

**Umweltuntersuchungen
NOK-Schleusen Brunsbüttel
Grundwassermodellierung**

13.03.2009

Projekt Nr.: 3 / 43874212

Projekt Name: Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel
Titel: Grundwassermodellierung
Projekt Nr.: 43874212
Bericht Ref.:
Status: Endbericht
Ansprechpartner: Herr Gondesen
Kundenname: TGP Landschaftsarchitekten
Erstellt von: URS Deutschland GmbH
 Schweriner Straße 8-12
 22143 Hamburg
 Deutschland
 Tel.: +49 40 460760-0
 Fax: +49 40 460760-60

Dokumenterstellung / Prüfvermerk:

	Name	Datum	Position
Erstellt durch:	Dr. Matthias Weede	13.03.2009	Projektbearbeiter
Geprüft durch:	Theo Woll, Thomas Willert	13.03.2009	Peer Review
Genehmigt durch:	Rolf Heykes	13.03.2009	Projektleiter

Dokumentüberarbeitung:

Version	Datum	Kommentar
1	07.08.2008	Berichtsentwurf
2	08.02.2009	überarbeiteter Berichtsentwurf nach Berücksichtigung der Ergebnisse der Baugrunderkundung
3	13.03.2009	Endbericht nach Berücksichtigung der Ergebnisse der Baugrunderkundung

COPYRIGHT

© Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Jede unerlaubte Vervielfältigung oder Verwendung durch Dritte ist untersagt.

INHALT

Kapitel	Seite
ZUSAMMENFASSUNG	1
1. ANLASS UND AUFGABENSTELLUNG.....	2
2. EINSCHRÄNKUNGEN	3
3. ALLGEMEINES	3
4. KURZBESCHREIBUNG DER VERWENDETEN SOFTWARE	5
5. MODELLAUFBAU	5
5.1. Hydrogeologischer Rahmen und Modellstruktur.....	5
5.2. Hydrogeologische Modellparameter	8
5.3. Randbedingungen	8
5.3.1. Festpotenzialrandbedingungen.....	8
5.3.2. Grundwasserneubildung	9
5.3.3. Grundwasserentnahme/-einspeisung	9
5.3.4. Flussrandbedingung.....	10
5.3.5. Wandrandbedingung.....	10
5.3.6. Undurchlässiger Rand.....	10
6. STATIONÄRE KALIBRIERUNG	10
6.1. Sensitivitätsanalyse.....	13
6.2. Beurteilung der Prognosefähigkeit.....	14
7. MODELL DER SCHLEUSENINSEL.....	14
8. FALLSTUDIEN	16
8.1. Grundwasserabsenkung in den Aushubbereichen der Häupter der Schleusenkammer.....	17
8.2. Grundwasserabsenkung in der geplanten Schleusenkammer	18
8.3. Strömungsverhältnisse im Rahmen des späteren Schleusenbetriebs	20
9. ZUSAMMENFASSUNG.....	21
10. VERWENDETE UNTERLAGEN.....	22

INHALT

Kapitel	Seite
TABELLEN	
Tabelle 1: Modellparameter des Längs- und Querprofils.....	7
Tabelle 2: Kf-Werte der geologischen Einheiten in den modellierten Profilschnitten.....	8
Tabelle 3: Vergleich von gemessenen und berechneten Grundwasserständen im Längsprofil.....	12
Tabelle 4: Vergleich von gemessenen und berechneten Grundwasserständen im Querprofil.....	13
Tabelle 5: Wasserbilanz des kalibrierten Modells (Längs- und Querprofil).....	14
Tabelle 6: Aufbau des Modells der Schleuseninsel.....	16
Tabelle 7: Berechnete Entnahmeraten im Bereich der Schleusenhäupter.....	18
Tabelle 8: Entnahmerate und Lage der Wasseroberfläche innerhalb der geplanten Schleusenkammer bei Elbe MHW.....	19
Tabelle 9: Berechneter Wasserzustrom durch die hydraulisch offene Schleusenkammersohle im Rahmen des späteren Betriebs.....	21

ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Entnahmerate und Absenkung bei hydraulisch offener Schleusensole. Dargestellt ist die Situation für MNW (orange) und MHW (blau) der Elbe mit logarithmischen Ausgleichsgeraden.....	20
Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Wasserstand Elbe und erwartetem Zustrom über die Kammersohle.....	21

ANLAGEN

Anlage 1:	Lage des Untersuchungsgebietes
Anlage 2:	Luftbild mit Lage der modellierten Profilschnitte
Anlage 3a:	Anordnung der Modellzellen im Längsprofil mit Randbedingungen
Anlage 3b:	Anordnung der Modellzellen im Querprofil mit Randbedingungen
Anlage 4a:	Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten im Längsprofil
Anlage 4b:	Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten im Querprofil
Anlage 5:	Ergebnis der Modellkalibrierung
Anlage 6a:	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse Längsprofil
Anlage 6b:	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse Querprofil
Anlage 7:	Modell der Schleuseninsel - Anordnung der Modellschichten
Anlage 8a:	Modell der Schleuseninsel - Anordnung der Randbedingungen
Anlage 8b:	Modell der Schleuseninsel - räumliche Darstellung der Randbedingungen
Anlage 9:	Modell der Schleuseninsel - Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten
Anlage 10:	Berechnete Grundwassergleichen bei Absenkung in der Schleusenkammer
Anlage 11:	Berechnete Grundwassergleichen bei Schleusenbetrieb

ZUSAMMENFASSUNG

Im Bereich der Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals (NOK) in Brunsbüttel sind umfangreiche Umbau- und Instandsetzungsmaßnahmen geplant. Um die hydraulische Situation und die Auswirkungen der Baumaßnahmen zur geplanten fünften Schleusenkammer auf die Grundwasserverhältnisse darzustellen, sollte ein numerisches Strömungsmodell erarbeitet werden.

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die verwendeten Eingabeparameter, die Modellerstellung, die Kalibrierung und die Sensitivitätsanalyse beschrieben, bevor in den folgenden Kapiteln Variantenstudien durchgeführt werden. Hierbei werden unterschiedliche Strömungsszenarien gerechnet und der Zusammenhang zwischen erwarteter Grundwasserabsenkung und der hierfür erforderlichen Entnahmerate dargestellt.

Im Rahmen einer durchgeführten Variantenstudie wird sowohl die Möglichkeit eines Teilaushubs im Bereich der Schleusentore, als auch eine Grundwasserabsenkung in der gesamten geplanten Schleusenkammer betrachtet. Darüber hinaus wird bei den einzelnen Varianten untersucht, welchen Einfluss hydraulische Fenster in den Beckentonen/-schluffen haben, die das oberste Grundwasserstockwerk in den Kleischichten mit dem zweiten Grundwasserstockwerk in den unterlagernden Sanden verbinden.

Das erste Grundwasserstockwerk, das sich innerhalb der relativ schlecht durchlässigen Kleischichten und feinsandigen Partien befindet, wird in erster Linie von oberflächlichen Sickerwasserzutritten beeinflusst. Ein Tideeinfluss der Elbe ist hier nur stark gedämpft zu verzeichnen. Sande im Liegenden der Beckentone/-schluffe bilden das zweite Grundwasserstockwerk. Hier zeichnet sich eine direkte Beeinflussung durch den Tidenhub der Elbe ab. So beträgt z. B. die Schwankungsbreite der Grundwasseroberfläche in der im ersten Grundwasserstockwerk verfilterten Grundwassermessstelle (GWM) GW0707F ca. 1,2 m (10.-30.06.2008). In GW0707T, die das zweite Grundwasserstockwerk erschließt, wird dagegen eine Schwankung um ca. 2,9 m registriert.

Es zeigt sich - bei Annahme von Teilaushubmaßnahmen an den geplanten Schleusentoren -, dass im nördlichen Aushubbereich mit etwa 1,5-fach höheren Entnahmeraten zu rechnen ist als im südlichen. Dies ist auf sandige Partien in den Kleien zurückzuführen, die als Zonen erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit im Modell eine Wegsamkeit in den Bereich des NOKs bilden.

Auf Grundlage der getroffenen konservativen Annahmen ist bei Einspundung der Schleusenkammer und hydraulisch offener Sohle mit einem Wasserzustrom über die Kammersohle von ca. 2.300 – 2.900 m³/d zu rechnen, eine Absenkung der Wasseroberfläche auf ca. -4,5 m NHN vorausgesetzt. Bei einer Absenkung auf -1,5 m NHN reduziert sich der zu fördernde Volumenstrom auf ca. 700 – 1.500 m³/d. Um Aussagen über den maximal zu erwartenden Zustrom über die offene Schleusensole im Rahmen des späteren Schleusenbetriebs treffen zu können, wurde der Zustrom durch die Sohle für einen Wasserstand von +3 m NHN für die Elbe und -0,2 m NHN in der Schleusenkammer berechnet. Für diesen Extremzustand ergibt sich ein Zustrom von ca. 1.300 m³/d.

1. ANLASS UND AUFGABENSTELLUNG

Im Rahmen des Neubaus und der Instandsetzung der Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals (NOK) in Brunsbüttel soll ein numerisches zweidimensionales Grundwassermodell erstellt werden. Das allgemeine Ziel der Modellierung ist die Darstellung der hydraulischen Situation im Bereich der Schleuseninsel und die Erfassung und Beurteilung der Auswirkungen der vorgesehenen Baumaßnahme auf die hydraulischen Verhältnisse im Untergrund. Der vorliegende Bericht greift u.a. auf die geologischen Informationen der Baugrunderkundung aus dem Herbst 2008 zurück.

In einer Reihe von vorangegangenen Untersuchungen wurden u. a. ein Baugrundgutachten erstellt, das bestehende Grundwassermessstellennetz erweitert und Stichtagsmessungen durchgeführt. Hierdurch sind die lokalen Untergrundverhältnisse hinreichend bekannt. Die Durchlässigkeitsbeiwerte (kf) der auftretenden Schichten wurden näherungsweise durch Siebanalysen ermittelt. Auf diesen Ergebnissen soll das Grundwassermodell aufbauen und anhand von vorliegenden Stichtagsmessungen stationär kalibriert werden. Das aufgesetzte Modell besteht aus zwei getrennt voneinander berechneten Profilschnitten, die die Schleuseninsel längs bzw. quer durchlaufen und auf jeder Seite um einige Hundert Meter über diese hinausreichen. Aufbauend auf den Ergebnissen der kalibrierten 2D-Profilschnitte wurde daran anschließend ein 3D-Modell der Schleuseninsel aufgesetzt, das für die in Kap. 8 durchgeführten Fallstudien verwendet wurde.

Insbesondere sind mit Hilfe der Modellierung folgende Fragestellungen zu klären:

- Durch die geplanten Tiefbaumaßnahmen werden möglicherweise direkte Wegsamkeiten zwischen oberflächennahem und tiefem Grundwasserleiter geschaffen. Mögliche Folgewirkungen sind darzustellen.
- Im Zuge der Baumaßnahme ist eine Grundwasserabsenkung geplant. Hierfür sind notwendige Entnahmemengen abzuschätzen und Folgewirkungen der Absenkung zusammen mit Gegenmaßnahmen zu diskutieren.

Die Wasserhaltung in der Kammer auf NHN -4,50 m erfolgt zwischen den Baugruben der Schleusenhäupter auf einer Fläche von rd. 320 x 45 m. Die Kammerbaugrube ist allseitig durch Spundwände geschlossen. Die Häupter werden in einer geschlossenen Baugrube mit umlaufenden Baugrubenwänden und dichter Sohle erstellt.

Die Kammerwände werden zunächst von einer Arbeitsebene, ca. NHN +0,0 m, hergestellt. Im Schutze der Wand wird der Boden kammerseitig bis ca. NHN -4,50 m ausgehoben und der Betonüberbau mit vorderer Betonschürze im Trockenen hergestellt. Für die Betonarbeiten ist eine Wasserhaltung vorgesehen. Anschließend wird die Baugrube geflutet, danach bis ca. NHN -16,50 m im Nassen ausgehoben und die rückverankerte UW-Betonsohle hergestellt.

Der vorliegende Bericht schließt mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse.

2. EINSCHRÄNKUNGEN

Der vorliegende Bericht wurde von URS Deutschland GmbH (URS) für den alleinigen Gebrauch durch TGP Landschaftsarchitekten und im Einklang mit der vertraglichen Vereinbarung vom 28.05.08 angefertigt, auf deren Grundlage die URS-Leistungen erbracht wurden.

Über die vertraglich vereinbarte Gewährleistung hinaus werden keine ausdrücklichen oder stillschweigenden Garantien hinsichtlich der in diesem Bericht enthaltenen Empfehlungen oder sonstigen von URS erbrachten Leistungen übernommen. Der vorliegende Bericht darf ohne die vorherige schriftliche Zustimmung von URS nicht an Dritte weitergegeben und von diesen genutzt werden. Sofern in diesem Bericht nicht anderweitig festgelegt, beruhen die hierin enthaltenen Bewertungen auf der Annahme, dass die Örtlichkeiten und Anlagen ohne wesentliche Änderung weiterhin für ihren derzeitigen Zweck genutzt werden.

Die im vorliegenden Bericht genannten Schlussfolgerungen und Empfehlungen beruhen auf von Dritten erhaltenen Informationen sowie auf der Annahme, dass die Parteien, von denen die Informationen erbeten wurden, ohne Einschränkung sämtliche relevanten Informationen zugänglich gemacht haben. Sofern in diesem Bericht nicht anderweitig dargestellt, unterzog URS die von Dritten erhaltenen Informationen von URS keiner unabhängigen Prüfung.

Der vorliegende Bericht legt die von URS bei der Erbringung seiner Leistungen zugrunde gelegten Methoden und Informationsquellen dar. Die hier beschriebenen Arbeiten wurden im Zeitraum vom 15.06.2008 bis 06.02.2009 durchgeführt und basieren auf den Gegebenheiten und Informationen, die während dieses Zeitraums an den untersuchten Örtlichkeiten angetroffen wurden bzw. zur Verfügung standen. Daraus ergibt sich zwangsläufig eine faktische Begrenzung des Berichts- und Leistungsumfangs.

Der vorliegende Bericht bezieht sich ausschließlich auf den während des oben genannten Zeitraum angetroffenen Zustands der untersuchten Örtlichkeiten oder Anlagen und berücksichtigt nicht deren mögliche künftige Entwicklung. Davon ausgeschlossen sind spezifische Prognosen, die im Bericht enthalten und ausdrücklich als solche gekennzeichnet sind.

Aussagen bzgl. bodenmechanischer Fragestellungen, wie z.B. der Möglichkeit eines hydraulischen Grundbruches, können nicht allein mit der verwendeten Modellierungssoftware getroffen werden, da bodenmechanische Parameter im Strömungsmodell keine Berücksichtigung finden. Ferner wird der Transport von im Wasser gelösten Schadstoffen im vorliegenden Strömungsmodell nicht betrachtet.

3. ALLGEMEINES

Eine numerische Grundwassermodellierung bietet innerhalb eines gewissen Rahmens die Möglichkeit, Strömungsverhältnisse und hydraulische Potentialverteilungen in heterogenen geologischen Systemen zu prognostizieren. Hierfür ist die Verarbeitung von hyd-

rogeologischen und strukturgeologischen Eingangsparametern die Voraussetzung. Die Güte dieser Parameter hat dabei einen direkten Einfluss auf die Verlässlichkeit der berechneten Daten, insbesondere im Hinblick auf eine gute Prognosefähigkeit des Modells.

Das vorliegende Modell beruht auf dem Prinzip der Finiten Differenzen. Hierbei wird das natürliche geologische System in rechteckige Zellen eingeteilt und für jede dieser Zellen eine Bilanz der strömenden Massen über jeweils einen bestimmten Zeitschritt aufgestellt (KINZELBACH & RAUSCH 1995). Um eine ausgeglichene Bilanz zu erreichen, muss hierbei die Summe aus advektivem und dispersivem Zufluss und dem Zufluss aus Quellen und Senken gleich der Speicheränderung sein. Zur Berechnung werden die Differentialgleichungen unter Verwendung der Taylor-Formel in Differenzenquotienten überführt (MARSAL 1989, HELMIG 1996).

Die Wahl eines geeigneten Netzes ist daher für die Erstellung eines genauen numerischen Modells von großer Bedeutung. Durch die Wahl ungeeigneter Netze kann es zu numerischen Instabilitäten und Oszillationen während der Berechnungen kommen.

Unabhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung sind i. d. R. folgende Informationen für den Aufbau eines numerischen Grundwassermodells notwendig:

- Topographie der Geländeoberkante und der einzelnen geologischen Schichten, geometrische Verhältnisse der betrachteten geologischen Körper;
- Hydrogeologische Parameter (k_f -Werte, Transmissivitäten, spez. Speicherkoeffizienten, gesamte und effektive Porositäten der vorliegenden Gesteine);
- Daten zu den Grundwasserverhältnissen des betrachteten Gebietes (Messstellennetz mit Grundwasserstandsdaten oder GW-Ganglinien).
- Daten zum Wasserhaushalt (Entnahmen, Grundwasserneubildung, Zu- und Abstrom aus Modellrändern)

Üblicherweise wird bei der Festlegung dieser Parameter versucht, auf Messwerte aus Feldversuchen und Naturbeobachtungen zurückzugreifen. Da Messwerte aufgrund der Komplexität, Inhomogenität und Anisotropie von hydrogeologischen Körpern i. d. R. nur punktuelle Informationen liefern oder überhaupt nicht verfügbar sind, werden zu Beginn der Modellierung Vertrauensbereiche für einzelne Parameter definiert. Diese werden entsprechend der Spannbreite von verfügbaren Messwerten sowie aufgrund von Erfahrungswerten des Bearbeiters festgelegt. Es ist dann Gegenstand der Kalibrierung (Kap. 6) des Modells, diese vordefinierten Parameter innerhalb der Vertrauensbereiche derart zu variieren, bis eine akzeptable Anpassung der berechneten Druckhöhen mit den gemessenen Größen erreicht ist. Ebenso muss eine Wasserhaushaltsbilanz erzielt werden, die realistisch ist oder im Idealfall anhand von Messwerten (z.B. Abflussganglinien in Vorflutern) belegt werden kann.

Der letzte Schritt der Modellerstellung bildet die Sensitivitätsanalyse (Kap. 6.1). Hierbei werden einzelne Modellparameter gezielt variiert und die Auswirkung auf die Qualität der Kalibrierung beurteilt. Im Ergebnis können Rückschlüsse über die Genauigkeit der berechneten Daten und somit die Prognosefähigkeit des Modells abgeleitet werden.

