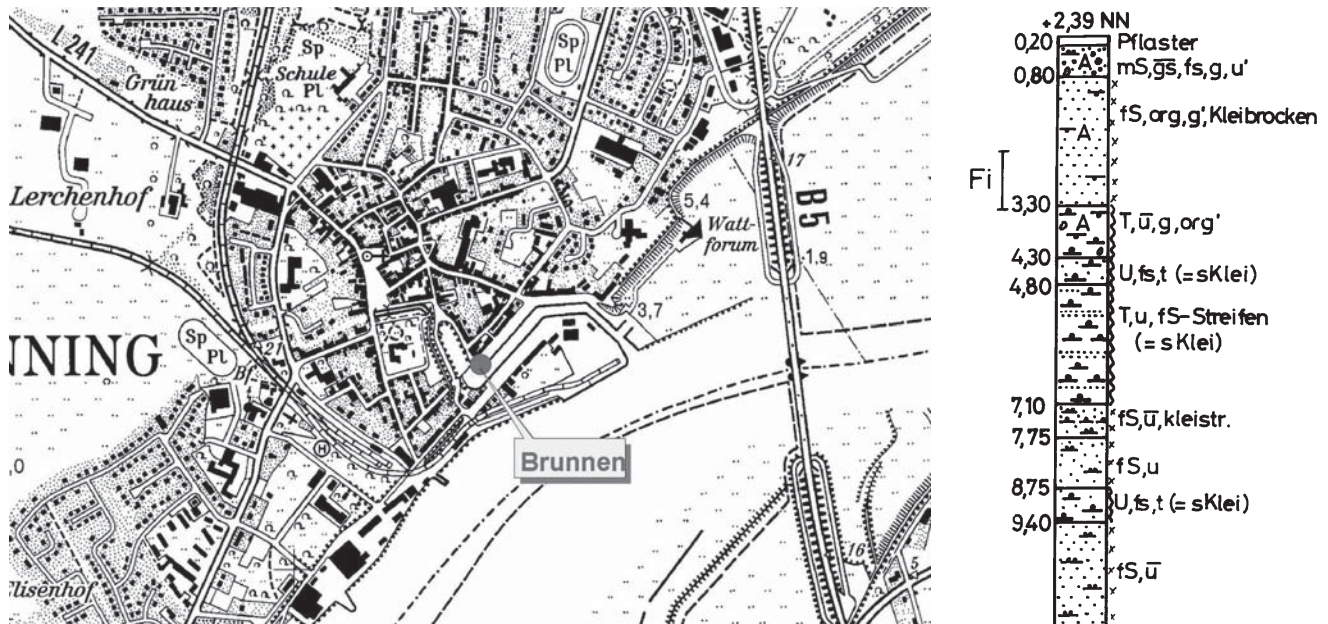


Abb. 19: Lageplan mit Bohrprofil und Lage der Filterstrecke im Hafen Tönning

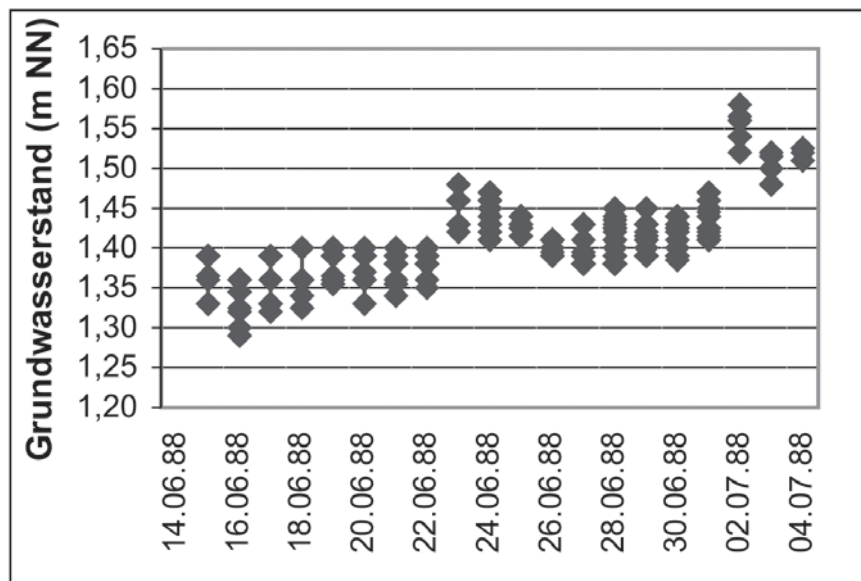


Abb. 20: Schwankungen des Grundwasserspiegels an der Nordkaje des Hafens Tönning

Die vom Hafenmeister in der Anfangsphase in stündlichen Abständen vorgenommenen Messungen des Hafen- und Grundwasserspiegels ergaben auch hier geringe tidebedingte Tagesschwankungen (Abb. 20) mit größeren mittelfristigen Veränderungen (Abb. 20 u. 21). Sie führten wie der Vergleich allein der Wasserstandsmaxima und -minima aus den späteren täglichen Kontrollen zu einer identischen Korrelation zwischen der Dämpfung des Grundwasserspiegels und dem Außenwasserstand (Abb. 22). Die Bemessungswasserstände mit der zugehörigen Dämpfung des Grundwasserspiegels sind:

	m NN	Dämpfung
MThw	+1,12	+0,40 m
MTnw	-1,24	+2,70 m
MSpTnw (= SKN)	-1,50	+2,95 m
NNTnw	-2,03	+3,50 m

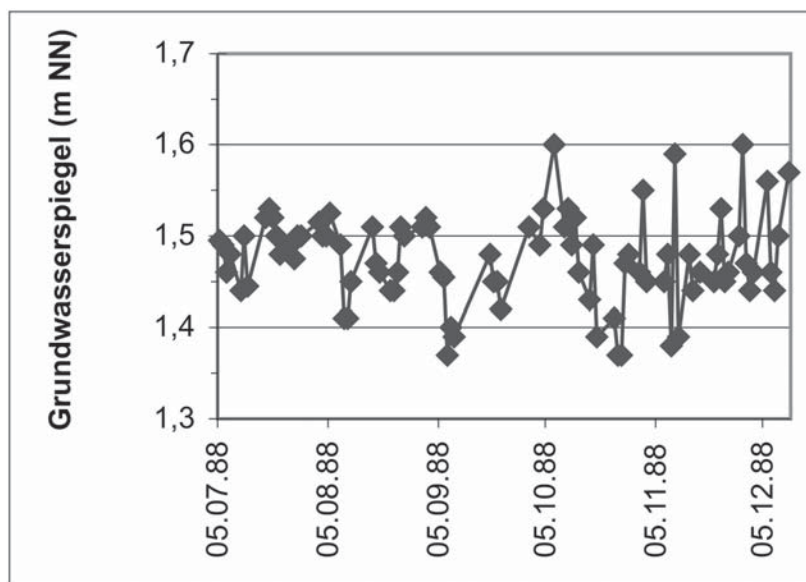


Abb. 21: Zeitlicher Verlauf des oberen Grundwasserspiegels im Hafen Tönning

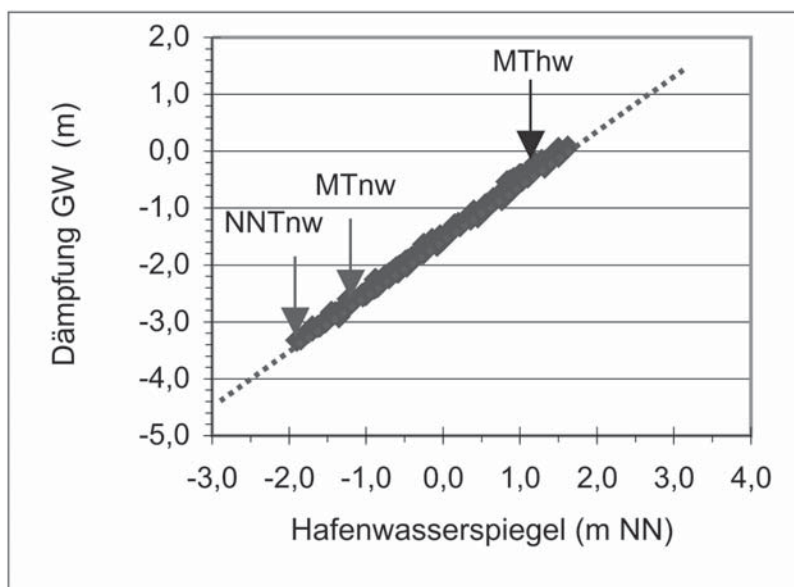


Abb. 22: Dämpfung des oberen Grundwasserspiegels am Hafen Tönning

Aus dem Diagramm der Abb. 22 ergab sich für den nördlichen Hafenbereich ein einheitlicher Bemessungswasserstand hinter der Uferwand von +1,50 m NN (= 0,4 m über dem MThw).

Binnenhafen Glückstadt

Im Zuge der Standsicherheitsüberprüfung der vorhandenen Uferwände des Glückstädter Binnenhafens wurden innerhalb der aufgefüllten sandigen Deckschicht 5 Peilbrunnen installiert (Abb. 23). Die Ergebnisse der vom ALR Itzehoe in der Zeit vom 3.11. bis 3.12.1997 ausgeführten Wasserstandsmessungen sind im Bericht Ki 97-694/5.12.1997 des Ing.-Büros

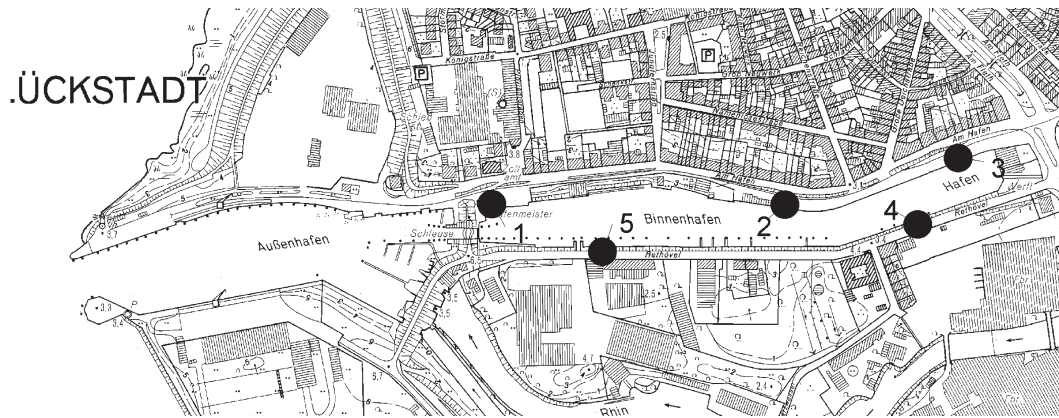


Abb. 23: Lage der Grundwassermessstellen am Binnenhafen Glückstadt

IGB Kiel (OVERBECK, 1997) tabellarisch dokumentiert und in ihrem Verlauf ausgewertet. Der Wasserspiegel im Glückstädter Binnenhafen ist wegen des i.d.R. geschlossenen Sperrwerkes Tide unabhängig. Dennoch ergeben sich durch die erhebliche Brauchwasserentnahme für die benachbarte Papierfabrik mit zwischenzeitlicher Wiederauffüllung des abgesenkten Hafenwasserspiegels mit Elbwasser deutliche Höhenschwankungen des Außenwasserstandes (Abb. 24).

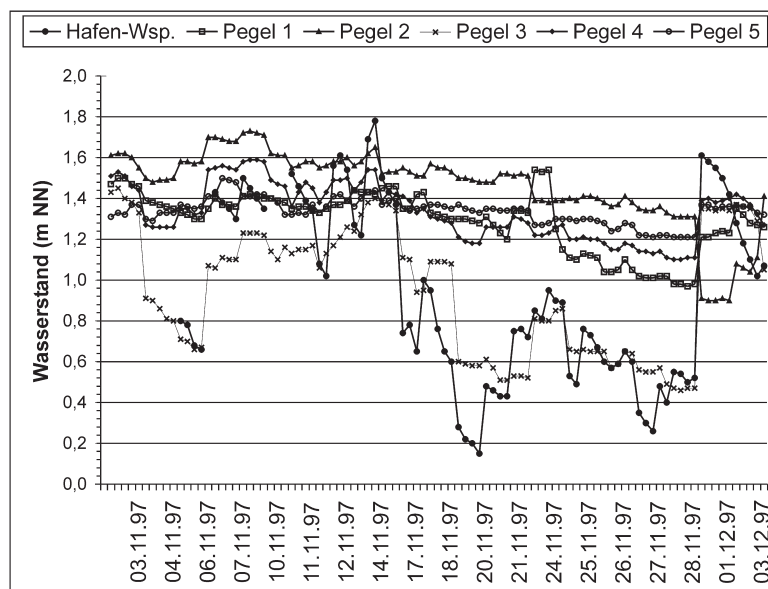


Abb. 24: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände am Glückstädter Binnenhafen

Die Höhenunterschiede zwischen dem Hafen- und Grundwasserstand hinter der Uferwand (= Dämpfung des oberen Grundwasserleiters) sind in der Abb. 25 für die einzelnen Pegelstellen grafisch dargestellt und die verschiedenen Messergebnisse zusätzlich in der Tab. 5 zusammengefasst.

