

Grundwasser in Bremen-Nord in drei Dimensionen

Kopplung eines Strukturmodells und eines Strömungsmodells

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
in den Naturwissenschaften am Fachbereich 05 der Universität Bremen

vorgelegt von Dipl. Geol. Sven Jensen

Bremen, November 2010

In Kooperation mit dem Geologischen Dienst für Bremen (GDfB)

Gutachter: 1. Prof. Dr. H. D. Schulz
2. Prof. Dr. T. Mörz

eingereicht: 03.11.2010

Grundsatz

Modelle sollten so einfach wie möglich sein.
Aber nicht einfacher.

Nach A. Einstein

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist Teil des Projekts GEOPLAN 1 (BLANKENBURG et al. 2008), einem Gemeinschaftsprojekt des Bremer Senators für Wirtschaft und Häfen (SWH) und des Bremer Senators für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa (SUBVE). Das Projekt wird beim Geologischen Dienst für Bremen (GDfB) in Zusammenarbeit mit der Universität Bremen durchgeführt. Das Projekt GEOPLAN 1 bildet eine geowissenschaftliche Planungsgrundlage für die senatorischen Dienststellen der Stadt Bremen, in der alle verfügbaren und geologisch relevanten Daten für den Bereich Bremen-Nord digital enthalten sind. Zwei Teilaspekte von GEOPLAN 1 stellen ein 3-dimensionales Strukturmodell des mitteltiefen Untergrunds und ein Grundwasserströmungsmodell für den Bereich Bremen-Nord dar. Das Strömungsmodell soll einen Überblick zum Fließverhalten des genutzten Hauptgrundwasserleiters in Bremen-Nord und seinen Systemeigenschaften geben. Das 3D-Strukturmodell wird mit der Software GOCAD 2.1.2 (EARTH DECISION SCIENCES 2005) erstellt, das Strömungsmodell mit der Software PMWin 5.3 (CHIANG 2005).

Ziel dieser Arbeit ist die Kopplung der beiden Modelle. Es wird gezeigt, inwieweit das 3D-Strukturmodell als Datengrundlage für das Strömungsmodell nutzbar ist. Eine neue Möglichkeit der Modellkopplung wird vorgestellt und in Zusammenhang mit den Ergebnissen des Strömungsmodells diskutiert.

Wesentliche Punkte der Arbeit sind weiterhin der Aufbau, die Kalibrierung und Anwendung des Grundwasserströmungsmodells für den Bereich Bremen-Nord. Dafür wurden von 2005 bis 2007 im Untersuchungsgebiet an Messstellen zweimal jährlich Stichtagsmessungen durchgeführt. Außerdem werden die Grundwasserneubildung und die jährlichen Grundwasserentnahmemengen für die jeweiligen Zeiträume ermittelt, ebenso die Wasserstände in den Hauptvorflutern Weser und Lesum.

Die Modellkopplung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird ein 1-Schichtmodell konstruiert, das die Modellausdehnung festlegt und nach dem Einbau von Entnahmebrunnen, Messstellen, Gewässern, Drainagen und Festpotentialrändern zur Ermittlung von Transmissivitäten genutzt wird. Dabei wird das Modul PEST (DOHERTY 2002) verwendet. Anschließend wird ein 5-Schichtmodell erstellt, das die quartärgeologischen Strukturen im Untergrund des Modellgebiets berücksichtigt. Es wird beschrieben, wie die Ergebnisse einer 3D-Strukturmodellierung beim Aufbau eines Strömungsmodells berücksichtigt werden. Die technischen Nachteile und Einschränkungen der verwendeten Software werden aufgezeigt.

Mit dem 1-Schicht- und dem 5-Schichtströmungsmodell modellierte Grundwasserdruckspiegelhöhen (GW-Druckspiegelhöhen) und -schwankungen im Arbeitsgebiet werden mit Ergeb-

nissen einer Stichtagsmessung vom Herbst 2007 verglichen und zeigen im Wesentlichen eine gute Übereinstimmung.

Das Ziel, Auswirkungen durch Veränderungen von Grundwasserentnahmen auf den Grundwasserkörper zu prognostizieren, wird erreicht. Eine Neubestimmung von Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der Effekte des Wesereinflusses und unter Einbeziehungen von schwankenden öffentlichen und privaten Grundwasserentnahmen wird möglich. Die Genauigkeit und die Randbedingungen für derartige Fragen werden beschrieben.

Insgesamt wird gezeigt, dass ein Strömungsmodell, das vorgegebene geologische Strukturen berücksichtigt, plausiblere Ergebnisse hinsichtlich der modellierten Grundwasserströmung liefert, als ein Strömungsmodell, das den geologischen Aufbau des Untergrunds nicht oder nur wenig beachtet. Ein Vorteil des komplexeren Modells liegt in der Möglichkeit, sowohl Entnahmebrunnen als auch Messstellen entsprechend ihrer tatsächlichen Tiefenlage besser im Modell zu berücksichtigen. Für die grafische Darstellung von Ergebnissen wird die Software SEER 3D (CHIANG 2009) genutzt.

Abstract

This submitted work has been conducted together with the senator for harbor facilities and economy and the senator for environment, building, traffic, and Europe. The project, GEOPLAN 1, has been carried out at the geological survey of Bremen together with the University of Bremen. GEOPLAN 1 supplies us with a geological planning map in which all data of geological interest is digitally integrated. One part of this project is a structural model, another part deals with a hydrological flow model which is the main goal of this paper. The model allows the forecast of environmental changes due to altering groundwater recharge or withdraws for the area of Bremen-Nord. The structural model has been constructed by using GOCAD 2.1.2 (EARTH DECISION SCIENCES 2005), the flow model has been built by using PMWin 5.3 (CHIANG 2005).

The aim of the submitted work is the combination of the two models. Problematic is the demonstration to what extent the 3D structural model can be used as a data basis for the flow model. A new way of connecting the models in conjunction with the focus on the flow model is discussed.

This paper focuses on the structure, the calibration, and the use of the flow model for the area of Bremen-Nord. Therefore, wells were discovered, documented and measured two times per year between 2005 and 2007 in this area.

Two steps are compulsory for the construction of the model. First, a 1-layer model will be constructed which defines the model boundaries. This 1-layer model will be utilized to com-

pute the transmissivity after the installation of the sampling well, measuring gauges, drainage systems, and fixed potential margins. Therefore PEST (DOHERTY 2002) is used. The second step focuses on the creation of a 5-layer model which takes the structures of the geology of the Quaternary of the subsurface into account. The work describes how the results of a 3D structural model can be used for the construction of a flow model. The model takes advantage of geographic data and demonstrates technical disadvantages and constraints of the utilized software.

Groundwater levels and their alteration within the model area can be calculated by 1-layer and 5-layer model. The results can be compared to and coincide with measurements taken in autumn 2007. The main goal is the prognosis of the effects of alternating groundwater withdrawals onto the groundwater body. Regarding the effects of the river Weser and the recurrent private and official groundwater withdrawals a new geographic extent of the catchment area can be defined. The accuracy and requirements of such problems will be discussed.

In conclusion, it is confirmed that a flow model which takes present geological structures into account, is capable of computing plausible results in reference of the modeled groundwater flow. The advantage of the more complex model is the possibility of modeling the influence of withdrawal wells and measuring points in respect to their real depth. Some results are presented with SEER 3D (CHIANG 2009).

Schlüsselwörter:

Grundwasserströmungsmodell, MODFLOW, PEST, SEER 3D, Wasserbilanz, Bremen-Nord, 3D-Strukturmodell, GOCAD, Kopplung von Struktur- und Strömungsmodell

Keywords:

groundwaterflowmodel, MODFLOW, PEST, SEER 3D, water budget, Bremen-Nord, 3D structural model, GOCAD, combined structure and flow model

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XI
TABELLENVERZEICHNIS	XIV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XV
PARAMETER	XVI
1 EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG	1
1.1 Stand der Forschung	1
1.2 Grundsatzfragen	3
1.3 Konzept der Modellerstellung	4
2 METHODEN	5
2.1 Grundlagen - Theorie	5
2.2 Module in PMWin	9
2.3 Grundwasserneubildung	10
2.4 3D-Strukturmodell	12
2.5 Hydrostratigrafie	14
2.6 Grundwasserstand	14
3 UNTERSUCHUNGS- UND MODELLGEBIET	16
3.1 Geografischer Überblick	16
3.2 Geologischer Überblick	19
3.3 Hydrostratigrafischer Überblick	23
4 DATENGRUNDLAGEN	24
4.1 Vorhandene Untersuchungen im Modellgebiet	24

4.1.1	Vorhandene Strömungsmodellierungen im Bereich des Modellgebiets	24
4.1.2	Einfluss durch Tide auf den GW-Druckspiegelstand	26
4.2	Gemessene Grundwasserstände für die Modellkalibrierung	27
4.2.1	Messungen der Daten	27
4.2.2	Anwendung der Daten	30
4.3	Eingangsdaten für die Strömungsmodellierung	35
4.3.1	Geländeoberfläche	36
4.3.2	Grundwasserentnahmebrunnen und -mengen	37
4.4	Wetter und Klima im Untersuchungszeitraum	38
5	MODELLERSTELLUNG	40
5.1	Konzept	40
5.2	Aufbau des Strömungsmodells	41
5.2.1	Horizontale Grenzflächen	42
5.2.2	Randbedingungen 1. Art – vorgeschriebener Wasserstand	43
5.2.3	Randbedingungen 2. Art – vorgeschriebener Zu- oder Abfluss	43
5.2.4	Randbedingungen 3. Art – Kombination 1. und 2. Art	43
5.3	Kalibrierung im 1-Schichtmodell	44
5.4	Kopplung mit dem 3D-Strukturmodell	47
5.4.1	Umrechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte	50
5.4.2	Einbau der umgerechneten Durchlässigkeitsbeiwerte	53
5.5	Einbau von Messstellen und Brunnen entsprechend ihrer Tiefenlage	54
6	ERGEBNISSE UND SENSITIVITÄTSANALYSE	57
6.1	Modellergebnisse des 1-Schichtmodells	57
6.2	Modellergebnisse des 5-Schichtmodells	61
6.3	Vergleich zwischen 1-Schichtmodell und 5-Schichtmodell	66
6.4	Ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte	67
6.5	Wasserbilanzen für das Modellgebiet	70
6.6	Sensitivitätsanalyse	72

7	DISKUSSION / MODELLAUSSAGEN	75
7.1	Stichtagsmessungen	75
7.2	Kalibrierung im 1-Schichtmodell	76
7.3	Kopplung mit dem 3D-Strukturmodell	80
7.4	Wasserbilanzen	83
7.5	Vor- und Nachteile einer Gitterverfeinerung	85
8	AUSBLICK / MODELLPFLEGE	87
8.1	Anwendungsmöglichkeiten des 1-Schichtmodells	87
8.2	Anwendung gekoppelter 3D-Struktur-Strömungsmodelle	88
8.3	Modellkopplung bei Verwendung der beschriebenen Software	89
	LITERATURVERZEICHNIS	91
	ANHANG	102
	DANKSAGUNG	129
	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	131

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Grundwasserneubildung im Modellgebiet nach GROWA06V2 (KUNKEL et al. 2006)	12
Abb. 2: Skizze eines Ausschnitts des GOCAD (EARTH DECISION SCIENCES 2005) 3D-Strukturmodells für Bremen-Nord und angrenzende Bereiche von Niedersachsen	13
Abb. 3: Geografische Lage des Untersuchungsgebiets und des Modellgebiets in Niedersachsen und Bremen-Nord	16
Abb. 4: Auelandschaft im Verlauf der Blumenthaler Aue, zentral im Modellgebiet	17
Abb. 5: Blick von Westen auf das Modellgebiet mit drainierten Flächen im Vordergrund und der Rekumer Mühle zwischen den Windrädern im Hintergrund	18
Abb. 6: Gliederung Tertiär und Quartär (verändert nach HÖFLE (1990) und STREIF (2004)), die relevanten stratigrafischen Kürzel sind in Tab. 3 erläutert	19
Abb. 7: Skizze der geologischen Struktur des mitteltiefen Untergrunds in Bremen-Nord	20
Abb. 8: Skizze der Landschaft und des Untergrundes in Norddeutschland während der Eiszeiten (rechts) und in der Gegenwart (links) (verändert nach GDfB (2003))	21
Abb. 9: Lage der 266 im Untersuchungsgebiet ermittelten und der davon im Modellgebiet verwendeten 163 Messstellen, die Markierung im Süden des Modellgebiets weist auf die Messstelle GMS 118 hin	29
Abb. 10: Schwankung der gemessenen Wasserstände 2005 bis 2007, die Markierungen im Nordwesten und Nordosten weisen auf Messstellen hin, die von wenigen anderen Messstellen umgeben sind und deren Messwerte während der Kampagne über 1 m schwanken, die Markierung im Süden weist auf Messstellen hin, deren Messwerte ebenfalls stark schwanken, die aber von vielen anderen Messstellen umgeben sind	31
Abb. 11: Ganglinie der gemessenen Wasserstände bei GMS 118 von 1994 bis 2007	32
Abb. 12: Konstruierter GW-Druckspiegelgleichensplan auf Grundlage der Stichtagsmessung im Herbst 2007, die Markierungen weisen auf die Auswirkungen von Grundwasserentnahmen auf den Grundwasserdruckspiegel hin, im Norden durch das Wasserwerk (WW) Siedbruch, im Südwesten durch das WW Blumenthal, im Süden durch das WW Vegesack und im Südosten durch das WW Ritterhude	33
Abb. 13: Skizze des Modellaufbaus mit Bereichen artesisch gespannten Grundwassers und Höhenlagen der Oberflächengewässersohlen in Bezug zum Grundwasserdruckspiegel	34
Abb. 14: Geländeoberfläche im Modellgebiet aus DGM	36

Abb. 15: Lage der im Strömungsmodell integrierten Grundwasserentnahmebrunnen _____	38
Abb. 16: Klimatische Wasserbilanzen für den Bereich Bremen als Summenkurven, dargestellt sind ein Mittelwert für die Jahre 1961 - 2004 und Einzelwerte für die Jahre 2005 - 2008 (DWD 2009) _____	39
Abb. 17: Modellgitter, die dunklen Streifen kennzeichnen Verfeinerungen im Gitter _____	41
Abb. 18: Basis des genutzten Grundwasserleiters aus dem 3D-Strukturmodell _____	42
Abb. 19: Randbedingungen 1., 2. und 3. Art im Modellgebiet, die Oberflächengewässer und die Drainage sind Randbedingungen 3. Art _____	44
Abb. 20: Endgültige Zonen im Modellgebiet für die automatisierte Kalibrierung _____	45
Abb. 21: räumliche Skizze des 1-Schichtmodells, Blickrichtung von Südwest nach Nordost, dreißigfach überhöht _____	46
Abb. 22: Im 3D-Strukturmodell ermittelte Ausdehnung der bindigen Drenthe-Schichten (Schicht 2) im Modellgebiet, die Pfeile kennzeichnen hydraulische Fenster _____	48
Abb. 23: Im 3D-Strukturmodell ermittelte Ausdehnung der bindigen Lauenburger-Schichten (Schicht 4) im Modellgebiet, der Pfeil zeigt ein hydraulisches Fenster _____	49
Abb. 24: Skizze eines Querschnitts des mit dem 3D-Strukturmodell gekoppelten Strömungsmodells, dunkle Farben kennzeichnen schlechte Durchlässigkeitsbeiwerte (bindige Schichten), helle Farben kennzeichnen gute Durchlässigkeitsbeiwerte (sandige Schichten) _____	52
Abb. 25: räumliche Skizze des 5-Schichtmodells, dreißigfach überhöht, Blickrichtung von Südwest nach Nordost, die Linien A – A' und B – B' kennzeichnen die Verläufe der Schnitte aus Abb. 26, der Pfeil markiert einen oberflächennah verfilterten Entnahmebrunnen, die Messstellen sind mit einem Radius von 100 m dargestellt, die Entnahmebrunnen entsprechen in ihrer Ausdehnung der Zelle, in der sie aktiv sind _____	54
Abb. 26: Skizzen zweier Schnitte durch das Modellgebiet von Nord nach Süd (a) und von West nach Ost (b), dreißigfach überhöht, die Messstellen sind mit einem Radius von 100 m dargestellt, die Entnahmebrunnen entsprechen in ihrer Ausdehnung der Zelle, in der sie aktiv sind _____	55
Abb. 27: Modellierte GW-Druckspiegelgleichungen im 1-Schichtmodell, der Pfeil markiert eine GW-Druckspiegelhochfläche _____	57
Abb. 28: Abweichungen zwischen Grundwasserständen des konstruierten GW-Druckspiegelgleichensplans und dem Modellergebnis im 1-Schichtmodell, Bereiche mit Abweichungen über 2 m sind durch kleine Pfeile, ein Bereich mit Abweichungen über 4 m durch einen großen Pfeil gekennzeichnet _____	58