4. KURZBESCHREIBUNG DER VERWENDETEN SOFTWARE

Die vorliegende Modellierung wurde mit dem Softwarepaket Visual Modflow 3.0. erstellt. Dieses Programm bietet eine Benutzeroberfläche für verschiedene Programmmodule. Jedes dieser Programme ist für unterschiedliche Fragestellungen geeignet.

Für die dreidimensionale Strömungssimulation wurde das Modul MODFLOW2000 verwendet. Es greift zur Lösung der dreidimensionalen Strömungsgleichung auf die Methode der Finiten Differenzen zurück. Die Berechnungen erfolgten mit Hilfe des PCG2-Solvers. Die Anzahl der nichtlinearen (äußeren) Iterationen wurde auf 25 begrenzt, die Anzahl der inneren Iterationen auf 10. Nach jeder nichtlinearen Iteration wird die maximale Änderung des Wasserstandes in jeder Zelle überprüft und bei Konvergenz (d.h. in diesem Fall: maximale Änderung < 0,01 m) der nächste Schritt berechnet. Die inneren Iterationen wurden solange ausgeführt, bis die absolute maximale Flusssdifferenz aller berechneten Knotenpunkte weniger als 0,01 m³ betrug.

Aufbauend auf eine MODFLOW Simulation, können mit MODPATH sowohl Fließwege in Strömungsrichtung als auch entgegen der Strömung berechnet werden.

5. MODELLAUFBAU

5.1. Hydrogeologischer Rahmen und Modellstruktur

Die Lage der beiden zunächst modellierten Profilschnitte ist in Anlage 1 veranschaulicht.

Das untersuchte Grundstück befindet sich in dem von holozänen Sedimenten dominierten Elbmündungsbereich. Der geologische Aufbau des Untergrundes wird im wesentlichen durch Klei (Schwemmland-Ablagerungen), fluviatile Sande, Beckentone/-schluffe und Geschiebemergel charakterisiert.

Geologie und Hydrogeologie:

Das geologische Standardprofil, wie es im Umfeld der Schleuseninsel durch zahlreiche Bohrungen bestätigt werden konnte, ist im Folgenden beschrieben.

- Klei: Diese Schicht wurde bis etwa 20 m unter Geländeoberkante (GOK) erbohrt. Es handelt sich überwiegend um Schluffe mit wechselndem Sand- und Tongehalt. Die obersten Meter wurden anthropogen umgelagert. Hier findet sich örtlich Bauschutt der Stein- und Kiesfraktion.
- Innerhalb des Kleis sind mitunter großflächige und bis zu 5 m mächtige schluffige Sandlinsen eingeschaltet.
- Nach den vorliegenden Siebanalysen bewegt sich der kf-Wert zwischen $5 \cdot 10^{-5}$ m/s (gewachsener Klei, horizontal) und $1 \cdot 10^{-7}$ m/s (gewachsener Klei, vertikal und aufgefüllter Klei vertikal und hori-

zontal).

- Sande:** Die stellenweise kiesigen Sande wurden in einer Mächtigkeit von ca. 10 – 18 m erbohrt. Die Unterkante liegt bei etwa -30 m NHN im Bereich der Kleinen Schleuse. Nahe der Großen Schleuse wurde die Untergrenze dieser Schichten dagegen auch in einer Tiefe von -46 m NHN nicht erbohrt. Stellenweise ist mit eingeschalteten Steinen zu rechnen.
Der kf-Wert dieser Schicht bewegt sich zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ und $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.
- Beckentone/-schluffe:** Es handelt sich um stark tonigen, schwach sandigen Schluff, der stellenweise nahe der Schichtgrenze zwischen Sanden und Klei in einer Mächtigkeit von wenigen Metern auftritt.
Der kf-Wert dieses Materials beläuft sich auf ca. $1 \cdot 10^{-8}$ m/s.
- Geschiebemergel:** Der Geschiebemergel wurde im Liegenden der Sande im Bereich der Kleinen Schleuse erbohrt. Hierbei handelt es sich um ein überwiegend schluffiges, überkonsolidiertes Sediment, in dem grobkörnige Geschiebe auftreten können.
Der kf-Wert dieses Materials wird nach den durchgeführten Siebanalysen mit ca. $1 \cdot 10^{-8}$ m/s angegeben.

Diese vier Materialien wurden beim Aufbau des Grundwassermodells durch Zellen unterschiedlicher Modelleigenschaften berücksichtigt. Die räumliche Anordnung der vier Schichten zueinander wurde gemäß der vorliegenden Bohrprofile im Modell umgesetzt.

Die Sande stellen den Hauptgrundwasserleiter des Untersuchungsgebietes dar. Darüber hinaus finden sich im überlagernden Klei Ansammlungen von flachem Grund-/Schichtwasser, das sich bevorzugt über feinkörnigen Partien in gröber gekörnten Zonen sammelt.

Die beiden Grundwasserstockwerke werden durch eine Schicht Beckentone voneinander getrennt. Diese Schicht wurde jedoch nicht flächendeckend erbohrt, so dass von einem lokalen hydraulischen Kontakt zwischen oberflächennahem Schichtwasser und dem Grundwasser in den Sanden ausgegangen werden muss.

Morphologie:

Die Morphologie des modellierten Bereichs weist im Umfeld der Schleuseninsel Höhenunterschiede von ca. 6 m auf. Um dies im Modell zu berücksichtigen, wurde entlang der beiden Profilschnitte zwischen Höhenpunkten interpoliert. Die genaue Höhenlage der Modellschichten ist in den Anlagen 3a und b grafisch dargestellt.

Im Folgenden (Tabelle 1) sind die grundlegenden Merkmale des modellierten Längs- und Querprofilmodells zusammengestellt.

Tabelle 1: Modellparameter des Längs- und Querprofils.

	Längsprofil	Querprofil
Profillänge	1.683 m	1.117 m
Anzahl der Schichten	11	16
Anzahl der Reihen	1	1
Anzahl der Spalten	88	124
Anzahl der Zellen	880	1.984
Auflösung des Modellgitters	40 m am Modellrand	27 m am Modellrand
	5 m im Zentrum	3 m im Zentrum
Modelloberfläche	0 bis 6,3 m NHN	-0,5 bis 4,5 m NHN
Modellbasis	-40 m NHN	-40 m NHN

- Der Grundwasserzustrom und –abstrom an den Modellrändern wird durch Zellen konstanter Druckhöhe (Constant Head Boundary), als undurchlässiger Rand (No Flow Boundary) oder als Flussrandbedingung (Flow Boundary) dargestellt;
- Die Modellbasis liegt im Bereich der Oberkante der Geschiebemergel auf einer Höhe von –40 m ü. NHN.
- Die Höhenlage der Modelloberfläche wurde durch Interpolation zwischen Grundwassermessstellen entlang der Profile festgelegt.
- Der Aufbau aus vier geologischen Haupteinheiten entspricht den Daten der aufgenommenen Bohrprofile. Das stellenweise in Oberflächennähe vorhandene Aufschüttungsmaterial wird im Modell nicht berücksichtigt, da die hydraulischen Unterschiede zwischen umgelagertem und gewachsenem Klei im Rahmen der Fragestellung vernachlässigt werden kann.
- Folgende Dimensionen wurden im Modell als Einheiten definiert:

Länge:	Meter [m]
Zeit:	Tag [d]
kf:	Meter pro Sekunde [m/s]
Volumenstrom:	Kubikmeter pro Sekunde [m ³ /d]

5.2. Hydrogeologische Modellparameter

Für die im Modell verwendeten kf-Werte kann auf Informationen aus dem vorliegenden Baugrund- und Gründungsgutachten der Bundesanstalt für Wasserbau zurückgegriffen werden. Die dort aufgeführten kf-Werte wurden aus Siebanalysen bestimmt.

Startwerte und Durchlässigkeitsbeiwerte nach erfolgter Kalibrierung sind in Tabelle 2 für jede der vier geologischen Einheiten zusammengestellt.

In den Modellaquiferen wird darüber hinaus eine Anisotropie der Durchlässigkeiten angenommen. Die horizontalen Durchlässigkeiten (k_x und k_y) sind um den Faktor 10 größer als die vertikale Durchlässigkeit k_z . Dieses Verhältnis wird in vergleichbaren Porenaquiferen generell als gute Annäherung angesehen (KIENZELBACH & RAUSCH 1995).

Eine grafische Darstellung der gewählten Durchlässigkeitsverteilung ist als Anlage 4 (a und b) dem Bericht beigelegt.

Tabelle 2: Kf-Werte der geologischen Einheiten in den modellierten Profilschnitten.

	kf [m/s] Startwert	kf [m/s] kalibrierter Wert	kf_h/kf_v
Klei	$5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	10/1
Sande	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	10/1
Beckentone/ -schluffe	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	10/1
Geschiebemergel	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	10/1

Als Speicherkoeffizient wird im Modell einheitlich ein Wert von 0,15 angenommen. Die effektive Porosität wird mit 0,15, bei einer Gesamtporosität von 0,2 angenommen (PRINZ 1997, BUSCH & LUCKNER 1974).

5.3. Randbedingungen

In den folgenden Abschnitten werden die im Modell gewählten Randbedingungen vorgestellt.

5.3.1. Festpotenzialrandbedingungen

Die Schleuseninsel befindet sich in einem Bereich mit tidebeeinflusster Grundwasserfließrichtung. Der regionale Vorfluter ist die Elbe, die unmittelbar an das Modellgebiet angrenzt. Der Tidenhub im Elbmündungsbereich beläuft sich auf etwa 2,8 m mit +1,5 m NHN bei mittlerem Hochwasser (MHW) und -1,3 m NHN bei mittlerem Niedrigwasser (MNW).

Längsprofil:

Das modellierte Profil verläuft orthogonal zur Elbe und somit parallel zur Hauptgrundwasserfließrichtung. Die Elbe wird aufgrund ihres maßgeblichen Einflusses auf die Grundwasserströmungsverhältnisse im Modellgebiet an der südlichen Modellgrenze durch eine Festpotenzialrandbedingung simuliert. Für das Szenario MHW wird hierfür eine Höhe von +1,5 m NHN gewählt und für das Szenario MNW eine Höhe von -1,3 m NHN.

Querprofil:

Das berechnete Querprofil verläuft in etwa parallel zur Elbe und orthogonal zur regionalen Hauptgrundwasserfließrichtung. Diese Orientierung wurde gewählt, um eine genauere Darstellung der hydraulischen Interaktion der einzelnen Schleusenammern zu ermöglichen.

Zur Darstellung der beschriebenen hydraulischen Verhältnisse wird an der westlichen und östlichen Modellgrenze ein hydraulisches Festpotenzial von +0,1 m NHN gewählt.

Darüber hinaus werden die Wasserstände in den zwei Kammern der Großen Schleuse mit Hilfe von Festpotenzialrandbedingungen festgelegt.

5.3.2. Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung wird in beiden Profilschnitten durch eine gleichmäßige Recharge Randbedingung in sämtlichen Zellen der obersten Schicht des Modellnetzes simuliert. Bei einem mittleren Jahresniederschlag von ca. 750 mm (Klimadaten DWD) und den gegebenen geologischen Verhältnissen wurde als Ausgangswert für die Kalibrierung eine Grundwasserneubildung von 150 mm angenommen.

Dieser Wert, der als Startwert für die Kalibrierung in das Modell eingeht, wurde mit Hilfe von empirischen Formeln, wie z.B. Proksch 1990, abgeschätzt.

5.3.3. Grundwasserentnahme/-einspeisung

Im Modell erfolgt die Grundwasserentnahme mit Hilfe von Modellzellen, denen Brunnen (Well Boundaries) zugewiesen werden. Über diese können sowohl Injektionen, als auch Entnahmen von Grundwasser mit unterschiedlichen Volumenströmen simuliert werden, wobei auch die Einflüsse der in verschiedenen Tiefen installierten Filterstrecken berücksichtigt werden. Die modellhafte Simulation von Infiltrationsprozessen in das Grundwasser erfolgt immer als direkte Eingabe auf die Grundwasseroberfläche. Sickerprozesse innerhalb der ungesättigten Zone können in diesen Zellen nicht simuliert werden. Die Fähigkeit des anstehenden Bodens zur Aufnahme der angesetzten Wassermengen wird vorausgesetzt. Eine Beurteilung der Infiltrationskapazität ist nicht Gegenstand dieser Modellierung.

Eine Grundwasserabsenkung, wie sie im Zuge der Baumaßnahmen geplant ist, wird im Modell durch Entnahmebrunnen simuliert. Die Lage der Filterstrecken wird dabei in m NHN zugewiesen und im Modell automatisch den entsprechenden Modellschichten zugeordnet.

5.3.4. Flussrandbedingung

Der NOK wird im Längsprofil als Flussrandbedingung simuliert. Hierbei kann neben dem Wasserstand auch die Durchlässigkeit der Kanalsohle und dadurch die hydraulische Verbindung zum Untergrund dargestellt werden. Steigt die Wassersäule in den angrenzenden Zellen über den vorgegebenen Wasserstand im NOK, so wirkt dieser als entwässerndes Element, und Grundwasser aus den angrenzenden Zellen tritt dem NOK zu. Sinkt die Wassersäule dagegen unter den Wasserspiegel im NOK, so dreht sich der Effekt um, und Wasser exfiltriert aus dem Kanal in den umgebenden Untergrund.

Im Querprofil werden die Schleusenkammern der Kleinen Schleuse als Flussrandbedingung dargestellt. Die Kammersohle wird hier bei -10,67 m NHN im Modell eingesetzt. Als Wasseroberfläche wird der mittlere Wasserstand im NOK mit -0,2 m NHN gewählt. Die hydraulische Durchlässigkeit der Schleusensohle wird mit 10^{-5} m/s angenommen.

5.3.5. Wandrandbedingung

Die Schleusenkammern werden in den Profilschnitten durch Modellzellen mit einer Wandrandbedingung (Wall Boundary) begrenzt. Hierbei können Zonen definierter Mächtigkeit hydraulische Durchlässigkeiten zugewiesen werden.

Die Kammerbasis der großen Schleuse wurde dagegen als hydraulisch offene Ausführung mit einer Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-3}$ m/s dargestellt.

5.3.6. Undurchlässiger Rand

Die Basis beider Profilschnitte wird als undurchlässiger Rand dargestellt (No Flow Boundary).

Darüber hinaus sind im unteren Teil des nördlichen und südlichen Modellrands des Längsprofils undurchlässige Ränder eingebaut. Dadurch wird ein Unterströmen der Festpotenzialrandbedingung der Elbe bzw. des NOKs verhindert.

6. STATIONÄRE KALIBRIERUNG

Die vorliegenden Profilschnitte wurden als erster Ansatz stationär auf die erwarteten Grundwasserniedrig- und -höchststände kalibriert. Im Rahmen der Kalibrierung werden die hydraulischen Eigenschaften der geologischen Einheiten und die Grundwasserneubildung innerhalb vorher festgelegter Grenzen variiert, bis die Genauigkeit des Modells ein Maximum erreicht. Um dies beurteilen zu können, wird das normierte mittlere Fehlerquadrat (normalised root mean square error) der berechneten Grundwasserstände nach jeder Veränderung der hydraulischen Parameter ermittelt. Ein nRMS-Fehler von unter 15 % gilt bei vergleichbaren Modellen als ausreichende Genauigkeit.

Längsprofil:

Die Kalibrierung des Längsprofils erfolgte mit Hilfe der Grundwasserstandsmessungen in den drei Brunnen GWS1, GWS2, GWS3, sowie in den 8 Kleinrammbohrungen KRB3, KRB9, KRB10, KRB11, KRB12, KRB13, KRB15 und KRB16. Diese Grundwasseraufschlüsse wurden gewählt, da sie etwa entlang der Mittelachse der Schleuseninsel und somit entlang des Längsprofils angeordnet sind. Darüber hinaus wurde auf die Grundwasserganglinien der GW 0707 (F+T) zurückgegriffen.

Mit den in Kapitel 5.2 beschriebenen Ausgangsparametern wurde keine zufriedenstellende Anpassung an die gemessenen Grundwasserstände erreicht. Daher mussten die Eingangsparameter folgendermaßen geändert werden:

- kf-Wert Klei:

Mit Hilfe der Siebanalysen wurden Durchlässigkeiten von $5 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-7}$ m/s ermittelt. Für eine hinreichende Anpassung konnte dieser Wertebereich bestätigt werden. Für einen Wert von $1 \cdot 10^{-6}$ m/s wurden die geringsten Abweichungen erreicht.

- kf-Wert Sande:

Mit Hilfe der Siebanalysen wurden für die Sande Durchlässigkeiten von $1 \cdot 10^{-3}$ - $1 \cdot 10^{-5}$ m/s ermittelt. Auch dieser Wertebereich konnte während der Kalibrierung bestätigt werden. Für einen Wert von $1 \cdot 10^{-4}$ m/s wurden die geringsten Modellfehler beobachtet.

- kf-Wert Beckentone/-schluffe

Der Startwert der Durchlässigkeit betrug für diese Schicht $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Dieser Wert erwies sich im Modell als zu hoch. Der kf-Wert der Beckentone/-schluffe musste im Rahmen der Kalibrierung auf $1 \cdot 10^{-9}$ m/s gesenkt werden.

- kf-Wert Geschiebemergel

Auch der Startwert der Durchlässigkeit dieser Schicht betrug $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Dieser Wert erwies sich im Modell als zu niedrig. Er wurde im Rahmen der Kalibrierung auf $1 \cdot 10^{-7}$ m/s erhöht.

- Grundwasserneubildung

Bezüglich der Grundwasserneubildung existiert keine fundierte Datengrundlage. Sie muss aus den vorliegenden Niederschlagswerten, den geologischen Verhältnissen und mit Hilfe von empirischen Formeln (z.B. Proksch 1990) abgeschätzt werden. Die Grundwasserneubildung musste im Modell ausgehend von einem Startwert von 150 mm auf ca. 70 mm/a reduziert werden.

Die räumliche Verteilung der vier unterschiedlichen geologischen Einheiten zueinander richtet sich nach den Bohrprofilen der eingerichteten Messstellen. Hierbei mussten im Rahmen der Kalibrierung geringfügige Änderungen, wie z.B. das Hinzufügen von lokalen Sandlinsen innerhalb des Kleis, durchgeführt werden.

Die räumliche Erstreckung der Beckentone im Liegenden des Kleis wurde so gewählt, dass sich die geringste Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Grundwasserströmungsfeld ergibt. Bohraufschlüsse in dieser Tiefe sind nicht in ausreichender Anzahl vorhanden.