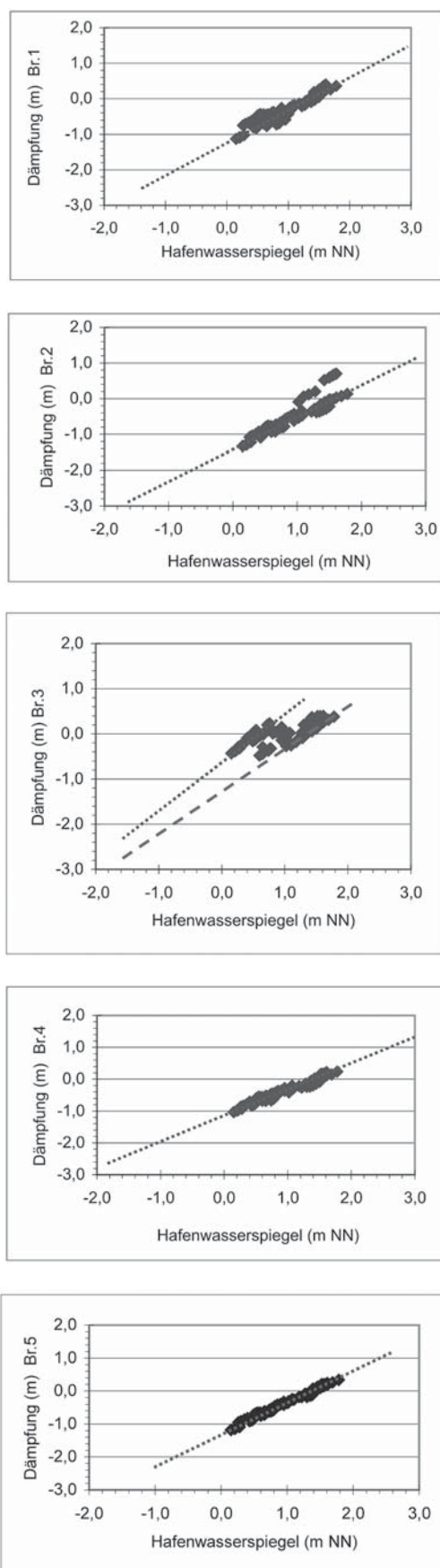


Abb. 25: Dämpfung des oberen Grundwasserspiegels am Glückstädter Binnenhafen

Tab. 5: Messdaten des Stauwasserspiegels am Glückstädter Binnenhafen

	Pegel 1	Pegel 2	Pegel 3	Pegel 4	Pegel 5
GOK (m NN)	+2,50	+2,56	+2,59	+3,21	+2,54
max. Wsp.	+1,54	+1,73	+1,45	+1,59	+1,49
min. Wsp.	+0,97	+0,90	+0,46	+1,10	+1,21
Dämpfung beim Hafen-Wsp. +1,5 m NN	0,20 m	-0,30 bis 0,60 m	0,10 bis 0,30 m	0,00 m	0,15 m
D beim Hafen-Wsp. +0,5 m NN	-0,60 m	-0,90 m	0,00 m	-0,70 m	-0,75 m
Wasserdruck (t) bei +0,15 m NN	1,30	1,55	0,60	1,20	1,35
Wasserdruck (t) bei -1,20 m NN	2,30	2,60 bis 3,05	1,85 bis 2,00	2,10	2,50

Aus den Messergebnissen lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen:

- die maximale Grundwasserspiegelhöhe ist unabhängig vom örtlichen Geländeniveau
- die täglichen Schwankungen des Grundwasserspiegels betragen max. 1–2 dm
- die Brunnen 1, 4 und 5 zeigen eine lineare Beziehung zwischen der Dämpfung des Stauwasserspiegels und dem Hafenwasserstand. Beim Br. 2 sind bei Außenwasserständen $> +1,0$ m NN zwei etwas unterschiedliche Korrelationen möglich
- die Ganglinie des Brunnens 3 lehnt sich in ihrem Verlauf mit einer anomal geringen Dämpfung des oberen Grundwasserspiegels, abweichend von allen anderen Messstellen, stark an die Schwankungen des Hafenwasserspiegels an (Abb. 24). Dies lässt auf eine größere Undichtigkeit der vorhandenen Uferwand in der Nähe des Brunnens 3 schließen.
- bei allen anderen Brunnen ergab sich für den tiefsten gemessenen Hafenwasserstand von $+0,15$ m NN ein zahlenmäßig etwas unter dem MThw liegendes Dämpfungsmaß von i.M. 1,35 m. Für einen Hafenwasserstand entsprechend dem MTnw von $-1,22$ m NN führte die Extrapolation der Messdaten zu einem vergleichbaren Wasserdruck auf die Uferwand wie im Hafen Tönning.

2.3 Gespannter Grundwasserspiegel

Deichsiel F.W. Lübkekoog

Die Baugrube für das neue, im Zuge der Deichverstärkung erforderliche Schöpfwerk schneidet mit einer Kote von $-4,0$ m NN verhältnismäßig tief in den Untergrund ein, wobei die unterlagernden Weichschichten ab einer Tiefe von $-5,4$ m NN von wasserführenden pleistozänen Fein- und Mittelsanden unterlagert werden. Das gespannte tiefere Grundwasserstockwerk steht seewärts in hydraulischem Kontakt zum Tidewasserspiegel der Nordsee. Zur Berechnung der Auftriebssicherheit der Baugrubensohle war die genaue Kenntnis der Grundwasserverhältnisse wichtig, die deshalb vom 1.12.2000 bis 21.4.2002 in einem mit einem Schreibpegel versehenen Brunnen überprüft wurden (Abb. 26). Der gespannte Grundwasserspiegel zeigt gegenüber der Tide die erwartete starke Dämpfung (Abb. 27 und 28). Die

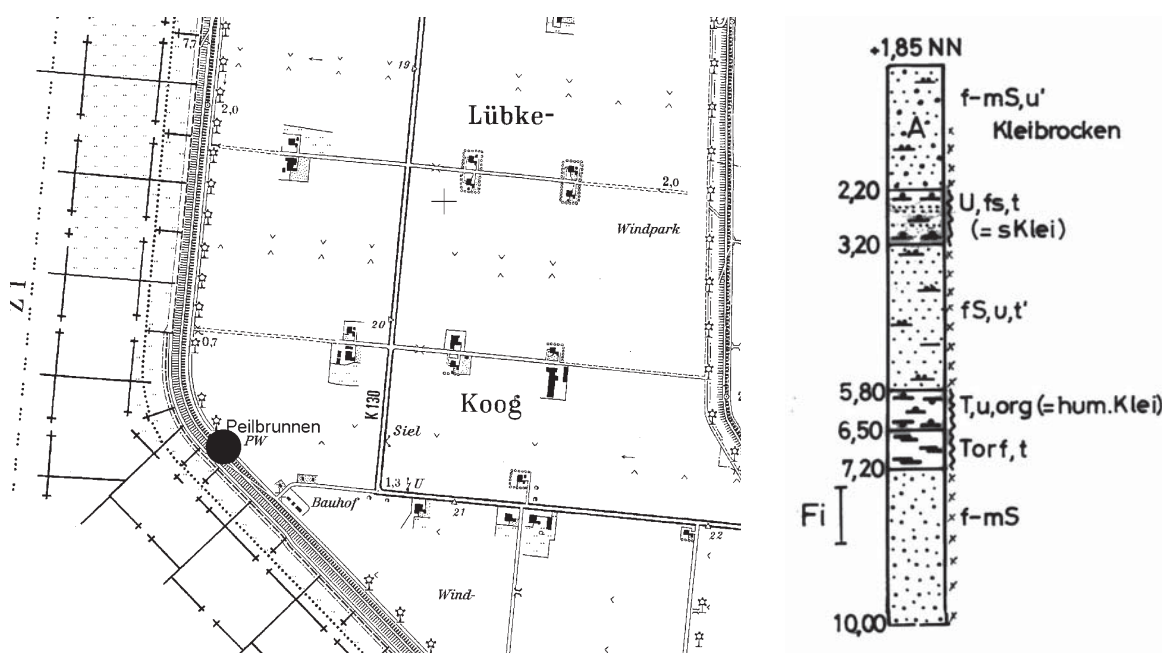


Abb. 26: Lageplan mit Bohrprofil und Lage der Filterstrecke am Schöpfwerk F.W. Lübkekoog

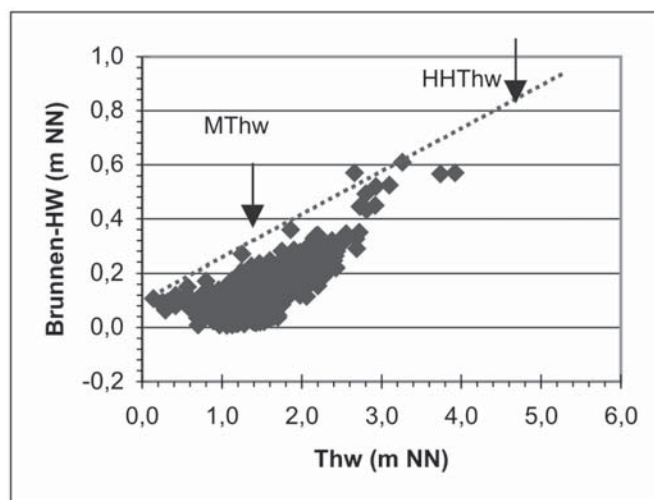


Abb. 27: Grund- vs. Tidehochwasser am Schöpfwerk F.W. Lübkekoog

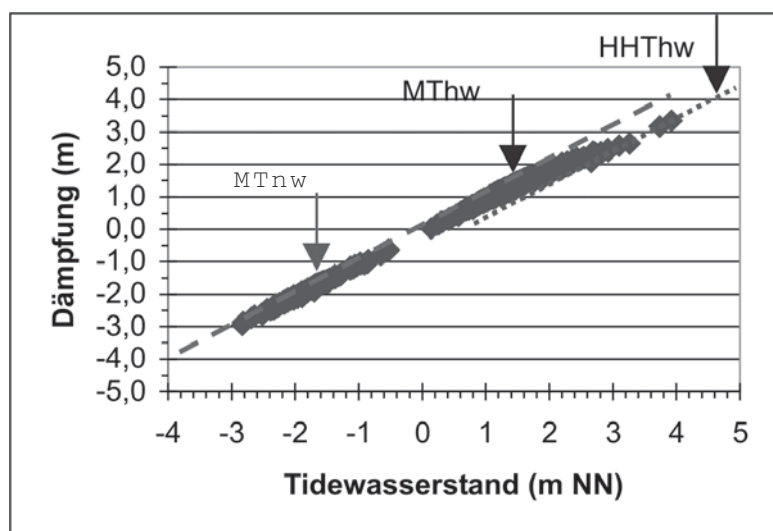


Abb. 28: Dämpfung des Tiefengrundwasserspiegels am Schöpfwerk F.W. Lübkekoog

bei gleichem Tidewasserstand etwas unterschiedliche Dämpfung des gespannten Tiefengrundwassers hängt mit den bei den Messungen nicht berücksichtigten Veränderungen des Luftdrucks zusammen. Für den höchsten bisher gemessenen Sturmflutwasserstand in Dagebüll (NN +4,72 m) ergibt sich ein maximaler Brunnenwasserstand am Schöpfwerk F. W. Lübkekoog von +0,85 m NN (Abb. 27 + 28).

Bauinsel Holmer Siel bei Nordstrand

Bei den Gründungsarbeiten für das am Rand des damaligen Tidestroms „Holmer Fähr“ gelegenen Bauwerkes Holmer Siel im Zuge der Vordeichung der Nordstrander Bucht war beim versehentlichen Durchrammen der verhältnismäßig geringmächtigen bindigen Eemschicht gespanntes Tiefengrundwasser angeschnitten worden. An der Schadensstelle wurde zu dessen Entspannung der Brunnen B 17 installiert (Abb. 29 u. 30).

Die Hauptzahlen der Wasserstände im Tidestrom „Holmer Fähr“ sind

HHThw	+5,70 m NN
MThw	+1,45 m NN
MTnw	-1,85 m NN
MSpTnw	-2,23 m NN
NNTnw	-3,50 m NN

Der Vergleich der Wasserstandsmessungen in B 17 mit dem Tideschreibpegel „Holmer Fähr“ zeigte, dass die Tide den Wasserdruck im gespannten Wasserleiter erheblich beeinflusst. In erster Näherung wurde davon ausgegangen, dass die Nulldruckfläche des Tiefengrundwassers etwa dem jeweiligen Tidewasserstand in der umgebenden Nordsee entspricht. Ohne Ansatz einer Dämpfung zwischen Tide- und Druckwasserspiegel war für Außenwasserstände über +0,7 m NN keine Auftriebssicherheit der tiefen, auf dem Niveau -4,60 m NN gelegenen Baugrubensohle gegeben. Zur Klärung der erforderlichen Anzahl von Entspannungsbrunnen wurden zunächst 3 Peilbrunnen abgeteuft und zusätzlich 3 Entlastungsbrunnen (E1, E2 + E4) eingerichtet, in der Untersuchungsphase nacheinander zugeschaltet und am 29.3.85 gemeinsam mit dem Brunnen B 17 in Betrieb genommen (SCHMIDT, 1985).

Wegen der kurzen Messphasen (22.–29.3. und 4.–8.4.85) wurde beim Vergleich des Grund- und Nordseewasserspiegels der gesamte Bereich der Tidekurve berücksichtigt.

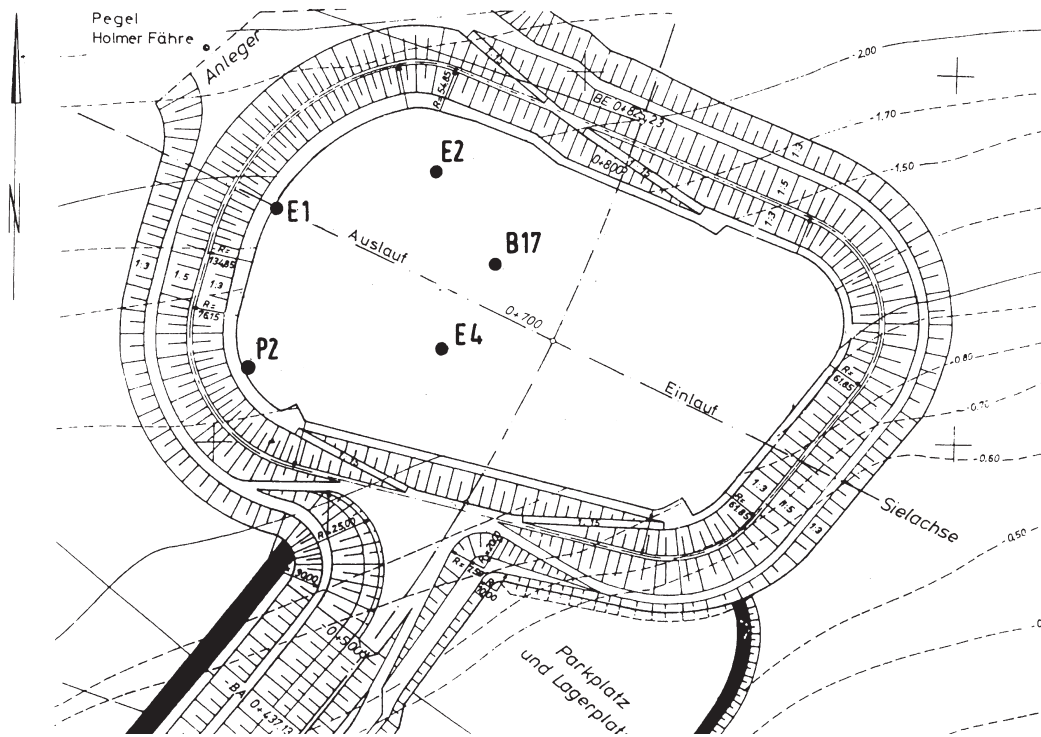


Abb. 29: Lageplan Bauinsel Holmer Siel

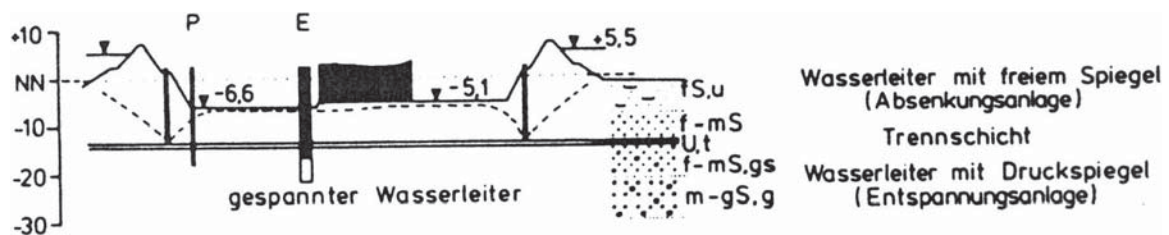


Abb. 30: Querschnitt der Bauinsel Holmer Siel mit kennzeichnendem Bodenprofil

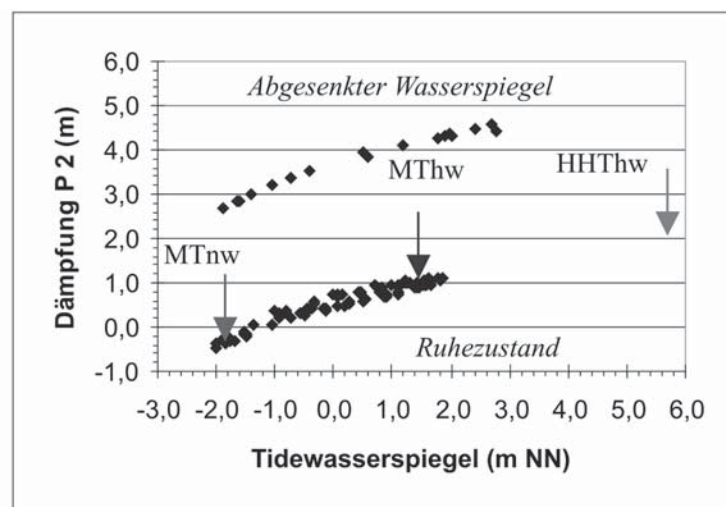


Abb. 31: Dämpfung des gespannten Grundwasserspiegels im Ruhezustand und bei voller Pumpenleistung der Brunnen B 17, E 1, E 2 + E 4 Bauinsel Holmer Siel