Abb. 29: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen Grundwasserständen, die mit dem kalibrierten 1-Schichtmodell berechnet werden und im Herbst 2007 gemessenen, zusätzlich ist die Gaußsche Normalverteilungskurve dargestellt	59
Abb. 30: Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen nach der Kalibrierung des 1-Schichtmodells	60
Abb. 31: Korrelation gemessener und berechneter Grundwasserstände nach der Modellkalibrierung im 1-Schichtmodell, auf der Linie stimmen gemessene und berechnete Werte überein	61
Abb. 32: Modellierte GW-Druckspiegelgleichungen des genutzten Grundwasserleiters im 5-Schichtmodell, der Pfeil markiert eine GW-Druckspiegelhochfläche	62
Abb. 33: Abweichungen zwischen Grundwasserständen des konstruierten GW-Druckspiegelgleichensplans und dem Modellergebnis im 5-Schichtmodell für den genutzten Grundwasserleiter, Bereiche mit Abweichungen über 2 m sind durch kleine Pfeile markiert	63
Abb. 34: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen Grundwasserständen, die mit dem kalibrierten 5-Schichtmodell berechnet werden und im Herbst 2007 gemessenen, zu Vergleichszwecken ist die Gaußsche Normalverteilungskurve dargestellt	64
Abb. 35: Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen nach der Kalibrierung des 5-Schichtmodells	65
Abb. 36: Korrelation gemessener und berechneter Grundwasserstände nach der Modellkalibrierung im 5-Schichtmodell, die Linie kennzeichnet eine Übereinstimmung	65
Abb. 37: Differenzen zwischen dem im 1-Schichtmodell modellierten Grundwasserdruckspiegel und dem im 5-Schichtmodell modellierten genutzten Grundwasserdruckspiegel (Schicht 5)	66
Abb. 38: Verteilung der logarithmierten Durchlässigkeitsbeiwerte im 1-Schichtmodell und Gaußsche Normalverteilungskurve	68
Abb. 39: Verteilung der logarithmierten Durchlässigkeitsbeiwerte in den Schichten 1 bis 5 des kalibrierten 5-Schichtmodells zusammen mit der Gaußschen Normalverteilungskurve	69
Abb. 40: Ausschnitt des Differenzenplans zwischen modellierter GW-Druckspiegelgleichung von Schicht 1 und Schicht 5 im 5-Schichtmodell,	82
Abb. 41: Modellgebiete vorhandener Strömungsmodelle in Bremen-Nord im Vergleich zum Modellgebiet dieser Arbeit	83

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vergleich zwischen FE und FD Verfahren _____	8
Tab. 2: Schichtaufbau im Modellgebiet bis zur Basis des genutzten Grundwasserleiters ____	22
Tab. 3: Übersicht über die im Modellgebiet vorkommenden hydrostratigrafischen Einheiten _____	23
Tab. 4: Übersicht und Vergleich von Strömungsmodellen für Bremen-Nord _____	26
Tab. 5: Übersicht der durchgeführten Stichtagsmessungen _____	28
Tab. 6: Vertikaler Aufbau im 5-Schichtmodell _____	47
Tab. 7: Zwischenergebnisse der Umrechnung der Transmissivität des 1-Schichtmodells in die Transmissivitäten der einzelnen Schichten des 5-Schichtmodells anhand eines Beispiels, die notwendigen Basisangaben kommen für Schritt A aus dem 3D-Strukturmodell, für Schritt B aus dem kalibrierten 1-Schichtmodell und für Schritt D wurden Literaturangaben verwendet _____	51
Tab. 8: Ergebnisübersicht und -vergleich von 1-Schichtmodell und 5-Schichtmodell _____	67
Tab. 9: Übersicht der ermittelten Durchlässigkeiten der Gewässerbetten _____	68
Tab. 10: Übersicht der ermittelten Durchlässigkeiten im 5-Schichtmodell _____	69
Tab. 11: Gesamtwasserbilanz (gerundet) für das 1-Schichtmodell _____	70
Tab. 12: Wasserbilanz (gerundet) für die Oberflächengewässer im 1-Schichtmodell _____	71
Tab. 13: Gesamtwasserbilanz (gerundet) für das 5-Schichtmodell _____	71
Tab. 14: Wasserbilanz (gerundet) für die Oberflächengewässer im 5-Schichtmodell _____	71
Tab. 15: Sensitivität des 5-Schichtmodells auf die Veränderung verschiedener Eingangsdaten und der Durchlässigkeitsbeiwerte _____	73
Tab. 16: Vergleich von Aufwand der Modellerstellung und Nutzen der Ergebnisse zwischen 1-Schichtmodell und 5-Schichtmodell _____	81
Tab. 17: Vergleich der Wasserbilanzen (gerundet) verschiedener Modelle (MULL 1986 und 5-Schichtmodell) _____	84
Tab. 18: Vergleich der Wasserbilanzen (gerundet) verschiedener Modelle (GEOUM 2006 und 5-Schichtmodell) _____	84

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Name
ATKIS®	Amtliches topografisches Karteninformationssystem
BÜK 50	Bodenübersichtskarte 1:50000
DGM	Digitales Geländemodell
DGK 5	Deutsche Grundkarte 1:5000
FD	Finite Differenzen
FE	Finite Elemente
GDfB	Geologischer Dienst für Bremen
GIS	Geographisches Informationssystem
GW	Grundwasser – als Bestandteil einer Wortkombination, die das Wort <i>Grundwasserdruckspiegel</i> enthält (z. B. GW-Druckspiegelgleichenplan)
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LGN	Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen
RMS	Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (root mean square)
TK 25	Topografische Karte 1:25000
WW	Wasserwerk

Parameter

Parameter	Symbol	Einheit
Abfluss (oberirdisch)	A_O	mm/a
Durchlässigkeitsbeiwert	k_f	m/s
logarithmierter Durchlässigkeitsbeiwert	$\log k_f$	dimensionslos
Filtergeschwindigkeit	v_f	m/s
Grundwasserneubildung	GW_{neu}	mm/a
Höhe bezogen auf Normal Null	mNN	m
Hydraulischer Gradient	i	dimensionslos
Niederschlag	N	mm/a
Transmissivität	T	m^2/s
Evapotranspiration (real)	ET_{real}	mm/a

1 Einleitung und Fragestellung

Im Bereich Bremen-Nord wird Trinkwasser aus Grundwasser gewonnen. Neben der öffentlichen Wasserversorgung verwendet die Industrie Grundwasser als Brauch- und Prozesswasser. Veränderungen in der Grundwasserförderung haben deutliche Auswirkungen auf den Grundwasserkörper. Es liegt daher im allgemeinen Interesse, auf Grundlage verlässlicher Daten aussagekräftige Prognosen in Hinblick auf Beschaffenheit und Fließverhalten des genutzten Grundwasserleiters bei sich ändernden Randbedingungen zu erstellen.

Ein neuer Ansatz zur Kopplung eines 3D-Strukturmodells mit einem Strömungsmodell stellt einen zentralen Punkt dieser Arbeit dar. Die Übertragbarkeit dieses Ansatzes auf ähnliche Fragestellungen in anderen Regionen wird diskutiert.

Es soll untersucht werden, ob das hier beschriebene Strömungsmodell für eine zukünftige planvolle Grundwasserbewirtschaftung die notwendige Grundlage liefert. Das Modell betrachtet das gesamte Gebiet Bremen-Nord und angrenzende Gebiete in Niedersachsen.

Das Modell ist ein Werkzeug, mit dem die Auswirkungen von Veränderungen der Grundwasserfördermengen auf den genutzten Grundwasserleiter in Bremen-Nord prognostiziert werden. Eine wichtige Frage ist dabei, inwieweit Weserwasser in den genutzten Grundwasserleiter infiltriert und das Grundwasser beeinflusst.

Neben wasserwirtschaftlichen Fragen ist es von technischem Interesse, wie es möglich ist, die Daten eines für den gleichen Bereich vorhandenen 3D-Strukturmodells in ein Strömungsmodell zu übertragen und dort anzuwenden.

In den nächsten Abschnitten wird zunächst der Stand der Forschung betrachtet. Anschließend werden die Grundsatzfragen dieser Arbeit vorgestellt und dann das gewählte Konzept der Modellerstellung in dieser Arbeit erläutert.

1.1 Stand der Forschung

Seit den 1960er Jahren werden computergestützte numerische Lösungsverfahren zur Beschreibung von Grundwasserströmungen verwendet (FAYERS & SHELDON 1962, FREEZE & WITHERSPOON 1966, PINDER & BREDEHOEFT 1968). Mit fortschreitender Entwicklung und Verbreitung von Computern gewinnen diese Lösungsverfahren an Bedeutung und werden seit Mitte der 1990er Jahre kommerziell vertrieben. Die Nutzung eines numerischen Grundwasserströmungsmodells als Werkzeug zur planvollen Bewirtschaftung eines Grundwasserkörpers wird für verschiedene Regionen und Randbedingungen beschrieben (u. a. BEAR et

al. 1992, EL IDRYSY & DE SMEDT 2006, KALLIORAS et al. 2009). Es werden dort unterschiedliche Ansätze und die Nutzung verschiedener Softwarepakete zur Lösung der jeweiligen Problemstellungen vorgestellt und diskutiert.

Ein heute weit verbreiteter Softwarecode ist das Programm MODFLOW-96 (HARBAUGH & McDONALD 1996). Bereits 1983 entwickelt (McDONALD & HARBAUGH 2003), ist es heute Bestandteil verschiedener Softwarepakete wie z.B. PMWin 5.3 (CHIANG 2005) und Visual MODFLOW (WHI 2005), die weltweit zur numerischen Beschreibung von Grundwasserströmungen eingesetzt werden (u. a. CALDERON PALMA & BENTLEY 2007, DUFRESNE & DRAKE 1999, HATIPOGLU 2009). Weitere Arbeiten, die den Einsatz von MODFLOW-96 (HARBAUGH & McDONALD 1996) beschreiben, sind bei KALLIORAS et al. (2009) aufgeführt.

Der Einsatz von MODFLOW-96 (HARBAUGH & McDONALD 1996) ist nicht auf einen bestimmten Grundwasserleitertyp beschränkt. Es werden sowohl Grundwasserleiter im Lockergestein (BENDER 2003, EL IDRYSY & DE SMEDT 2006), als auch im Karstgestein (DUFRESNE & DRAKE 1999, BUTSCHER & HUGGENBERGER 2007) betrachtet.

Eine Schwierigkeit besteht grundsätzlich darin, die Strukturen des Untergrundes räumlich korrekt zu ermitteln und verlustfrei in das Strömungsmodell zu integrieren. Daher findet die Kopplung von 3D-Strukturmodellen mit Strömungsmodellen bei der Beantwortung von Fragen zur Grundwasserbewirtschaftung (u. a. BUTSCHER & HUGGENBERGER 2007, FAUNT et al. 2009, GOSSEL et al. 2009, WYCISK et al. 2009) aber auch bei der Stadtplanung (CARNEIRO & CARVALHO 2010) eine immer häufigere Anwendung. Ein wesentlicher Vorteil besteht dabei in einem geringeren Datenverlust bei der Übertragung von geologischen Informationen in den Aufbau eines Strömungsmodells gegenüber herkömmlichen Vorgehensweisen (ROSS et al. 2005, ROYSE et al. 2010).

SPOTTKE et al. (2005) erstellen ein geologisches Strukturmodell mit der Software GOCAD (EARTH DECISION SCIENCES 2005) und koppeln die Ergebnisse mit MODFLOW (HARBAUGH et al. 2000). Sie weisen auf technische Schwierigkeiten hin, die entstehen, wenn in GOCAD (EARTH DECISION SCIENCES 2005) modellierte tektonische Strukturen in das Programm MODFLOW (HARBAUGH et al. 2000) überführt werden sollen und stellen einen Lösungsansatz vor, der die Strukturen über den Einbau von Eigenschaftswerten berücksichtigt. Ein wesentlicher Unterschied zur vorliegenden Arbeit ist der überwiegend aus Festgestein bestehende Untergrund im dort betrachteten Modellgebiet. GOSSEL et al. (2009) beschreiben die Kopplung von 3D-Strukturmodellen, die unter anderem mit den Softwarepaketen Geo-Objects (BLUE MARBLE GEOGRAPHICS 2009) und GSI 3D (INSIGHT 2009) erstellt werden, mit der Strömungsmodelliersoftware FEFLOW (WASY 2006). WYCISK et al. (2009) nutzen für die

Strukturmodellierung GSI 3D (INSIGHT 2009) und koppeln ihre Ergebnisse mit einem Strömungsmodell, das mit Visual MODFLOW (WHI 2005) erstellt wird. Die gekoppelten Modelle klären erfolgreich verschiedene Fragestellungen. Das Modell von GOSSEL et al. (2009) wird genutzt, um komplexe Verteilungen von Schadstoffen zu erläutern und bei SPOTTKE et al. (2005) werden die Auswirkungen einer großen industriellen Grundwasserentnahme auf den regionalen Grundwasserkörper beschrieben.

Die Entwicklung von 3D-Strukturmodellen verfolgt teilweise das Ziel, Grundlagen für weitergehende Modellierungen und Modellkopplungen zu liefern (s. WYCISK et al. 2002, KESSLER et al. 2009), erfolgt aber auch unabhängig davon. LERCH et al. (2007) stellen ein 3D-Modell vor, das zur verbesserten Berechnung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung beitragen soll. Die Entwicklung und Perspektiven der 3D-Modellierung beschreibt CULSHAW (2005).

Eine Übersicht verschiedener Anwendungen zur Strömungsmodellierung findet sich bei LÜHR (2003). Unterschiedliche Programme zur 3D-Modellierung werden bei WYCISK (2005) aufgeführt, wobei dort die Kopplung von Struktur- und Strömungsmodellen im Fokus steht. Wie sehr verschiedene Disziplinen von einer Modellkopplung profitieren zeigt RIVERA (2007).

1.2 Grundsatzfragen

Es ist zu klären, wie ein 3D-Strukturmodell mit einem hydraulischen Modell gekoppelt wird und worin die Vor- und Nachteile gegenüber einer manuellen Ableitung oder Abschätzung der Struktur aus geologischen Schnitten und Schichtverzeichnissen bestehen.

Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, um durch ein 3D-Strukturmodell vorgegebene Untergrundstrukturen in eine Strömungsmodellierung zu integrieren? Welche Einschränkungen gibt es dabei? Dies wird anhand des Aufbaus eines Strömungsmodells für den Bereich Bremen-Nord und angrenzende Gebiete erläutert und diskutiert.

Es soll technisch geklärt werden, ob bei Verwendung der gewählten Software die Möglichkeit geschaffen wird, die Tiefenlage von Filtern in Messstellen und Entnahmebrunnen ihrer tatsächlichen Tiefe entsprechend ins Modell zu integrieren?

Trägt das 5-Schichtmodell dazu bei, eine räumliche Vorstellung des genutzten Grundwasserleiters mit all seinen Fließeigenschaften zu erhalten und den im 3D-Strukturmodell ermittelten strukturellen Aufbau des Untergrundes zu verifizieren?

Wie werden Transmissivitäten, Wasserzu- sowie -abflüsse durch den Einbau strukturgeologischer Grenzen beeinflusst und wie verhalten sich Modellergebnisse zu Messergebnissen?

1.3 Konzept der Modellerstellung

Es wird zunächst ein 1-Schicht-Strömungsmodell (im Weiteren: 1-Schichtmodell) konzipiert, das unter Berücksichtigung von Eingangsdaten und Randbedingungen zur Ermittlung hydraulischer Parameter genutzt wird (s. Abschn. 5.3 und Abschn. 6.4). In einem zweiten Schritt wird das 1-Schichtmodell mit den Ergebnissen der 3D-Strukturmodellierung gekoppelt (s. Abschn. 5.4). Das Ergebnis dieser Kopplung ist ein 5-Schicht-Strömungsmodell (im Weiteren: 5-Schichtmodell). Das 5-Schichtmodell berücksichtigt den strukturgeologischen Aufbau im Modellgebiet genauso wie ihn das 3D-Strukturmodell ermittelt und es übernimmt die hydraulischen Parameter aus dem 1-Schichtmodell. Diese werden für die Nutzung im gekoppelten Modell in einem Zwischenschritt umgerechnet. Im nächsten Schritt werden Randbedingungen (wie z. B. Grundwasserentnahmebrunnen), die im 1-Schichtmodell nur in einer einheitlichen Tiefe berücksichtigt werden können, in unterschiedlichen Tiefen eingebaut (s. Abschn. 5.5). Abschließend werden die Ergebnisse zusammen mit einer Sensitivitätsanalyse dargestellt und diskutiert (s. Kap. 6 und Kap. 7).

2 Methoden

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Grundlagen der Strömungsmodellierung. Zunächst werden die mathematischen Zusammenhänge kurz dargestellt und unterschiedliche Softwareanwendungen verglichen. Anschließend werden Programmmodule aus PMWin (CHIANG 2005) vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit angewendet werden. In Abschn. 2.3 und Abschn. 2.4 werden die Ergebnisse mathematischer Modelle erläutert, die hier als Randbedingungen eingehen und angewendet werden (s. Kap. 5). Hierbei handelt es sich um das Modell GROWA06V2 (KUNKEL et al. 2006), das zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Modellgebiet eingesetzt wird und das aus GEOPLAN 1 (BLANKENBURG et al. 2008) hervorgegangene 3D-Strukturmodell, mit dem das hier vorgestellte Strömungsmodell gekoppelt wird. Zusätzliche Randbedingungen, die durch Datenerhebungen ermittelt werden, sind in Kapitel 4 aufgeführt.