Als Ergebnis der beschriebenen Kalibrierung ergibt sich ein nRMS-Fehler von 8,55 % für das Szenario MHW und 14,73 % für das Szenario MNW. Gemessene und berechnete Grundwasserstände sind in der folgenden Tabelle 3 zusammengestellt und in Anlage 5 veranschaulicht.

Tabelle 3: Vergleich von gemessenen und berechneten Grundwasserständen im Längsprofil.

	MHW		MNW	
	gemessen m NHN	berechnet m NHN	gemessen m NHN	berechnet m NHN
GWS 1	-0,05	0,43	0,41	0,31
GWS 2	2,57	2,43	1,03	0,99
GWS 3	1,66	1,77	-0,02	0,20
KRB 3	0,47	0,50	0,47	0,60
KRB 9	0,89	0,94	0,89	0,84
KRB 10	1,21	1,33	1,21	0,87
KRB 11	1,26	1,78	-	-
KRB 12	2,24	2,41	-	-
KRB 13	2,08	2,02	-	-
KRB 15	2,68	2,46	-	-
KRB 16	2,71	2,55	-	-

Querprofil:

Die durch die Kalibrierung des Längsmodells festgelegten Durchlässigkeiten der vier geologischen Einheiten wurden in das Querprofil übernommen. Als Beobachtungsmessstellen wurden hier die sechs Grundwassermessstellen BKF GW 0107 F und T, BKF GW 0707 F und T sowie BKF GW 1107 F und T, für die Grundwasserganglinien vorliegen, verwendet. Aus dieser Vorgehensweise ergibt sich ein nRMS-Fehler für das modellierte Querprofil im Hochwasserszenario (MHW) von 10,57 % und von 29,67 % bei Niedrigwasser. Gemessene und berechnete Grundwasserstände sind in der folgenden Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Vergleich von gemessenen und berechneten Grundwasserständen im Querprofil.

	MHW		MNW	
	gemessen m NHN	berechnet m NHN	gemessen m NHN	berechnet m NHN
GW 0107 F	1,00	1,21	0,20	0,21
GW 0107 T	0,05	0,09	-0,80	-1,05
GW 1107 F	0,50	0,56	0,30	-0,53
GW 1107 T	0,40	0,30	-1,20	-0,89
GW 0707 F	0,80	0,84	0,40	-0,30
GW 0707 T	0,25	0,22	-0,80	-0,91

Nach erfolgter Kalibrierung wird im folgenden Abschnitt die durchgeführte Sensitivitätsanalyse beschrieben.

6.1. Sensitivitätsanalyse

Nach der Eichung wurde eine Sensitivitätsanalyse des Modells durchgeführt. Ziel der Analyse ist eine Quantifizierung der Prognoseunsicherheiten des geeichten Modells. Da weder die hydraulischen Parameter noch die Randbedingungen exakt zu bestimmen sind, ist jedes Grundwassermodell mit Fehlern behaftet. Daher ist eine Sensitivitätsanalyse der wichtigsten Parameter erforderlich. Hierdurch kann die Qualität der Prognosen, die aus dem betreffenden Modell abgeleitet werden, beurteilt werden. Erst nach erfolgter Sensitivitätsanalyse kann die Güte eines geeichten Modells beurteilt werden.

Im vorliegenden Fall wurde die Sensitivität des Längs- und Querprofils anhand von Variationen der hydraulischen Leitfähigkeit ermittelt, wobei die Variation jeweils für k_x , k_y und k_z gemeinsam vorgenommen wurde. Der Einfluss, den die Variation der k_f -Werte auf den nRMS-Fehler hat, ist in den Anlagen 6a und b grafisch dargestellt.

Es zeigt sich, dass sowohl das modellierte Längsprofil, als auch das Querprofil sehr sensitiv auf Änderungen des k_f -Wertes in der Kleischicht reagiert. Schon eine Veränderung der k_f -Werte um einen Multiplikator von weniger als 10 oder 0,1 führt dazu, dass der nRMS-Fehler des Modells 15 % überschreitet.

Hingegen wirkt sich eine Variation der hydraulischen Durchlässigkeiten der Sande, der Beckentone und der Geschiebemergel nur geringfügig auf die Genauigkeit der Modellergebnisse aus.

Dies hat zur Konsequenz, dass der Auswahl des k_f -Wertes in der Kleischicht eine hohe Bedeutung zukommt.

6.2. Beurteilung der Prognosefähigkeit

Das Modell zeigt insgesamt gute Konvergenzeigenschaften und Laufstabilität. Es verhält sich sehr sensitiv gegenüber einer k_f -Wert Variation in der Kleischicht, hingegen sehr robust gegenüber k_f -Wert Variationen in den Sanden, den Beckentonen oder dem Geschiebemergel. Die hohe Sensitivität ist dadurch bedingt, dass der Klei als relativ schlecht wasserleitende Schicht den größten Anteil am geologischen Aufbau der oberflächennahen Modellschichten hat. Somit erlangt er einen unmittelbaren Einfluss auf den hydraulischen Einfluss der Grundwasserneubildung. Darüber hinaus sind zahlreiche der flacheren Grundwassermessstellen in Sandlinsen innerhalb des Kleis ausgebaut.

Die erreichte stationäre Kalibrierung stellt eine hinreichend genaue Anpassung an die hydraulischen Verhältnisse bei MHW und MNW der Elbe dar. Die gewählten k_f -Werte sind plausibel und führen zusammen mit den gewählten Randbedingungen zu einer Grundwasserbilanz (Tabelle 5), die plausible Volumenströme für die bewegten Wassermassen ausweist.

Die vorliegende Modellierung wurde stationär auf den höchsten und niedrigsten mittleren Wasserstand der Elbe kalibriert und beschreibt dadurch die beiden Grenzwerte der im Normalfall erwarteten Wasserschwankungen. Die instationäre Reaktion des Systems auf die Wasserstandschwankungen werden jedoch nicht abgebildet. Im Rahmen der durchgeführten Kalibrierung und der Sensitivitätsanalyse zeigt sich, dass eine instationäre Kalibrierung zu einer Verbesserung der Prognosefähigkeit führen würde, das Vorliegen ausreichender instationärer Grundwasserstandsdaten vorausgesetzt.

Tabelle 5: Wasserbilanz des kalibrierten Modells (Längs- und Querprofil).

	Zuflüsse		Abflüsse	
	Längsprofil	Querprofil	Längsprofil	Querprofil
Festpotenzialrand [m³/d]	-	498,88	9,63	221,10
Grundwasserneubildung [m³/d]	134,39	49,20	-	
Flussrandbedingung [m³/d]	-		124,78	326,96
Summe [m³/d]	134,39	548,08	134,41	548,06
Differenz [m³/d]			0,02	0,02
Differenz [%]			0,015	0,004

7. MODELL DER SCHLEUSENINSEL

Um die Aussagekraft der in den nächsten Abschnitten durchgeführten Fallstudien zu erhöhen, wurde ein dreidimensionales Modell der Schleuseninsel aufgebaut. Hierbei wird auf die Ergebnisse der Kalibrierung und der Sensitivitätsanalyse der beiden 2D-Profil-schnitte zurückgegriffen. Vereinfacht ausgedrückt wird der zweidimensionale Ansatz in

ein Mehrschichtenmodell überführt, auf Basis der bei der Kalibrierung ermittelten Parameter. Aufgrund der räumlichen Komplexität der Fragestellung (große Nähe der hydraulischen Randbedingungen zur Position der geplanten Schleusenammer, Tideeinfluss, geringer Flurabstand) verspricht dieser Ansatz eine höhere Ergebnisgenauigkeit als eine rein zweidimensionale Herangehensweise.

Wie bereits erwähnt, werden die hydraulischen Verhältnisse, die im Bereich der geplanten Schleusenammer bei einer Grundwasserabsenkung sowie im Rahmen des späteren Schleusenbetriebs zu erwarten sind, in erheblichem Maße von den geologischen Verhältnissen beeinflusst. In erster Linie ist hier die lokale Verbreitung von grundwasserhemmenden Beckenschluffen und Tonen im Übergangsbereich zwischen Kleischichten und sandigen Ablagerungen bei ca. -20 m NHN zu nennen. Aus diesem Grund flossen die geologischen Erkenntnisse der im Herbst 2008 durchgeführten Baugrunderkundung in das Modell der Schleuseninsel mit ein.

Die folgenden Schritte wurden, ausgehend vom zweidimensionalen Längsprofil, durchgeführt, um das Modell der Schleuseninsel zu erstellen:

1. Einteilung des Modells in 44 Reihen in W-E-Richtung: Die Erstreckung des Modells in W-E-Richtung beträgt somit 505 m.
2. Verwendung eines vereinfachten digitalen Geländemodells, das aus 53 Höhenkoten interpoliert und der obersten Modellschicht zugewiesen wurde. Die Unterkante der obersten Modellschicht wurde in 2 m Tiefe parallel zur GOK gewählt. Die Höhenlage der übrigen Modellschichten wurde unverändert übernommen.
3. Für die räumliche Verteilung der hydrogeologischen Kennwerte wird zusätzlich zu den Informationen aus GWM 1 – 3 und KRB 1 – 21 auch auf die Ergebnisse von insgesamt 33 Bohrungen der Baugrunderkundung aus dem Herbst 2008 zurückgegriffen. Hierfür werden die Ergebnisse der vorliegenden Schichtenverzeichnisse den in Kap. 5 beschriebenen hydrogeologischen Einheiten zugeordnet und entsprechend in das Modell überführt.
4. Die Insel wird im Modell von Flussrandbedingungen umschlossen, deren Höhen entsprechend den Wasserständen MHW +1,5 und MNW -1,3 m NHN in der Elbe und -0,2 m NHN im NOK gewählt wurden.
5. Da der Einfluss der Elbe für die hydraulischen Verhältnisse im Bereich der Schleuseninsel ausschlaggebend ist, wird diese als Festpotenzialrandbedingung dargestellt.

Zur besseren Veranschaulichung sind in den Anlagen 7 bis 10 der räumliche Aufbau des Modells und die Lage der Randbedingungen dargestellt.

Die folgende

Tabelle 6 gibt einen Überblick über den Aufbau des dreidimensionalen Modells.

Tabelle 6: Aufbau des Modells der Schleuseninsel.

Modell der Schleuseninsel	
Grundfläche	ca. 85 ha
Anzahl der Schichten	10
Anzahl der Reihen	44
Anzahl der Spalten	154
Anzahl der Zellen	67.760
Auflösung des Modellgitters	40 m am Modellrand
	5 m im Zentrum
Modelloberfläche	0 bis 6,3 m NHN
Modellbasis	-40 m NHN

8. FALLSTUDIEN

Das Ziel der Modellierung ist es zum einen, mögliche Vertikalströmungen zwischen oberflächennahem und tiefem Grundwasser darzustellen und zum anderen die im Zuge der Baumaßnahmen geplante Grundwasserabsenkung zu simulieren und notwendige Entnahmeraten zu berechnen. Außerdem soll der Einfluss des Bauwerks auf die hydraulischen Verhältnisse der Schleuseninsel ermittelt werden. Aussagen bzgl. bodenmechanischer Fragestellungen, wie z.B. der Möglichkeit eines hydraulischen Grundbruches, können nicht allein mit der verwendeten Modellierungssoftware getroffen werden, da bodenmechanische Parameter im Strömungsmodell keine Berücksichtigung finden.

Es werden die im folgenden aufgelisteten und in den Kapiteln 8.1. bis 8.3. beschriebenen Szenarien simuliert:

- Teilaushub an den geplanten Häuptionen der Schleusenammer
- Grundwasserabsenkung auf der Fläche der geplanten Schleusenammer
- Strömungsverhältnisse im Rahmen des späteren Schleusenbetriebs

Die vorgesehenen Änderungen des Grundwasserstandes führen zu instationären Strömungsverhältnissen im Untergrund. Ein Bereich verminderten hydraulischen Potentials breitet sich von der Schleusenammer aus, ähnlich einem Absenktrichter im Nahbereich um einen Förderbrunnen. Diese Ausbreitung geschieht wegen der überwiegend gering durchlässigen Schichten im Bereich der Schleuseninsel langsam im Verhältnis zur Geschwindigkeit der geplanten Absenkungen. Im betrachteten Fall ist außerdem die räumliche Ausbreitung eines solchen Bereichs mit vermindertem hydraulischen Potential durch die Nähe zur Elbe (Randbedingung 1. Art) eingeschränkt. In den folgenden Abschnitten

wird als konservativer Ansatz der Grundwasserzustrom jeweils einen Monat nach Erreichen des Absenkungsziels berechnet.

8.1. Grundwasserabsenkung in den Aushubbereichen der Häupter der Schleusenammer

Im Zuge der geplanten Baumaßnahmen ist ein Teilaushub im Bereich der nördlichen und südlichen Häupter der Schleusenammer geplant. Die Ausführung ist hierbei als umspundete Baugrube mit einer dichten Sohle bei ca. -14 m NHN vorgesehen.

Hierfür wird am südlichen und nördlichen Ende der geplanten Kammer ein jeweils ca. 60 x 60 m großer Bereich im Modell von Dichtwänden umschlossen und daran anschließend die für eine Grundwasserabsenkung innerhalb der simulierten Baugruben notwendige Wasserentnahmerate berechnet. Sie binden in die feinkörnigen Bereiche an der Basis der Kleischichten bei ca. -22 m NHN ein.

Im ersten Ansatz wurden die eingespundeten Teilaushubbereiche mit hydraulisch offener Sohle gerechnet. Hierbei zeigte sich, dass bei einer Entnahmerate von 800 m³/d eine Grundwasserabsenkung auf ca. -12 m NHN im südlichen Bereich und ca. -5,5 m NHN im nördlichen Aushubbereich zu erreichen ist.

Im zweiten Schritt wurde im Modell eine dichtende Sohle bei -14 m NHN eingesetzt und folgende Annahmen getroffen:

- Es wird von einem einheitlichen Wasserstand von 0,13 m NHN in der Elbe und im NOK ausgegangen, was dem aus MHW und MNW der Elbe gemittelten Wasserstand, sowie dem mittleren Wasserstand im NOK entspricht.
- Innerhalb der von Dichtwänden abgegrenzten Bereiche wird eine Durchlässigkeit von 0,1 m/s angenommen, um den Aushub zu simulieren.
- Darstellung der umgebenden Spundwände bis in den Bereich der grundwasserhemmenden Schichten an der Basis des Kleis bei ca. -22 m NHN
- Die Wasserentnahme erfolgt mittels eines zentralen Entnahmepunktes an der Basis der modellierten Baugruben.
- Darstellung der dichten Sohle durch Annahme einer vertikalen Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-10}$ m/s in den Modellzellen bei ca. -14 m NHN

Bei diesem Ansatz ergeben sich die folgenden Grundwasserabsenkungsbeträge innerhalb der beiden Aushubbereiche in Abhängigkeit von der Entnahmerate (

Tabelle 7).

Tabelle 7: Berechnete Entnahmeraten im Bereich der Schleusenhäupter.

Südlicher Aushubbereich		Nördlicher Aushubbereich	
Entnahmerate [m ³ /d]	GW-Oberfläche [m NHN]	Entnahmerate [m ³ /d]	GW-Oberfläche [m NHN]
6,0	-14,0	9,0	-14,0

Es zeigte sich, dass im nördlichen Aushubbereich mit etwa 1,5-fach höheren Entnahmeraten zu rechnen ist als im südlichen. Dies ist auf sandige Partien in den Kleien zurückzuführen, die als Zonen erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit im Modell eine Wegsamkeit in den Bereich des NOKs bilden. Als durchschnittliche hydraulische Durchlässigkeit der Dichtwände und der dichtenden Sohle wird 10^{-10} m/s angenommen. Auf Grundlage der getroffenen Annahmen ergeben sich Entnahmeraten von ca. 6,0 – 9,0 m³/d.

8.2. Grundwasserabsenkung in der geplanten Schleusenkammer

Im Zuge der Bauarbeiten ist nach Einspundung bei hydraulisch offener Sohle auf der gesamten Fläche der geplanten Schleusenkammer eine Absenkung der Wasseroberfläche auf ca. -4,5 m NHN vorgesehen. Die für die entsprechende Absenkung notwendigen Entnahmeraten werden für die Szenarien MHW Elbe und MNW Elbe gerechnet.

Die geplante Schleusenkammer wird hierfür im Modell wie folgt dargestellt:

- Umschließung der Schleusenkammer durch Dichtwände, die bis auf ein Niveau von -25 m NHN reichen
- Darstellung der Dichtwände als Modellzellen mit einer Restdurchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-10}$ m/s
- Dem inneren Bereich der Schleusenkammer wird eine sehr hohe hydraulische Durchlässigkeit zugewiesen ($k_f = 0,1$ m/s), um den Aushub der Kammer zu simulieren.
- Die Basis der Schleusenkammer wird nicht verändert, ist also hydraulisch offen ausgebildet. Sie liegt innerhalb der Kleischichten mit eingelagerten sandigen Partien.
- Dem Inneren der Schleusenkammer wird das gewünschte Absenkungsziel als Ausgangswasserspiegel zugewiesen. Das anfängliche Leerpumpen der Schleusenkammer findet keine Berücksichtigung.

In diesem Szenario wird von einer Absenkung des Wasserspiegels innerhalb der geplanten Schleusenammer (auf der gesamten Länge der Kammer) bis auf ca. -4,5 m NHN ausgegangen. Diese Absenkung wird im Modell durch eine entsprechende Randbedingung in einer Modellzelle im unteren Bereich der Grube fest vorgegeben (Randbedingung 1. Art). Das Modell wählt automatisch eine Entnahmerate aus dieser Zelle, die für die Einhaltung der vorgegebenen Absenkung notwendig ist. Die berechnete Wasserbilanz gibt Aufschluss über die jeweiligen Volumenströme.

Festpotenzial- und Flussrandbedingung auf Seiten der Elbe werden auf +1,5 m NHN für MHW, bzw. -1,3 m NHN für MNW Elbe eingestellt. Nördlich der Schleuseninsel wird der mittlere Wasserstand des NOKs mit -0,2 m NHN der Rechnung zugrunde gelegt. Die Verbreitung der grundwasserhemmenden Beckenschluffe hat einen erheblichen Einfluss auf die in der Schleusenammer anfallende Wassermenge im Falle einer Wasserhaltungsmaßnahme. Für die Verbreitung der Beckenschluffe wird auf die Ergebnisse der Bohrungen aus der Baugrunderkundung im Herbst 2008 zurückgegriffen.