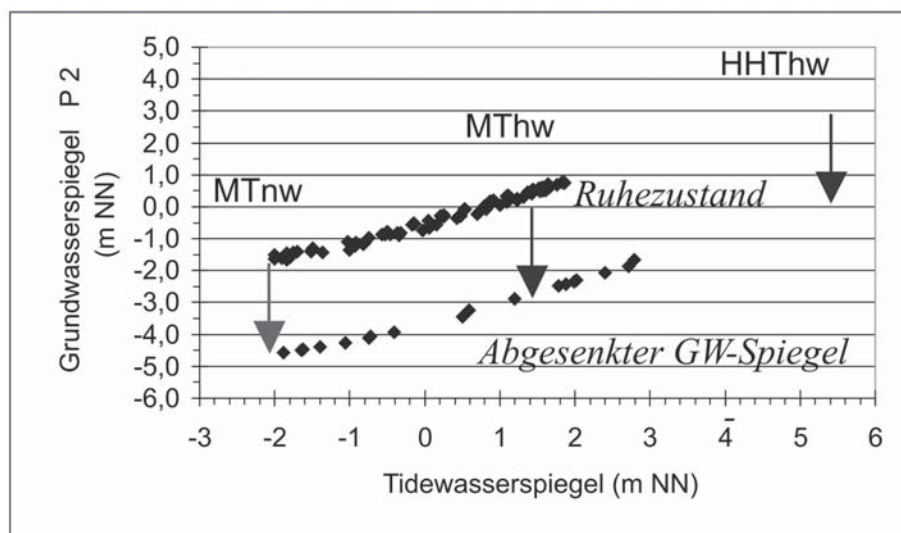


Abb. 32: Tide- und gespannter Grundwasserspiegel im Ruhezustand und bei voller Pumpenleistung der Brunnen B 17, E 1, E 2 + E 4 Holmer Siel

Zwischen dem Tide- und Druckwasserspiegel besteht trotz der Lage der Baustelle inmitten der Nordsee bei allen Außenwasserständen eine mit der Höhe des Tidewasserspiegels abnehmende Dämpfung (Abb. 31). Die Schwankungsbreite der Dämpfung bei gleichem Außenwasserstand von rd. 0,4 m im Ruhezustand ist wahrscheinlich auf den nicht berücksichtigten Einfluss von Luftdruckschwankungen während der Messphase zurückzuführen.

Mit jedem zugeschalteten Förderbrunnen verschiebt sich die Dämpfungsrate i.M. um 0,75 m nach oben. Mit Hilfe der 4 Förderbrunnen gelang es, das Tiefengrundwasser so weit zu entspannen, dass nach einer Extrapolation der Messwertkurven das Entspannungsziel von $D = 5,15$ m in der Baugrube für ein angenommenes Sturmflut-Bemessungshochwasser von $+5,50$ m NN erreicht werden konnte. Bei voller Pumpenlast und einem Absenkmaß von $-3,5$ m NN in der Baugrube betrug die durchschnittlich geförderte Wassermenge 400 cbm/h.

Die gespannten Grundwasserstandsmaxima und -minima traten generell zwischen 5 und 37 Minuten verspätet gegenüber der Tide auf, wobei die Grundwasserentnahme in den Förderbrunnen auf den Betrag der Phasenverschiebung keinen Einfluss hatte.

Laglumsiel/Insel Föhr

Im Zuge der Deichverstärkung auf der Insel Föhr war nördlich von Wyk der Neubau des Laglumsiels erforderlich. Die Lage des Bauwerkes bei Dkm 1+140 und der dortige Bodenaufbau sind aus der Abb. 33 ersichtlich.

Die Hauptzahlen der Wasserstände im Hafen Wyk sind

HHThw	+4,52 m NN
MSpThw	+1,38 m NN
MThw	+1,29 m NN
MTnw	-1,47 m NN
MSpTnw	-1,69 m NN
NNTnw	-2,10 m NN

Im eiszeitlichen Sand ist ein gespannter Grundwasserspiegel vorhanden, dessen Druckhöhe mit geringer, leicht schwankender Phasenverschiebung amplitudengedämpft mit dem Tidewasserspiegel variiert. Der gespannte Grundwasserspiegel liegt bei Tnw über, bei Thw unter dem Außenwasserstand. In der Abb. 34 ist für den mit einem Schreibpegel ausge-

rüsteten Peilbrunnen neben dem alten Sieleinlauf das Maß der Dämpfung als Spiegeldifferenz zwischen dem Tide- und Grundwasserstand gegen den zugehörigen Außenwasserstand aufgetragen.

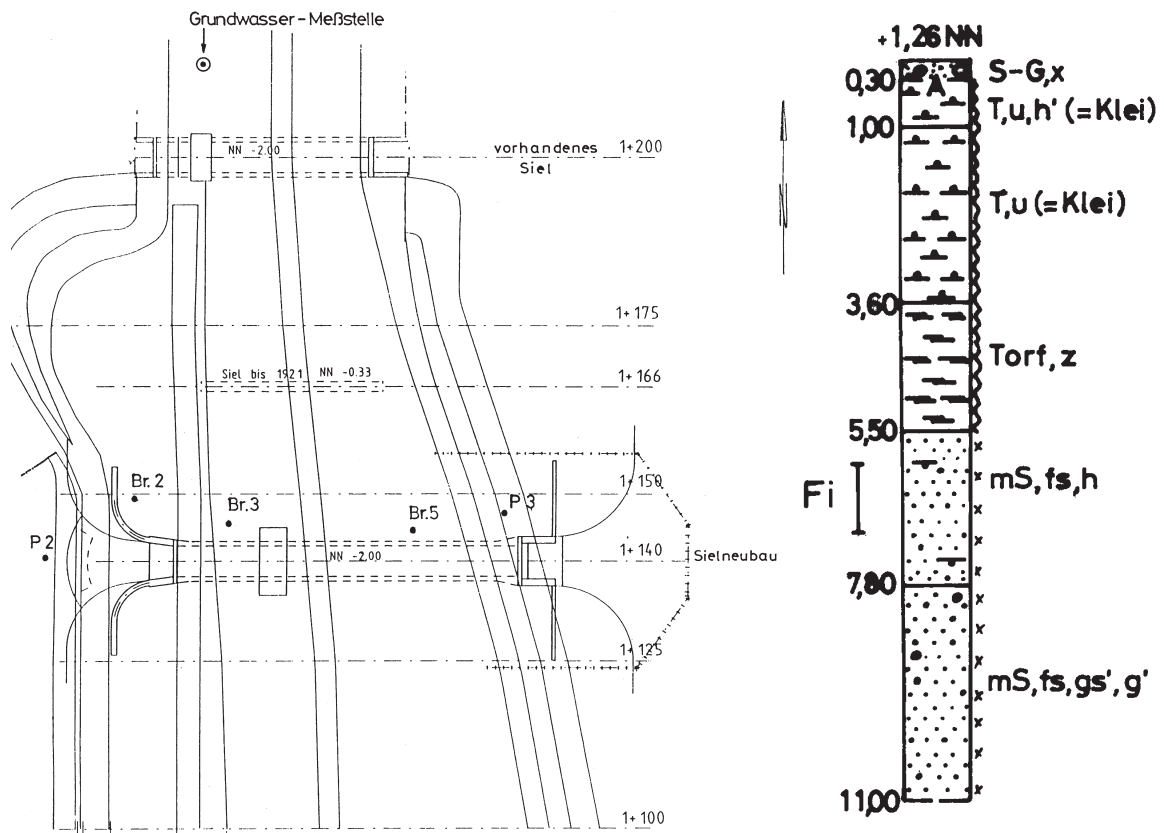


Abb. 33: Lageplan mit Bohrprofil und Lage der Filterstrecke am Laglumsiel/Föhr

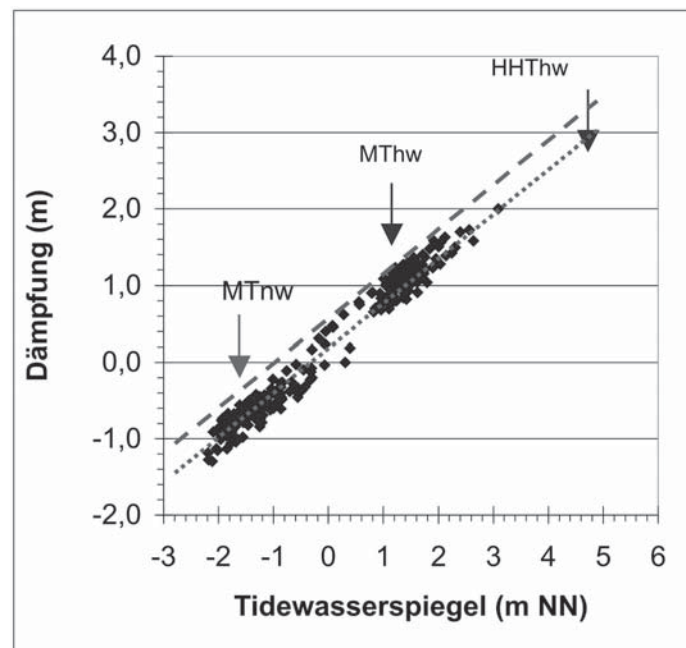


Abb. 34: Dämpfung des tiefen Grundwasserspiegels vs. Tidewasserstand am Laglumsiel

Die kurzfristig (für eine einwöchige Messperiode) auf einer Ausgleichsgeraden liegenden Messwerte der Dämpfung werden von mittelfristigen Schwankungen überlagert, die während der insgesamt 2-monatigen Messphase eine Verschiebung der Spiegeldifferenz bei gleichem Tidewasserstand um etwa 50 cm ergab. Wegen zu hoch eingestellter Empfindlichkeit des Pegelschreibers stieß der Messstift des Schreibpegels verschiedene Male an die Begrenzung der Pegelplattform, was z.T. eine Nullpunktverschiebung bis in dm-Größe (max. 47 cm) zur Folge hatte. Ein Teil der Messdaten wurde daher bei der Auswertung nicht verwendet. Ein zusätzlicher Messfehler kann durch die nicht berücksichtigten Luftdruckschwankungen entstanden sein. Für die Berechnung der Auftriebssicherheit der Baugrube mit einem Bemessungswasserstand $Thw = +2,50$ m NN wurde damit ein gespannter Grundwasserspiegel von $+1,30$ m NN angesetzt.

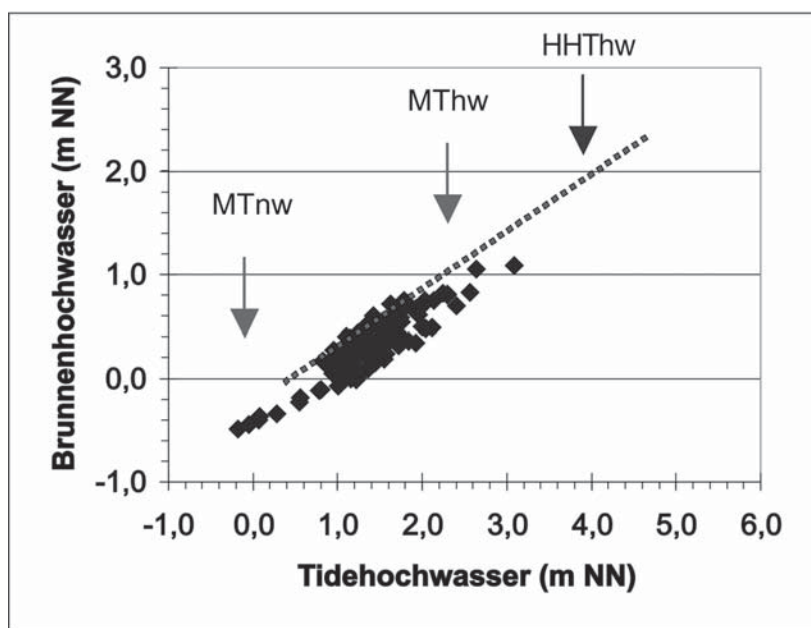


Abb. 35: Brunnen- vs. Tidehochwasser am Laglumsiel

Wegen der tiefen Lage der Gründungssohle von $-2,85$ m NN (im Auslauf $-3,25$ m NN) war eine Entspannung des tiefen Grundwasserstockwerkes erforderlich. Zur genauen Bemessung der Absenkanlage wurden mehrere Peil- und Förderbrunnen installiert und zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit des Sandes im Bereich der Filterstrecke zwei *Pumpversuche* ausgeführt (TEMMLER, 1994). Die vor Versuchsbeginn am 10.6.1993 ausgeführte Einmessung des Grundwasserspiegels ergab kurz vor dem Tideniedrigwasserstand (12,20 h) ein geringfügiges Absinken der Nulldruckfläche von $-0,82$ m NN am landseitigen Deichfuß bis auf $-0,90$ m NN unter der Deichkrone (BW-Mitte). Bei der zweiten Messung am 16.6.93 (11.30 h) kurz vor dem Hochwassermaximum wurde unter der Deichaußenböschung eine flach (NN $+0,36$ bis $+0,27$ m), landwärts steiler bis auf $+0,05$ m NN abfallende GW-Nulldruckfläche registriert (Abb. 36). Auch der etwas stärkere Grundwasseranstieg in den see-seitigen Förderbrunnen 7 und 8 gegenüber den landnäheren Brunnen 1 und 2 (Abb. 33) bei einer Änderung des Tidehochwasserspiegels um $1,0$ m sprechen dafür, dass das gespannte Grundwasser im Bauwerksbereich im Wesentlichen von der unmittelbar angrenzenden Nordsee her gespeist wird.