Abschließend wird die hydrostratigrafische Klassifikation und die Messung von Grundwasserständen erläutert. Beide Punkte haben einen wesentlichen Einfluss auf die Modellkalibrierung.

2.1 Grundlagen - Theorie

Die Grundlagen für die hydraulische Modellierung leiten sich aus der Kontinuitätsbedingung und dem Fließgesetz für poröse Medien, dem DARCY-Gesetz ab. Nach DARCY ist die Wassermenge Q [m^3/s], die ein poröses Medium der Querschnittsfläche A [m^2] durchströmt, proportional zum hydraulischen Gradienten i . Mit dem Proportionalitätsfaktor k_f (Durchlässigkeitsbeiwert) [m/s] gilt:

$$Q = -k_f \times i \times A \quad (1)$$

Der hydraulische Gradient ist dimensionslos und wird beschrieben durch den Quotienten aus der Differenz zweier Standrohrspiegelhöhen h [m] entlang einer Fließstrecke und dem Abstand l [m] der beiden voneinander.

Bei der Strömungsmodellierung auf Basis des Finite Differenzen (FD) Verfahrens wird der zu betrachtende Grundwasserleiter in Elementarzellen aufgeteilt (diskretisiert). Eine Elementarzelle muss dabei so groß sein, dass sie die physikalischen Eigenschaften des Grundwasserleitermaterials darstellt und zeitgleich so klein, dass die Unterschiede des Grundwasserstandes innerhalb der Zelle nicht berücksichtigt werden müssen.

Die Kontinuitätsbedingung besagt für inkompressible Flüssigkeiten:

$$Q = v_f \times A \quad (2)$$

dabei ist v_f [m/s] die Filtergeschwindigkeit. Somit gilt:

$$v_f = -k_f \times i \quad (3)$$

Der Wasserfluss durch eine Elementarzelle wird entlang der drei Raumachsen x , y und z betrachtet. Damit ergibt sich bei stationärer Strömung, bei der Zu- und Abfluss einer Elementarzelle identisch sind, die Kontinuitätsgleichung als partielle Differentialgleichung zu:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k_{fx} \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k_{fy} \frac{\delta h}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k_{fz} \frac{\delta h}{\delta z} \right) \pm q = 0 \quad (4)$$

Die Gleichung wird durch Integration in eine Differenzgleichung überführt, in der die einzelnen Differentiale durch endliche (finite) Differenzen angenähert werden. Der Wasserfluss aus einer Zelle in eine benachbarte wird dann vereinfacht wie folgt beschrieben:

$$Q = T \times \Delta x \times \frac{h_1 - h_2}{\Delta y} \quad (5)$$

Dabei ist die Transmissivität T [m^2/s] gleich dem Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s] multipliziert mit der Mächtigkeit M [m] des betrachteten Grundwasserleiters.

Für jeden Wasserfluss aus einer Zelle in eine benachbarte wird eine Differenzgleichung aufgestellt, so dass der Gesamtzu- und -abfluss einer Zelle durch ein Gleichungssystem mit sechs Differenzgleichungen beschrieben ist. Da eine Zelle von ihren Nachbarzellen beeinflusst wird, müssen die Gleichungssysteme zeitgleich gelöst werden. Voraussetzung ist dabei, dass Anfangs-, Randbedingungen und Systemeigenschaften bekannt sind.

Bei der Berechnung eines stationären Zustandes sind Zu- und Abfluss einer Zelle gleich, es wird ein Gleichgewichtszustand beschrieben. Wird also von außerhalb des Systems ein Zufluss (z. B. durch Grundwasserneubildung) oder ein Abfluss (z. B. durch Grundwasserentnahme) induziert, so sind Zu- und Abflüsse an anderer Stelle davon beeinflusst. Sind Q [m^3/s] und k_f [m/s] bekannt, lässt sich die Standrohrspiegelhöhe h [m] ermitteln. Eine ausführlichere Darstellung der theoretischen Grundlagen findet sich u. a. bei KINZELBACH & RAUSCH (1995), PIOTROWSKI & RUMOHR (1995) und ANDERSON & WOESSNER (2002).

Bei der Modellierung werden drei Arten von Randbedingungen unterschieden (s. a. Abschn. 5.2). Bei der Randbedingung erster Art ist eine Standrohrspiegelhöhe vorgegeben, bei der Randbedingung zweiter Art ein Zu- oder Abfluss (der im Spezialfall Null sein ist) und

die Randbedingung dritter Art ist eine Kombination der Randbedingungen erster und zweiter Art. Für ein stationäres Modell muss es an mindestens einer Stelle des Modells eine Randbedingung erster oder dritter Art geben, damit es eine eindeutige Lösung gibt.

Vereinfacht lässt sich die Modellierung wie folgt beschreiben. Als Anfangsbedingung wird jeder Zelle ein Wasserstand zugewiesen, der hier einem konstruierten Grundwassergleichplan (Abschn. 4.2.2) entstammt. Die mittleren Wasserstände der Hauptvorfluter gehen als Randbedingungen erster Art in das Modell ein und die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte als Systemeigenschaften. Hiermit ist es nun möglich, die Standrohrspiegelhöhe jeder einzelnen Zelle durch numerisches Lösen der Differenzgleichungen zu bestimmen.

Wie in Abschnitt 1.1 aufgeführt, gibt es unterschiedliche Verfahren und Softwareanwendungen, um Strömungsmodelle zu erstellen. Das Hauptunterscheidungsmerkmal ist die mathematische Grundlage der verschiedenen Modelle. Am weitesten verbreitet sind das Finite Differenzen (FD) Verfahren und das Finite Elemente (FE) Verfahren (GOSSEL 2008). Weitere Modelle benutzen die Finite Volumen Methode oder gekoppelte Verfahren (s. a. ZYVOLOSKI 2007, HAITJEMA et al. 2010).

Ein Unterschied zwischen dem FD und dem FE Verfahren ist die Art der Aufteilung eines Modellgebiets. Das FD Verfahren unterteilt das Modellgebiet in rechtwinklige Elemente, das FE Verfahren in Elemente beliebiger Form (zumeist Dreiecksformen). Das FE Verfahren bietet die Möglichkeit, dass Modellgebiete sehr gut der Wirklichkeit entsprechend aufgebaut und Bereiche von größerem Interesse problemlos feiner aufgelöst werden können. Randbereiche oder Bereiche, in denen wenige Daten vorliegen, können hingegen in einer groben Auflösung bleiben. Sollen bei Benutzung des FD Verfahrens Bereiche verfeinert werden, muss das immer über die gesamte Modellausdehnung erfolgen. Ein zusätzlicher Unterschied besteht in der Berechnung des Grundwasserstandes in einer Zelle. Das FD Verfahren berechnet den Grundwasserstand immer für den Knoten im Mittelpunkt einer Zelle. Über den Grundwasserstand zwischen den Knoten einzelner Zellen wird keine Aussage getroffen. Das FE Verfahren berechnet hingegen den Wasserstand über Interpolationsverfahren für jeden Punkt einer Zelle. Für den Datenaustausch mit anderen Computeranwendungen ist der gleichmäßige Modellaufbau beim FD Verfahren allerdings von großem Vorteil. Weitere Unterschiede zwischen den beiden Verfahren sind in Tab. 1 aufgeführt.

Weitverbreitete Anwendungen für die Strömungsmodellierung sind FEFLOW (WASY 2006) auf Grundlage des FE Verfahrens und das im Rahmen dieser Arbeit verwendete MODFLOW-96 (im Weiteren: MODFLOW (HARBAUGH & McDONALD 1996)) auf Grundlage des FD Verfahrens.

KRESIC (2007) urteilt über MODFLOW (HARBAUGH & McDONALD 1996), dass es sich dabei wahrscheinlich um das am häufigsten eingesetzte und am meisten überprüfte Programm handelt. Dank seiner Vielseitigkeit und offenen Struktur stellt es heute einen industriellen Standard dar. Eine einfache Gebiets- und Schichtengeometrie im Modellgebiet sprechen hier zusätzlich für den Einsatz von MODFLOW (HARBAUGH & McDONALD 1996), da bei geringerer Ausnutzung von Computerressourcen in Hinblick auf die Fragestellung genauso gute Ergebnisse (LÜHR 2003) zu erwarten sind, wie bei einem Einsatz von FEFLOW (WASY 2006). Arbeiten, die für die Beantwortung einer Fragestellung sowohl MODFLOW (HARBAUGH & McDONALD 1996) als auch FEFLOW (WASY 2006) einsetzen und die Ergebnisse einander gegenüberstellen, sind nicht bekannt.

Zentral für die Fragestellung dieser Arbeit ist der Punkt, ob es durch die Kopplung eines 3D-Strukturmodells mit einem Strömungsmodell gelingt, ein verlässliches Prognosewerkzeug für die Bewirtschaftung des Grundwasserkörpers in Bremen-Nord zu bekommen. Andere Fragestellungen sollen zunächst nicht beantwortet werden.

Tab. 1: Vergleich zwischen FE und FD Verfahren

	Finite Elemente (FE)	Finite Differenzen (FD)
Ergebnisse	für jeden Punkt einer Zelle	nur für den Zellknotenpunkt
Gebietsgeometrie	realitätsnah einbaubar	approximierbar
Anwendung	FEFLOW	MODFLOW
Kosten der Anwendung	ab 1500,- €	~250,- €

MODFLOW (HARBAUGH & McDONALD 1996) ist Bestandteil des Programmpakets „Processing MODFLOW for Windows“ (PMWin) Version 5.3 (CHIANG 2005). Dieses Programmpaket ist eine Schnittstelle zwischen verschiedenen Modulen und Postprozessoren. Neben dem Softwarecode zur Strömungsmodellierung sind dort weitere Anwendungen enthalten, die hier verwendet werden (s. Abschn. 2.2).

Weitere Kriterien für die Nutzung von PMWin (CHIANG 2005) in dieser Arbeit sind vorhandene Anwenderkenntnisse, eine gute Handhabbarkeit und verbesserte Visualisierungsmöglichkeiten im Vergleich zu Vorgängerversionen.

2.2 Module in PMWin

Im Folgenden werden die in PMWin (CHIANG 2005) integrierten Module beschrieben, die hier neben MODFLOW (HARBAUGH & McDONALD 1996) angewendet werden. Im Einzelnen sind das die Module PEST (DOHERTY 2002) zur automatisierten Modellkalibrierung, die „2D-Visualization“ und „3D-Visualization“ zur Darstellung von Modellergebnissen, der „Results Extractor“ zum Exportieren von Modellergebnissen und das „Water Budget“ zur Berechnung von Wasserbilanzen.

Die Kalibrierung eines Strömungsmodells kann manuell, automatisiert oder kombiniert erfolgen. Bei der manuellen Kalibrierung werden die Kalibrierungswerte von Hand geändert, ein Modelldurchlauf gerechnet und die Anpassung zwischen berechneten und gemessenen Werten betrachtet. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis sich die Anpassung auf diesem Wege nicht mehr verbessern lässt. Alternativ kann dieser Vorgang mit den Softwarepaketen PEST (DOHERTY 2002) oder UCODE (POETER & HILL 1998) automatisiert erfolgen.

In PMWin (CHIANG 2005) sind die Module UCODE (POETER & HILL 1998) und PEST (DOHERTY 2002) über eine Softwareschnittstelle mit MODFLOW (HARBAUGH & McDONALD 1996) verbunden. Hier wird PEST (DOHERTY 2002) verwendet. In der Anwendung der beiden Module gibt es technisch keine Unterschiede, aber im Laufe der Modellierung stellt sich heraus, dass UCODE (POETER & HILL 1998) bei Benutzung des River Package (Abschn. 5.2.4) fehlerhafte Ergebnisse liefert und PEST (DOHERTY 2002) bei kürzeren Laufzeiten auch Sensitivitäten für verschiedene Parameter ermittelt.

PEST (DOHERTY 2002) ermittelt automatisch Parameter und versucht dabei die Abweichungen zwischen Messwerten und Modellwerten zu minimieren. Es werden die Durchlässigkeitsbeiwerte von Gewässer- und Drainagebetten ebenso ermittelt, wie die horizontale und vertikale Durchlässigkeit einzelner Schichten. Es gibt die Möglichkeit, Parameter für einzelne Zellen, für Abschnitte von Polylinien, für Zonen und für ganze Schichten zu berechnen. PEST (DOHERTY 2002) greift dabei auf die in MODFLOW (HARBAUGH & McDONALD 1996) eingegebenen Messstellen und Randbedingungen zurück. Grenzwerte für die zu ermittelnden Parameter können angegeben werden. Sollen zu viele Parameter (> 30) gleichzeitig ermittelt werden wird der Prozess sehr langsam.

Bei der Modellkalibrierung werden die horizontale Durchlässigkeit verschiedener Zonen sowie abschnittsweise die Durchlässigkeiten der Gewässerbetten und der Drainage ermittelt. Eine Einschränkung von PMWin (CHIANG 2005) ist, dass nur 20 Zonen mit jeweils maximal 40 Stützpunkten gebildet werden können. Grundsätzlich lassen sich die Methoden PEST

(DOHERTY 2002) und manuelle Kalibrierung kombiniert verwenden. In dieser Arbeit wird zunächst automatisiert und anschließend manuell kalibriert (s. a. Abschn. 5.3).

Zur Darstellung von Zwischen- und Endergebnissen gibt es die Module „2D-Visualization“ und „3D-Visualization“ (SEER 3D (CHIANG 2009)). Mit ihnen werden berechnete GW-Druckspiegelhöhen dargestellt. Es ist möglich, zusätzliche Daten wie Hintergrundkarten oder Grenzverläufe einzuladen, um die Ergebnisse in einem geografischen Kontext zu zeigen. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Modulen ist die Art der Darstellung. In der „2D-Visualization“ ist die Darstellung ausschließlich als Draufsicht auf die Modellergebnisse möglich. Die „3D-Visualization“ dagegen erlaubt eine Betrachtung von allen Seiten. Für die Erstellung verschiedener Abbildungen wird das Modul „3D-Visualization“ benutzt (s. a. Abschn. 5.3 und Abschn. 5.5).

Über den „Results Extractor“ lassen sich verschiedene Modellergebnisse wie z. B. der berechnete Grundwasserdruckspiegel oder die Veränderung des Grundwasserdruckspiegels vom Ausgangszustand zum Endzustand im Modell in verschiedenen Formaten abspeichern. Die Daten werden in Spalten- oder Matrizenform gespeichert und anderen Softwareanwendungen zur Verfügung gestellt.

Mit dem Modul „Water Budget“ lassen sich Wasserbilanzen für das Modellgebiet oder Ausschnitte davon berechnen. Bei Nutzung des Moduls wird automatisch eine Wasserbilanz für das gesamte Modellgebiet berechnet, die bei Mehrschichtmodellen zusätzlich eine Gesamtbilanz für jede einzelne Schicht ermittelt. Es ist möglich, zusätzliche Bereiche festzulegen, für die gesonderte Wasserbilanzen berechnet werden. Dies kann für eine Einzelschicht, mehrere Schichten oder alle vorhandenen Schichten erfolgen.

2.3 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung ist eine wichtige Randbedingung (2. Art) bei der Strömungsmodellierung. Ein Überblick und eine umfassende Erläuterung dazu finden sich bei SOPHOCLEOUS (2004). Die Grundwasserneubildung ist modellunabhängig und weist jeder jeweils höchsten aktiven Modellzelle einen Wasserzufluss zu. Die Berechnung der Grundwasserneubildung basiert auf folgender vereinfachter Gleichung, einer Form der Wasserhaushaltsgleichung:

$$GW_{neu} = N - ET_{real} - A_0 \left[\frac{mm}{a} \right] \quad (6)$$

Die Parameter ET_{real} und A_0 hängen dabei von unterschiedlichen Faktoren ab. Die wichtigsten sind der Versiegelungsgrad der betrachteten Fläche, die vorhandene Vegetation, die Hangneigung und der Grundwasserflurabstand.

Es gibt unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Grundwasserneubildung (u.a. DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1980; RINGER & WESSOLEK 1990; KUNKEL et al. 2006), die sich darin unterscheiden, dass sie auf verschiedene Datengrundlagen zurückgreifen, teilweise mit Randbedingungen arbeiten und im Detail unterschiedliche Rechenschritte vollziehen.

Das Modell „Großräumiger Wasserhaushalt“ GROWA06V2 (KUNKEL et al. 2006) berechnet unter anderem mittlere Grundwasserneubildungsraten und berücksichtigt dabei verschiedene Eingangsdaten auf Grundlage der BÜK 50 (Bodenübersichtskarte 1:50000 (LBEG 2008)). Für die Niederschlagsdaten werden Zeitreihen des Deutschen Wetterdienstes von 1961 bis 1990 ausgewertet und eingebaut. Darüber hinaus wird die Verdunstung auf ebenen und unversiegelten Flächen beachtet, genauso wie Hangneigung, Exposition, versiegelte Flächen, Grundwasserflurabstand, die hydrogeologische Gesteinseinheit und das Verhältnis zwischen Gesamtabfluss und Grundwasserabfluss. Wesentliche Informationen sind dabei aus ATKIS[®] (Amtliches topografisches Karteninformationssystem) -Daten (LGN 2003) abgeleitet. Es werden die Waldflächen genauso wie der Versiegelungsgrad einer Fläche anhand der ATKIS[®]-Daten (LGN 2003) ausgewiesen. Über eine Auswertung von Profilen in der BÜK 50 (LBEG 2008) werden drainierte Gebiete ermittelt.