Die berechnete Verteilung der Grundwassergleichen im Bereich der Insel ist in Anlage 10 dargestellt. Die folgenden Absenkungsbeträge werden in Abhängigkeit von der Entnahmerate erreicht.

Tabelle 8: Entnahmerate und Lage der Wasseroberfläche innerhalb der geplanten Schleusenammer bei Elbe MHW.

MNW Elbe		MHW Elbe	
Entnahmerate [m³/d]	GW-Oberfläche [m NHN]	Entnahmerate [m³/d]	GW-Oberfläche [m NHN]
730	-1,5	1.500	-1,5
1.600	-3,0	2.200	-3,0
2.300	-4,5	2.900	-4,5

Bei umpundeter Schleusenammer und hydraulisch offener Sohle ist demnach bei einer Absenkung bis auf -4,5 m NHN mit einem Wasserandrang von ca. 2.300 - 2.900 m³/d (ca. 95 – 120 m³/h) zu rechnen. Legt man in der Elbe einen Wasserstand von +1,5 m NHN (MHW) zugrunde, erhöht sich die zuströmende Wassermenge um ca. 25 % im Verhältnis zu MNW Elbe, ein stationäres Strömungsfeld vorausgesetzt.

In der folgenden Abbildung 1 ist der Zusammenhang zwischen Lage der Wasseroberfläche und Entnahmerate grafisch für MNW und MHW Elbe dargestellt. Eine grafische Darstellung der berechneten Grundwassergleichen bietet Anlage 10.

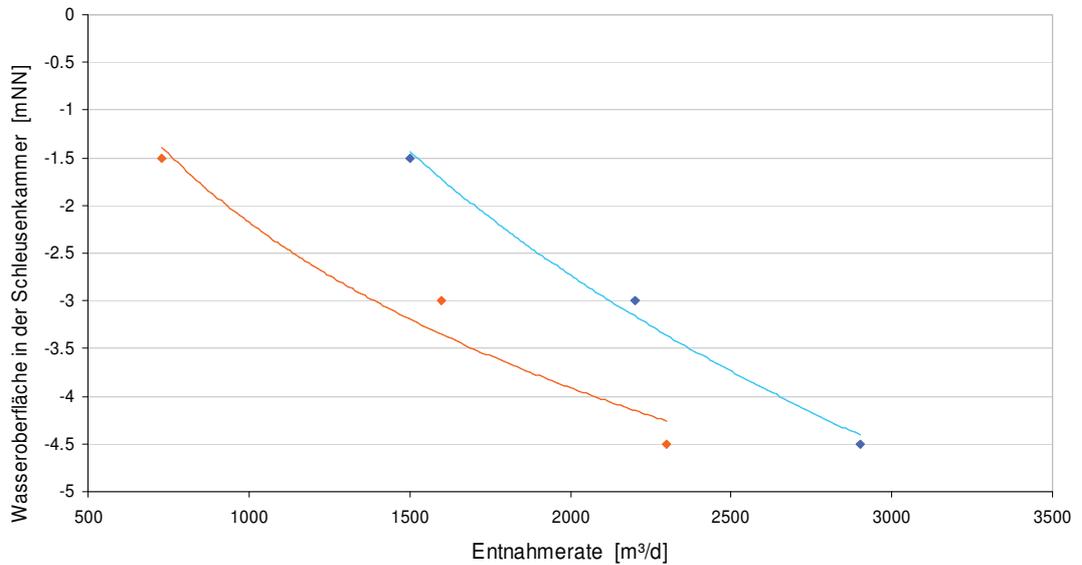


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Entnahmerate und Absenkung bei hydraulisch offener Schleusensole. Dargestellt ist die Situation für MNW (orange) und MHW (blau) der Elbe mit logarithmischen Ausgleichsgeraden.

8.3. Strömungsverhältnisse im Rahmen des späteren Schleusenbetriebs

Um Aussagen über den maximal zu erwartenden Zustrom über die offene Schleusensole im Rahmen des späteren Schleusenbetriebs treffen zu können, wird in diesem Szenario ein Wasserstand von +3 m NHN für die Elbe und -0,2 m NHN in der Schleusenkammer angenommen. Der Zustrom über die Schleusensole wird berechnet.

Zusätzlich zu den in Kap. 8.2 beschriebenen Eigenschaften des Schleusenkammermodells werden die beschriebenen Verhältnisse folgendermaßen dargestellt:

- Am nördlichen Ende der Schleusenkammer wird statt der Dichtwand eine direkte hydraulische Verbindung zur Randbedingung des NOK eingesetzt. Der berechnete Wasserstand in der Schleusenkammer entspricht somit dem Wasserstand der Randbedingung NOK (-0,2 m NHN).

In Abhängigkeit der Wasserstandsdifferenz zwischen Elbe und Schleusenkammer stellen sich hierbei die folgenden Volumenzuströme über die Kammersohle ein.

Tabelle 9: Berechneter Wasserzustrom durch die hydraulisch offene Schleusenkammer-
 sohle im Rahmen des späteren Betriebs.

Wasserstand NOK: -0,2 m NHN	
Wasserstand Elbe	Zustrom [m³/d]
0,0 m NHN	85
1,0 m NHN	300
2,0 m NHN	830
3,0 m NHN	1.300

Das berechnete Verhältnis wird, zusammen mit Ausgleichsgerade in der folgenden
 Abbildung 2 veranschaulicht. Eine grafische Darstellung der berechneten Grundwasser-
 gleichen bietet Anlage 11.

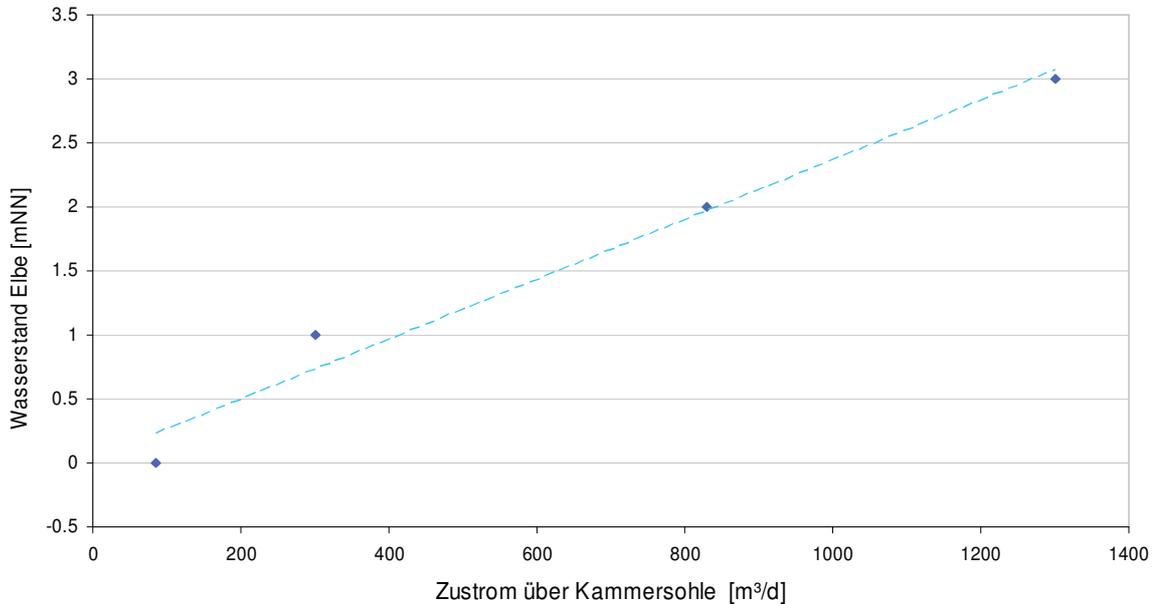


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Wasserstand Elbe und erwartetem Zustrom über
 die Kammersohle.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Die hydraulischen Verhältnisse im Bereich der Schleuseninsel werden hauptsächlich von
 den tidebedingten Wasserschwankungen in der Elbe beeinflusst. Der mittlere Tidenhub
 beträgt ca. 2,8 m.

Die grundwasserhemmenden Schichten der Beckenschluffe sind für die hydraulischen Verhältnisse im Modellgebiet von großer Bedeutung. Es können demnach zwei Hauptgrundwasserstockwerke voneinander unterschieden werden. Die relativ schlecht wasserleitenden Kleischichten mit ihren sandigen Einschaltungen werden bereichsweise durch eine geringmächtige Schicht von Beckenschluffen/-tonen voneinander getrennt.

Es zeigt sich, dass die beiden vorhandenen Grundwasserstockwerke miteinander hydraulisch kommunizieren. Das erste Grundwasserstockwerk, das sich innerhalb der relativ schlecht durchlässigen Kleischichten und feinsandigen Partien befindet, wird in erster Linie von oberflächlichen Sickerwasserzutritten beeinflusst. Ein Tideeinfluss der Elbe ist hier nur stark gedämpft zu verzeichnen. Sande im Liegenden der Beckentone/-schluffe bilden das zweite Grundwasserstockwerk. Hier zeichnet sich eine direkte Beeinflussung durch den Tidenhub der Elbe ab. So beträgt z.B. die Schwankungsbreite der Grundwasseroberfläche in der im ersten Grundwasserstockwerk verfilterten Grundwassermessstelle (GWM) GW0707F ca. 1,2 m (10. – 30.06.2008). In GW0707T, die das zweite Grundwasserstockwerk erschließt, wird dagegen eine Schwankung um ca. 2,9 m registriert.

Auf Grundlage der getroffenen Annahmen ist bei Einspundung der Schleusenkammer und hydraulisch offener Sohle mit einem Wasserzustrom über die Kammersohle von ca. 2.300 – 2.900 m³/d zu rechnen, eine Absenkung der Wasseroberfläche auf ca. -4,5 m NHN vorausgesetzt.

Um Aussagen über den maximal zu erwartenden Zustrom über die offene Schleusensohle im Rahmen des späteren Schleusenbetriebs treffen zu können, wurde der Zustrom durch die Sohle für einen Wasserstand von +3 m NHN für die Elbe und -0,2 m NHN in der Schleusenkammer berechnet. Für diesen Extremzustand ergibt sich ein Zustrom von ca. 1.300 m³/d.

Das Modellgebiet zeichnet sich wegen des Tideinflusses der Elbe durch ausgeprägt instationäre Strömungsverhältnisse im Grundwasser aus. Die vorliegende Modellierung wurde stationär auf den höchsten und niedrigsten mittleren Wasserstand der Elbe kalibriert und beschreibt dadurch die beiden Grenzwerte der im Normalfall erwarteten Wasserschwankungen. Im Rahmen der durchgeführten Kalibrierung und der Sensitivitätsanalyse zeigt sich, dass eine genaue instationäre Kalibrierung zu einer Verbesserung der Prognosefähigkeit führen würde. Hierfür ist allerdings das Vorliegen ausreichender instationärer Grundwasserstandsdaten die Voraussetzung.

10. VERWENDETE UNTERLAGEN

BUSCH, K.-F. & LUCKNER, L. (1974): Geohydraulik für Studium und Praxis. – 2. Aufl., 442 S., Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.

HELMIG, R. 1996: Einführung in die Numerischen Methoden der Hydromechanik. – Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, Mitteilungen 86: 219 S.; Stuttgart.

KINZELBACH, W. & RAUSCH, R. 1995: Grundwassermodellierung. – 283 S., Gebrüder Borntraeger; Berlin, Stuttgart.

MARSAL, D. 1989: Finite Differenzen und Elemente. – 300 S., Springer Verlag; Berlin, New York, London.

POLLOCK, D. W. (1994): User's guide for modpath/modpath-plot, version 3: A particle tracking post-processing package for modflow, the u.s. geological survey finite-difference ground-water flow model. Of 94-464, U.S. Geol. Survey, Washington, D.C.

PRINZ, H. (1997): Abriß der Ingenieurgeologie. – 545 S., Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1997.

ooo000ooo

Wir bedanken uns für das uns entgegengebrachte Vertrauen und stehen Ihnen selbstverständlich jederzeit gerne zur Verfügung, sollten Sie Fragen oder Kommentare zu diesem Bericht haben.

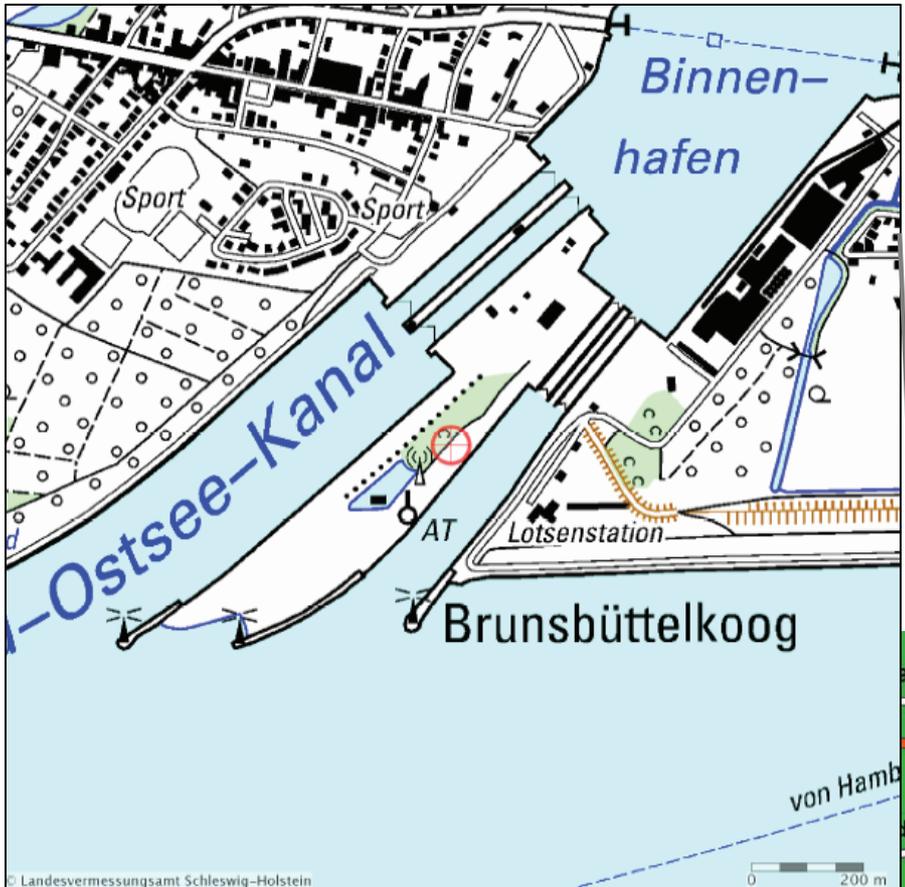
URS Deutschland GmbH

für i.A. Dr. Matthias Weede
Projektbearbeiter



für i.V. Dipl.-Geol. Rolf Heykes
Projektleiter

Anlage 1 – Lage des Untersuchungsgebietes



© Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein



Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein

Benennung

Lage des Untersuchungsgebietes

Projekt

Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel

Auftraggeber

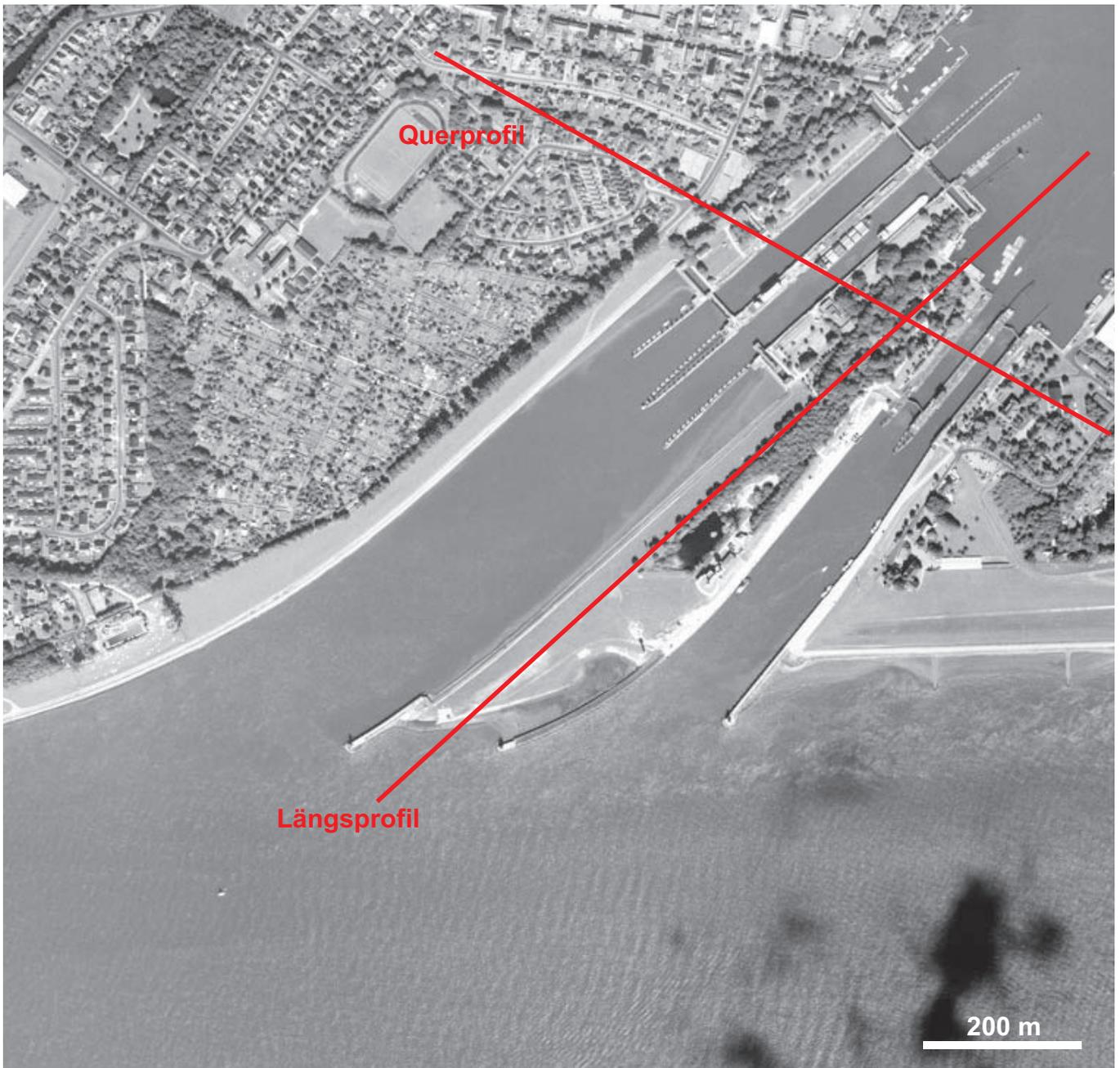
TGP Landschaftsarchitekten



URS Deutschland GmbH
 Sutelstr. 2
 D-30659 Hannover
 Tel.: +49 (0) 511 646419-0
 Fax: +49 (0) 511 646419-99