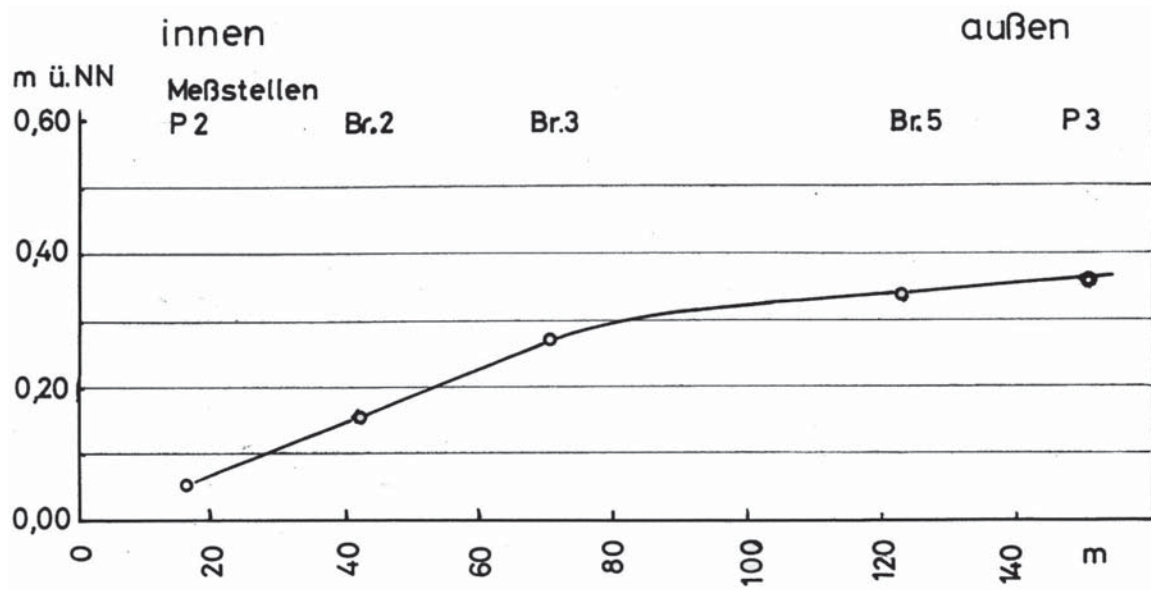


Abb. 36: Verlauf der GW-Nulldruckfläche am Laglumsiel bei Thw am 16.6.1993 (11.30 h)

Bauhofdock Husum

Im Rahmen der Grundinstandsetzung des Bauhofdocks am Außenhafen Husum kam dem Grundwasserdruck auf die Docksohle eine besondere Bedeutung zu. In den bindigen Weichschichten ist ein *oberflächennaher Stauwasserspiegel* entwickelt, der mit jahreszeitlichen, niederschlagsabhängigen Schwankungen der unterschiedlichen Geländehöhe folgt (Abb. 37). Die gemessenen Grundwasserstände entsprechen einer normalen, parabelförmigen Sickerlinie mit der Docksohle (NN -0,66 bis -1,16 m) als Vorflut.

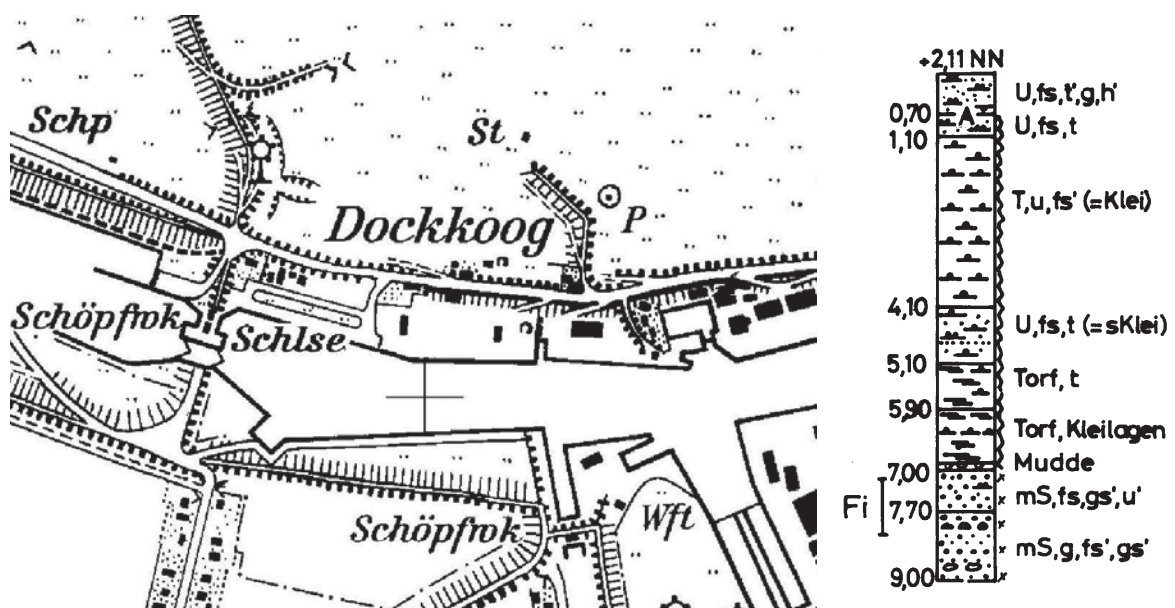


Abb. 37: Lageplan und Bohrprofil mit Lage der Filterstrecke am Bauhofdock Husum

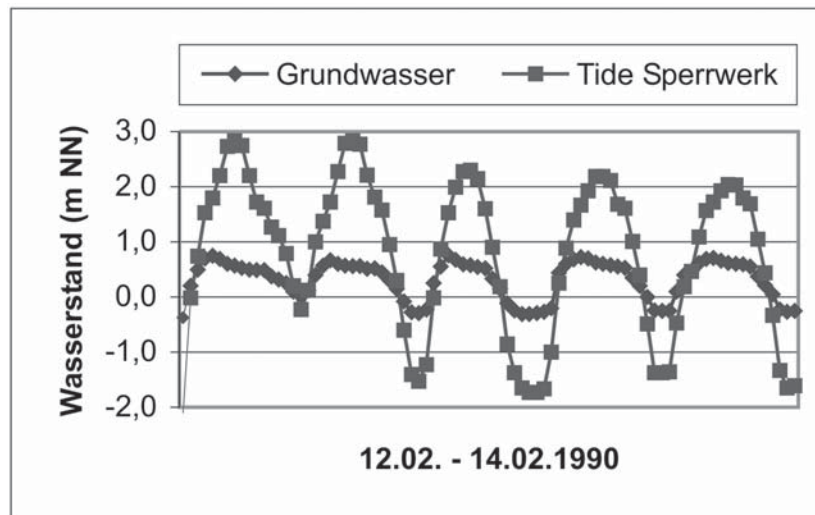


Abb. 38: Schwankungen des Tide- und Tiefengrundwassers vom 12.–14.2.1990 am Bauhofdock Husum

Die Sande im Liegenden der Weichschicht führen *gespanntes Grundwasser*. In der Abb. 38 sind für den Zeitraum vom 12.–14.2.90 die am Schreibpegel gemessenen Druckschwankungen im gespannten Wasserleiter gegen die Tideschwankungen am Sperrwerk vor dem Husumer Außenhafen aufgetragen.

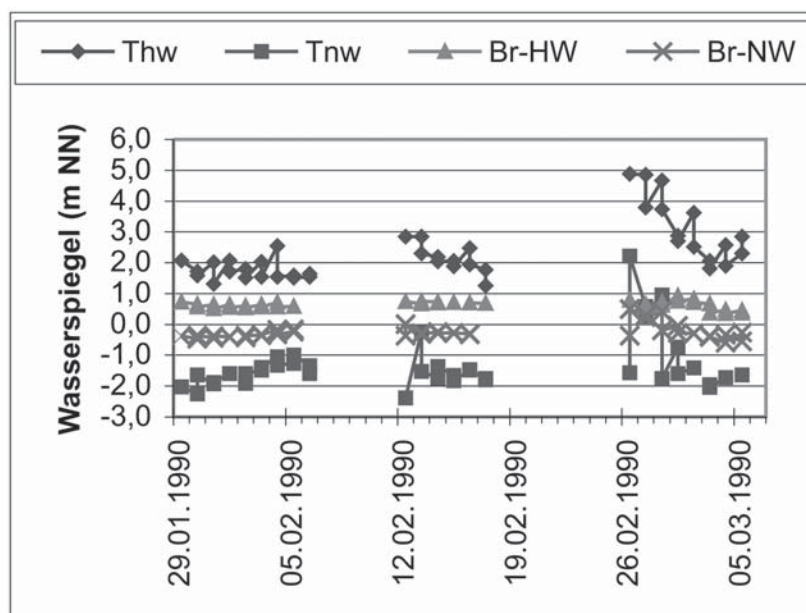


Abb. 39: Mittelfristiger Verlauf der Wasserstände am Bauhofdock Husum

Die Auswertung sämtlicher Messungen vermittelt die folgenden Erkenntnisse:

- Die Veränderungen des Druckwasserspiegels verlaufen gegenüber den Tideschwankungen stark gedämpft. Während das GW-Minimum auf die Veränderungen des Tideminimums deutlich reagiert, z.B. ein anormal hohes Niedrigwasser zwischen zwei Sturmtiden einen erheblichen Anstieg des gespannten Grundwasserspiegels um rd. 80 cm zur Folge

hatte, zeigt der Maximalwert im Brunnen unabhängig von den beträchtlichen Schwankungen des Tidehochwassers (einschließlich einer vor dem Sperrwerk bis auf NN +4,90 m aufgelaufenen Sturmflut) nur geringe Höhendifferenzen zwischen +0,50 und +0,85 m NN

- Die Eintrittszeiten des höchsten/tiefsten Grundwasserspiegels streuen gegenüber dem Zeitpunkt des zugehörigen Tidemaximums bzw. -minimums teilweise erheblich mit $\pm$ Abweichungen bis zu 3 Stunden
- Das in der hochgelegenen sandigen Geest versickernde Niederschlagswasser strömt teils über die freien Vorfluter (Husumer Au), teils unterirdisch zum Hafen. Der seewärts verlaufende Grundwasserstrom wird durch das Tidehochwasser zeitweise gebremst, zum anderen von einer tideabhängigen, landwärts gerichteten Druckwelle überlagert.

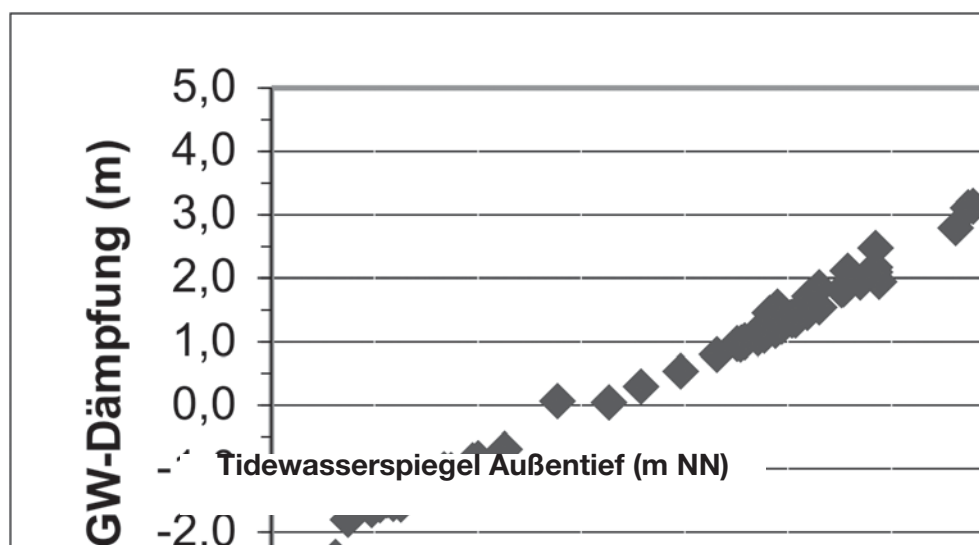


Abb. 40: Grundwasser- vs. Tidewasserstand am Bauhofdock Husum

- In der Abb. 40 ist von dem Messzeitraum vom 29.1.–26.3.90 die Dämpfung des Grundwasserspiegels gegen den zugehörigen Tidescheitelwasserstand aufgetragen. Für alle Außenwasserstände $< +2,0$ m NN ergab sich eine annähernd geradlinige Beziehung zwischen beiden Wasserständen. Bei höherem Tidewasserstand in der Nordsee und geschlossenem Sperrwerk vor dem Außenhafen 600 m westlich des Docks steigt der gespannte GW-spiegel nicht mehr an. Bezeichnenderweise wurde der höchste gemessene Brunnenwasserstand von NN +0,93 m am 1.3.90 erst *nach* einer bis auf +4,8 m NN aufgelaufenen Sturmflutserie bei schon deutlich gefallenem Außenhochwasser ($T_{hw} = +2,88$ m NN) registriert.

Peilbrunnen Deichsiel Neufeld/Elbe

Der im Zuge der Deichverstärkung erforderliche Neubau des Deichsiels erfolgt mit einer eingespundeten, tiefen Baugrube ($-3,25$ m NN) elbseitig inmitten des vorhandenen, tidebeeinflussten Außentiefs (TEMMLER, 1999). Die Hauptwasserstände im Hafen Neufeld sind

HH T_{hw}	+5,40 m NN
M T_{hw}	+1,88 m NN
M T_{nw}	-0,70 m NN
NN T_{nw}	-2,50 m NN

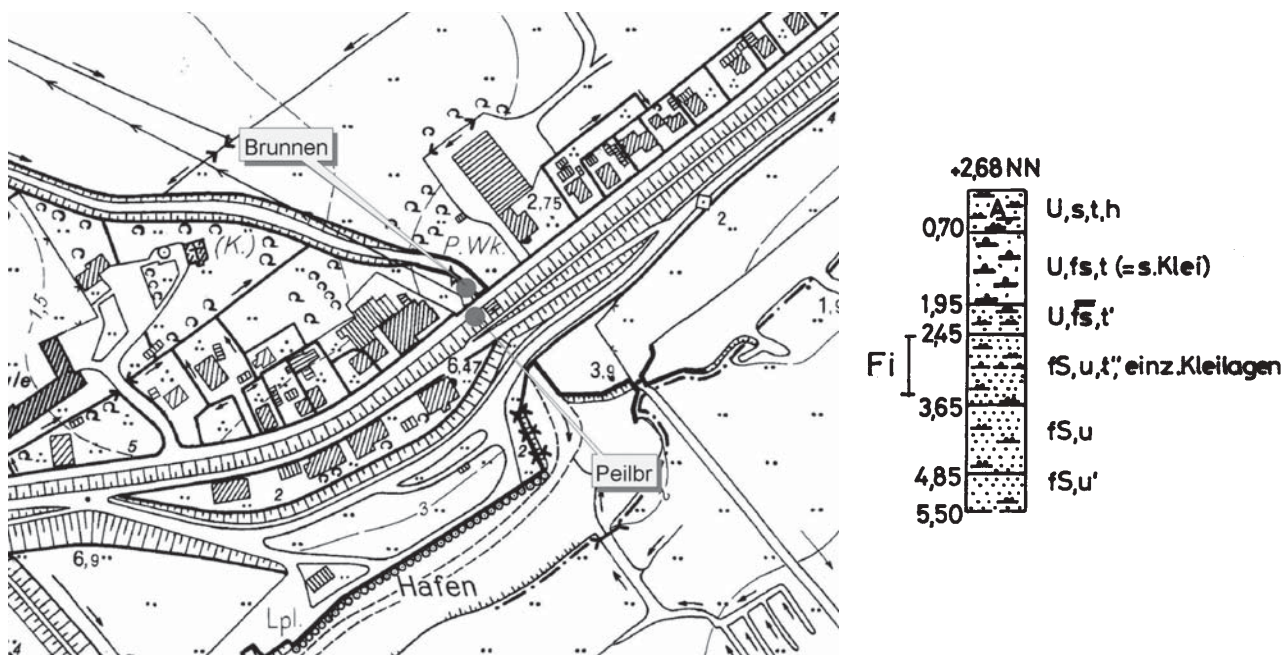


Abb. 41: Lageplan mit Bohrprofil am Deichsiel Neufeld

Im Juni 1999 wurde vom LANU am Innendeichfuß 7 m westlich der vorhandenen Sielachse eine 5,5 m tiefe Kleinbohrung verfiltert (Pbr 1). Die 1 m lange Filterstrecke liegt im stark schluffigen Wattenfeinsand unter einer 3 m mächtigen Kleiüberdeckung (Abb. 41). Die vom ALR Husum, Abt. Küstengewässerkunde Büsum, eingemessenen Wasserstände ergaben für den 2-monatigen Messzeitraum vom 2.7.–6.9.99 geringe, im Höhenbereich NN +0,65 bis +1,02 m liegende, von den Tideschwankungen im benachbarten Hafenbecken weitgehend unabhängige Veränderungen des Grundwasserstandes (Abb. 42).