Die Verfahren nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) und nach KUNKEL et al. (2006) werden in LEMKE & ELBRACHT (2008) vergleichend untersucht und dargestellt. Es wird dort gezeigt, dass das Modell GROWA06V2 (KUNKEL et al. 2006) im Lockergestein plausible Werte liefert und geringere Abweichungen zu vorhandenen Pegelmessdaten (NLÖ 1995) im Lockergestein aufweist, als die Methode von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980). Auch HERMANN et al. (2009) weisen auf die allgemeine Eignung von GROWA als Eingangsdatensatz bei regionalen Grundwassermodellen hin. Dort wird die Version GROWA98 (KUNKEL & WENDLAND 2002) eingesetzt.

Grundsätzlich kann die Grundwasserneubildung auch mit einem Strömungsmodell ermittelt werden, wenn alle anderen Zu- und Abflüsse für ein Gebiet sowie die Parameter des Untergrundes bekannt sind. Da das hier nicht der Fall ist, wird zur Bestimmung der Grundwasserneubildung im Modellgebiet das Modell GROWA06V2 (KUNKEL et al. 2006) verwendet (s. Abb. 1). Ausschlaggebend dafür sind die Bewertung des Modells bei LEMKE & ELBRACHT (2008) und die Aktualität der Eingangsdaten. Im Mittel kommt es danach im Modellgebiet zu einer Grundwasserneubildung von 165 mm/a.

Die Originaldaten liegen als Flächendateien vor und werden über ein Geographisches Informationssystem (GIS, hier: ArcView (ESRI 2005)) in eine Rasterform beliebiger Auflösung umgerechnet und dann in das Strömungsmodell integriert. Die räumliche Auflösung wird dadurch begrenzt, dass die Niederschlagsdaten in GROWA06V2 (KUNKEL et al. 2006) als Raster mit einer Auflösung von 50 m x 50 m eingehen.

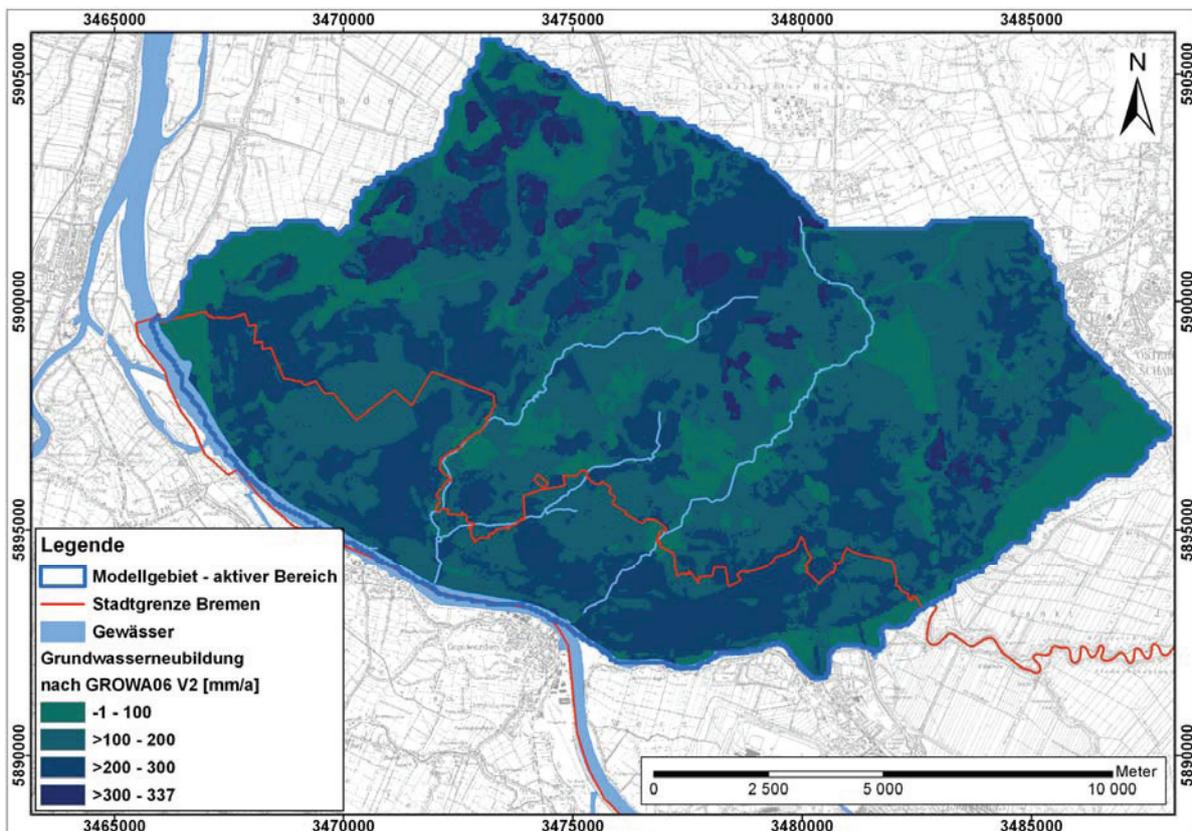


Abb. 1: Grundwasserneubildung im Modellgebiet nach GROWA06V2 (KUNKEL et al. 2006)

2.4 3D-Strukturmodell

Das 3D-Strukturmodell (s. a. Abb. 2) ist eine wesentliche Grundlage dieser Arbeit und liefert den strukturellen Aufbau für die hier vorgestellten Strömungsmodelle. Der strukturelle Aufbau ist maßgeblich für den Höhenunterschied zwischen einzelnen Zellen im Strömungsmodell und somit ein wesentlicher Eingangsdatensatz bei der Berechnung von Grundwasserständen (s. a. Abschn. 2.1).

Das hier genutzte 3D-Strukturmodell entstammt dem Projekt GEOPLAN 1 (BLANKENBURG et al. 2008) und bildet den mitteltiefen Untergrund in Bremen-Nord ab. Mit der Software 12

GOCAD (EARTH DECISION SCIENCES 2005) erstellt, sind 380 beim GdFB vorhandene Bohrungen mit einer Endteufe von mehr als 40 m gemäß ihrer stratigrafischen Einstufung integriert. Zusätzlich sind vorliegende Querprofile in das Strukturmodell eingebaut. Weitere Profile werden während der Modellierung erzeugt und berücksichtigt. Ergänzt werden diese Informationen durch den Einbau von Ergebnissen geophysikalischer Messungen nach Eigenpotential, elektrischem Widerstand und natürlicher Gammastrahlung der Schichten im Untergrund. Insgesamt werden Messungen an 107 Bohrlokalationen in die Auswertung einbezogen. Das 3D-Strukturmodell liefert für den Bereich Bremen-Nord die Top- und Basisflächen der bindigen Drenthe-Schichten (Geschiebemergel), die Top- und Basisflächen der bindigen Lauenburger-Schichten (Lauenburger Ton) und die Basisfläche des Hauptgrundwasserleiters. Die Ergebnisse werden auf den strukturellen Aufbau des Strömungsmodells übertragen.

In Abb. 2 sind die Geländeoberkante in transparentem Grau, die bindigen Drenthe-Schichten in Hellbraun, die bindigen Lauenburger-Schichten in Dunkelbraun und die Basis des genutzten Grundwasserleiters in Weiß dargestellt. Die Skizze ist zwanzigfach überhöht und zur Orientierung sind der Verlauf von Weser und Lesum sowie die Landesgrenze von Bremen abgebildet.

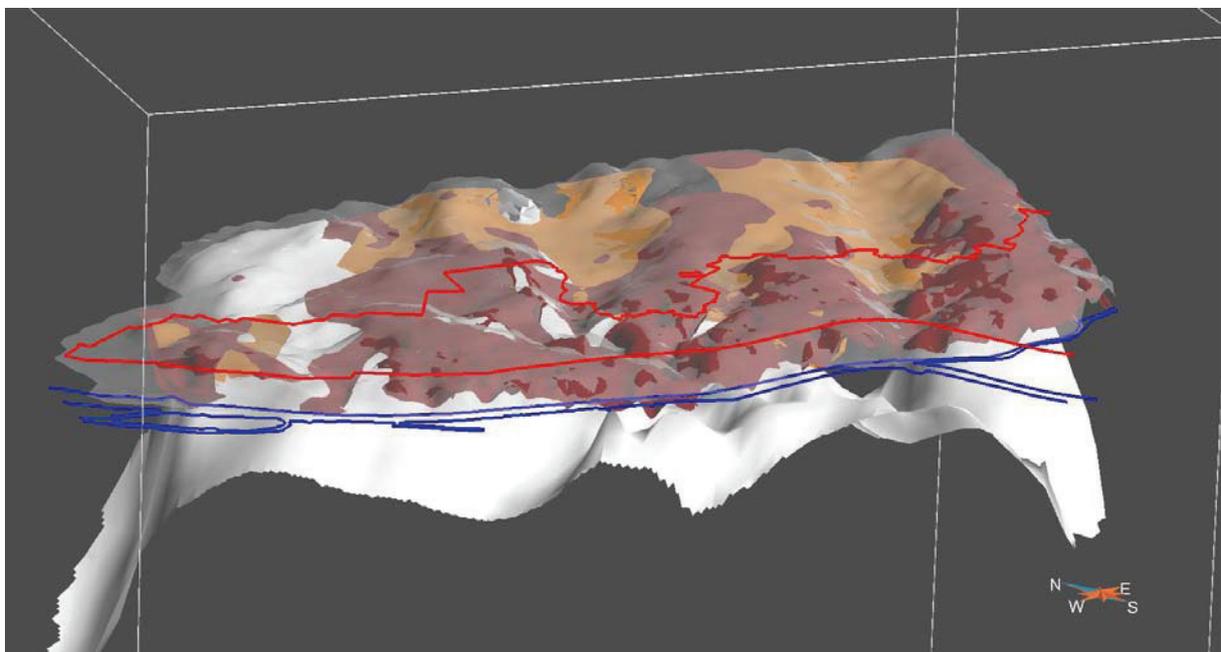


Abb. 2: Skizze eines Ausschnitts des GOCAD (EARTH DECISION SCIENCES 2005) 3D-Strukturmodells für Bremen-Nord und angrenzende Bereiche von Niedersachsen

Auf die das Strömungsmodell betreffenden Ergebnisse der 3D-Strukturmodellierung und deren Einbau in das Strömungsmodell wird in Abschnitt 5.4 detaillierter eingegangen.

2.5 Hydrostratigrafie

In der Hydrostratigrafie werden Grundwasserleiter, -hemmer und -geringleiter durch eine einheitliche Nomenklatur gekennzeichnet. Eine Abgrenzung verschiedener Körper zueinander erfolgt dabei durch die hydrogeologische Interpretation von Schichtverzeichnissen. Eine hydrogeologische Einheit besteht bei Lockergesteinen aus einem einzelnen oder einem Komplex von mehreren Sedimentationskörpern (SCHUBERT 1997).

Für die Kalibrierung eines Strömungsmodells werden berechnete Grundwasserstände mit gemessenen verglichen. Die Zuordnung einer Messstelle zu einer hydrostratigrafischen Einheit erlaubt es, eine Vorauswahl zu treffen und nur solche Messstellen zu berücksichtigen, die in einer für die Fragestellung bedeutsamen Einheit verfiltert sind.

Einen Überblick über die Hydrostratigrafie von Nordwestdeutschland gibt die Publikation Geofakten 21 (REUTTER 2005). Die hydrostratigrafische Gliederung (L0 bis L4 für die Grundwasserleiter, H1 bis H5 für die Grundwasserhemmer und HL 4.3 für einen Grundwassergeiringleiter) für das Untersuchungsgebiet beruht auf dieser Klassifizierung (s. Abschn. 3.3, Tab. 3).

2.6 Grundwasserstand

Im Untersuchungsgebiet finden eine umfangreiche Recherche nach Grundwassermessstellen und anschließend Stichtagsmessungen statt. Im Rahmen der Recherche werden, soweit erforderlich, die Ansatzpunkte von Messstellen in mNN durch die Firma GeoInformation Bremen eingemessen. Des Weiteren wird eine umfangreiche Funktionsprüfung jeder Messstelle durchgeführt. Dabei werden die Genauigkeit archivierter Daten (Lage, Rohrdurchmesser, Verschlusskappe, Eigentümer und Endteufe des Ausbaus) ebenso wie der Allgemeinzustand (ist die Messstelle trocken gefallen, liefert sie nachvollziehbare Messwerte) begutachtet.

Die Lagekoordinaten der einzelnen Messstellen werden mithilfe eines GIS (hier: ArcView (ESRI 2005)) dargestellt und gegebenenfalls entsprechend den Ergebnissen der Geländerecherche im digitalen Datensatz korrigiert. Die im Messnetz eingebundenen Messstellen sind digital katalogisiert, mit Lagefotos dokumentiert und mit Lageplänen auf Grundlage des GIS

versehen (s. a. Anhang J). Mit der Software GeODin 5.1 (FUGRO CONSULT GMBH 2008) werden die Messstellen verwaltet und die Geländeunterlagen erstellt. Die Genauigkeit der Höhenlage der Messstellen schwankt im Zentimeterbereich, die der geografischen Lage im Bereich weniger Meter.

Die Stichtagsmessungen werden zweimal jährlich, zu Beginn und zum Ende der Grundwasserneubildungsphase im Frühjahr und Herbst, durchgeführt (s. a. Abschn. 4.2.1). In den meisten Messstellen wird dazu der Wasserstand unter der Messstellenrohroberkante per Hand mit einem Lichtlot gemessen. In wenigen Messstellen sind Datenlogger installiert, die zu den jeweiligen Stichtagsmessungen ausgelesen werden. Für jede Messstelle ist ein exakter Messansatzpunkt definiert und in Geländeunterlagen abgelegt, so dass Messungenauigkeiten, die dadurch zustande kommen, dass unterschiedliche Personen messen, weitgehend ausgeschlossen sind. Die Messungenauigkeit liegt daher im Bereich weniger Millimeter. Die Messkampagnen sind so konzipiert, dass die Messwerte in einem Zeitraum von einer Woche erhoben werden. Es soll so die Auswirkung von zum Beispiel durch Starkregenereignisse verursachten, kurzfristigen Schwankungen im Grundwasserdruckspiegel auf die Messwerte ausgeschlossen werden. Während der durchgeführten Stichtagsmessungen ist es zu keinen Extremwetterlagen gekommen, auch wurde nicht in Zeiten überdurchschnittlicher Trockenheit oder Feuchtigkeit gemessen (s. a. Abschn. 4.4).

3 Untersuchungs- und Modellgebiet

In den folgenden Abschnitten werden die Ausdehnung von Untersuchungs- und Modellgebiet sowie die Struktur im Untergrund dargestellt und in einen geologischen sowie hydrogeologischen Kontext gestellt. Es wird gezeigt, wie die den genutzten Grundwasserleiter beeinflussenden Schichten entstanden und wie sie heute unterschieden werden.

3.1 Geografischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet umfasst den Bereich Bremen-Nord und daran angrenzende Gebiete aus Niedersachsen (Abb. 3). Bremen-Nord zu untersuchen ist dabei eine Vorgabe aus GEOPLAN 1 (BLANKENBURG et al. 2008). Die Größe ist so gewählt, dass nach den bisherigen Informationen (u. a. Lage der Grundwasseroberfläche 1:200.000 (LBEG 2008b)) der Zustrombereich für Bremen-Nord erfasst wird.