Maßstab siehe Balken	Bearbeiter Dr. M. Weede	Plangröße A4
Datum Februar 2009	Zeichner Dr. M. Weede	Anlage 1
Datei		
Projekt-Nr.		43874212

Anlage 2 – Luftbild mit Lage der modellierten Profilschnitte



<p>Benennung</p> <p style="text-align: center;">Luftbild mit Lage der modellierten Profilschnitte</p>	<p style="text-align: center;">URS</p> <p>URS Deutschland GmbH Sutelstr. 2 D-30659 Hannover Tel.: +49 (0) 511 646419-0 Fax: +49 (0) 511 646419-99</p>		
<p>Projekt</p> <p style="text-align: center;">Umweltuntersuchungen NOK- Schleusen Brunsbüttel</p>			
<p>Auftraggeber</p> <p style="text-align: center;">TGP Landschaftsarchitekten</p>	<p>Datum Februar 2009</p>	<p>Zeichner Dr. M. Weede</p>	<p>Anlage 2</p>
	<p>Datei</p> <p>Projekt-Nr. 43874212</p>		

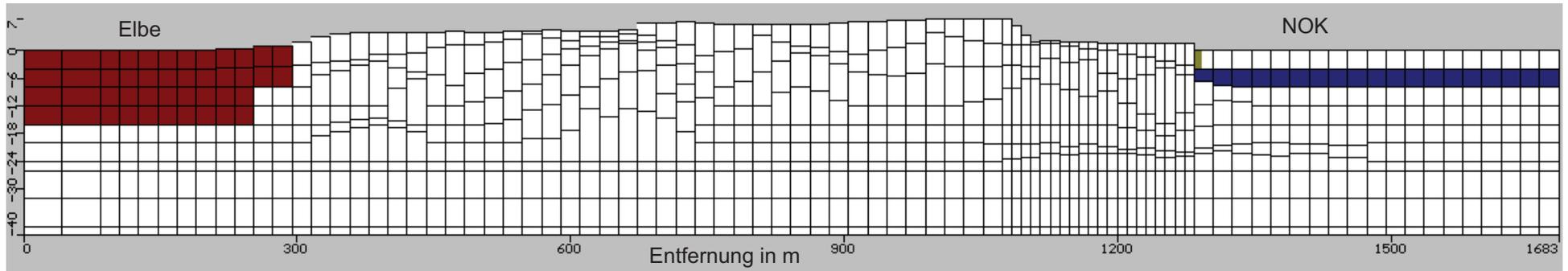
Anlage 3a – Anordnung der Modellzellen im Längsprofil mit Randbedingungen

SSW

NNE

Höhe in m NN

Schleuseninsel



Legende:

-  Modellzelle
-  Festpotentialrandbedingung
-  Flussrandbedingung
-  Wandrandbedingung

Benennung

Diskretisierung – Verteilung der Zellen im Längsprofil mit Randbedingungen

Projekt

Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel

Auftraggeber

TGP Landschaftsarchitekten

URS

URS Deutschland GmbH
Sutelstr. 2
D-30659 Hannover
Tel.: +49 (0) 511 646419-0
Fax: +49 (0) 511 646419-99

Maßstab

ohne

Bearbeiter

Dr. M. Weede

Plangröße

A4

Datum

Februar 2009

Zeichner

Dr. M. Weede

Anlage

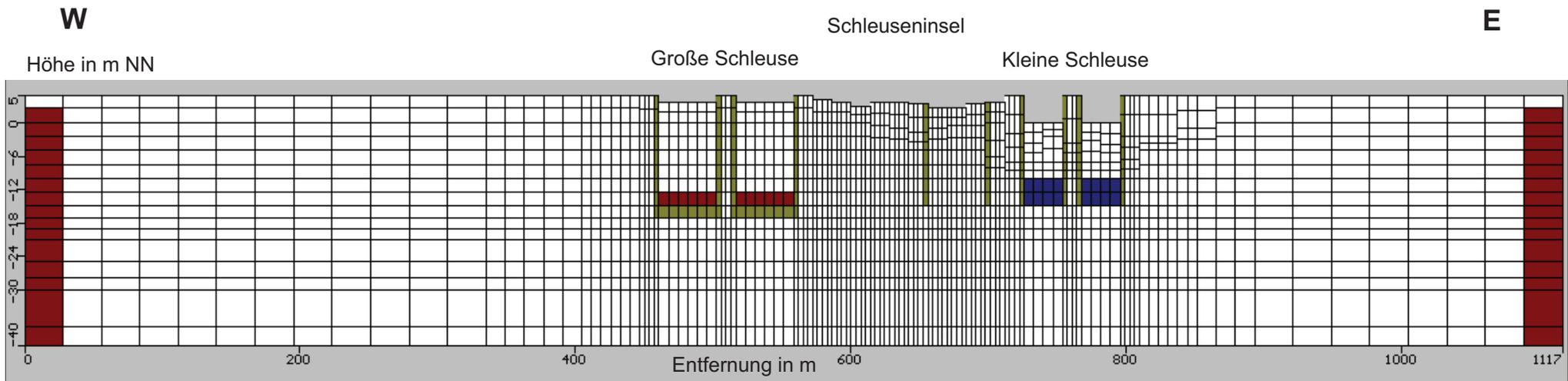
3a

Datei

Projekt-Nr.

43874212

Anlage 3b – Anordnung der Modellzellen im Querprofil mit Randbedingungen



- Legende:
- Modellzelle
 - Festpotenzialrandbedingung
 - Flussrandbedingung
 - Wandrandbedingung

Benennung <p style="text-align: center;">Diskretisierung – Verteilung der Zellen im Querprofil mit Randbedingungen</p>	<p>URS Deutschland GmbH Sutelstr. 2 D-30659 Hannover Tel.: +49 (0) 511 646419-0 Fax: +49 (0) 511 646419-99</p>	
Projekt <p style="text-align: center;">Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel</p>	Maßstab ohne	Bearbeiter Dr. M. Weede
Auftraggeber <p style="text-align: center;">TGP Landschaftsarchitekten</p>	Datum Februar 2009	Zeichner Dr. M. Weede
Datei		Plangröße A4
Projekt-Nr.		Anlage 3b
43874212		3b

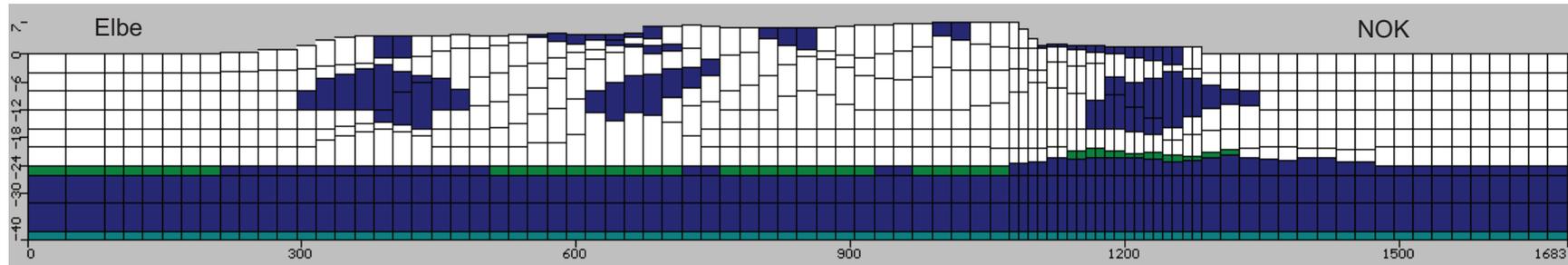
Anlage 4a – Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten im Längsprofil

SSW

NNE

Höhe in m NN

Schleuseninsel



Entfernung in m

Legende:

- Klei $k_f = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$
- Sande $k_f = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
- Beckenton/-schluff $k_f = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$
- Geschiebemergel $k_f = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

Benennung

Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten im Längsprofil

Projekt

Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel

Auftraggeber

TGP Landschaftsarchitekten



URS Deutschland GmbH
 Sutelstr. 2
 D-30659 Hannover
 Tel.: +49 (0) 511 646419-0
 Fax: +49 (0) 511 646419-99

Maßstab ohne	Bearbeiter Dr. M. Weede	Plangröße A4
Datum Februar 2009	Zeichner Dr. M. Weede	Anlage 4a
Datei		
Projekt-Nr.		43874212

Anlage 4b – Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten im Querprofil

W

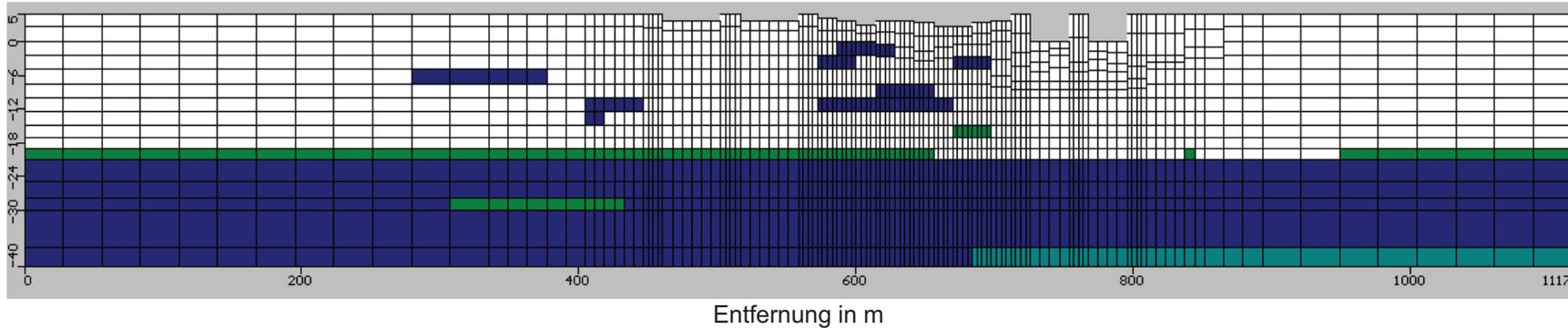
E

Höhe in m NN

Schleuseninsel

Große Schleuse

Kleine Schleuse



Legende:

- Klei $k_f = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$
- Sande $k_f = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
- Beckenton/-schluff $k_f = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$
- Geschiebemergel $k_f = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

Benennung

Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten im Querprofil

Projekt

Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel

Auftraggeber

TGP Landschaftsarchitekten

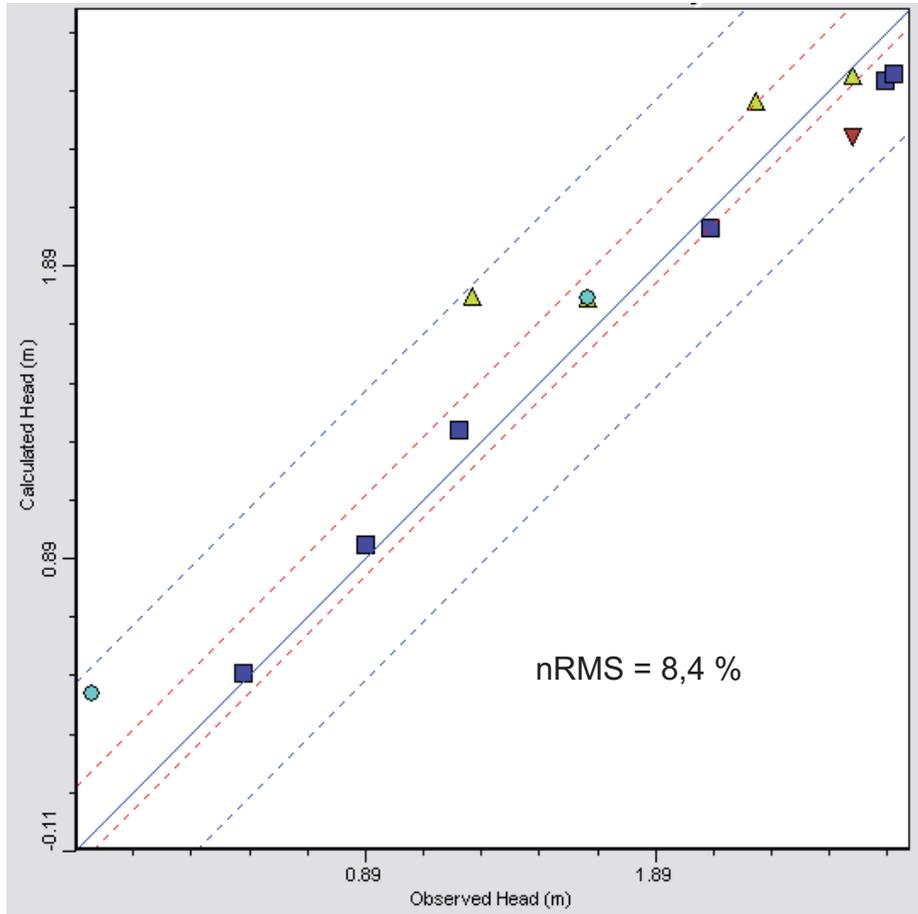


URS Deutschland GmbH
 Sutelstr. 2
 D-30659 Hannover
 Tel.: +49 (0) 511 646419-0
 Fax: +49 (0) 511 646419-99

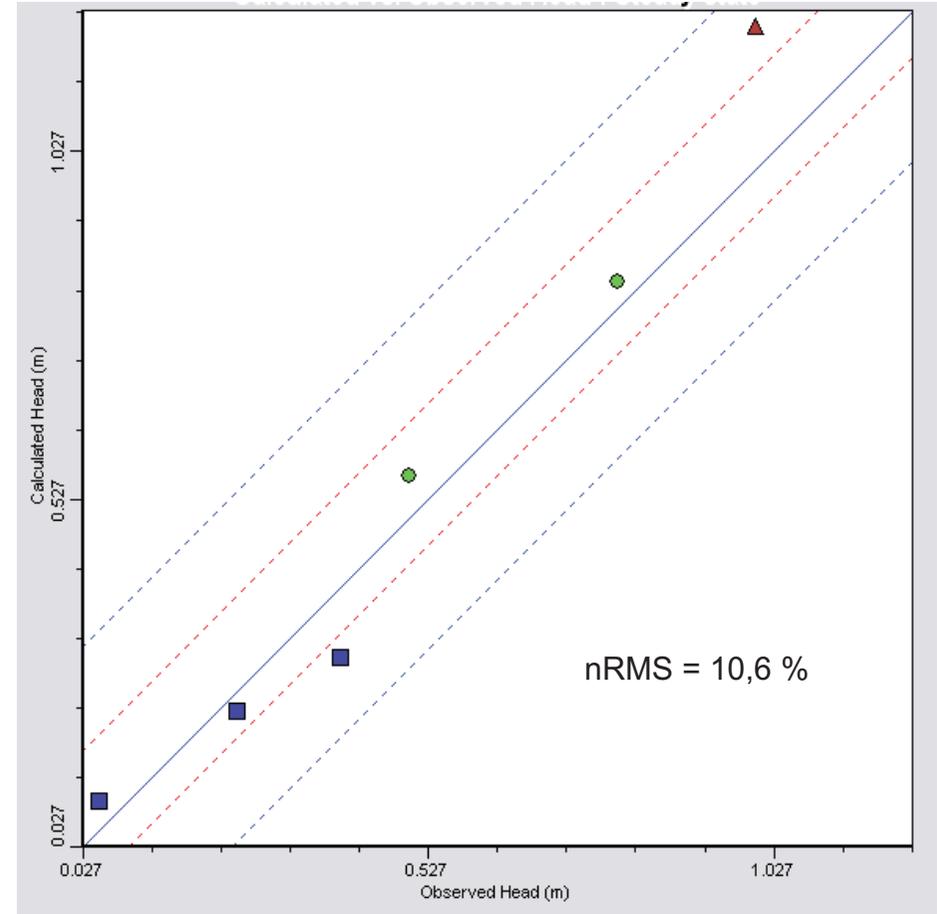
Maßstab ohne	Bearbeiter Dr. M. Weede	Plangröße A4
Datum Februar 2009	Zeichner Dr. M. Weede	Anlage 4b
Datei		
Projekt-Nr.		43874212

Anlage 5 – Ergebnis der Modellkalibrierung

Berechnete gegen gemessene Wasserstände - Längsprofil



Berechnete gegen gemessene Wasserstände - Querprofil



Tiefenlage der Beobachtungspunkte im
Längsprofil Querprofil

- Modellschicht 2
- Modellschicht 3
- ▲ Modellschicht 4
- ▼ Modellschicht 6
- Modellschicht 6
- ▲ Modellschicht 7
- Modellschicht 12