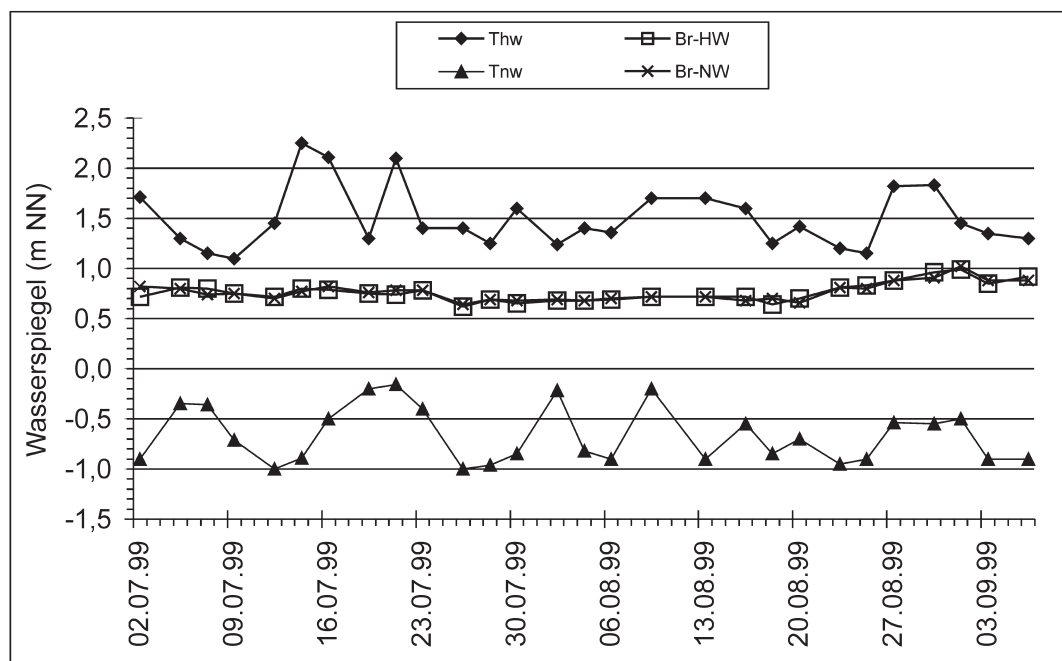


Abb. 42: Zeitlicher Verlauf des Tide- und Grundwasserstandes im Peilbrunnen Neufeld

Die Dämpfung als Differenz zwischen Tide- und Grundwasserspiegel korreliert linear gegen den Hafenwasserspiegel (Abb. 43). Die *relative*, auf den Außenwasserstand bezogene Dämpfung schwankt zwischen 0,28 und 0,65 (Abb. 44); hierbei sind die Luftdruckschwankungen im Messzeitraum nicht berücksichtigt. Unabhängig vom jeweiligen Tidewasserstand im Hafen ergab sich für den gespannten Wasserspiegel im Schluffsand unter der Kleischicht ein Bemessungswasserstand (Tide-Wsp-Dämpfung) von NN +0,70 m.

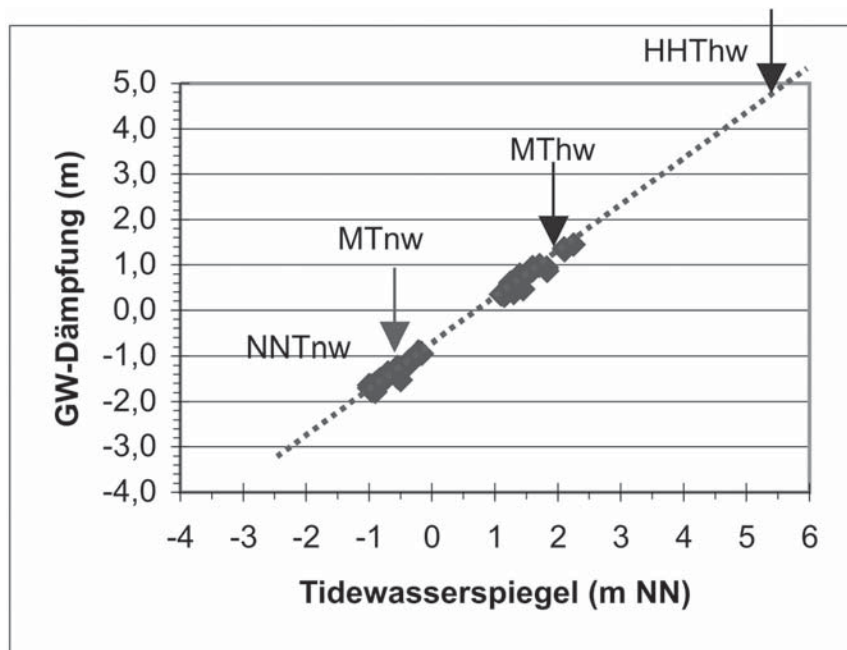


Abb. 43: Dämpfung des gespannten Grundwasserspiegels im Peilbrunnen Neufelder Siel

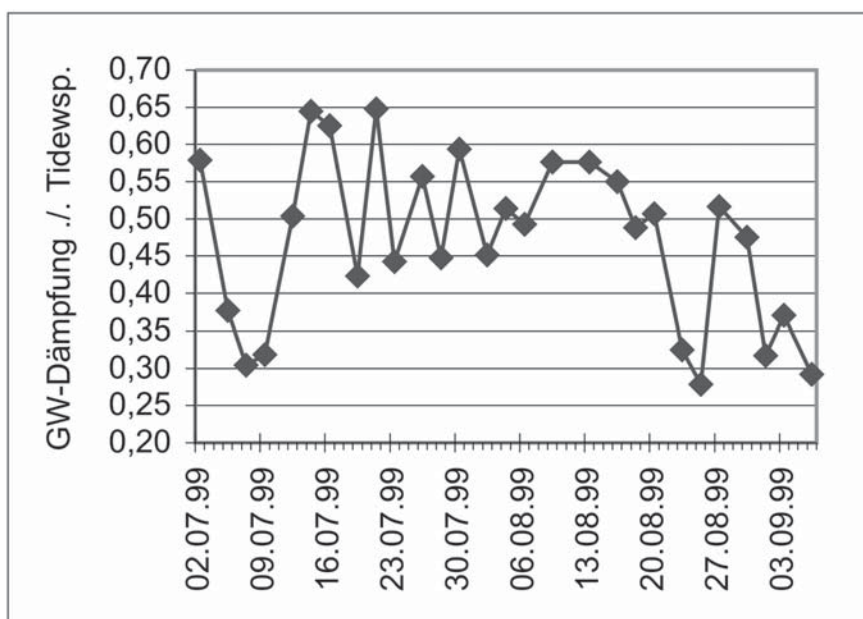


Abb. 44: Zeitlicher Verlauf der relativen Grundwasser-Dämpfung im Peilbrunnen Neufelder Siel

Messstelle Siel Neufeld

An einem zweiten, mit einem Schreibpegel ausgerüsteten Brunnen im Deichhinterland (Abb. 41) wurde für eine Filtertiefe zwischen $-3,0$ und $-4,0$ m NN im Zeitraum vom 6.10.–10.12.1999 auch für außergewöhnliche Tidehochwasserstände ($-0,20$ bis $+4,67$ m NN) die Beziehung zwischen dem Tidewasserstand im Hafen Neufeld und dem gespannten unteren Grundwasserspiegel überprüft (Abb. 45+46). Bereits durch die etwas erhöhten Vorlaufzeiten einige Tage vor der schweren Sturmflut vom 3.12.1999 stieg der mittlere Grundwasserspiegel stark an und erreichte seinen Maximalwert von $+1,65$ m NN um 22:20 h = 1:40 h nach dem Scheitelpunkt der Sturmflut. Nach diesem Ereignis wurden auch bei stark zurück-

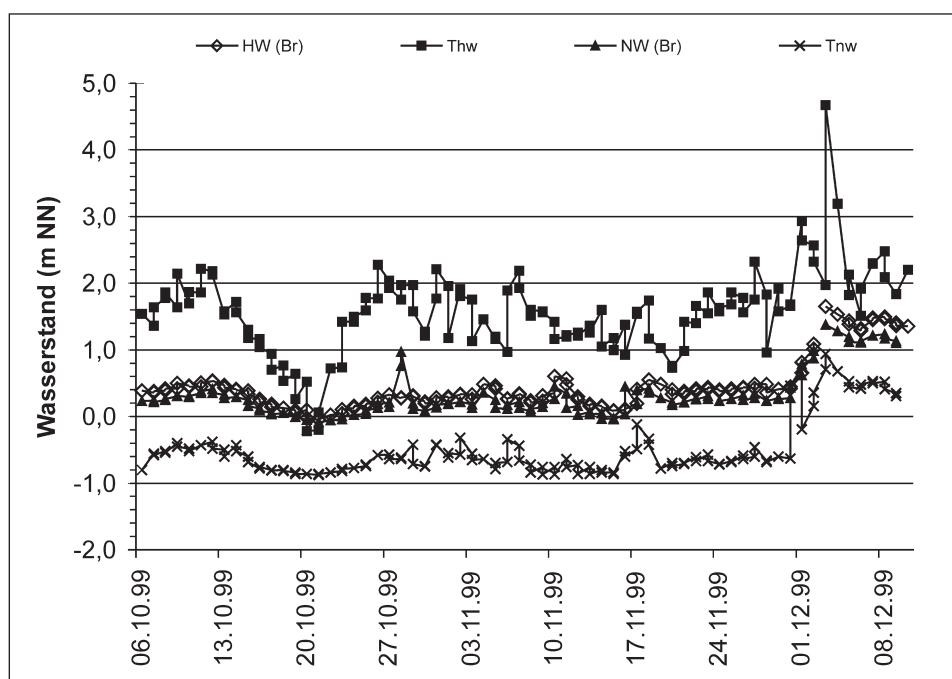


Abb. 45: Zeitlicher Verlauf der Wasserstände am Siel Neufeld

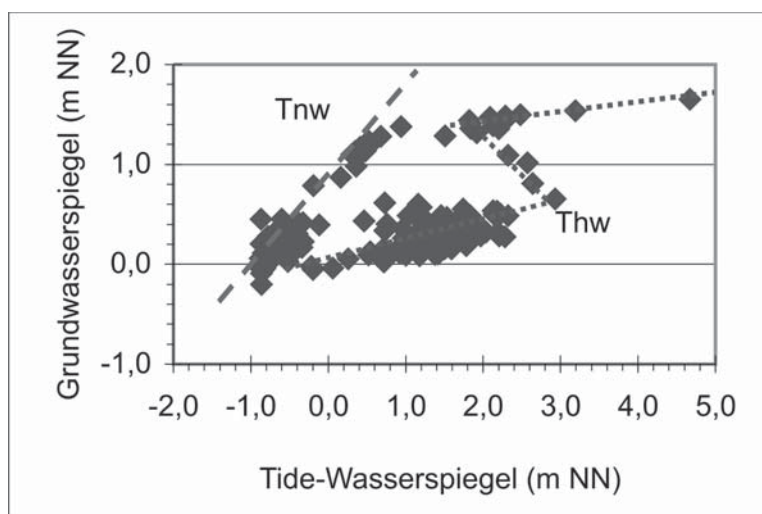


Abb. 46: Grund- vs. Tidewasserstand am Siel Neufeld

gehenden Außenwasserständen zwischen +2,6 und +1,5 m NN noch deutlich erhöhte Grundwasserspiegelstände zwischen +1,5 und +1,0 m NN registriert (Abb. 46).

In der Abb. 47 ist die Dämpfung des gespannten Grundwasserspiegels gegen den Tidewasserstand aufgetragen. Innerhalb des Messzeitraumes wurden bei gleichem Außenwasserstand Phasen mit größerer und niedrigerer absoluter wie relativer, auf den Tidewasserstand bezogener Dämpfung registriert (Abb. 47). Geringe Dämpfungsraten, d.h. vergleichsweise

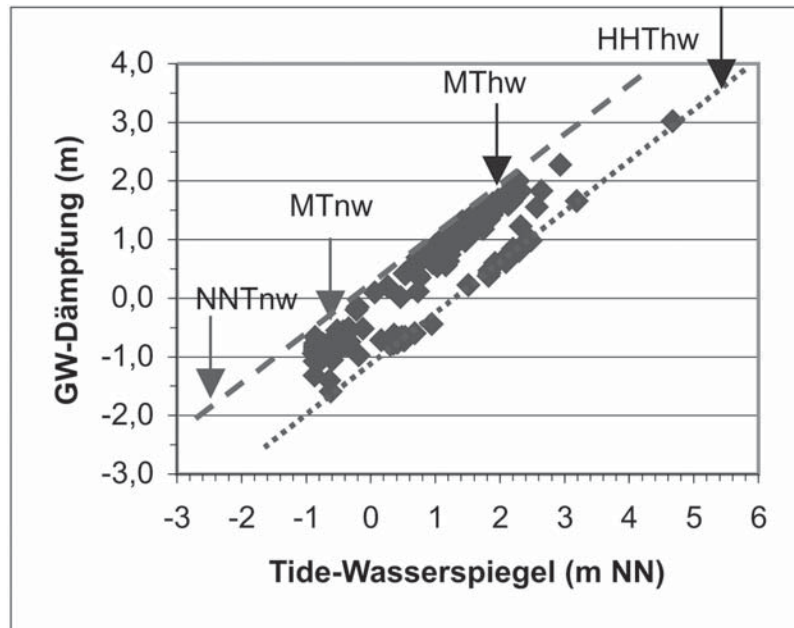


Abb. 47: Dämpfung des tiefen Grundwasserspiegels vs. Tidewasserspiegel am Deichsiel Neufeld

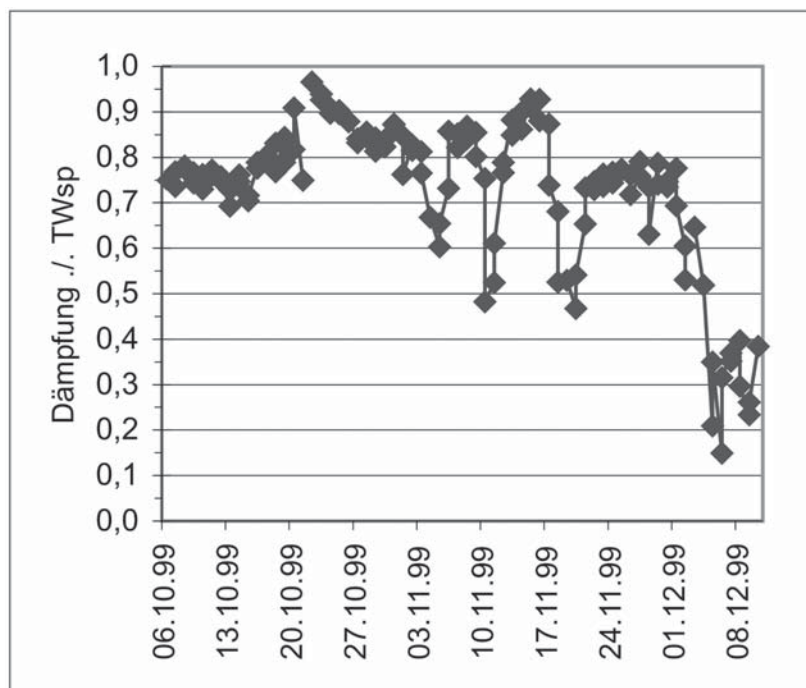


Abb. 48: relative Dämpfung des gespannten Grundwasserspiegels am Deichsiel Neufeld