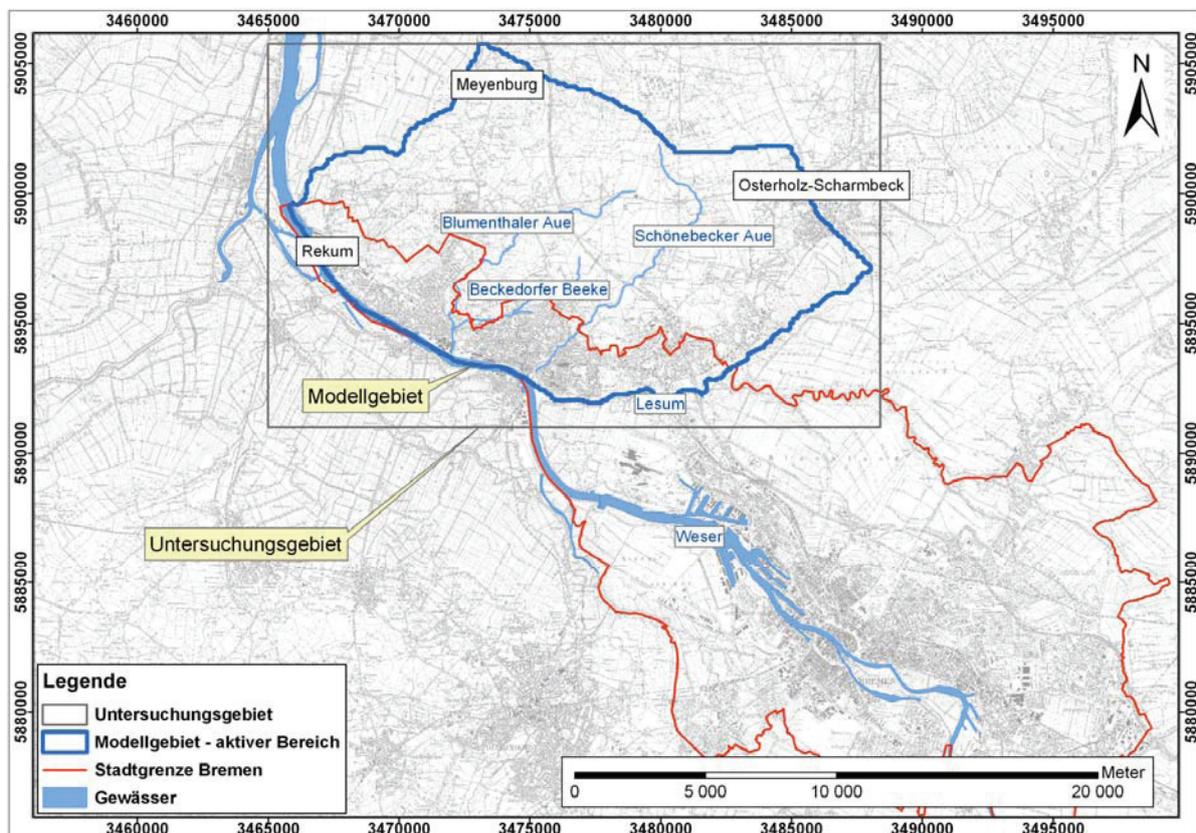


Abb. 3: Geografische Lage des Untersuchungsgebiets und des Modellgebiets in Niedersachsen und Bremen-Nord

Das Modellgebiet wird nach ersten Ergebnissen aus dem Untersuchungsgebiet abgeleitet und ist durch Grundwasserscheiden und Stromlinien begrenzt. Grundwasserscheiden und Stromlinien bilden Randbedingungen (2. Art), ohne Zu- und Abfluss, in das Gebiet und gehen später auch als solche in das Modell ein (Abschn. 5.2.3). Das Modellgebiet wird durch die aktiven Zellen des Strömungsmodells beschrieben und erstreckt sich über die Blätter der Topografischen Karte 1:25000 (TK 25) 2716, 2717, 2718, 2816, 2817 und 2818. Die genaue Ausdehnung ist von Rechtswert: 3465875 bis Rechtswert: 3488000 (22,125 km) und von Hochwert: 5891625 bis Hochwert: 5905750 (14,125 km). Das Untersuchungsgebiet hat eine Ausdehnung von 345,15 km², das Modellgebiet hat eine Ausdehnung von 181 km². Im Süden durch die Lesum und im Westen durch die Weser begrenzt, erstreckt sich das Modellgebiet im Norden bis Meyenburg und im Osten bis Osterholz-Scharmbeck.



Abb. 4: Auelandschaft im Verlauf der Blumenthaler Aue, zentral im Modellgebiet

Das Modellgebiet ist durch eine auffällige Morphologie charakterisiert. Im Westen liegt die Geländeoberfläche teilweise unter 0 mNN und steigt im Osten bis auf über +46 mNN an. Tiefe Geländeeinschnitte folgen den Gewässerläufen der Schönebecker Aue und der Blu-

menthaler Aue mit ihren Nebengewässern von Nordost nach Südwest. Abb. 4 zeigt eine Aue-landschaft im Verlauf der Blumenthaler Aue. Im Hintergrund (Blickrichtung NO) zeichnet sich die Erhebung eines Geestkörpers ab.



Abb. 5: Blick von Westen auf das Modellgebiet mit drainierten Flächen im Vordergrund und der Rekumer Mühle zwischen den Windrädern im Hintergrund

Im Westen, Nordwesten und Osten des Modellgebiets sind Bereiche drainiert. Abb. 5 zeigt den Blick vom westlichsten Punkt des Modellgebiets nach Osten. Im Vordergrund sind drainierte Flächen zu erkennen, im Hintergrund zwei Windräder und die alte Rekumer Mühle. Die Rekumer Mühle steht auf einer morphologischen Erhebung, einer kleineren Geestfläche.

Das Modellgebiet ist gekennzeichnet durch eine sehr unterschiedliche Nutzung. Innerhalb der Verwaltungsgrenzen der Stadt Bremen ist der überwiegende Teil durch eine wechselnd starke Wohnbebauung geprägt. Im Südwesten sind größere Parkflächen angelegt. In Richtung Weser dominieren kleine und mittlere Industrie- und Gewerbebetriebe. Der nördliche und östliche Teil auf niedersächsischem Gebiet ist mit Forst- und Landwirtschaftsflächen

ländlich ausgeprägt. Entsprechend der Nutzungsformen ist der Versiegelungsgrad des Bodens im Süden und Westen deutlich höher als im Norden und Osten. Zwei Bundesautobahnen durchziehen das Modellgebiet. Die A27 von Bremen nach Bremerhaven verläuft vom Osten kommend im Bogen nach Nord, die A270 im Süden des Gebietes in Ost-West-Richtung.

3.2 Geologischer Überblick

Geologisch betrachtet lässt sich bei der Entwicklung der Weser das gesamte, ca. 2,6 Millionen Jahre umfassende Zeitalter des Quartär (Abb. 6) zurückverfolgen (STREIF 2001). Dieses Zeitalter ist entscheidend für die Bildung der grundwasserführenden Schichten im Untersuchungsgebiet, die ihre Basis in den jüngsten Schichten des Tertiärs haben.

		Stratigraphie			Ablagerungen			
Zeitalter	Periode	Abteilung	Gliederung		Art	Genese		
Känozoikum	Quartär (q)	Holozän	qh	Postglazial	Torfe	H		
		8000 a	Weichsel-Kaltzeit	qw	(glazi)fluviale Sande	gf		
					Geschiebedecksand	Gds		
		115 000 a	Eem Warmzeit	qee	Torfe	H		
					Pleistozän (qp)	Saale- Kaltzeit	qs	Warthe - Stadium
		Drenthe 2 - Stadium	qD2	Nachschüttsande				gf
		Drenthe 1 - Stadium	qD1	Vor & Nachschüttsande				gb
		Geschiebelehm	gb					
		235 000 a	Holstein-Warmzeit	qhol	Vorschüttsande	gf		
		250 000 a			Lauenburger Schichten	qL	Beckensand (Ritterhuder Sand)	b
	ältere Kaltzeiten	Elster-Kaltzeit	qe	Nachschüttsande	gf			
				Geschiebelehm/mergel	gb			
	350 000 a			Vorschüttsande	gf			
					Schichtlücke			
	Tertiär (t)	2,5 Mio a	Pliozän	tpl		(Kaolin)Sande	m	
			Miozän	tmi	Sytlum	tmiS	Feinsande & Schluffe	m
					Gramium	tmiG	Feinsande und Schluffe	m
Langenfeldium					tmiL	Schluffe und Tone	m	
Reinbekium					tmiR	sandige Schluffe	m	
Hemmoorium					tmiH	sandige bis tonige Schluffe	m	
Vierlandium					tmiV			
Oligozän			tol	Chattium	tolo	Schluffe und Tone, Basis sandig	m	
				Rupelium	tolm			
Eozän			teo	Latdorfium	tolu			
				sandige bis tonige Schluffe	m			
Paläozän	tpal			Schluffe und Tone	m			

Abb. 6: Gliederung Tertiär und Quartär (verändert nach HÖFLE (1990) und STREIF (2004)), die relevanten stratigrafischen Kürzel sind in Tab. 3 erläutert

Das Modellgebiet liegt nahezu komplett auf der Hohen Geest (GRÜTZMANN & REICHLING 2006) in Bremen-Nord. In der Tiefe werden Schichten aus dem Quartär und an einigen Stellen aus dem Tertiär betrachtet. Fünf, die Strömungsmodellierung beeinflussende Schichtpakete, sind im Modellgebiet erhalten geblieben. Sie sind in Abb. 7 in idealisierter Form dargestellt. Die verwendeten Kürzel kennzeichnen Petrographie und Stratigrafie der einzelnen Schichten und sind dem Symbolschlüssel Geologie entnommen (PREUSS et al. 2009).

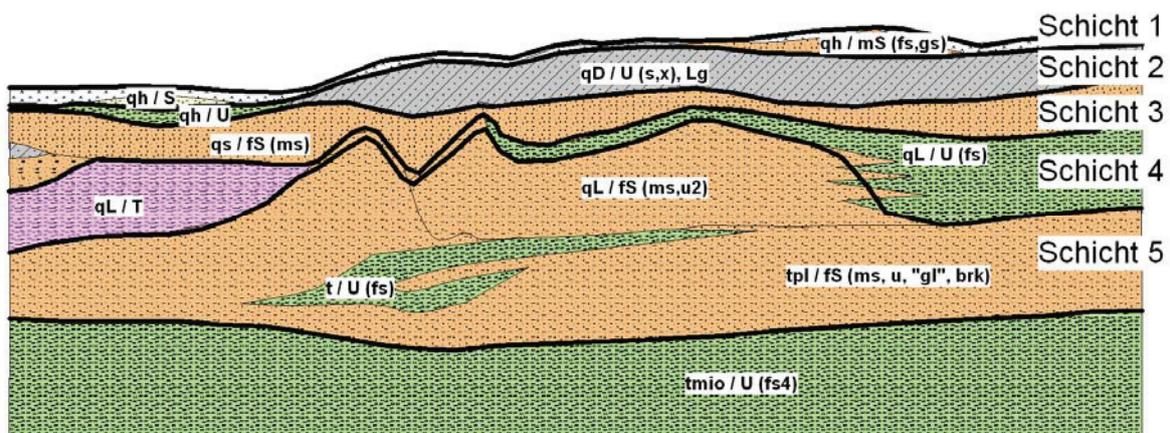


Abb. 7: Skizze der geologischen Struktur des mitteltiefen Untergrunds in Bremen-Nord

Charakteristisch sind eine eiszeitliche Morphologie und Rinnenstruktur in den Schichten, sowie eine Verstellung durch den Aufstieg zweier Salzstöcke unterhalb des Untersuchungsgebiets (Lesum und Aschwarden). Während des Zechstein (250 Millionen Jahre vor heute) abgelagertes Steinsalz durchlief in der Folgezeit einen durch Dichteinversion gesteuerten Hebungsprozess (Halokinese). Dieser Aufstieg dauerte bis ins jüngere Tertiär und beeinflusste Lage und Stellung der bis dahin gebildeten Ablagerungen. Aus dem Pleistozän sind keine salinartektonischen Bewegungen mehr nachgewiesen (ILLIES 1955).

Das Zeitalter des Quartär ist gekennzeichnet durch einen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Während der Kaltzeiten hat es immer wieder Eisvorschübe aus dem Norden gegeben, die auch das Untersuchungsgebiet zeitweilig mit einer mehrere 100 m mächtigen Eisschicht bedeckt haben (Abb. 8).

In die Zeit der ältesten Vereisungsphase des Quartär, der Elster-Kaltzeit, fällt die Bildung tiefer Rinnensysteme im Untersuchungsgebiet. Es wird angenommen, dass es sich hierbei um Erosionsformen handelt (KUSTER 1979, HÖFLE et al. 1989, EHLERS 1994), die dadurch

entstehen, dass Wasser entlang von Störungen im Gletscher zu dessen Basis gelangt und dort unter hohem Druck den Untergrund erodiert. Anschließend kommt es zu einer Verfüllung mit zunächst gröberem, später feinerem Material. In diesen Rinnenbereichen liegt die Quartärbasis teilweise bei bis zu -300 mNN und zeigt eine generelle Nordsüd-Ausrichtung (HÖFLE et al. 1989).

Im Wesentlichen ist der im Untersuchungsgebiet gelegene Geestkörper aus elsterzeitlichen Beckensedimenten aufgebaut. Im Untersuchungsgebiet sind dies die Lauenburger Schichten, die sowohl tonig (Lauenburger Ton) als auch sandig (Ritterhuder Sande) ausgeprägt sind. Die sandige Fazies wird durch Schmelzwässer gebildet, die tonige entsteht durch Ablagerung feiner Suspension in Stillwasserbereichen.

Der Elster-Kaltzeit folgt das Holsteininterglazial, in dem die Temperaturen und der Meeresspiegel deutlich ansteigen. Aus dieser Zeit sind keine Ablagerungen im Untersuchungsgebiet vorhanden.

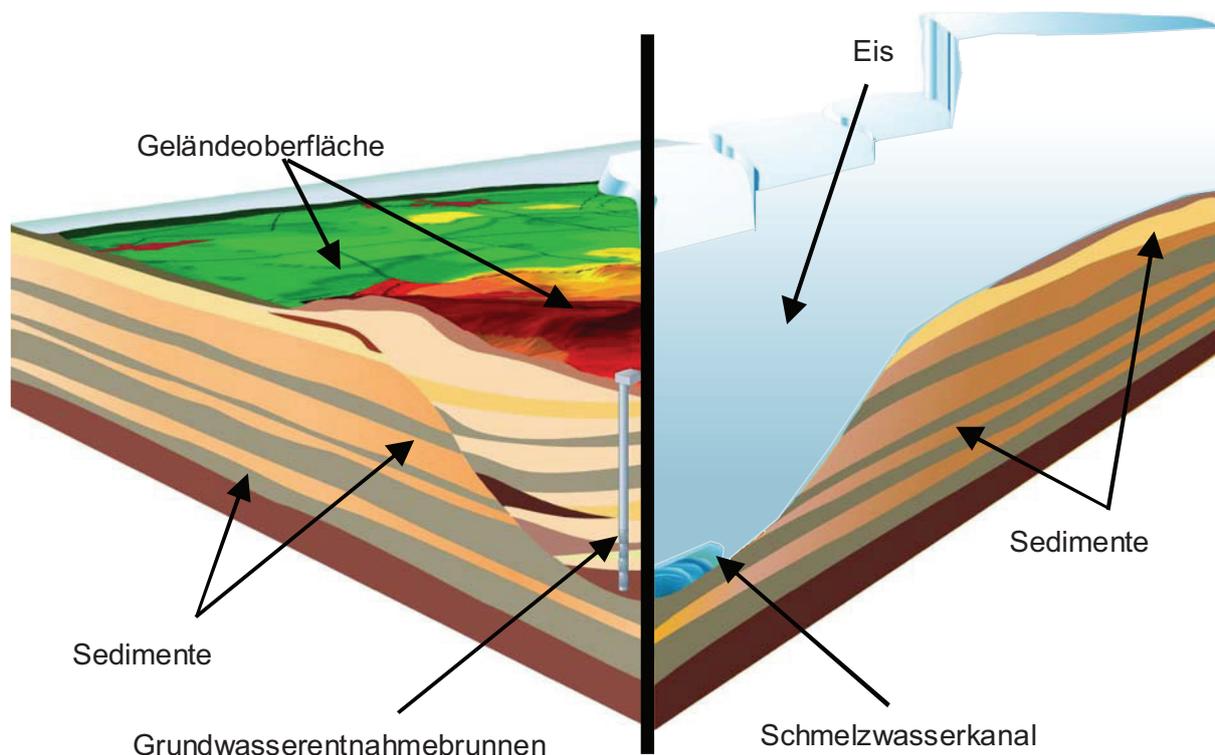


Abb. 8: Skizze der Landschaft und des Untergrundes in Norddeutschland während der Eiszeiten (rechts) und in der Gegenwart (links) (verändert nach GDFB (2003))

Während der dann einsetzenden Saale-Kaltzeit kommt es zu einer erneuten Abkühlung und Eisvorschüben aus dem Norden. Auch während dieser Kaltzeit werden Schmelzwassersande im Untersuchungsgebiet abgelagert, allerdings sind diese deutlich weniger mächtig als die der Elster-Kaltzeit. Von den drei Eisvorschüben der Saale erreicht nur der Haupt-Drenthe-Gletscher das Untersuchungsgebiet. Er lagert relativ geringmächtige bindige Schichten, die aus dem Material der Grundmoräne bestehen (Geschiebelehm, Geschiebemergel), ab (STREIF 2001). Da Ablagerungen aus der Holsteinwarmzeit fehlen, liegen die Saale-Schichten direkt auf den Elster-Schichten (s. Tab. 2).

Aus der anschließend einsetzenden Eem-Warmzeit sind wie aus der Holstein-Warmzeit keine Sedimente im Untersuchungsgebiet vorhanden.

Während der darauf folgenden Weichsel-Kaltzeit kommt es wieder zu Eisvorschüben aus dem Norden, die das Untersuchungsgebiet allerdings nicht mehr erreichen. Vielmehr werden periglaziale Schichten gebildet, die im Untersuchungsgebiet stark verbreitet sind.