Benennung

Ergebnisse der Modellkalibrierung

Projekt

Umweltuntersuchungen NOK-
Schleusen Brunsbüttel

Auftraggeber

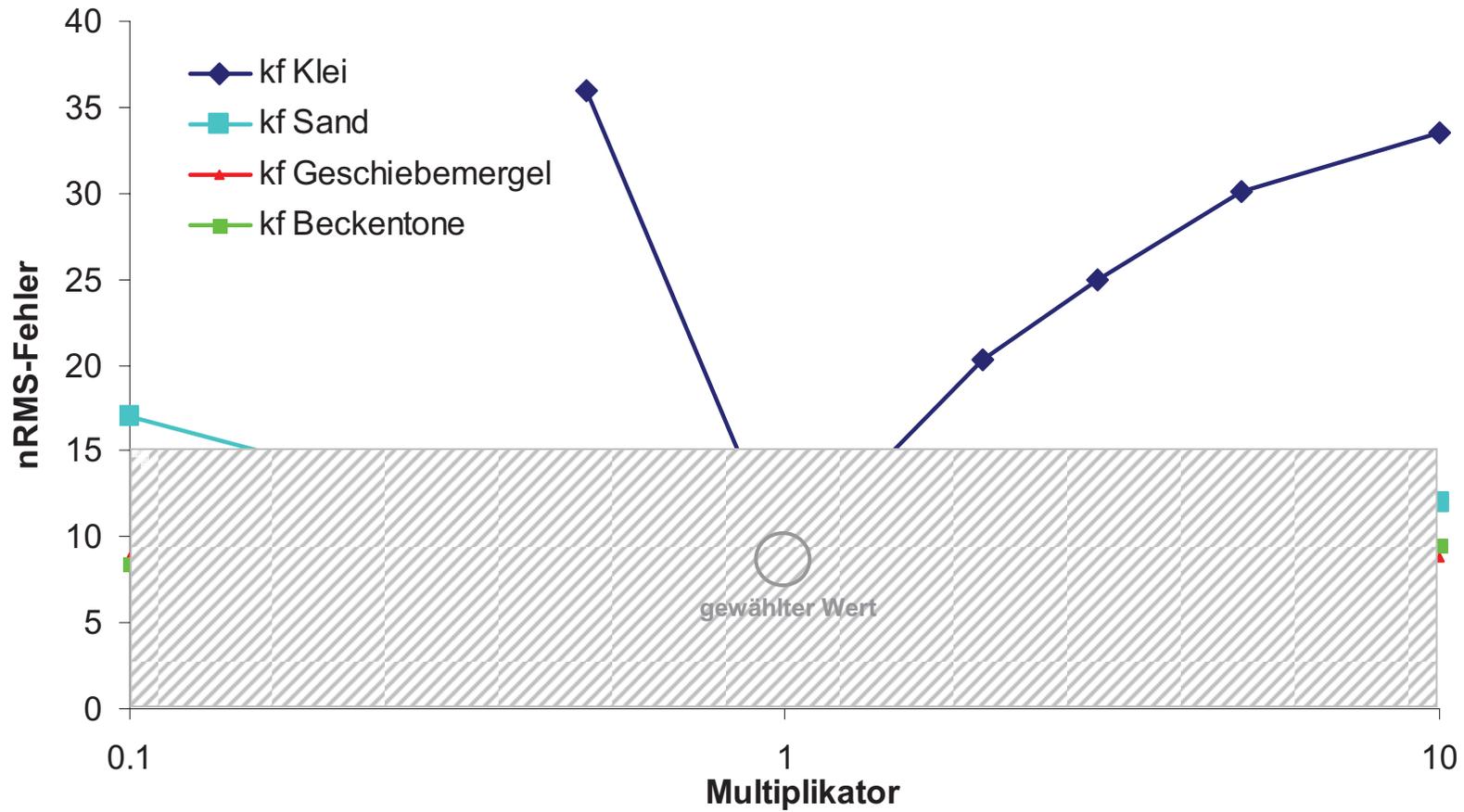
TGP Landschaftsarchitekten



URS Deutschland GmbH
Sutelstr. 2
D-30659 Hannover
Tel.: +49 (0) 511 646419-0
Fax: +49 (0) 511 646419-99

Maßstab ohne	Bearbeiter Dr. M. Weede	Plangröße A4
Datum Februar 2009	Zeichner Dr. M. Weede	Anlage 5
Datei		
Projekt-Nr.		43874212

Anlage 6a – Ergebnis der Sensitivitätsanalyse Längsprofil



Angestrebte Modellgenauigkeit

Benennung

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse
Längsprofil

Projekt

Umweltuntersuchungen NOK-
Schleusen Brunsbüttel

Auftraggeber

TGP Landschaftsarchitekten

URS

URS Deutschland GmbH
Sutelstr. 2
D-30659 Hannover
Tel.: +49 (0) 511 646419-0
Fax: +49 (0) 511 646419-99

Maßstab
ohne

Bearbeiter
Dr. M. Weede

Plangröße
A4

Datum
Februar 2009

Zeichner
Dr. M. Weede

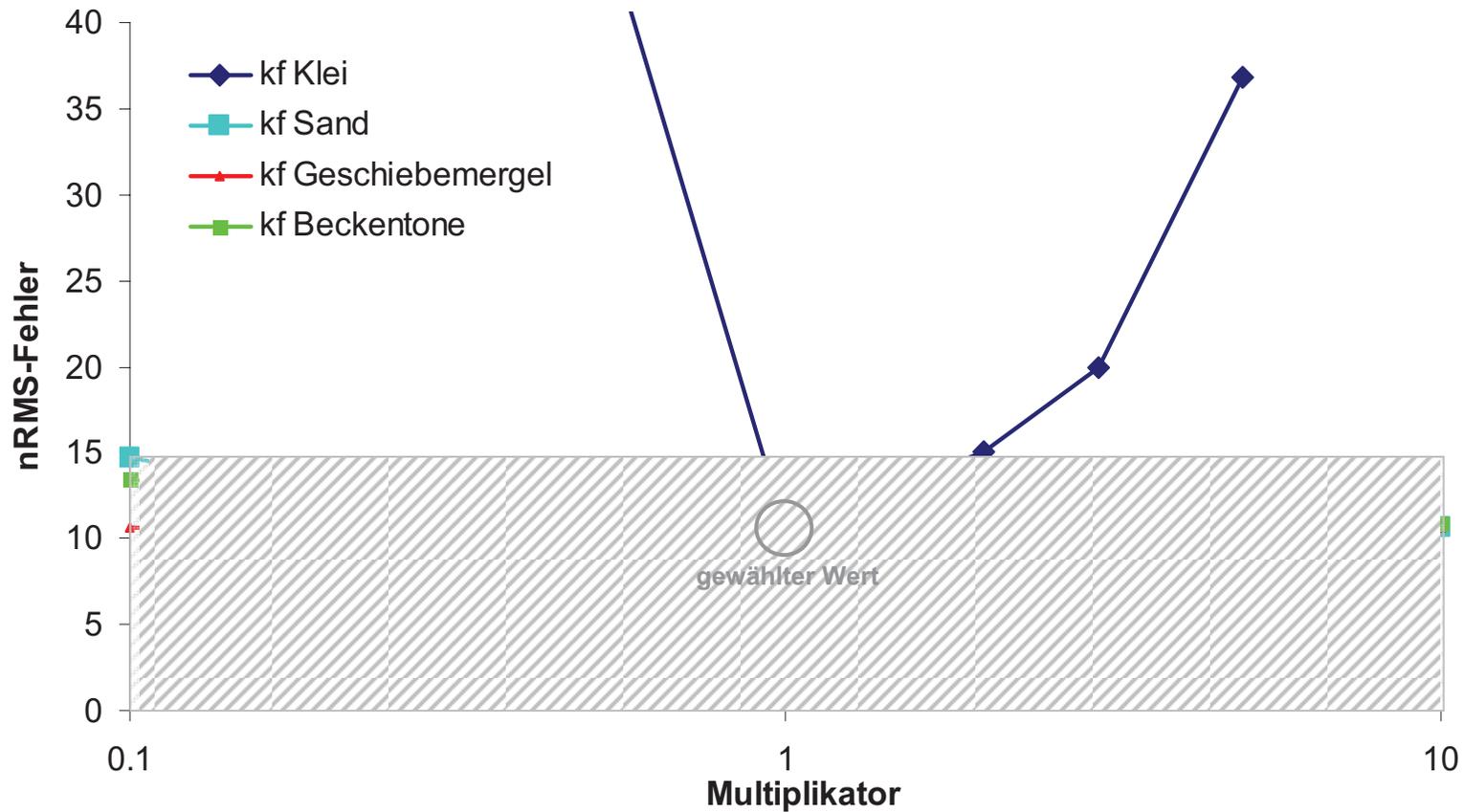
Anlage
6a

Datei

Projekt-Nr.

43874212

Anlage 6b – Ergebnis der Sensitivitätsanalyse Querprofil



Angestrebte Modellgenauigkeit

Benennung

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse
Querprofil

Projekt

Umweltuntersuchungen NOK-
Schleusen Brunsbüttel

Auftraggeber

TGP Landschaftsarchitekten



URS Deutschland GmbH
Sutelstr. 2
D-30659 Hannover
Tel.: +49 (0) 511 646419-0
Fax: +49 (0) 511 646419-99

Maßstab
ohne

Bearbeiter
Dr. M. Weede

Plangröße
A4

Datum
Februar 2009

Zeichner
Dr. M. Weede

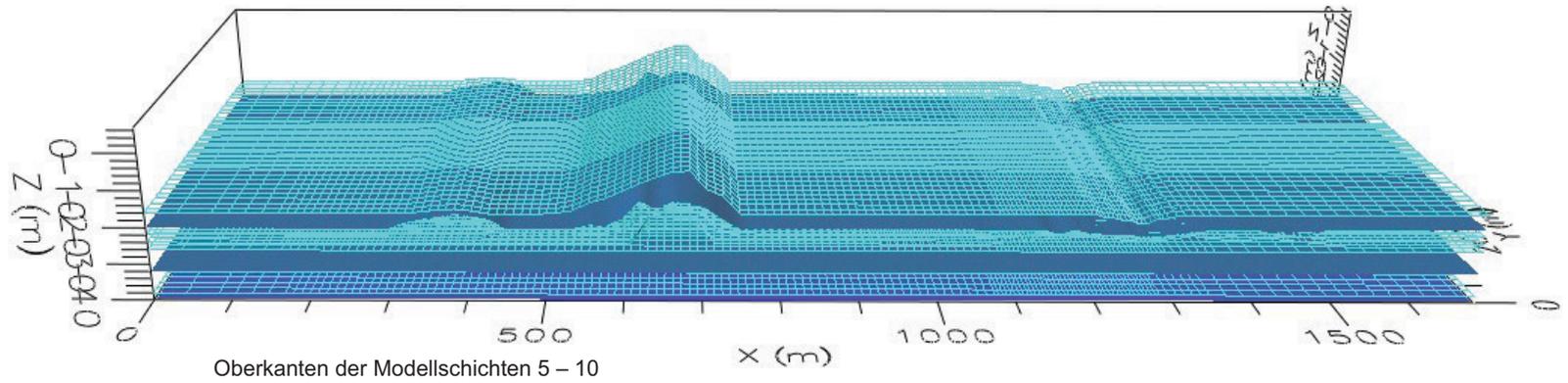
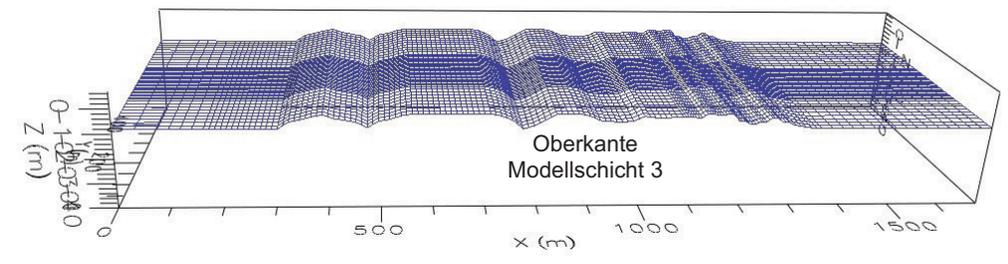
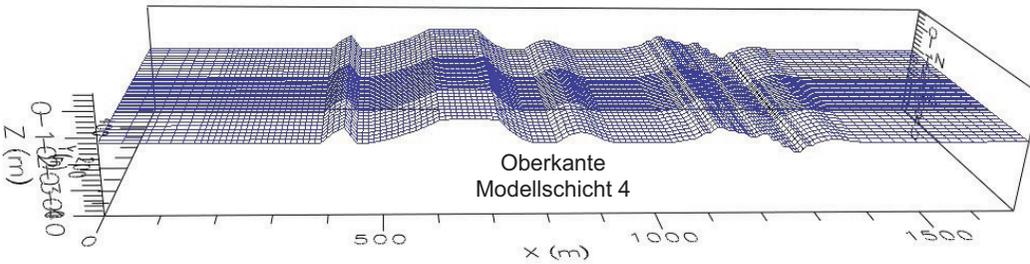
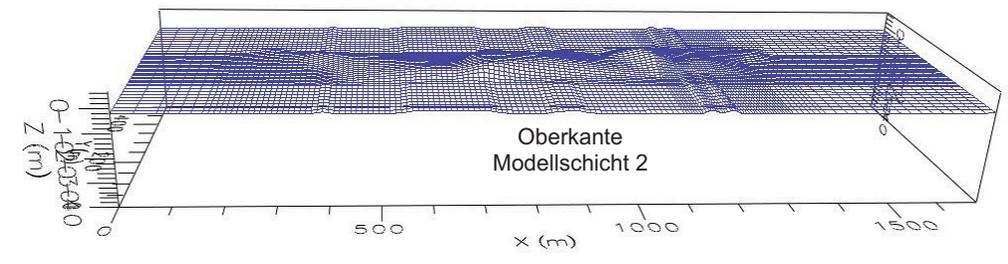
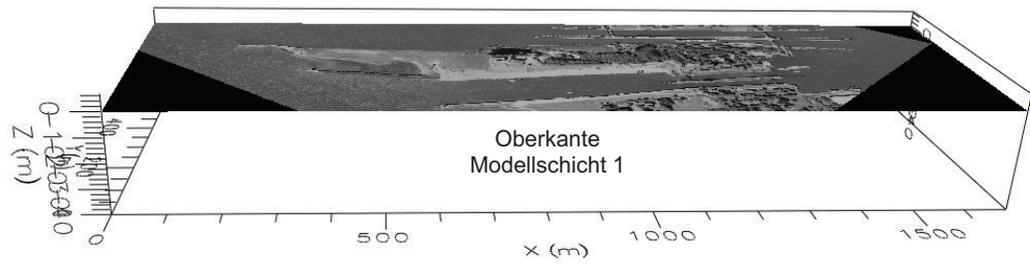
Anlage
6b

Datei

Projekt-Nr.

43874212

Anlage 7 – Modell der Schleuseninsel - Anordnung der Modellschichten

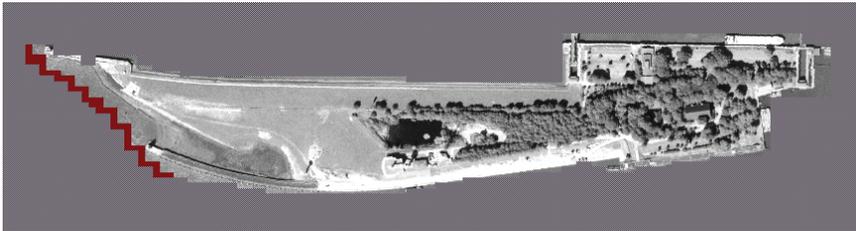


Darstellung fünffach überhöht.

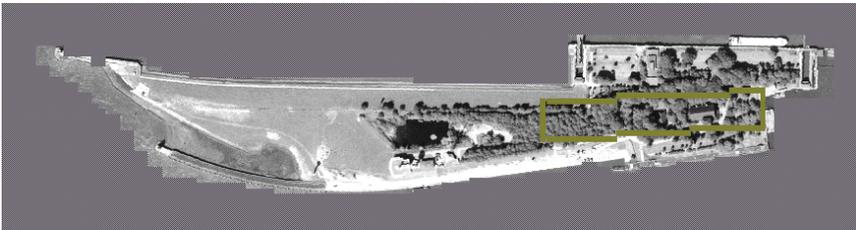
Auftraggeber TGP Landschaftsarchitekten		Projekt/Maßnahme Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel	
Zeichner URS URS Deutschland GmbH Sutelstr. 2 30659 Hannover Tel.: (0511)646419 0 Fax: (0511)646419 99		Benennung Modell der Schleuseninsel – Anordnung der Modellschichten	
Maßstab ohne	Zeichnungs-Nr. 43874212	Bearbeiter M. Weede	Anlage 7
Datum 02/2009	Projekt-Nr. 43874212	Zeichner M. Weede	Blatt-Nr.