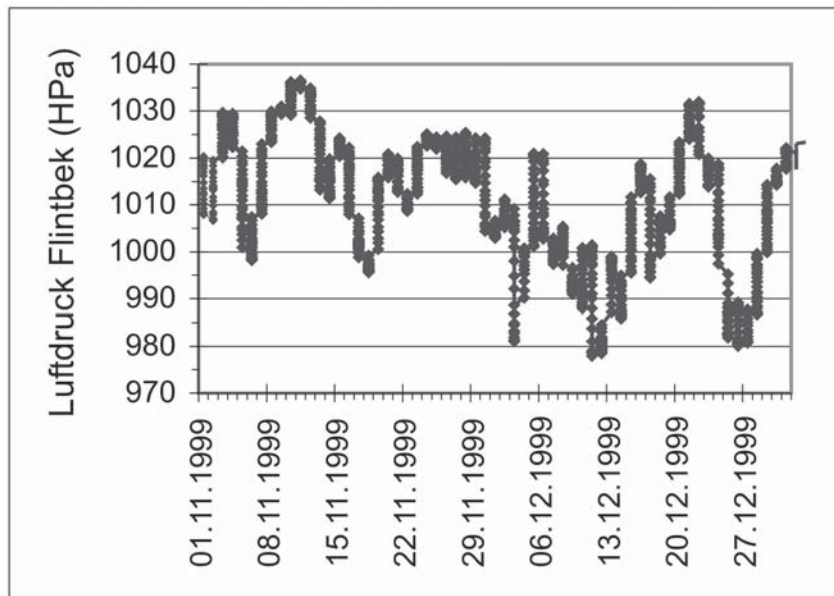


Abb. 49: Luftdruckverlauf im LANU Flintbek

hohe Brunnenwasserstände, wurden kurzfristig 3-mal im November 1999 sowie durchgehend am Ende der Messperiode nach dem 5.12.99 registriert. Der relative Grundwasserspiegelanstieg am 5. und 6.11. sowie Anfang Dezember 1999 kann mit einem zeitgleichen Luftdruckabfall (gemessen im LANU Flintbek [Abb. 49] sowie an der 23 km westlich von Neufeld gelegenen Klimastation Cuxhaven; beide Messreihen sind nahezu identisch) zusammenhängen. Andere ausgeprägte Minima der relativen Dämpfung (z.B. am 10. + 11.11., am 18.–20.11. sowie am 3.12.99) fallen mit ausgeprägten Hochwerten des Luftdrucks zusammen und lassen sich daher nicht durch das Wettergeschehen erklären. Da die höchsten Grund- und Tidewasserstände bei Sturmfluten und i.d.R. ausgeprägtem Tiefdruck eintreten, ist für die Bemessung des Auftriebes durch den tieferen gespannten Grundwasserspiegel auf die Bauwerkssohle die Untergrenze der Variationsbreite der GW-Spiegeldämpfung (punktierte Linie in der Abb. 47) maßgebend. Für den höchsten bislang gemessenen Sturmflutwasserstand resultiert daraus für die Absenkung des gespannten Grundwasserspiegels unter das Niveau der Baugrubensohle (–3,25 m NN) ein

$$H_{w1} = (HHThw - D_{max}) = (+5,40 - 3,60) = +1,80 \text{ m NN im Winter sowie}$$

$$H_{w2} = +3,50 - 1,90 = +1,60 \text{ m NN im Sommer.}$$

Der Unterschied gegenüber dem Messergebnis vom benachbarten Peilbrunnen kann in der größeren Tiefe des Brunnenfilters der Messstelle Neufeld im schwach schluffigen Wattenfeinsand mit größerer Wasserdurchlässigkeit liegen.

Zwischen den Eintrittszeitpunkten des jeweiligen Tide- und Grundwassermaximums bestehen beträchtliche Schwankungen. In der Abb. 50 ist die Differenz der Eintrittszeiten (positiv bei vorausseilendem, negativ bei nachlaufendem Außenwasserspiegel) im Messzeitraum für die Hochwasserbedingungen grafisch dargestellt.

Für die Hochwassersituation ist im Verlauf mehrerer Tiden eine rhythmische, jeweils nahezu gleichartige Veränderung der zunächst mit starkem Vorlauf (Werte zwischen 90 und 155 Minuten) eintretenden Außenwasserstände zu nahezu identischen Eintrittszeiten mit anschließend wiederum sprunghafter Zunahme zu einem mehrstündigen Vorlauf des Ti-

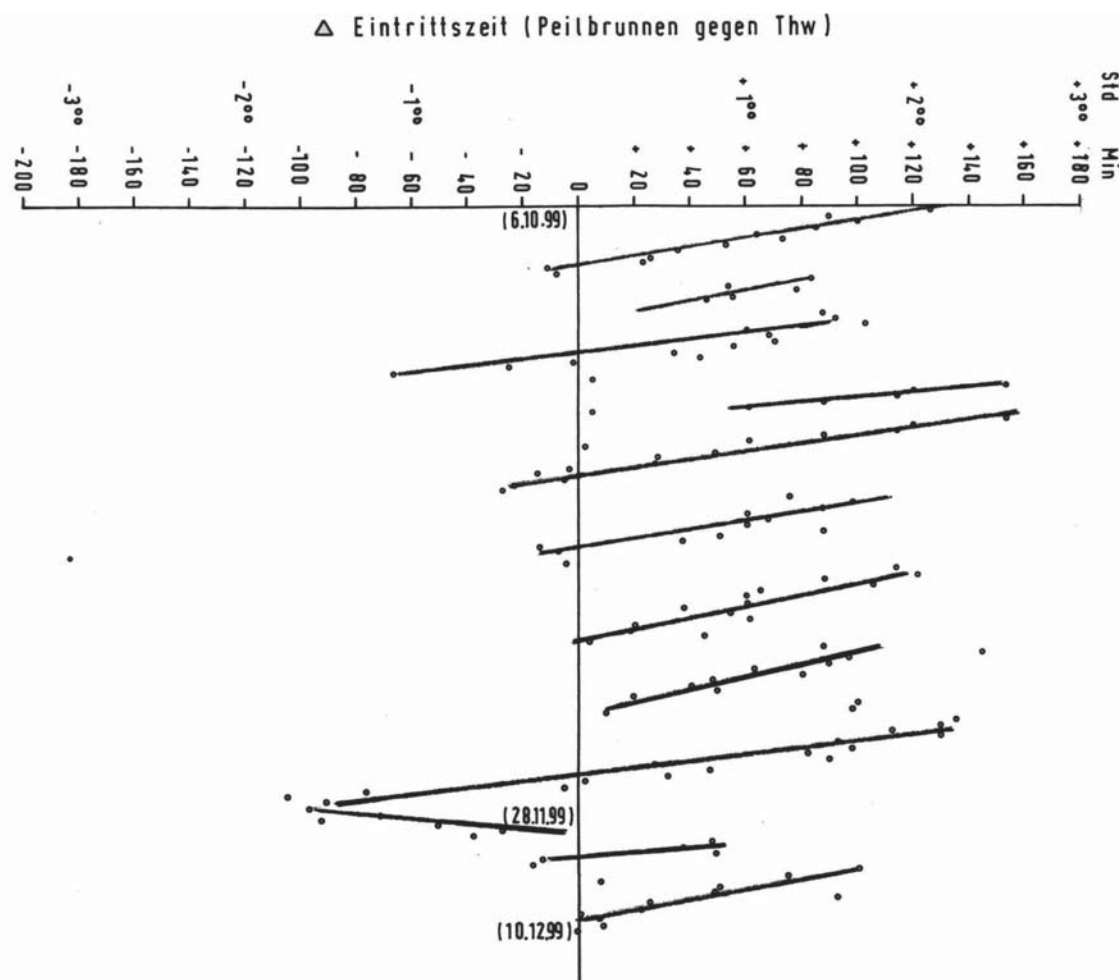


Abb. 50: Differenz der Eintrittszeiten zwischen Thw- und Grundwasser-Scheitelständen am Siel Neufeld

deh höchststandes kennzeichnend. Unter besonderen Bedingungen kann das Grundwasserstandsmaximum aber auch bis zu 2 Stunden *vor* dem Erreichen des Tidewasserscheitels eintreten. Unter Niedrigwasserverhältnissen tritt das Tideminimum i.d.R. zeitlich vor dem zugehörigen Tiefpunkt der Grundwasserganglinie ein. Teilweise sind auch hier rhythmische Veränderungen der Eintrittszeiten in einer Messkette erkennbar, doch sind für diese Situation ebenfalls große Schwankungen zwischen -90 und $+130$ Minuten bei unmittelbar folgenden Tidekurven kennzeichnend.

Deichsiel Neufelder Koog/Elbe

Für dieses gleichfalls im Zuge der Deichverstärkung Neufeld im Gründungsniveau $-2,20$ / $-2,40$ m NN neu zu errichtende, rd. 450 m SW des Neufelder Siels gelegene Bauwerk wurde in der Altdeichkrone neben einem zur Feststellung des Stauwasserspiegels im Deich dienenden Flachbrunnen ein weiterer Peilbrunnen zur Beobachtung der Druckveränderungen im gespannten Tiefengrundwasser angelegt (Abb. 51). Abb. 52 zeigt den gemessenen Verlauf der Wasserstandsmaxima und -minima. Niedrige Luftdruckwerte (Abb. 55) entsprechen nur teilweise hohen Grundwasserständen mit einer geringen relativen Dämpfung (Abb. 54). Für den höchsten, bisher gemessenen Sturmflutwasserstand von $+5,40$ m NN ergibt sich mit der Untergrenze der Messwertschwankungen (punktierter

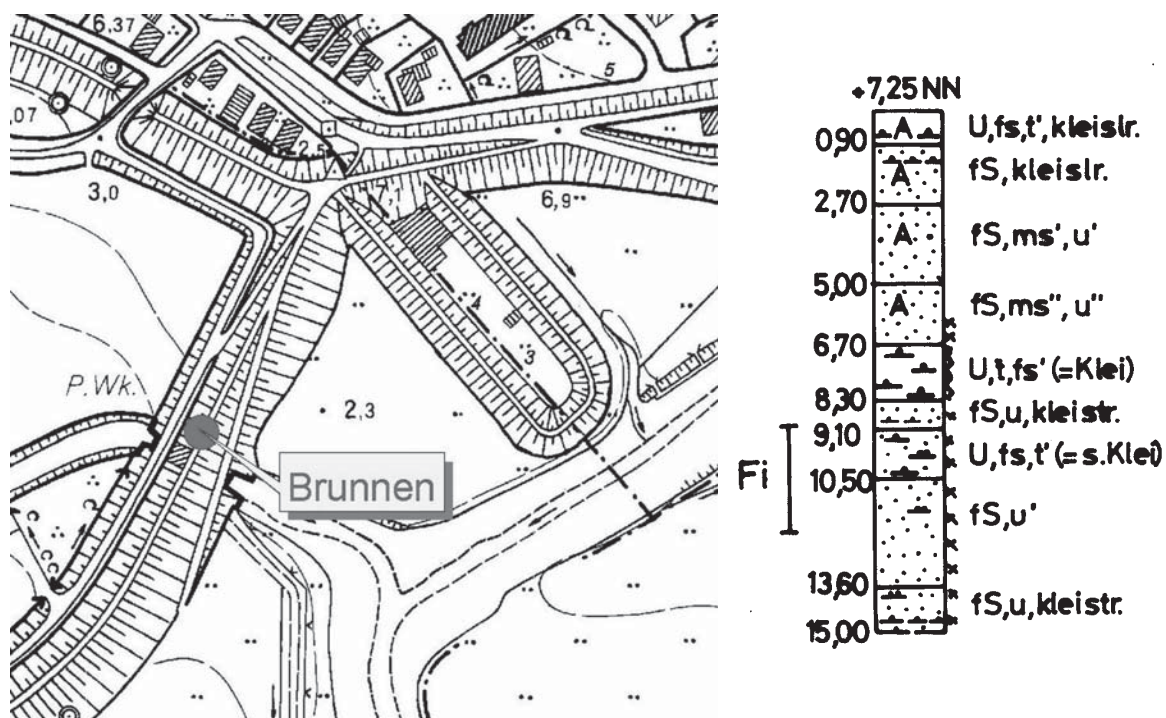


Abb. 51: Lageplan und Bohrprofil Siel Neufelder Koog

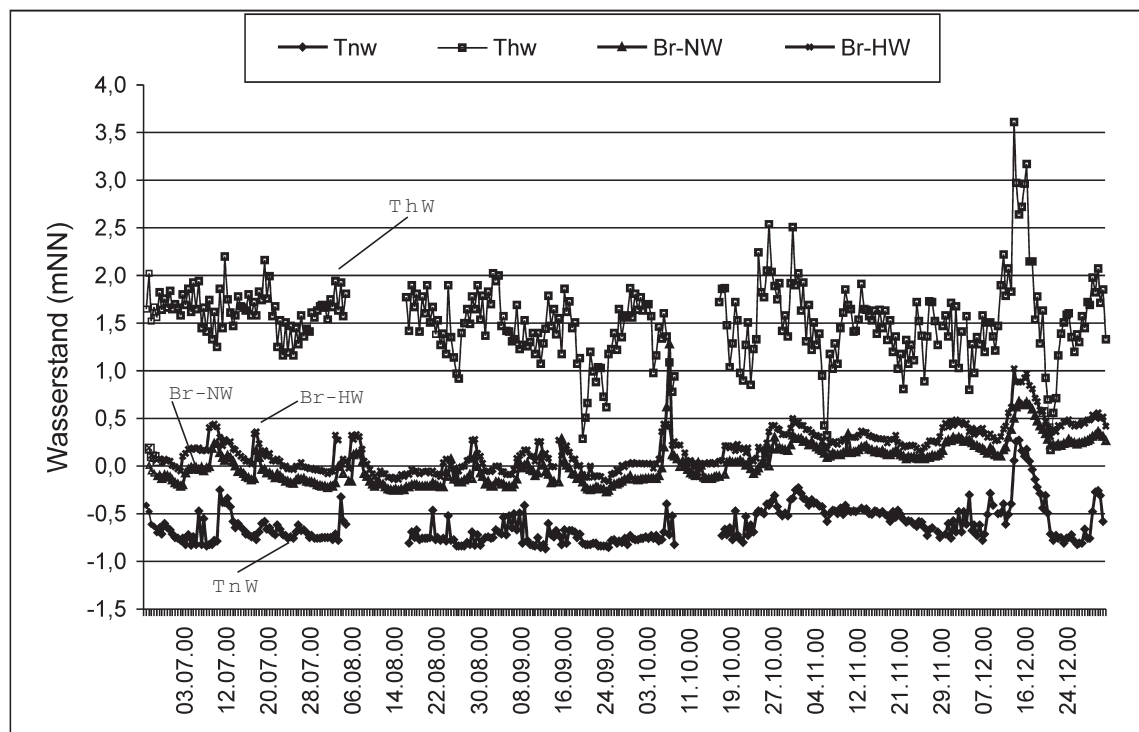


Abb. 52: Verlauf des Tide- und Tiefengrundwassers am Siel Neufelder Koog

Linie in Abb. 53) eine Dämpfung von 4,20 m. Dies entspricht einem Bemessungswasserstand des Tiefengrundwassers im Winter von NN +1,20 m. Für das maßgebende Sommerhochwasser von NN +2,50 m liegt der entsprechende Grundwasserstand bei NN +0,80 m.