Im dann beginnenden und bis heute andauernden Zeitalter des Holozän werden im Bereich der Geest keine bedeutenden Schichten mehr gebildet. Entlang der Geestbäche werden in flachen Uferbereichen Auesedimente abgelagert und in Niederungen und abflusslosen Senken entstehen kleine Moore.

Der Untergrund in Bremen-Nord bis zur Basis des genutzten Grundwasserleiters ist vereinfacht durch fünf Schichtpakete zu beschreiben. Tab. 2 zeigt eine Übersicht, in der auch die im Modellgebiet vorhandenen Mächtigkeiten der einzelnen Schichten dargestellt sind (s. a. Abschn. 5.4).

Tab. 2: Schichtaufbau im Modellgebiet bis zur Basis des genutzten Grundwasserleiters

Schicht Nr.	Aufbau	Mächtigkeit [m]
1	Terrassensande der Weichselzeit	1 – 34,5
2	Geschiebemergel der Grundmoräne aus dem Hauptdrenthe-Vorstoß	0,1 – 22,3
3	Terrassen-, Vorschüttsande der Saale-Kaltzeit	0,1 – 27,1
4	tonige Fazies der Lauenburger Schichten der Elster-Kaltzeit	0,1 – 71
5	sandige Fazies der Lauenburger Schichten und Vorschüttsande der Elster Kaltzeit, sowie Kaolinsande des Pliozän	41,8 – 259,3

3.3 Hydrostratigrafischer Überblick

Die hydrostratigrafische Gliederung nach REUTTER (2005) (s. a. Tab. 3) erfasst die im Modellgebiet vorkommenden Schichten bis zur Basis des genutzten Grundwasserleiters im Pliozän. Es wird zwischen Grundwasserleiter (L) und Grundwasserhemmer (H) unterschieden.

Die im Modellgebiet vorhandenen Messstellen werden entsprechend dieser Klassifikation anhand vorhandener Informationen zu Petrografie und Genese eingestuft (s. a. Anhang J). Es wird dabei die Schicht, in der die Messstelle verfiltert ist, beurteilt. Die Klassifikation beruht somit im Wesentlichen auf der Schichtbeschreibung, die im Zuge des Abteufens der Bohrung der jeweilige Bohrmeister erstellt. In Einzelfällen werden Bohrungen im direkten Umfeld bei der Klassifikation mit in Betracht gezogen. Können Messstellen aufgrund fehlender Informationen auch dann nicht eindeutig klassifiziert werden, wird die Tiefenlage der Filterstrecke in dem in GEOPLAN 1 (BLANKENBURG et al. 2008) erstellten 3D-Strukturmodell dargestellt und daraufhin eine Klassifikation durchgeführt. Ist es nicht möglich, eine eindeutige Klassifikation durchzuführen, wird die jeweilige Messstelle nicht weiter für die Modellierung verwendet.

Tab. 3: Übersicht über die im Modellgebiet vorkommenden hydrostratigrafischen Einheiten

Hydrostrat. Kurzbezeichnung	Stratigrafie		Petrografie	
L0	Quartär – Holozän	(qh)	Auffüllungen	
H1	Quartär – Holozän	(qh)	Torfe oder Schluffe	(H/U)
L1	Quartär – Weichsel Kaltzeit	(qw)	Sande	(S)
H3	Quartär – Saale Kaltzeit Drenthe-Stadium	(qD)	Geschiebemergel	(U)
L3	Quartär – Saale Kaltzeit	(qs)	Sande	(S)
H4	Quartär – Elster Kaltzeit Lauenburger Schichten	(qL)	Tone oder Schluffe	(T/U)
L4.1	Quartär – Elster Kaltzeit Lauenburger Schichten	(qL)	Feinsande	(fS)
L4.2	Quartär – Elster Kaltzeit	(qe)	Sande	(S)
HL 4.3	Tertiär – Pliozän	(tpl)	Schluff	(U)
L4.3	Tertiär – Pliozän	(tpl)	Feinsande	(fS)
H5	Tertiär – Obermiozän	(tmio)	Tone und Schluffe	(T-U)

4 Datengrundlagen

In diesem Kapitel wird auf die für die Strömungsmodellierung notwendigen Eingangsdaten eingegangen. Zunächst aber werden wissenschaftliche Arbeiten vorgestellt, die in der Vergangenheit zu verschiedenen Fragestellungen im Modellgebiet durchgeführt wurden. Sie liefern Ergebnisse, die mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen und diskutiert werden (s. Abschn. 7.4).

In den darauf folgenden Abschnitten werden gemessene Grundwasserstände und weitere Eingangsdaten für die Strömungsmodellierung dargestellt. Abschließend wird das Klima im Untersuchungszeitraum betrachtet.

4.1 Vorhandene Untersuchungen im Modellgebiet

In Abschn. 4.1.1 werden bestehende Modellierungen erläutert, die Teilbereiche des hier genutzten Modellgebiets betrachten aber andere Modellkonzepte verfolgen, als das in dieser Arbeit der Fall ist. Im darauf folgenden Abschnitt wird eine Arbeit vorgestellt, die sich mit dem Tideeinfluss im Modellgebiet beschäftigt. Sie liefert Auswahlkriterien für die Verwendung von Eingangsdaten und Vergleichswerte für die in dieser Arbeit ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte.

4.1.1 Vorhandene Strömungsmodellierungen im Bereich des Modellgebiets

Für Teilbereiche des Modellgebiets gibt es bereits zwei Strömungsmodelle (MULL 1986, GEOUM 2006), die andere Fragestellungen beantworten. Ein weiteres Modell überschneidet sich mit dem hier vorgestellten, betrachtet aber ein größeres Gebiet (INGENIEURGESELLSCHAFT DR. SCHMIDT MBH 2009). Diese Modelle werden nachfolgend vergleichend dargestellt und Unterschiede in Modellkonzeption und Modellaufbau aufgezeigt.

Im Bericht zum Gutachten „Grundwassermodell Bremen-Nord“ (MULL 1986) wird ein Einschichtmodell beschrieben, das im Bereich Bremen-Blumenthal den Grundwasserhaushalt untersucht. Das dort betrachtete Modellgebiet bildet mit ca. 20 km² einen kleinen Ausschnitt des hier bearbeiteten Modellgebiets. Eine geologische Struktur im Untergrund wird nur eingeschränkt berücksichtigt. Es werden zwar Bereiche mit unterschiedlichen Transmissivitäten unterschieden, ein Einbau von geologischen Strukturen übereinander ist in einem 1-Schichtmodell aber nicht möglich. Darüber hinaus werden Zuflüsse und Stromlinien als Randbedingungen im Bereich der Einzugsgebiete der Hauptgrundwasserentnahmebrunnen angenom-

men. Diese Annahmen sind von entscheidender Bedeutung (NEUB & DÖRHÖFER 2007), da der Wasserhaushalt des dort betrachteten Modellgebiets von den Zuflüssen abhängt und gesteuert wird. Bei der Bilanzierung und Bestimmung von Fließrichtungen des Grundwassers kommt es dadurch zu Unterschieden im Vergleich mit anderen Modellkonzepten (s. a. Abschn. 7.4).

Im Bericht „Hydrogeologisches Gutachten + Umweltverträglichkeitsprüfung zur Beantragung wasserrechtlicher Bewilligungen für das Wasserwerk der swb Netze GmbH & Co. KG Blumenthal in Bremen-Nord“ (GEOUM 2006) wird ein 4-Schichtmodell beschrieben, das ebenfalls einen Ausschnitt des in dieser Arbeit betrachteten Modellgebiets untersucht. Das bei GEOUM (2006) bearbeitete Modellgebiet ist mit ca. 87 km² deutlich größer als das bei MULL (1986). Es reicht in seiner Ausdehnung nach Norden und Osten nicht an das hier betrachtete Modellgebiet heran. Das 4-Schichtmodell berücksichtigt den strukturgeologischen Aufbau im Modellgebiet besser als ein 1-Schichtmodell (s. a. Abschn. 1.3). Eine Kopplung an ein 3D-Strukturmodell, wie es in dieser Arbeit gemacht wird, findet allerdings nicht statt. In Teilbereichen werden andere Arten von Modellgrenzen gesetzt als bei Mull (1986) oder in dieser Arbeit (s. a. Abschn. 3.1, Abschn. 5.2). Im Osten wird mit dem Verlauf der Schönebecker Aue ein flaches Oberflächengewässer gewählt und als Randbedingung 1. Art eingebaut. Es wird dort davon ausgegangen, dass die Schönebecker Aue über den berücksichtigten Verlauf an den Grundwasserleiter angebunden ist.

Im Bericht „Numerisches Grundwasserströmungsmodell für das Wasserwerk Siedbruch“ (INGENIEURGESELLSCHAFT DR. SCHMIDT MBH 2009) wird ein Strömungsmodell beschrieben, das in seiner Ausdehnung das hier vorgestellte Modell einschließt und im Norden darüber hinausgeht. Das betrachtete Modellgebiet ist ca. 400 km² groß und in 7 Schichten unterteilt. Oberflächengewässer im Modellgebiet werden wie bei MULL (1986) und GeoUm (2006) über den Einbau von In- und Exfiltrationsmengen in die Zellen der obersten Modellschicht berücksichtigt.

Allen Arbeiten gemeinsam ist, dass stationäre Ansätze gewählt werden, um ein Prognosewerkzeug für die Auswirkungen einer Veränderung in der Grundwasserbewirtschaftung zu erhalten. Die konkreten Erkenntnisse dieser Arbeiten sind Einzugsgebiete einzelner Grundwasserentnahmepunkte, die Auswirkungen verschiedener Entnahmemengen auf den Grundwasserdruckspiegel und bei den Arbeiten von MULL (1986) und GEOUM (2006) der Anteil von Uferfiltrat an der umgesetzten Grundwassermenge.

Abgesehen von der Modellgebietsgröße, der vertikalen Diskretisierung und der zu Grunde liegenden Fragestellung unterscheiden sich die Strömungsmodelle von dem in dieser Arbeit

vorgestellten Strömungsmodell auch durch die eingebauten Randbedingungen und den unterschiedlichen Einbau von Oberflächengewässern (s. a. Abschn. 5.2.4) im Modellgebiet (Tab. 4). Die Ergebnisse werden später diskutiert und mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen (s. Kap. 7).

Tab. 4: Übersicht und Vergleich von Strömungsmodellen für Bremen-Nord

Modell	MULL (1986)	GeoUm (2006)	5-Schichtmodell	SCHMIDT (2009)
Fragestellung	Prognose	Prognose, Wasserrecht	Übersicht	Prognose, Wasserrecht
Modellgebietsgröße [km ²]	20	87	181	400
Randbedingungen	Weser als 1. Art, sonst 1. und 2. Art	Weser und Schönebecker Aue 1. Art sonst 2. Art	Weser und Lesum 1. Art sonst 2. und 3. Art	Weser 1. Art, sonst 1., 2. und 3. Art
vertikale Unterteilung	1 Schicht	4 Schichten	5 Schichten gekoppelt an ein 3D-Strukturmodell	7 Schichten
Einbau Oberflächengewässer	Zellen	Zellen	Polylines	Zellen

4.1.2 Einfluss durch Tide auf den GW-Druckspiegelstand

Das Projekt GEOPLAN 1 des GDfB untersucht die Fragestellung, inwieweit ein tidebeeinflusster Vorfluter im Modellgebiet Einfluss auf den Grundwasserstand hat und welche Folgen das für eine Modellerstellung hat. In Zusammenarbeit mit der Universität Bremen wird hierzu eine Masterarbeit (HOFFMANN 2007) erstellt. Sie untersucht, ob sich aus der zeitlichen Verzögerung des Auftretens von Hochwässern in unterschiedlich weit von der Weser entfernten Messstellen Durchlässigkeitsbeiwerte des genutzten Grundwasserleiters ableiten lassen. Durch Anwendung zweier von FERRIS (1951, 1963) entwickelter Verfahren gelingt es, über die mit steigender Entfernung zum Vorfluter zunehmende Dämpfung von Extremwerten und die zeitliche Verzögerung ihres Auftretens in verschiedenen Messstellen Durchlässigkeitsbeiwerte für den Grundwasserleiter zu berechnen. Die ermittelten k_f -Werte (min = $1,4 \times 10^{-4}$ m/s, max = $1,3 \times 10^{-3}$ m/s) charakterisieren nach Schlimm (1996) einen feinsandigen Grundwasserleiter.

HOFFMANN zeigt, dass bis zu einer Entfernung von 150 m zur Weser die Tide einen signifikanten Einfluss auf den genutzten Grundwasserleiter hat und dass bis zu einer Entfernung

von 300 m ein Einfluss nachweisbar ist. Die Tide führt zu periodischen Schwankungen des Grundwasserdruckspiegels, die außerhalb des Einflussbereiches in der Form nicht auftreten.

Der Tideeinfluss verursacht Schwankungen im Grundwasserstand von mehr als einem Meter (s. HOFFMANN 2007). Es ist nicht möglich, den Tideeinfluss bei Einzelwertmessungen herauszurechnen. Messstellen, die im Modellgebiet liegen und deutlich tidebeeinflusste Messwerte liefern, werden daher in dieser Arbeit nicht zur Modellkalibrierung verwendet.

Des Weiteren untersucht HOFFMANN, inwieweit der Einbau von Spundwänden entlang der Weser einen hydraulischen Kontakt zwischen Hauptgrundwasserleiter und Vorfluter beeinträchtigt. Es gibt vereinzelte Bereiche (< 100 m), in denen Spundwände bis zu -26 mNN eingebaut sind. Die mittlere Einbautiefe liegt bei -6 mNN und die Sohle der Weser liegt im Mittel zwischen -10 mNN und -11 mNN (HOFFMANN 2007).

Die Abkopplung des Grundwasserkörpers vom Vorfluter Weser wird ausgeschlossen und im Bereich Bremen-Nord von einer durchgehenden hydraulischen Anbindung des genutzten Grundwasserleiters an die Weser ausgegangen. Vorhandene Spundwände dämpfen zwar die Ausbreitung von tideinduzierten Schwankungen des Grundwasserspiegels, haben aber keinen weiteren Einfluss auf die Strömungsmodellierung.

4.2 Gemessene Grundwasserstände für die Modellkalibrierung

Zwischen April 2005 und November 2007 werden in Bremen-Nord und angrenzenden Gebieten Stichtagsmessungen durchgeführt. In ausgewählten Messstellen werden jeweils zu Beginn und zum Ende der Wachstumsperiode Wasserstände gemessen, die als Grundlage für die Konstruktion von Grundwasserdruckspiegelgleichenplänen (im Weiteren: GW-Druckspiegelgleichenpläne) dienen und zur Kalibrierung des Strömungsmodells verwendet werden (s. Abschn. 4.2.2 und Abschn. 5.3). Die Recherche von Messstellen im Untersuchungsgebiet, die Messungen der Wasserstände vor Ort und die Auswahl von Messstellen, deren Messwerte bei der Modellkalibrierung berücksichtigt werden, stellen dabei sowohl vom Aufwand als auch vom Nutzen her einen zentralen Punkt dieser Arbeit dar.

4.2.1 Messungen der Daten

Das Ergebnis einer Aktenrecherche zeigt, dass 333 Brunnen und Messstellen ungleichmäßig im Untersuchungsgebiet verteilt als potenzielle Messpunkte zur Verfügung stehen. Auswertungen und Vor-Ort-Recherchen ergeben, dass von diesen 333 potentiellen Messpunkten bis

zu 266 (s. Tab. 5) verwendbar sind. Mehrere Messstellen sind entgegen der Aktenlage nicht aufzufinden. Des Weiteren fallen einige Datenlogger während der jeweiligen Stichtagsmessungen aus, so dass sie keine Werte liefern.

Tab. 5: Übersicht der durchgeführten Stichtagsmessungen

Begin	Ende	Jahr	Zusatz	Anzahl Messstel- len	Bemerkungen
01.04.	11.04.	2005	Frühjahr	236	
31.10.	09.11.	2005	Herbst	236	
27.03.	03.04.	2006	Frühjahr	251	
04.10.	11.10.	2006	Herbst	258	4 Messstellen später im Okt. 2006 gemessen
27.03.	02.04.	2007	Frühjahr	266	1 Messstelle später im Apr. 2007 gemessen
06.11.	09.11.	2007	Herbst	261	1 Messstelle später im Dez. 2007 gemessen

Die Brunnen und Messstellen gehören unterschiedlichen Eigentümern und werden teilweise auch von diesen betreut. Ungefähr die Hälfte der verwendbaren Messstellen wird durch den GDfB gemessen. Insgesamt gibt es sechs Stichtagsmessungen.

An den Tagen 01.04. bis 11.04.2005 und 31.10. bis 09.11.2005 werden jeweils 236 Messstellen und Brunnen durch die swb AG (123), den SUBVE (19), den Landkreis Osterholz (14) und den GDfB (80) gemessen. Es folgt die Auswertung der Messdaten, sowie die Aktualisierung und Anpassung des Messstellennetzes (Tab. 5). Für Auswertungen hinsichtlich Flurabstand und Grundwasserüberdeckung und die Einbindung in bestehende Projekte werden davon 43 Messstellen neu eingemessen. Die Höhenlage der Rohroberkante wird bestimmt, außerdem werden die archivierten Rechts- und Hochwerte überprüft und aktualisiert.