Anlage 8a – Modell der Schleuseninsel - Anordnung der Randbedingungen

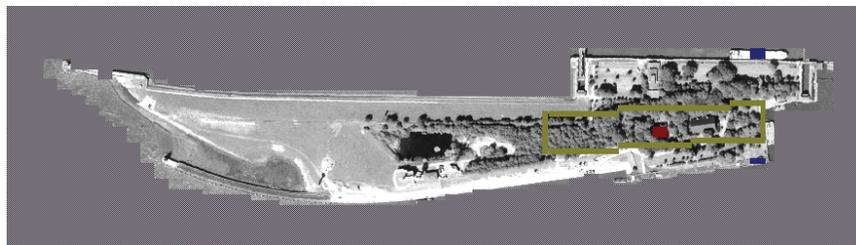
Modellschichten 8 - 10



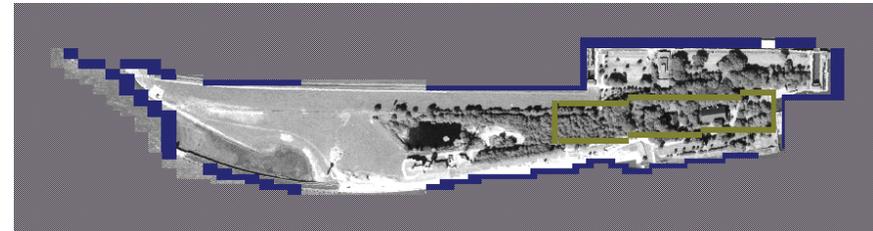
Modellschichten 1 - 2 und 6 - 7



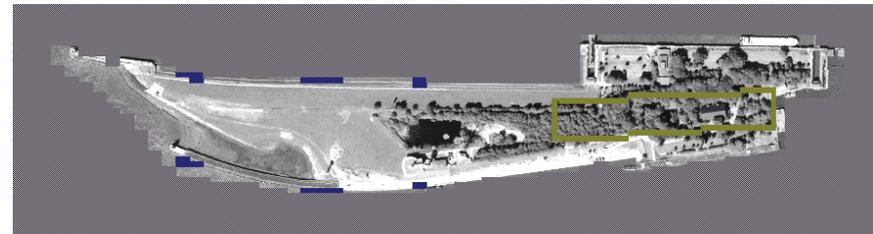
Modellschicht 3



Modellschicht 4



Modellschicht 5



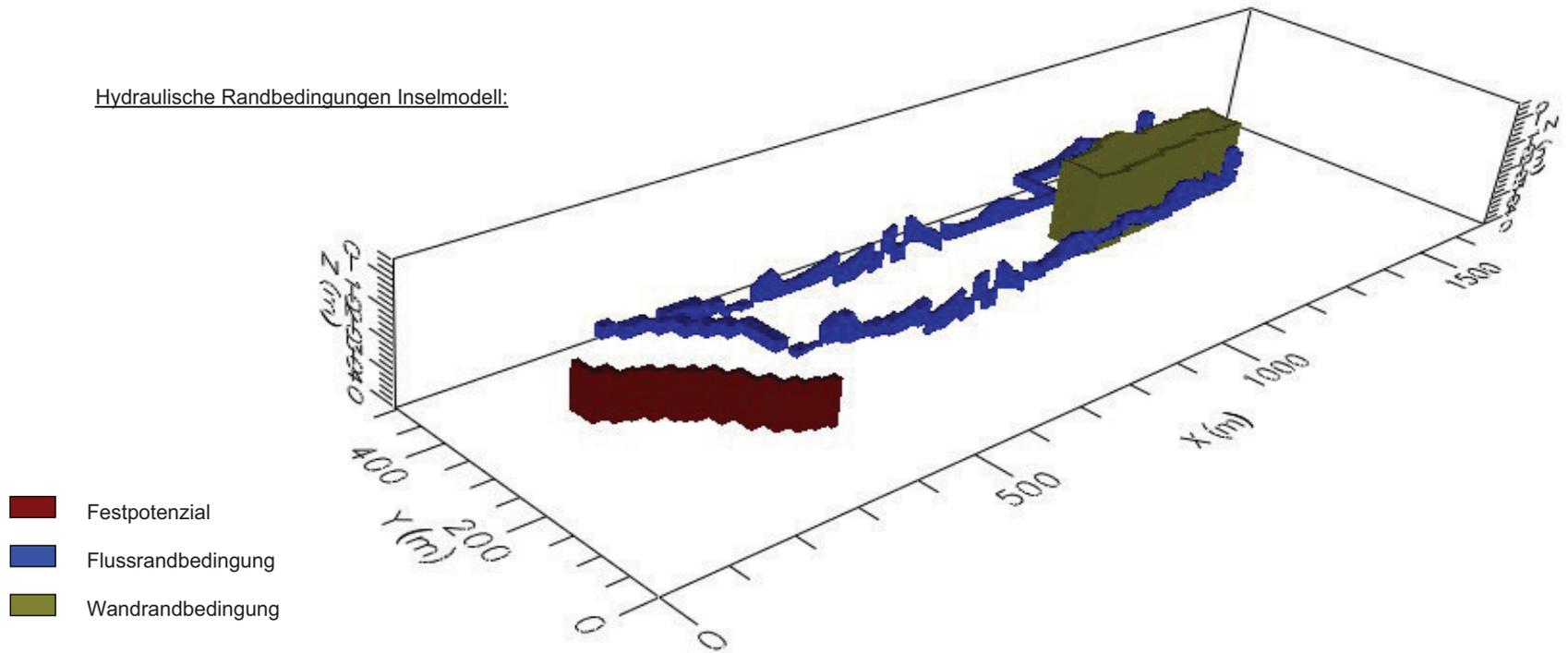
Legende:

- Festpotenzial
- Flussrandbedingung
- Wandrandbedingung

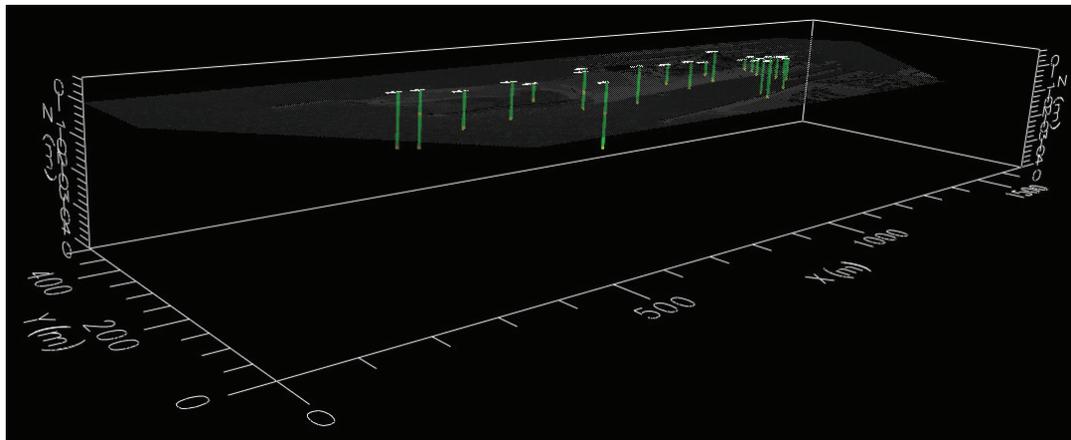
Auftraggeber TGP Landschaftsarchitekten		Projekt/Maßnahme Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel	
Zeichnungsersteller URS URS Deutschland GmbH Suteistr. 2 30659 Hannover Tel.: (0511)646419 0 Fax: (0511)646419 99		Benennung Modell der Schleuseninsel - Anordnung der Randbedingungen	
Maßstab ohne	Zeichnungs-Nr. 43874212	Bearbeiter M. Weede	Anlage 8a
Datum 02/2009	Projekt-Nr. 43874212	Zeichner M. Weede	Blatt-Nr.

Anlage 8b – Modell der Schleuseninsel – räumliche Darstellung der Randbedingungen

Hydraulische Randbedingungen Inselmodell:



Für Kalibrierung verwendete Bohrungen im Bereich der Schleuseninsel.

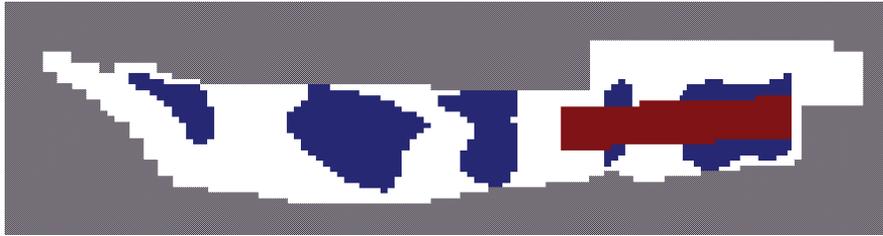


Jede Darstellung fünffach überhöht.

Auftraggeber TGP Landschaftsarchitekten		Projekt/Maßnahme Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel	
Zeichnersteller URS URS Deutschland GmbH Suteistr. 2 30659 Hannover Tel.: (0511)646419 0 Fax: (0511)646419 99		Benennung Modell der Schleuseninsel – räumliche Anordnung der Randbedingungen	
Maßstab ohne	Zeichnungs-Nr. 43874212	Bearbeiter M. Weede	Anlage 8b
Datum 02/2009	Projekt-Nr. 43874212	Zeichner M. Weede	Blatt-Nr.

Anlage 9 – Modell der Schleuseninsel – Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten

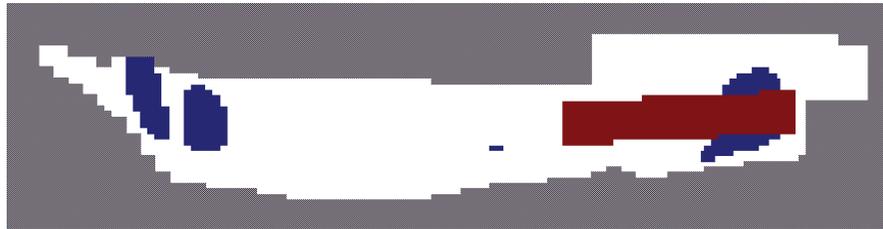
Modellschicht 1



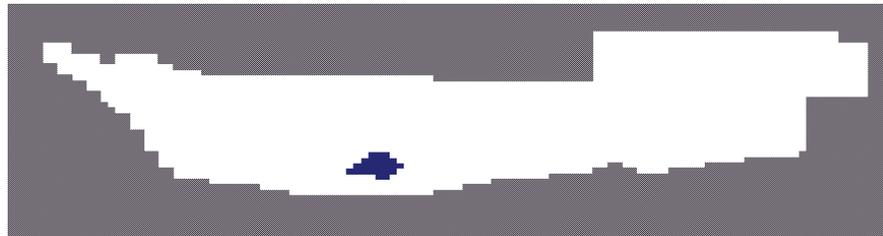
Modellschicht 2



Modellschichten 3 und 4



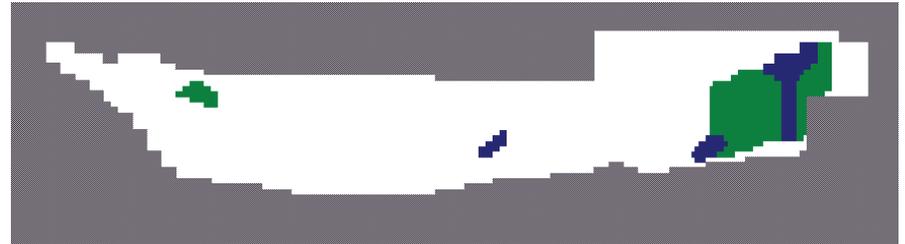
Modellschicht 5



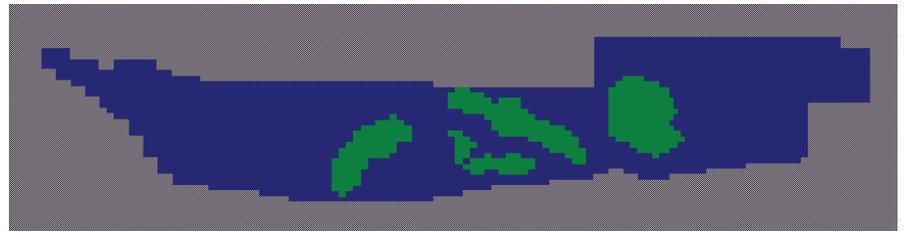
Modellschicht 6



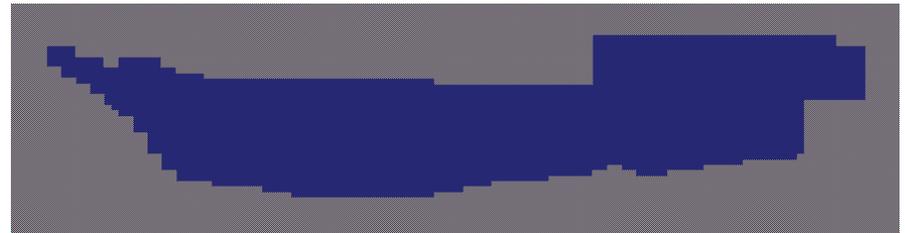
Modellschicht 7



Modellschicht 8



Modellschichten 9 und 10



Legende:

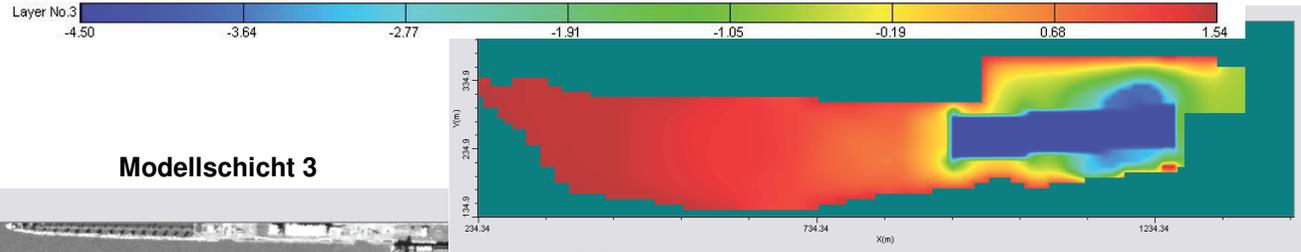
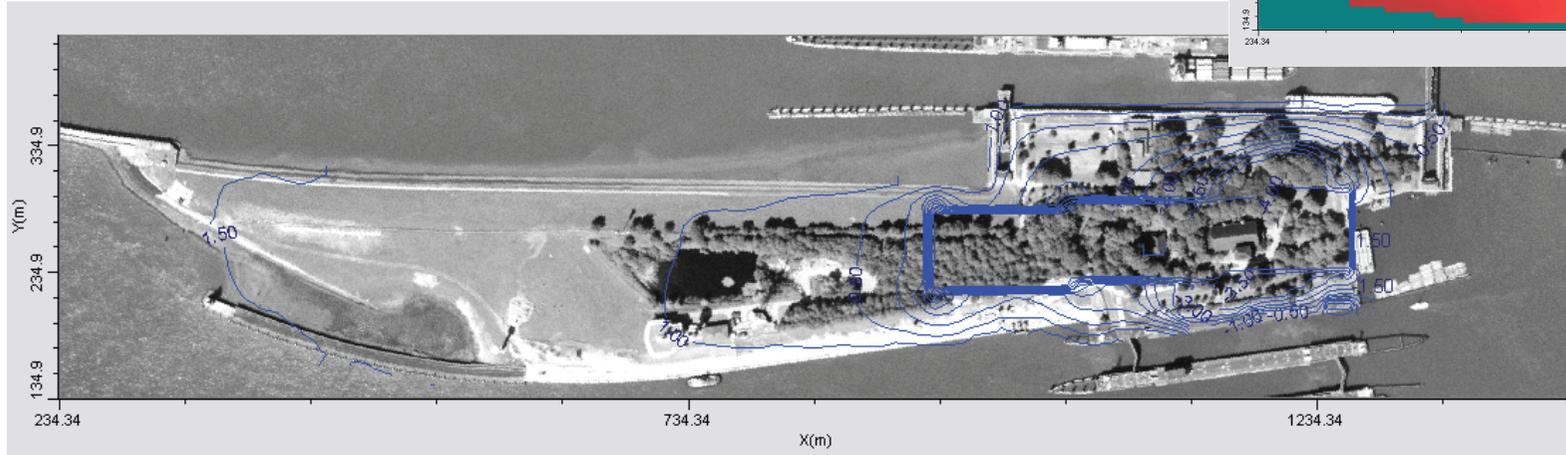
-  Kleischichten
-  Sande
-  Schleusenammer
-  Schluffe/Tone

Auftraggeber TGP Landschaftsarchitekten		Projekt/Maßnahme Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel	
Zeichner  URS Deutschland GmbH Suteistr. 2 30659 Hannover Tel.: (0511)646419 0 Fax: (0511)646419 99		Benennung Modell der Schleuseninsel – Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten	
Maßstab ohne	Zeichnungs-Nr. 43874212	Bearbeiter M. Weede	Anlage 9
Datum 02/2009	Projekt-Nr. 43874212	Zeichner M. Weede	Blatt-Nr.

Anlage 10 – Berechnete Grundwassergleichen bei Absenkung in der Schleusenkammer

Standrohrspiegelhöhe in m NN

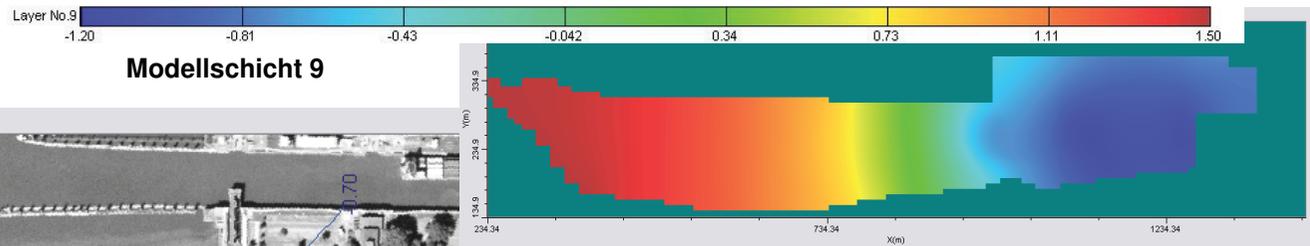
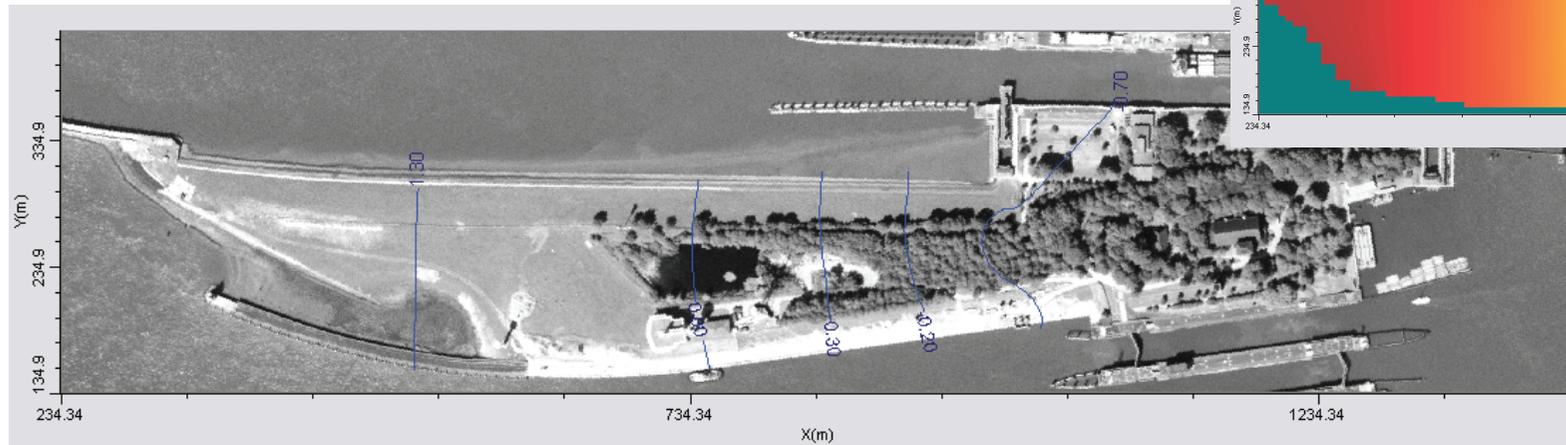
Modellschicht 3



Berechnete Verteilung der hydraulischen Standrohrspiegelhöhen im oberen Grundwasserstockwerk (Modellschicht 3) – stationärer Strömungszustand.

Standrohrspiegelhöhe in m NN

Modellschicht 9



Berechnete Verteilung der hydraulischen Standrohrspiegelhöhen im oberen Grundwasserstockwerk (Modellschicht 9) – stationärer Strömungszustand.