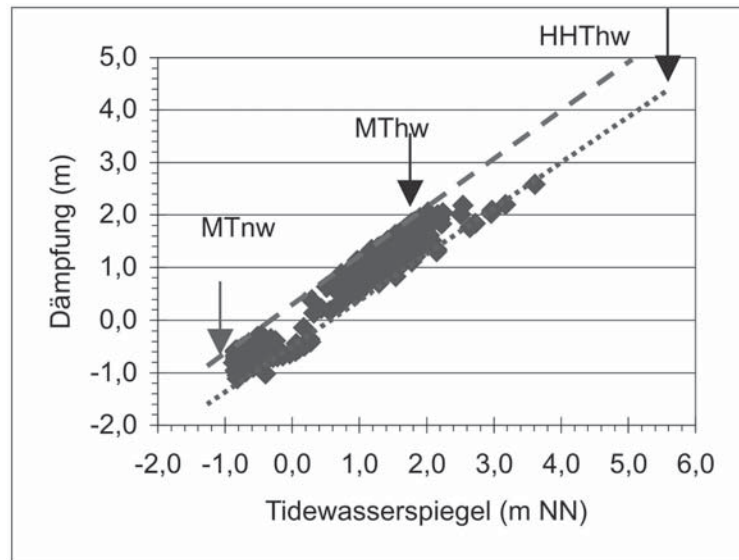


Abb. 53: Dämpfung des Tiefengrundwassers am Siel Neufelder Koog

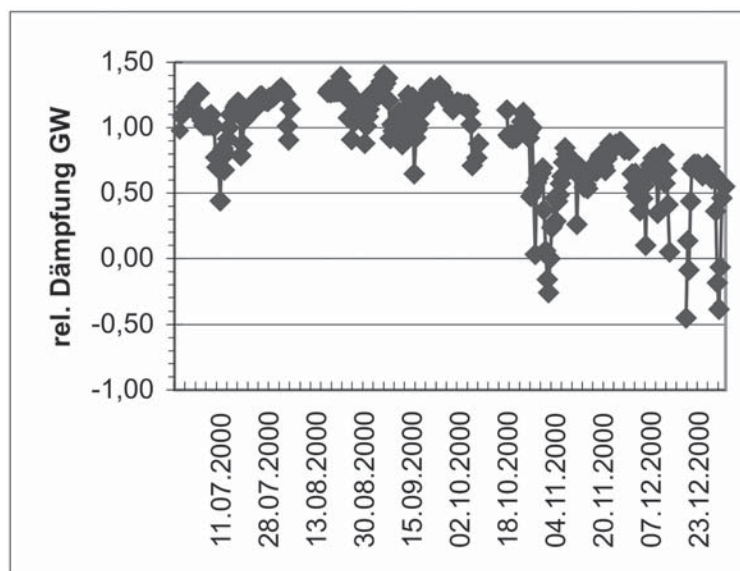


Abb. 54: Relative Dämpfung des gespannten Grundwasserspiegels am Siel Neufelder Koog

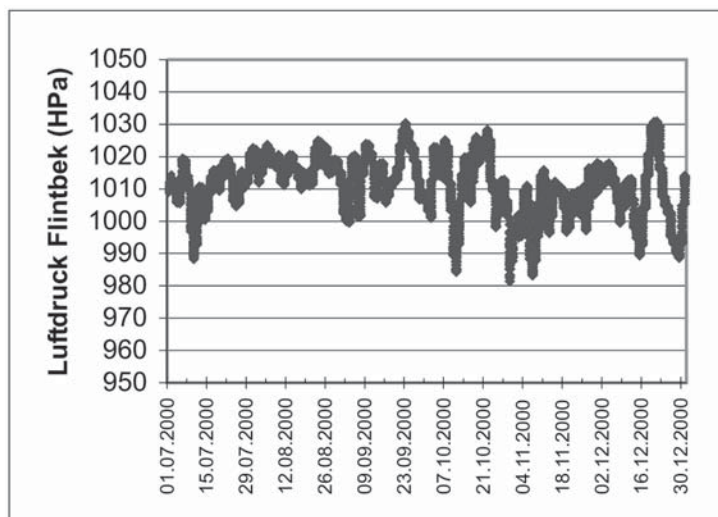


Abb. 55: Luftdruckverlauf im LANU Flintbek

Deichsiel Brokdorf

Im Zuge der Elbdeichverstärkung musste im Bereich des vorhandenen Außentiefs vor Brokdorf ein neues Deichsiel errichtet werden (Anl. 56: Lageplan und Bemessungsprofil). Der weichseleiszeitliche Talsand unter den bindigen Weichschichten enthält gespanntes Grundwasser, dessen Nulldruckfläche in deutlich gedämpfter Form mit dem Tidewasserspiegel der Elbe schwankt. Die Größe der Dämpfung nimmt mit steigendem Außenwasserspiegel zu. Innerhalb des Messzeitraums (28.2.85 bis 10.2.86) wurden bei gleichem Außenwasserstand Phasen mit größerer und niedrigerer Dämpfung registriert. Der Umschwung mit Differenzbeträgen von 30–50 cm geschieht sprunghaft.

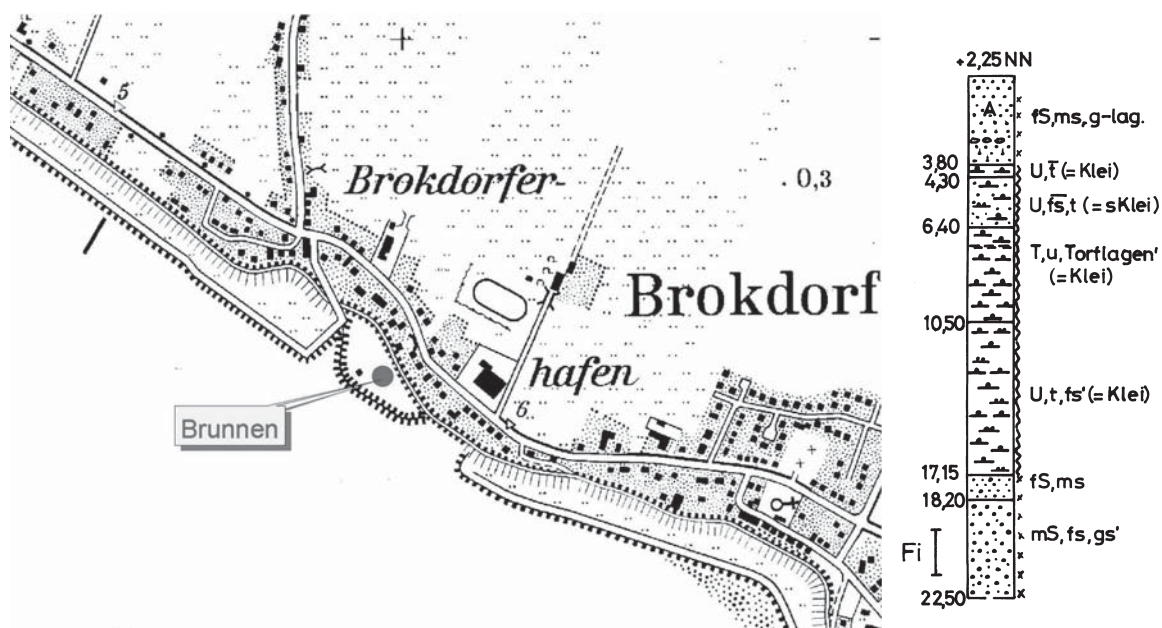


Abb. 56: Lageplan und Bohrprofil mit Lage der Filterstrecke am Deichsiel Brokdorf

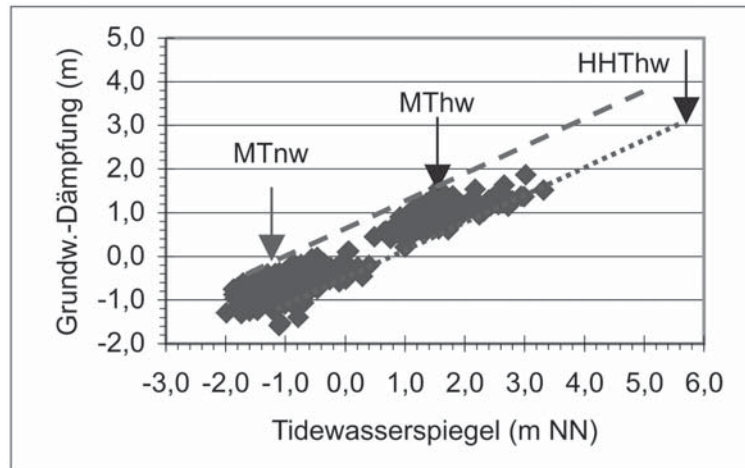


Abb. 57: Dämpfung des gespannten Tiefengrundwassers am Deichsiel Brokdorf

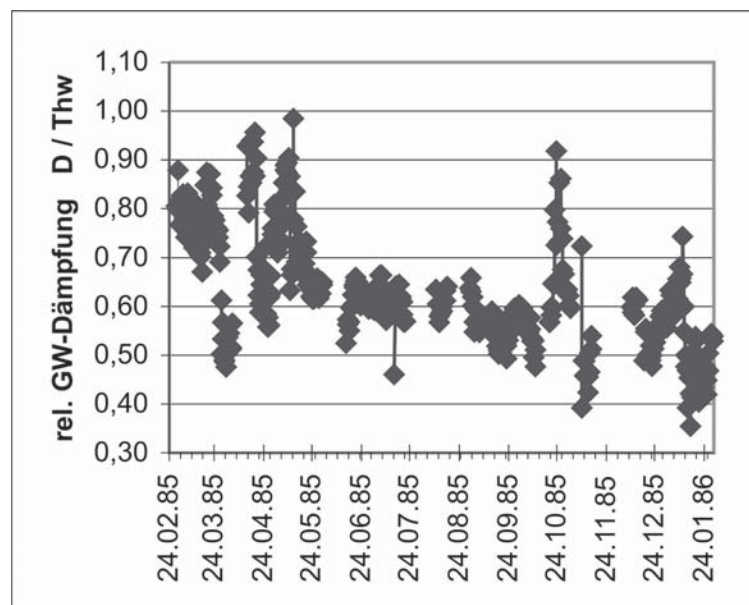


Abb. 58: Relative Dämpfung des täglichen Grundwasser-Maximums am Siel Brokdorf

Da der Pegelschreiber bei außergewöhnlichen Elbewasserständen wegen der zu hoch eingestellten Empfindlichkeit der Aufzeichnung bei größeren Nadelausschlägen am Rand der Messrolle aufsetzte und dadurch für die Folgemessungen eine Nullpunktverschiebung auftrat (ermittelt durch Kontrollpeilung mit dem Lichtlot beim Wechsel der Messrolle), konnten die Extremwerte der Grundwasserstandsmessungen bei der Datenauswertung nicht berücksichtigt werden. Ein Teil der Veränderungen bei der auf das Tidehochwasser bezogenen *relativen* Dämpfung des Tiefengrundwassers ($D_{\text{rel}} = D / \text{Thw}$, Abb. 58) ist jedoch auf Luftdruckschwankungen zurückzuführen. Nach den Ergebnissen der Luftdruckmessungen in der 41 km westlich von Brokdorf gelegenen Klimastation Cuxhaven korreliert im Regelfall die *relative* Dämpfung D / Thw direkt mit dem jeweiligen Luftdruckmaximum bzw. -minimum. Generell fällt auf, dass der Zeitunterschied zwischen dem Tide- und Grundwas-

serstandsmaximum bzw. -minimum außerordentlich rasch zwischen 0 und 4,5 Stunden schwankt. Für die Extrapolation sowohl der Dämpfung wie des Grundwasserstandsmaximums beim maßgebenden Bemessungswasserstand in der Elbe wird deshalb die Untergrenze der Variationsbreite in der Abb. 57 mit einer niedrigen relativen Dämpfung zugrunde gelegt. Für den höchsten, in Brokdorf bisher registrierten Elbwasserstand von +5,65 m NN ergibt sich bei einer Dämpfung von $D = 3,0$ m ein maximaler Grundwasserstand von $H_w = +2,65$ m NN. Für das Bemessungshochwasser der Elbe ergaben sich die folgenden maßgebenden Wasserstände

	Bem.wasserstand Elbe	Dämpfung	maßg. GW-stand
Winter	+4,50 m NN	2,50 m	+2,00 m NN
Sommer	+3,50 m NN	1,90 m	+1,60 m NN

Deichsiel St. Margarethen – Harrwettern

Die Baumaßnahme mit den Baugrund- und Grundwasserverhältnissen entspricht derjenigen von Brokdorf (Abb. 59). Auch hier existiert neben dem in der sandigen Auffüllung vorhandenen oberen, mit der Tide nur wenig schwankenden Grundwasserspiegel (mit Messwerten zwischen +1,2 m NN bei trockenfallendem Außentief und +1,5 m NN bei Thw) ein tieferer Druckwasserspiegel. Wie im Falle Brokdorf wurden innerhalb des Messzeitraumes vom 29.9.86 bis 3.5.87 bei gleichem Außenwasserstand Phasen mit größerer und niedrigerer Dämpfung registriert, die außerordentlich sprunghaft miteinander abwechseln. Auch hier konnte wegen der gelegentlichen Nullpunktverschiebung infolge zu hoch eingestellter Empfindlichkeit des Messsystems für die Auswertung nur ein Teil der Daten verwendet werden. Die Zeitdifferenz zwischen dem Eintritt des höchsten/tiefsten Tidewasserstands und dem