Im Frühjahr 2006 werden 251, im Herbst 2006 258 Messstellen in Bremen-Nord bearbeitet werden. Die Differenz zum Frühjahr kommt durch neue Daten nach einer ausgedehnten Recherche im Sommer 2006 sowie durch Neu- und Rückbau von Messstellen zustande. Zur weiteren Erfassung und Erkundung von Grundwassermessstellen erfolgt eine Auswertung der nachfolgenden Informationsquellen:

- Bohrchiv GDfB
- Bohr- und Ausbaudaten der unteren Wasserbehörden
- Bohr- und Ausbaudaten von diversen Bohrfirmen
- Bohr- und Ausbaudaten öffentlicher Wasserversorger

Im Anschluss an die Auswertung wird eine Vor-Ort-Erkundung durchgeführt und die neuen Messstellen in die Datenbank des GDfB eingepflegt. Im Frühjahr 2007 wird bei 266 Messstellen, im Herbst 2007 bei 261 Messstellen in Bremen-Nord eine Stichtagsmessung durchgeführt (Abb. 9, Tab. 5).

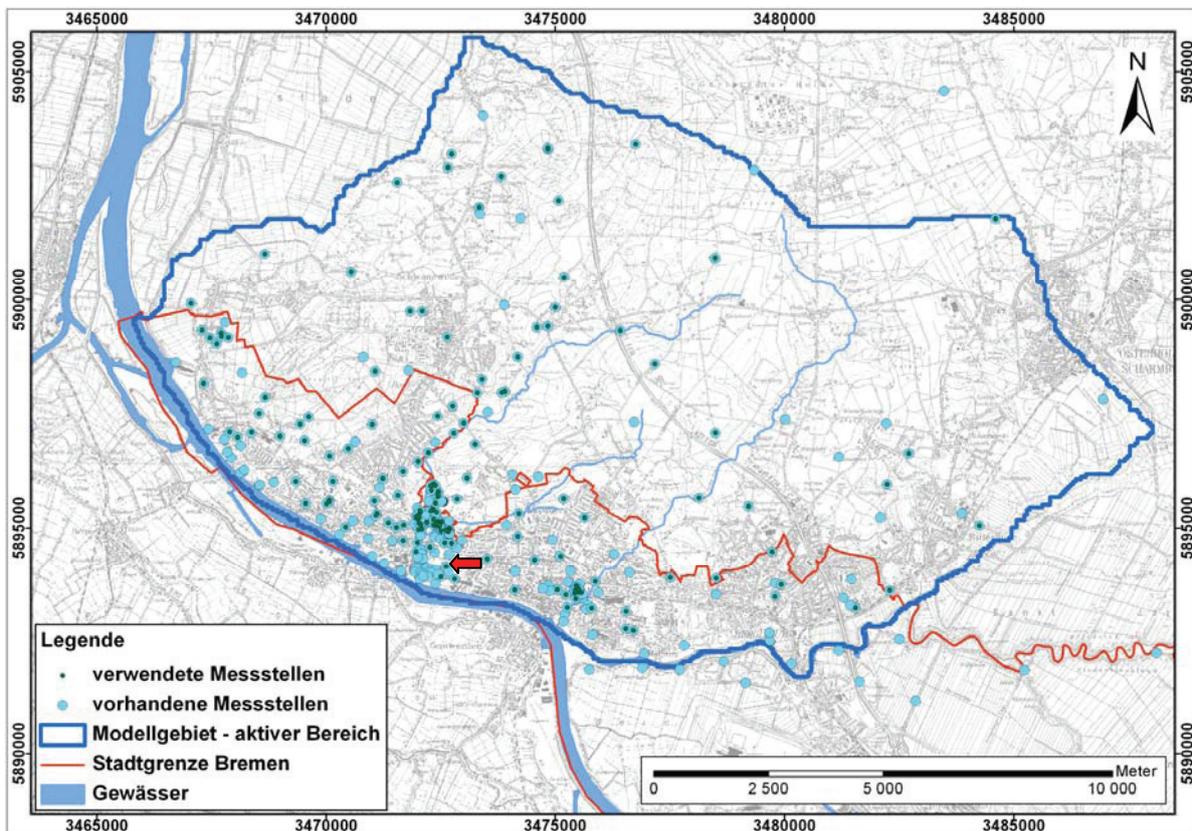


Abb. 9: Lage der 266 im Untersuchungsgebiet ermittelten und der davon im Modellgebiet verwendeten 163 Messstellen, die Markierung im Süden des Modellgebiets weist auf die Messstelle GMS 118 hin

Die gemessenen Daten werden auf ihre Aussagekraft hin bewertet. Extreme Messwert-schwankungen (> 1 m) zu Messungen anderer Stichtagsmessungen geben dabei ebenso Hinweise auf die Güte eines Messwertes, wie der Abgleich mit Messwerten von Messstellen in der unmittelbaren Umgebung.

Entsprechend der Lage ihrer Verfilterung in Bezug zur hydrostratigrafischen Einheit (s. Abschn. 2.5) werden die Messstellen klassifiziert. Die Klassifikation basiert dabei auf Schichtenverzeichnissen (für ein Beispiel s. Anhang J), in denen die Petrografie und Genese der einzelnen Schichten einer Bohrung angegeben sind. Fehlen Informationen zu Schichten, in denen eine Messstelle verfiltert ist, werden Bohrungen in der unmittelbaren Umgebung ausgewertet. Die Bewertung wird zu jeder Lokation gespeichert und ermöglicht so eine Filterung von Lokationswerten gleicher Klasse. Über eine Datenbankabfrage ist es möglich, sämtliche Messstellen im Modellgebiet, die in der gleichen hydrostratigrafischen Einheit verfiltert sind, auszuwählen.

4.2.2 Anwendung der Daten

Während der sechs Stichtagsmessungen wird der Grundwasserstand in hydrostratigrafisch klassifizierten Messstellen gemessen. Ein erstes Ergebnis davon ist die Auswahl der für das Messnetz relevanten Messstellen (Abb. 9, Abb. 10, Anhänge B, I).

Weitere Ergebnisse sind GW-Druckspiegelgleichenpläne. Dafür werden die Messwerte von im genutzten Grundwasserleiter verfilterten Messstellen einer Stichtagsmessung separiert und als Grundlage für die Konstruktion verwendet. Es erfolgt eine Konstruktion von GW-Druckspiegelgleichenplänen für jede durchgeführte Stichtagsmessung, ebenso wie für einen angenommenen Grundwasserhöchst- und -niedrigstand im Projektzeitraum.

Die Karte mit der Lage der Messstellen und der Darstellung von Schwankungen im Grundwasserstand zwischen Frühjahr 2005 und Herbst 2007 (Abb. 10) zeigt, welche Auswirkungen die Messwerte einzelner Messstellen im Messprogramm haben. Messstellen, die in Bereichen liegen, in denen nur wenige Messstellen zur Verfügung stehen, haben einen größeren Einfluss auf konstruierte GW-Druckspiegelgleichenpläne und Modellergebnisse, als solche in Bereichen mit einer hohen Messstellendichte. Als Beispiel dienen zwei Messstellen im Nordwesten und Nordosten des Modellgebiets, die von wenigen anderen Messstellen umgeben sind, während der Stichtagsmessungen zwischen 0,77 m und 1,15 m vom ermittelten Mittelwert abweichen und einen starken Einfluss auf weitere Auswertungen haben. Messstellen, die bei einzelnen Stichtagsmessungen noch stärker vom ermittelten Mittelwert abweichen,

liegen im südlichen Zentrum des Modellgebiets (s. Markierungen in Abb. 10). Sie haben aber einen weniger starken Einfluss auf einen konstruierten GW-Druckspiegelgleichplan, da sie auf geringer Fläche von vielen Messstellen umgeben sind.

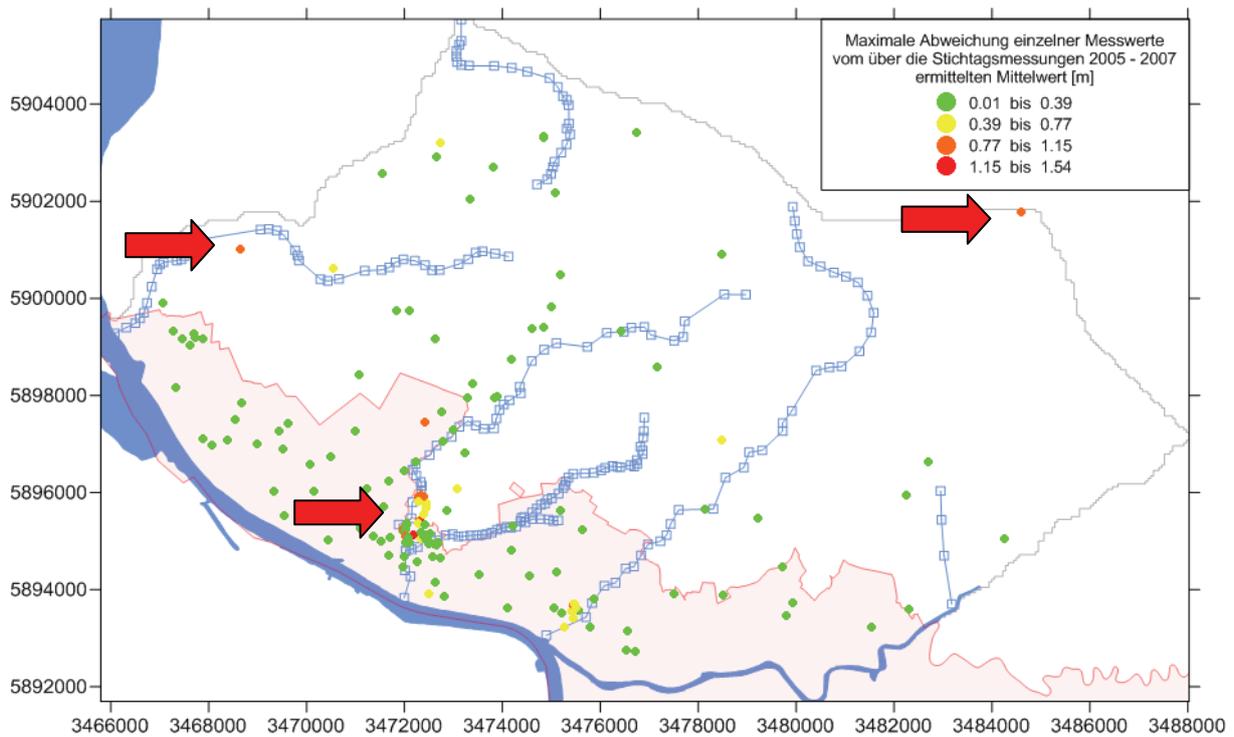


Abb. 10: Schwankung der gemessenen Wasserstände 2005 bis 2007, die Markierungen im Nordwesten und Nordosten weisen auf Messstellen hin, die von wenigen anderen Messstellen umgeben sind und deren Messwerte während der Kampagne über 1 m schwanken, die Markierung im Süden weist auf Messstellen hin, deren Messwerte ebenfalls stark schwanken, die aber von vielen anderen Messstellen umgeben sind

Welche Auswirkungen die Schwankungen von Niederschlägen und Verdunstung direkt oder verzögert auf die Messwerte einer Messstelle haben, zeigt Abb. 11. Dort ist die Zeitreihe der Messstelle GMS 118 (die Messstelle liegt im Süden des Modellgebiets, 750 m nordöstlich der Mündung der Blumenthaler Aue in die Weser, s. a. Abb. 9) von 1994 bis 2007 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte von -0,4 mNN bis 0,3 mNN und somit insgesamt um 0,7 m schwanken. Die Schwankungen im Zeitraum der Stichtagsmessungen betragen insgesamt weniger als 0,4 m.

In Abb. 11 ist der Stichtag im Herbst 2007 markiert. Zu diesem Zeitpunkt ist der Grundwasserstand seit knapp drei Monaten um ca. 0,15 m gesunken. Erst im Anschluss an diese Stichtagsmessung steigt der Grundwasserstand wieder an. Ein Vergleich mit Abschn. 4.4 zeigt, dass sich die seit Sommer 2007 durchweg ansteigende klimatische Wasserbilanz nicht sofort auf den Grundwasserkörper auswirkt.

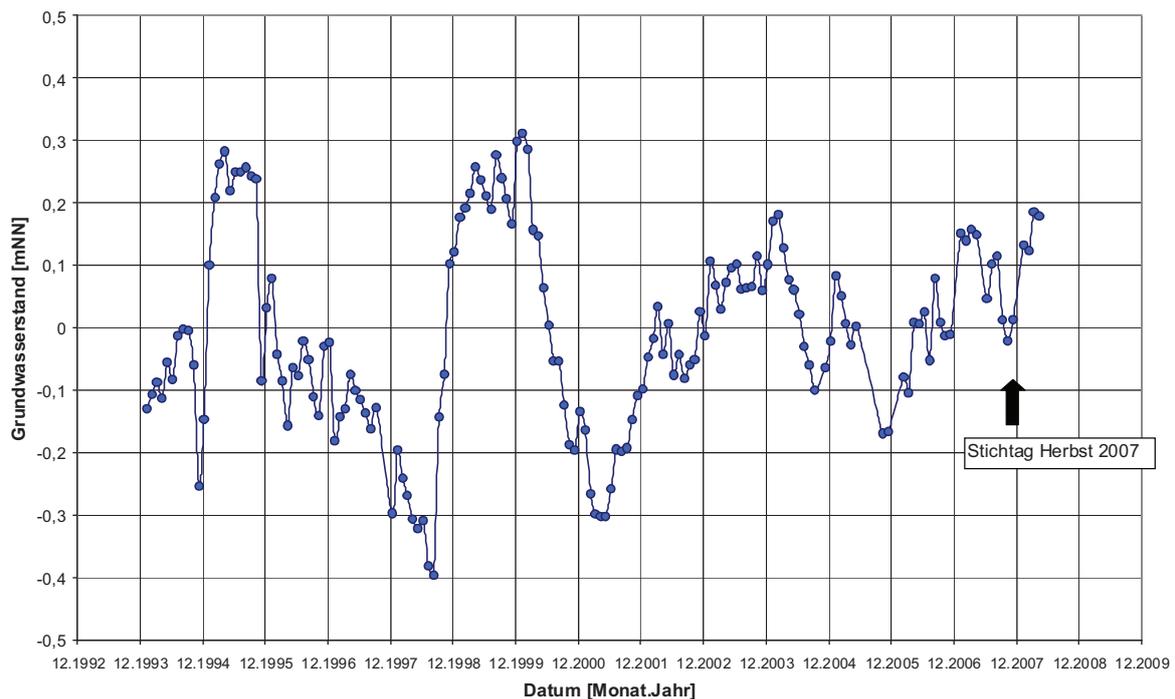


Abb. 11: Ganglinie der gemessenen Wasserstände bei GMS 118 von 1994 bis 2007

Das Strömungsmodell soll einen langjährigen mittleren Zustand des Grundwasserkörpers beschreiben (ein stationäres Modell ist deswegen ausreichend (s. a. BENDER 2003)). Die Auswahl der Messstellen zur Modellkalibrierung muss das berücksichtigen und der Datensatz einer Stichtagsmessung demnach möglichst mittlere Wasserstände liefern. Werden in einer Messstelle innerhalb eines Jahres mehr als 1 m voneinander abweichende Grundwasserstände gemessen, so werden die Ergebnisse einer eingehenden Prüfung unterzogen und, wenn möglich, mit Ergebnissen alter Messkampagnen aus den 1980er Jahren verglichen. Stellt sich heraus, dass die Schwankungen über ein mittleres Maß hinausgehen, werden die Ergebnisse nicht verwendet, da dann nicht mehr von mittleren Zuständen des genutzten Hauptgrundwasserleiters ausgegangen werden kann.

Die Messwerte der Stichtagsmessung im Herbst 2007 zeigen insgesamt keine großen Abweichungen von Mittelwerten, die über den Untersuchungszeitraum von den Messwerten aller Stichtagsmessungen gebildet werden. Die Ergebnisse der anderen Stichtagsmessungen weichen teilweise stärker von den gebildeten Mittelwerten ab. Ein weiterer Grund die Messwerte der Stichtagsmessung 2007 zur Modellkalibrierung zu verwenden ist, dass für die Stichtagsmessung im Herbst 2007 die meisten Messwerte zur Verfügung stehen (s. a. Anh. I).