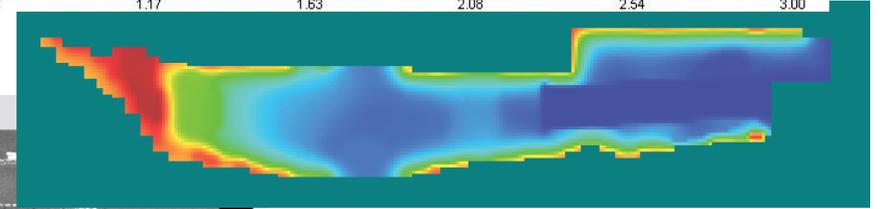
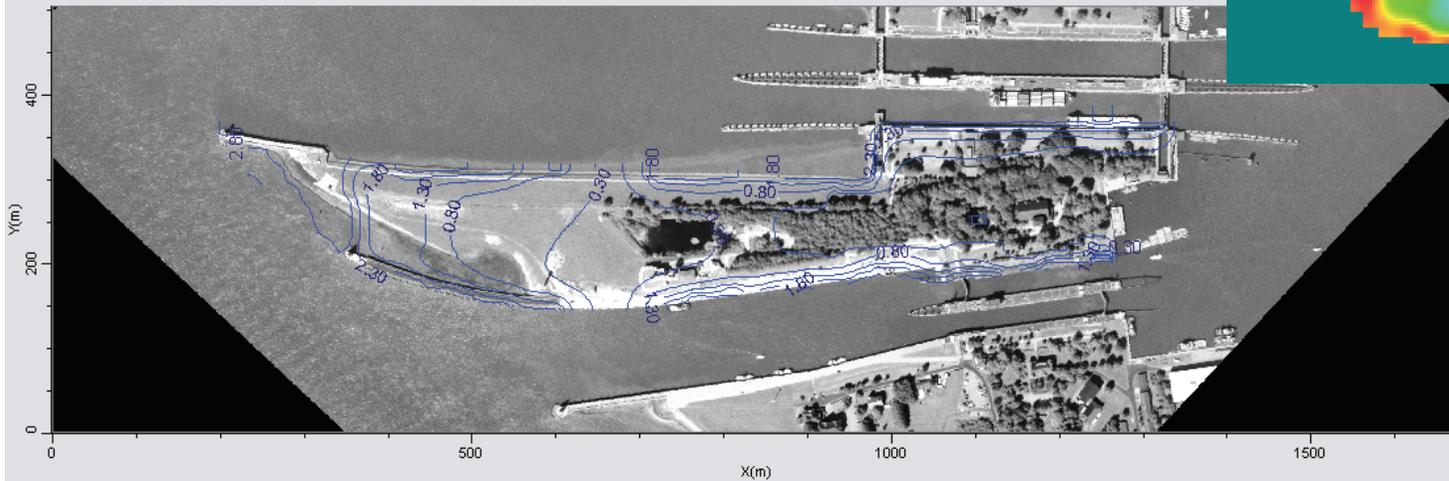
Auftraggeber TGP Landschaftsarchitekten		Projekt/Maßnahme Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel	
Zeichnersteller URS URS Deutschland GmbH Sutelstr. 2 30659 Hannover Tel.: (0511)646419 0 Fax: (0511)646419 99		Benennung Berechnete Grundwassergleichen bei Absenkung in der Schleusenammer	
Maßstab siehe Skala	Zeichnungs-Nr.	Bearbeiter M. Weede	Anlage 10
Datum 03/2009	Projekt-Nr. 43874212	Zeichner M. Weede	Blatt-Nr.

Anlage 11 – Berechnete Grundwassergleichen bei Schleusenbetrieb



Standrohrspiegelhöhe in m NN

Modellschicht 3



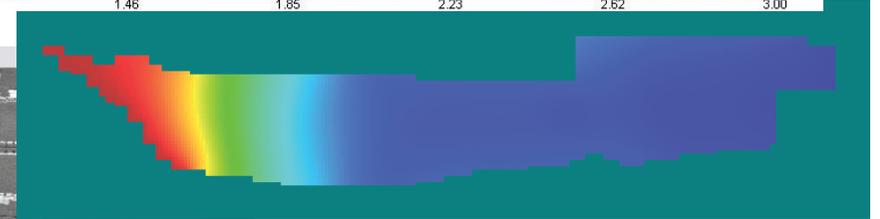
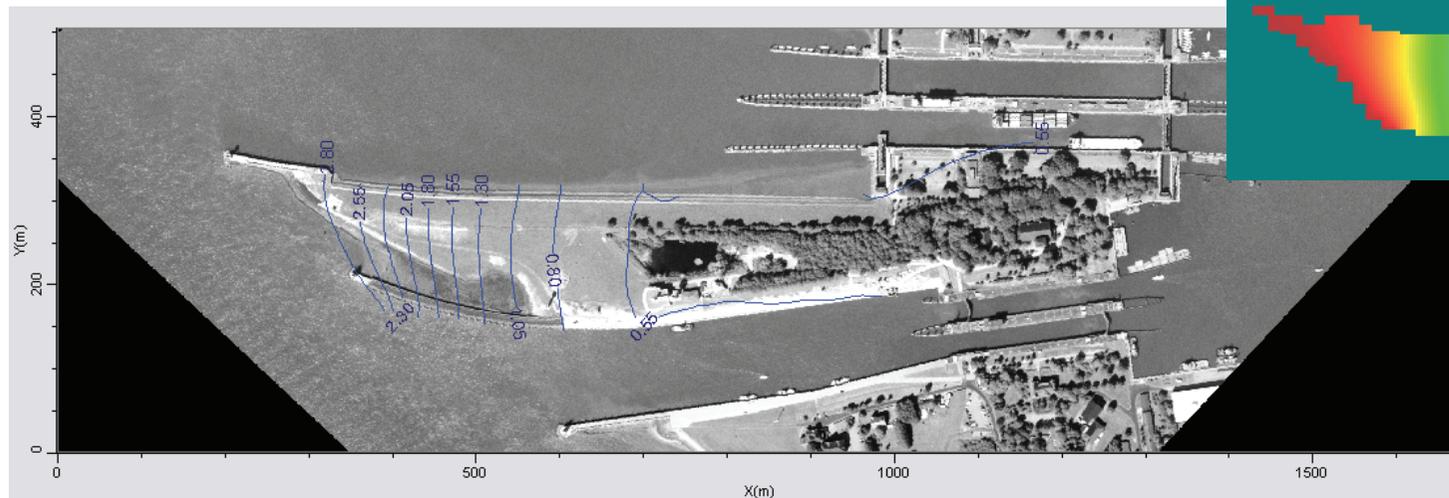
Berechnete Verteilung der hydraulischen Standrohrspiegelhöhen im oberen Grundwasserstockwerk (Modellschicht 3) – stationärer Strömungszustand.

Szenario: Schleusenbetrieb mit Wasserstand Elbe = +3,0 m NHN und Wasserstand Schleusenammer und NOK = -0,2 m NHN



Standrohrspiegelhöhe in m NN

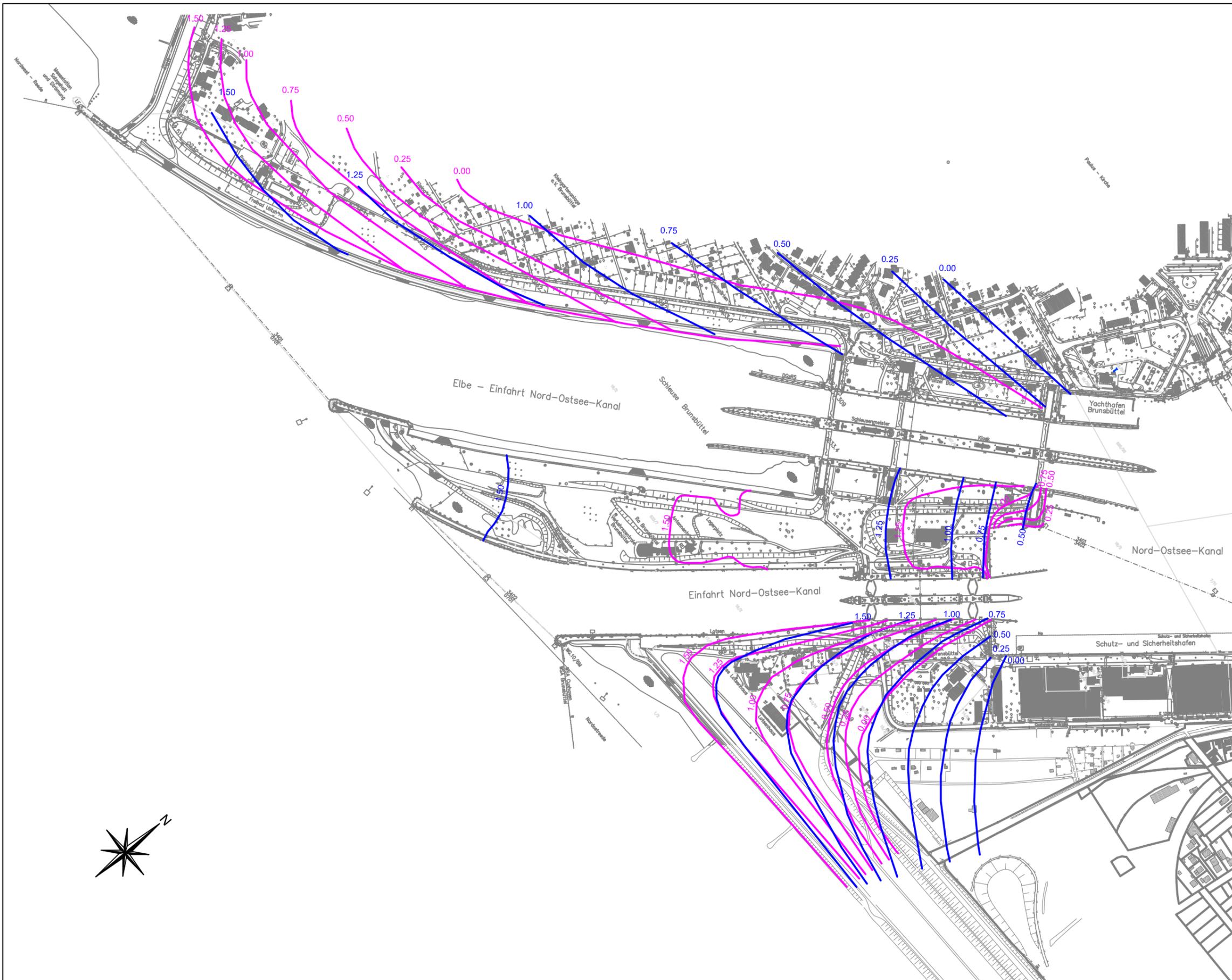
Modellschicht 9



Berechnete Verteilung der hydraulischen Standrohrspiegelhöhen im oberen Grundwasserstockwerk (Modellschicht 9) – stationärer Strömungszustand.

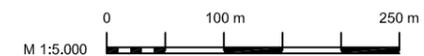
Szenario: Schleusenbetrieb mit Wasserstand Elbe = +3,0 m NHN und Wasserstand Schleusenammer und NOK = -0,2 m NHN

Auftraggeber TGP Landschaftsarchitekten		Projekt/Maßnahme Umweltuntersuchungen NOK-Schleusen Brunsbüttel		
Zeichnungsersteller URS URS Deutschland GmbH Sutelstr. 2 30659 Hannover Tel.: (0511)646419 0 Fax: (0511)646419 99		Benennung Berechnete Grundwassergleichen bei Betrieb der Schleusenammer		
Maßstab siehe Skala	Zeichnungs-Nr.	Bearbeiter M. Weede	Anlage 11	
Datum 02/2009	Projekt-Nr. 43874212	Zeichner M. Weede	Blatt-Nr.	



Legende

- Berechnete Grundwassergleichen in Modellschicht 3 (flaches Grundwasser/Schichtwasser innerhalb der Kleischichten/Sandlinsen)
- Berechnete Grundwassergleichen in Modellschicht 9 (Hauptgrundwasserleiter in den unterlagernden kiesigen Sanden)



Benennung/Title
Grundwassergleichenplan Ist-Zustand MHW Elbe

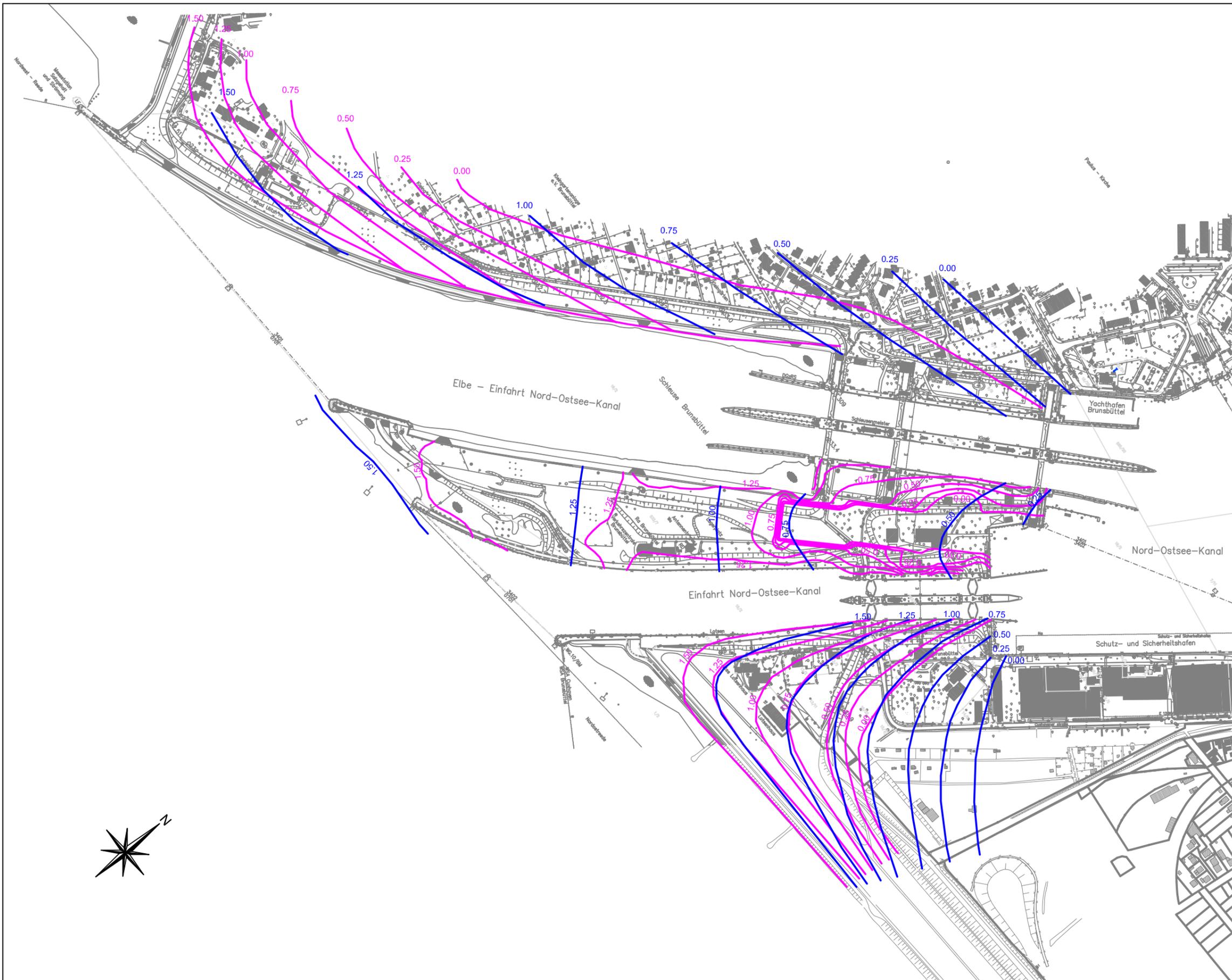
Projekt/Project
NOK-Schleusen Brunsbüttel Umweltuntersuchungen

Auftraggeber/Client
TGP Landschaftsarchitekten

URS URS Deutschland GmbH
 Büro Hamburg
 Schweriner Straße 8-12
 22143 Hamburg
 Tel: +49 (0) 40 460 760 0
 Fax: +49 (0) 40 460 760 60

Maßstab/Scale 1: 5.000	Bearbeiter/Responsible M. Weede	Plangröße/Size 510 x 320
Datum/Date März 2009	Zeichner/Drafter T. Fromme	Abbildung/Figure 1

Datei/File
 Projekt-Nr./Project-No.



Legende

- Berechnete Grundwassergleichen in Modellschicht 3 (flaches Grundwasser/Schichtwasser innerhalb der Kleischichten/Sandlinsen)
- Berechnete Grundwassergleichen in Modellschicht 9 (Hauptgrundwasserleiter in den unterlagernden kiesigen Sanden)



Benennung/Title
Grundwassergleichenplan Planzustand MHW Elbe

Projekt/Project
NOK-Schleusen Brunsbüttel Umweltuntersuchungen

Auftraggeber/Client
TGP Landschaftsarchitekten

URS URS Deutschland GmbH
 Büro Hamburg
 Schweriner Straße 8-12
 22143 Hamburg
 Tel: +49 (0) 40 460 760 0
 Fax: +49 (0) 40 460 760 0

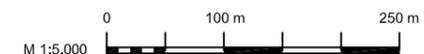
Maßstab/Scale 1: 5.000	Bearbeiter/Responsible M. Weede	Plangröße/Size 510 x 320
Datum/Date März 2009	Zeichner/Drafter T. Fromme	Abbildung/Figure 2

Datei/File
 Projekt-Nr./Project-No.



Legende

- Berechnete Grundwassergleichen in Modellschicht 3 (flaches Grundwasser/Schichtwasser innerhalb der Kleischichten/Sandlinsen) [Äquidistanz der Grundwassergleichen im Bereich der Insel: 1,0 m]
- Berechnete Grundwassergleichen in Modellschicht 9 (Hauptgrundwasserleiter in den unterlagernden kiesigen Sanden)



Benennung/Title
**Grundwassergleichenplan Bauzustand
 Grundwasserabsenkung -4,5 m NHN**

Projekt/Project
**NOK-Schleusen Brunsbüttel
 Umweltuntersuchungen**

Auftraggeber/Client
TGP Landschaftsarchitekten

URS URS Deutschland GmbH
 Büro Hamburg
 Schweriner Straße 8-12
 22143 Hamburg
 Tel: +49 (0) 40 460 760 0
 Fax: +49 (0) 40 460 760 60

Maßstab/Scale 1: 5.000	Bearbeiter/Responsible M. Weede	Plangröße/Size 510 x 320
Datum/Date März 2009	Zeichner/Drafter T. Fromme	Abbildung/Figure 3

Datei/File
 Projekt-Nr./Project-No.