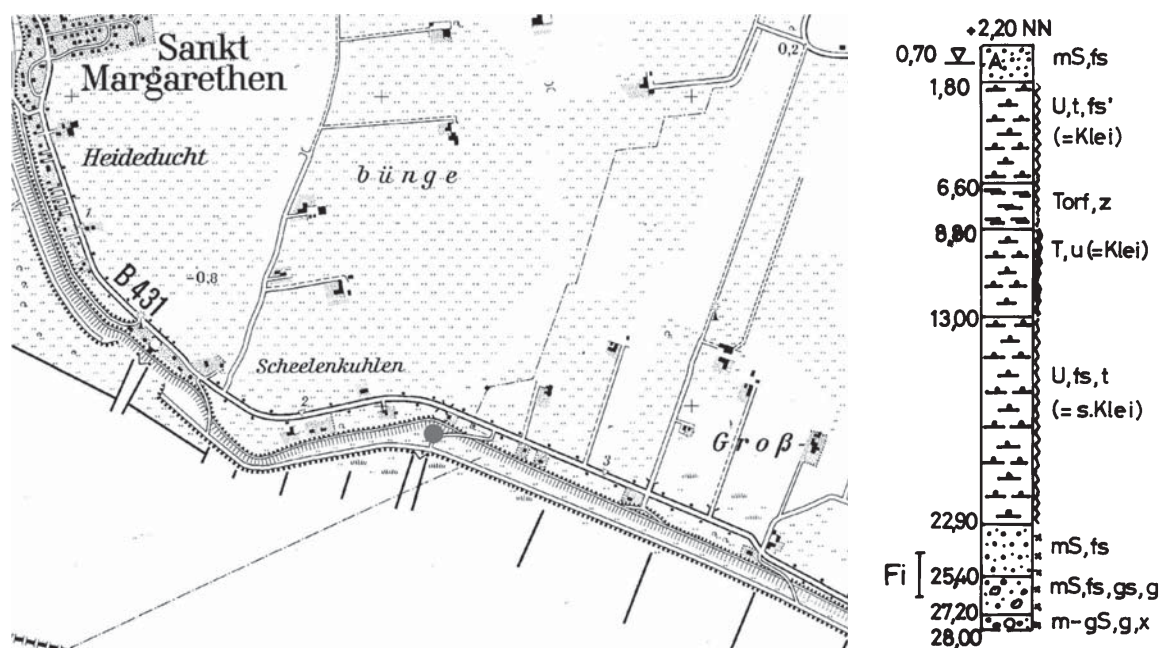


Abb. 59: Lageplan und Bohrprofil am Deichsiel St. Margarethen – Harrwettern

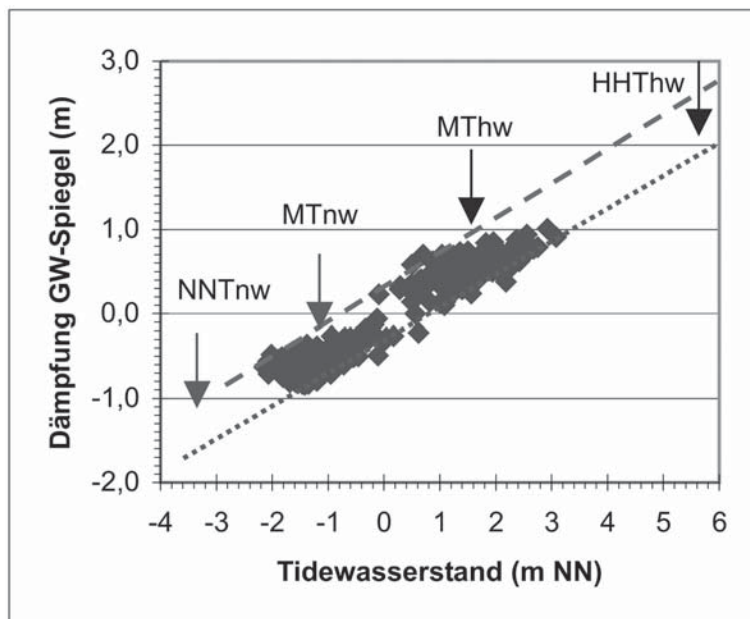


Abb. 60: Dämpfung des Druckwasserspiegels am Harrwettersiel

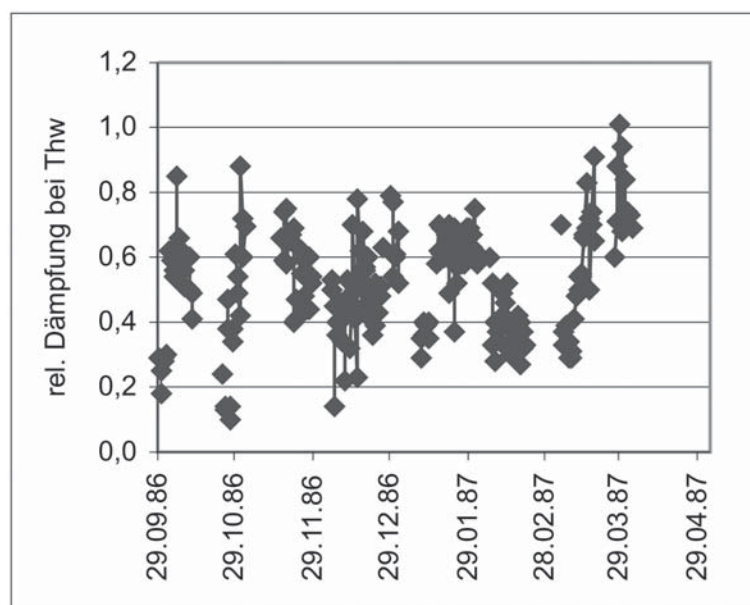


Abb. 61: Relative Dämpfung des Druckwasserspiegels am Harrwettersiel

Druckwasserspiegelmaximum/-minimum variiert wie in Neufeld und Brokdorf sehr rasch um Beträge bis zu einigen Stunden.

Stichprobenartige Messungen für die Zeitspannen vom 25.10. bis 15.12.86 und vom 1.2. bis 1.4.87 ergaben, dass die niedrigen Luftdruckwerte <1000 hPa an der 37 km westlich gelegenen Klimastation Cuxhaven teilweise nicht mit den gemessenen Minima der relativen Dämpfung (Abb. 61) übereinstimmen. Für den höchsten gespannten Grundwasserspiegel bei $\text{HHThw} = +5,55$ m NN ergab sich gemäß Extrapolation der unteren Grenzlinie aus der

Schwankungsbreite im Diagramm der Abb. 60 mit einer Dämpfung von $\Delta H = 1,80$ m ein Maß von $H_w = +3,75$ m NN. Für das Bemessungshochwasser der Elbe ergaben sich die folgenden maßgebenden Wasserstände

	Bem.wasserstand Elbe	Dämpfung	maßg. GW-stand
Winter	+4,50 m NN	1,45 m	+3,05 m NN
Sommer	+3,50 m NN	1,10 m	+2,40 m NN

Die Ursache für die deutlich höheren Grundwasserstände gegenüber der nur 4 km entfernten Messstelle Brokdorf kann einerseits mit dem Vorkommen eines 20 m tiefen Kolkes in der Elbe bei Scheelenkuhlen (Abb. 59) zusammenhängen, zum anderen damit, dass der untere Teil des Brunnenfilters am Harrwettersiel in die liegende, stark durchlässige Grobsandschicht einbindet, die ihrerseits auf Veränderungen des Tidewasserspiegels schneller reagiert als der geringer durchlässige, schwach schluffige Fein- und Mittelsand direkt unter der Holozänbasis.

3. Schlussfolgerungen

Die aus den Diagrammen für verschiedene Tidewasserstände direkt abgelesenen bzw. extrapolierten Dämpfungsmaße des Grundwasserspiegels sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst. Sie zeigen mit Ausnahme der beiden Messstellen im Binnenhafen Husum insbesondere beim Stau- und Tiefengrundwasser an der gesamten schleswig-holsteinischen Westküste und Unterelberegion eine relative Ähnlichkeit der Messergebnisse untereinander.

Tab. 6: Freier Grundwasserspiegel in sandigen Deckschichten

	Dämpfung Grundwasserspiegel (m)		
	NN –1,0 m	NN –1,5 m	NN –2,0 m
List	0,80	1,80	2,50
Büsum	1,50	2,00	2,40
Elbehafen	1,00	1,50	2,00

Tab. 7: Stauwasserspiegel über bindigen Weichschichten

	Dämpfung Grundwasserspiegel (m)		
	NN –1,0 m	NN –1,5 m	NN –2,0 m
Pbr 100 Husum	0,80	0,75	0,60
Pbr. 340 Husum	1,44	1,37	1,40
Fischereikaje Husum	2,50	2,80	3,50
Hafen Tönning	2,55	2,95	3,50
P 1 Glückstadt	2,00	2,50	2,90
P 2 Glückstadt	2,40	2,80	3,30
P 3 Glückstadt	1,75	2,40	3,00
P 4 Glückstadt	1,75	2,05	2,50
P 5 Glückstadt	2,10	2,60	3,00

Tab. 8: gespanntes Tiefengrundwasser

	Dämpfung Grundwasserspiegel (m)	
	NN +1,50 m	NN +5,00 m
F. W. Lübkekoog	1,30	4,50
Holmer Siel	1,00	1,70
Laglumsiel	1,40	2,80
Dock Husum	1,00	4,20
Siel Brokdorf	0,50–0,90	2,50–3,05
Harrwettersiel	0,25–0,60	1,60–1,90
Siel Neufeld	0,20–1,20	3,25
Peilbr. Neufeld	0,50	4,20
Siel Neuf. Koog	1,40–2,10	5,25–6,25

Bezüglich des Wasserdrucks im gespannten Grundwasserleiter unter Ufereinfassungen empfiehlt die Richtlinie „Berechnungsgrundsätze für private Hochwasserschutzwände und Uferbauwerke im Bereich der Freien und Hansestadt Hamburg“ vom Mai 1997 den Ansatz

$$w_{\ddot{u}3} = h_2 \cdot \gamma_w \quad \text{mit} \quad h_2 = 1,00 \text{ m unter Kaimauern} \\ \text{bzw.} \quad h_2 = 1,50 \text{ m unter Böschungen}$$

Die für die genannten Fallbeispiele mit gespanntem Tiefengrundwasser aus dem jeweiligen Diagramm abgelesenen Dämpfungsmaße für die Lastfälle MTnw und NNTnw mit den daraus errechneten Grundwasserstandshöhen und den jeweiligen Differenzbeträgen zum Stauwasserspiegel in der Hinterfüllung (Deckschicht) sind in der Tab. 9 zusammengestellt.

Tab. 9: Wasserdrücke in gespannten Grundwasserleitern

	Stau-Wsp.	MTnw	NNTnw	GW-Dämpfung (m) vs. Tidewasserstand	
	(m NN)	(m NN)	(m NN)	(MTnw)	(NNTnw)
Lübkekoog	+0,9	-1,63	-3,7	-1,75	-3,80
Laglumsiel	+1,0	-1,50	-2,9	-0,50 / -1,00	-1,35 / -1,85
Dock Husum	+1,6	-1,84	-4,3	-1,60	-3,6
Siel Neufeld	+1,0	-0,70	-2,5	-0,65 / -1,80	-2,25 / -3,40
Pbr. Neufeld	+1,0	-0,70	-2,5	-1,40	-3,20
Siel Neufelder Koog	+1,5	-0,70	-2,5	-0,45 / -1,30	-2,15 / -2,90
Harrwettersiel	+1,5	-1,20	-3,6	-0,35 / -0,85	-1,2 / -1,8
Siel Brokdorf	+1,5	-1,22	-3,6	-0,35 / -1,3	-1,8 / -2,75

	gesp. GW-spiegel (m NN)		Wasserdruck $w_{\ddot{u}3}$ = Diff. zum Stauwsp. $\times 10$	
	MTnw	NNTnw	MTnw	NNTnw
Lübkekoog	+0,13	+0,10	7,7	8,0
Laglumsiel	-0,50 / -1,00	-1,05 / -1,55	5,0	25,5 (20,5)
Dock Husum	0,25	-0,7	13,5	23,0
Siel Neufeld	-0,05 / 1,10	-0,25 / 0,90	1,05 (0,0)	12,5 (1,0)

	gesp. GW-spiegel (m NN)		Wasserdruck $W_{ü3}$ = Diff. zum Stauwsp. $\times 10$	
	MTnw	NNTnw	MTnw	NNTnw
Pbr. Neufeld	0,75	0,7	2,5	3,0
Siel Neufelder Koog	-0,25 / 0,60	-0,35 / 0,50	17,5 (9,0)	18,5 (10,0)
Harrwettersiel	-0,95 / -0,35	-2,40 / -1,88	24,5 (18,5)	39,0 (33,5)
Siel Brokdorf	-0,87 / +0,08	-1,80 / -0,85	23,2 (14,2)	33,0 (23,5)

Wieweit die in dieser Arbeit für tiefe Baugruben ermittelten höheren Zahlenwerte des Wasserdruckes auf die Bemessung von Uferwänden mit ihren anderen Randbedingungen übertragen werden können, muss zunächst weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

Generell zeigen die Messergebnisse beim gespannten Tiefengrundwasser eine deutliche Abhängigkeit

- vom Bodenaufbau und insbesondere von der Wasserdurchlässigkeit im Grundwasserleiter
- von der Entfernung zwischen dem Bauwerk und der hydraulischen Kontaktstelle zwischen dem Tide- und Grundwasser.

Bei den Uferwänden ist von entscheidender Bedeutung, ob die Spundwand bei sandiger Hinterfüllung nach E 19 (EAU, 1996) tideabhängig umströmt wird oder ob dieses wegen des Vorkommens einer geringdurchlässigen Weichschicht im Untergrund nicht möglich ist. Eine erhebliche Auswirkung auf den Grundwasserstand hinter der Uferwand haben mögliche Undichtigkeiten in der Wand selbst (z.B. Löcher infolge eingetretener Durchrostung).

Die verschiedenen Einflüsse sollte ein erfahrener Baugrundgutachter erkennen und deutlich machen. Bestehende Zweifel bei der Bewertung des hangenden und gespannten Grundwasserspiegels sollten zweckmäßig durch direkte Pegelbeobachtungen ausgeräumt werden.

4. D a n k s a g u n g

Herrn Bau-Dir. F. Eißfeldt, BAW Hamburg, danke ich für seine kritischen und konstruktiven Anmerkungen zum Manuskript; Frau P. Kopp, Landesamt für Natur und Umwelt S-H, für die technische Unterstützung bei der Gestaltung der Abbildungen.

5. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- EAU: Empfehlungen Ausschuss Uferneufassungen. Verlag Ernst & Sohn, 1996.
- OVERBECK, G.: Grundwasserstände im Bereich des Binnenhafens Glückstadt. – Gutachten Ing.-Büro IGB Kiel Nr. KI 97-694/5.12.1997 (unveröffentlicht), 1997.
- Richtlinie „Berechnungsansätze für private Hochwasserschutzwände und Uferbauwerke im Bereich der Freien und Hansestadt Hamburg, Mai 1987“. Amtlicher Anzeiger Nr. 33, S. 623–645, Hamburg 18.3.1998.
- SCHMIDT, R.: Bericht zur Gründung des Holmer Siels; Grundwasserentspannung. – Gutachten Nr. 80/90-3 (3. Nachtrag) des Geologischen Landesamtes Schl.-Holstein vom 11.6.1985 (unveröffentlicht), 1985.
- STEINFELD u. PARTNER: Standsicherheit der Uferwände im Elbehafen Brunsbüttel. 1. Bericht:

Beurteilung des Baugrundes und der Grundwasserverhältnisse (Nr. 07328 v. 1.10.1996) (unveröffentlicht), 1996.

TEMMLER, H.: Sanierung Bauhofdock Husum. – GLA-Gutachten Nr. 89/073 (unveröffentlicht), 1989.

TEMMLER, H.: Bericht zur Grundwasserentspannung am Laglumsiel/Föhr. – GLA-Gutachten Nr. 92/54-2 (unveröffentlicht), 1994.

TEMMLER, H.: Neubau Deichsiel Neufeld. – LANU-Gutachten Nr. 99/008 (unveröffentlicht), 1999.

Ergänzende Literatur:

EAK 2002: Empfehlungen für Küstenschutzwerke. Die Küste, H. 65, Heide, 2003.

GRETT: Dämpfung des Tideinflusses in den gespannten Grundwasserleiter unter der Bauinsel Holmer Siel. – Bericht Ingenieurgemeinschaft Holmer Siel vom 10.7.1987 (unveröffentlicht), 1987.

MÖLLER, B.: Berechnungsansätze für Hochwasserschutzwände und Uferbauwerke. – Sprechtag HTG und Amt Strom- und Hafenbau „Hochwasserschutz in Häfen, Neue Bemessungsansätze“, 2.10.1996, Hamburg, 1996.

SASS u. HOFFMANN: HB 1-Verfügung „Berechnungsgrundsätze für HWS-Wände“. – Amt für Strom- und Hafenbau Hamburg. 18.7.1989 (unveröffentlicht), 1989.

TEMMLER, H.: Uferwände Binnenhafen Husum. – GLA-Gutachten Nr. 91/037 (unveröffentlicht), 1991.