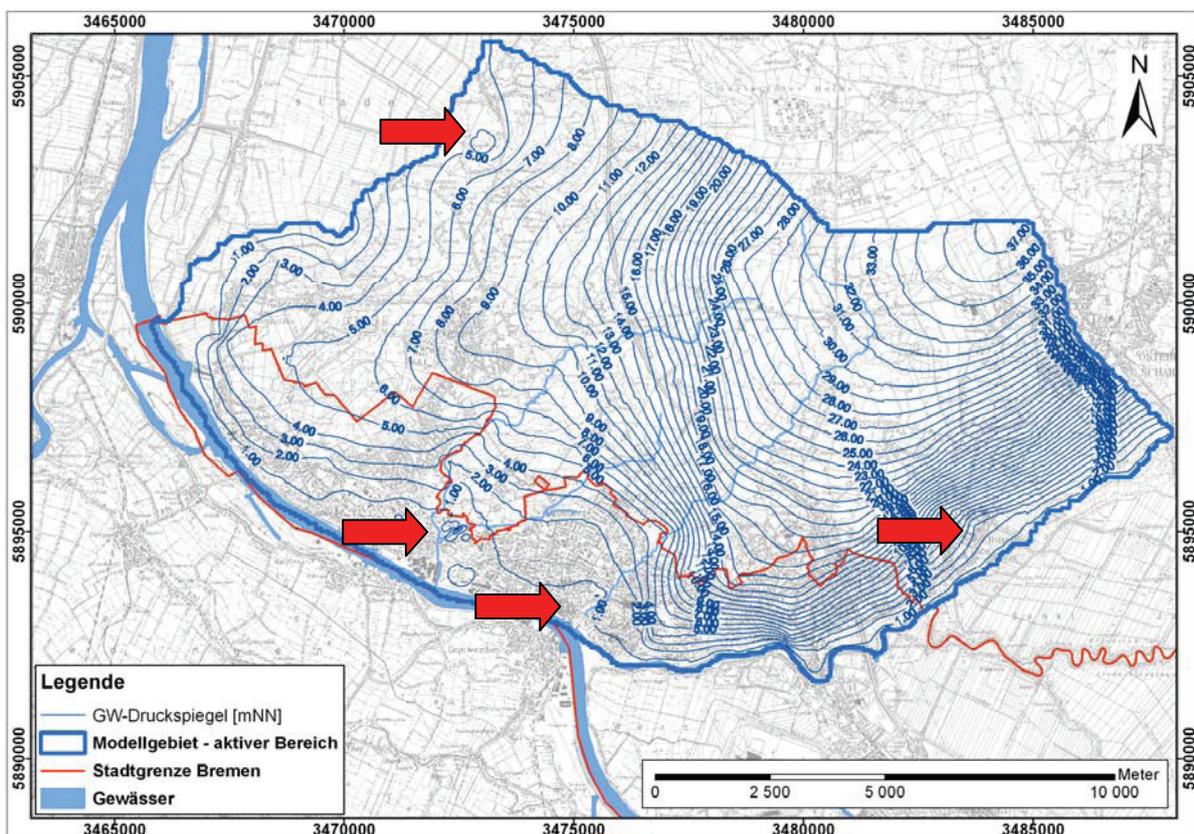


Abb. 12: Konstruierter GW-Druckspiegelgleichenplan auf Grundlage der Stichtagsmessung im Herbst 2007, die Markierungen weisen auf die Auswirkungen von Grundwasserentnahmen auf den Grundwasserdruckspiegel hin, im Norden durch das Wasserwerk (WW) Siedbruch, im Südwesten durch das WW Blumenthal, im Süden durch das WW Vegesack und im Südosten durch das WW Ritterhude

Der für den Stichtag im Herbst 2007 konstruierte GW-Druckspiegelgleichenplan (Abb. 12) wird als ein Eingangsdatensatz bei der Modellierung verwendet und weist jeder Zelle einen

Ausgangsgrundwasserstand h [m] zu (s. Gleichung 4). Entscheidend sind dabei die einzelnen Messwerte, sie werden für die Modellkalibrierung verwendet (s. Abschn. 5.3).

Insgesamt werden die Messwerte von 163 Messstellen genutzt, da Untersuchungen ergeben, dass von den 261 gemessenen Messstellen nicht alle im genutzten Grundwasserleiter verfiltert sind, Messstellen außerhalb des später festgelegten Modellgebiets liegen (s. Abschn. 3.1) oder Werte tidebeeinflusst sind (s. Abschn. 4.1.2).

Abb. 12 zeigt den für den Stichtag im Herbst 2007 konstruierten GW-Druckspiegelgleichplan. Die Isolinien markieren GW-Druckspiegelstände gleichen Niveaus. In die Konstruktion gehen die gemessenen GW-Druckspiegelstände aus dem Herbst 2007, die gemessenen Wasserstände der Hauptvorfluter Weser und Lesum, gemittelte Wasserstände für die Drainage im Westen und Wasserstände der Oberflächengewässer ein. Die Wasserstände der Oberflächengewässer werden nur dort berücksichtigt, wo von einer Anbindung derselben an den Hauptgrundwasserleiter ausgegangen wird. Bereiche, in denen die Basis der Oberflächengewässer deutlich über dem ermittelten Druckspiegel des Hauptgrundwasserleiters liegt, werden ebenso ausgespart wie Bereiche, in denen von artesischen Verhältnissen ausgegangen wird (s. a. Abb. 13).

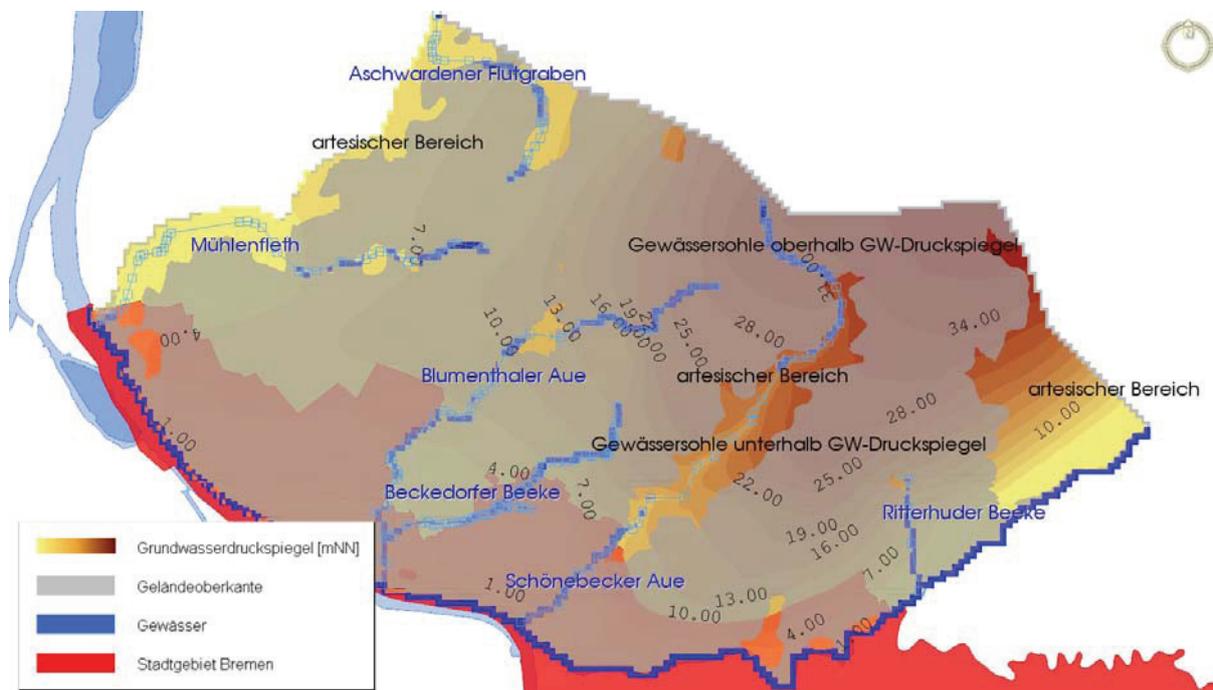


Abb. 13: Skizze des Modellaufbaus mit Bereichen artesisch gespannten Grundwassers und Höhenlagen der Oberflächengewässersohlen in Bezug zum Grundwasserdruckspiegel

Gut zu sehen sind in Abb. 12 die Absenkungsbereiche der Wasserwerke Siedbruch im Westen, Blumenthal und Vegesack im Süden und Ritterhude im Osten (s. Markierungen in Abb. 12). Weiterhin sind die Einflüsse der Oberflächengewässer im Unterlauf der Blumenthaler Aue und im Unterlauf der Schönebecker Aue zu erkennen. Auffällig ist der Verlauf der GW-Druckspiegelgleichen im Westen des Gebiets. Dieser erklärt sich durch eine morphologische Erhebung (s. a. Abb. 5 – Rekumer Mühle) und dort getätigte Grundwasser-entnahmen.

Bringt man einen vorkonstruierten GW-Druckspiegelgleichenplan mit der Geländeoberfläche (Abschn. 4.3.1) in Beziehung, erhält man einen Flurabstandsplan der GW-Druckspiegelhöhe (Abb. 13). Der Flurabstandsplan des Grundwasserdruckspiegels gibt Hinweise auf Bereiche mit artesisch gespanntem Grundwasser im Modellgebiet. In Abb. 13 sind dies die Bereiche, in denen der Grundwasserdruckspiegel die Geländeoberkante überdeckt (die graue Einfärbung ist dort ausgespart). Zusätzlich zu den beschrifteten Bereichen sind das Bereiche im Norden und Westen des Modellgebiets.

Weiterhin ist in Abb. 13 zu erkennen, dass die Oberflächengewässer teilweise in den genutzten Grundwasserleiter einschneiden. Dort, wo die Oberflächengewässer durch ein kräftiges Blau dargestellt sind, liegt die Gewässersohle oberhalb der GW-Druckspiegeloberfläche und kann den Grundwasserleiter nicht entwässern. Ist der Gewässerverlauf nur durch Linien angedeutet, liegt die Gewässersohle unterhalb der GW-Druckspiegeloberfläche und das Oberflächengewässer entwässert den Grundwasserleiter als Vorfluter. Liegt ein Oberflächengewässer in artesischen Bereichen, kann nicht von einer Kopplung an den Grundwasserleiter ausgegangen werden, auch wenn das Gewässer unterhalb der GW-Druckspiegeloberfläche liegt. In diesen Bereichen werden die Gewässer durch manuelle Zuweisung schlechter Durchlässigkeitsbeiwerte (bis zu 2×10^{-9} m/s) vom genutzten Grundwasserleiter faktisch abgekoppelt (s. a. Abschn. 5.3).

Darüber hinaus geben Abb. 12 und Abb. 13 einen Eindruck über die grundsätzliche Fließrichtung des Grundwassers von Nordosten in Richtung Lesum und Weser, sowie über das Gefälle der GW-Druckspiegeloberfläche (zur Belastbarkeit der Aussagen s. a. Abschn. 7.1).

4.3 Eingangsdaten für die Strömungsmodellierung

Neben den strukturgeologischen Daten, die in Abschn. 2.4 beschrieben sind, sowie den in Abschn. 4.2 erläuterten Messwerten und den daraus resultierenden Ergebnissen, gibt es weitere Daten, die für die Modellerstellung wichtig sind. Es handelt sich um die Geländeoberfläche und Grundwasserentnahmemengen, sie werden in den folgenden Abschnitten gezeigt.

Weitere Eingangsdaten, wie die Modellbasis und der Einfluss von Oberflächengewässern im Modellgebiet, werden in Abschn. 5.2 erläutert, da sie während der Modellkonzeption aus vorhandenen Daten (u. a. aus dem 3D-Strukturmodell) abgeleitet werden. Zusätzlich stehen die Lage der Landesgrenze Bremens und der Verlauf von Oberflächengewässern als digitale Daten zur Verfügung. Sie stellen eine Orientierungshilfe beim Aufbau des Strömungsmodells dar. Insgesamt gehen folgende Eingangsdaten in die Strömungsmodellierung ein:

- Grundwasserneubildung (Abschn. 2.3)
- gemessene Grundwasserstände (Abschn. 4.2)
- physikalische Struktur und Ausdehnung des Modells (Abschn. 4.3.1, Abschn. 5.2.1)
- Grundwasserentnahmemengen (Abschn. 4.3.2)

4.3.1 Geländeoberfläche

Für die Modellierung steht ein digitales Geländemodell (DGM (Abb. 14)) zur Verfügung.

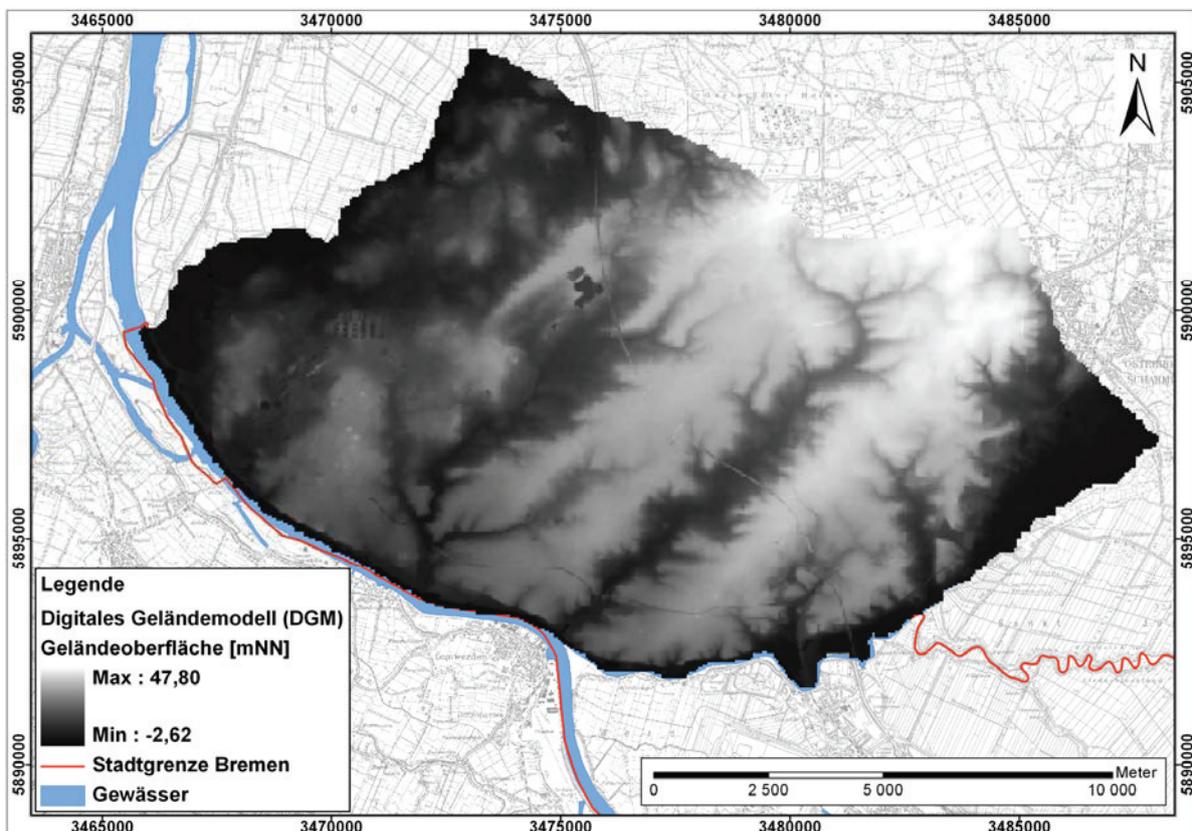


Abb. 14: Geländeoberfläche im Modellgebiet aus DGM

Ein DGM basiert auf einer Reihe von Informationen. Die Auswertungen von Luftbildern fließen genauso wie terrestrische Höhenmessungen ein. Außerdem werden digitalisierte Höheninformationen der Deutschen Grundkarte 1:5000 (DGK 5) berücksichtigt und geomorphologisch markante Strukturen wie Geländekanten, Mulden- und Kammlinien als wesentliche Grundlagendaten mit einbezogen. Die Originaldatensätze haben auf bremischem Gebiet eine horizontale Auflösung von 10 m (GEOINFORMATION BREMEN 2005) und auf niedersächsischem Gebiet eine Auflösung von 12,5 m (LGN 2005). Es wird ein Höhenfehler von +/- 0,5 m angegeben. Dieser hat keine Auswirkungen auf die Angabe von Grundwasserständen, da sie in Bezug zur Messstelle gemessen werden und deren Höhenermittlung ohne Verwendung des DGM stattgefunden hat. Bei einer Beurteilung der ermittelten artesischen Verhältnisse (s. Abb. 13) muss der angegebene Höhenfehler allerdings berücksichtigt werden. Das DGM (Abb. 14) geht als Modelloberkante direkt in die Modellierungen ein.

4.3.2 Grundwasserentnahmebrunnen und -mengen

Im Modellgebiet verteilt gibt es eine Reihe Grundwasserentnahmebrunnen (Abb. 15), die dem genutzten Grundwasserleiter Wasser entnehmen. Diese Informationen müssen bei der Strömungsmodellierung genauso berücksichtigt werden, wie Wasserzu- und -abflüsse durch z. B. Grundwasserneubildung, Zu- und Abflüsse durch Oberflächengewässer oder Randzu- und -abflüsse (s. Abschn. 2.1).

Für das Modellgebiet werden 56 Entnahmebrunnen (Abb. 15) ermittelt. Es stehen Lagekoordinaten, Ausbaudaten und die tatsächlichen Entnahmemengen für die Jahre 2005, 2006 und 2007 zur Verfügung.

Da die Messwerte der Stichtagsmessung im Herbst 2007 für die Modellkalibrierung verwendet werden (s. Abschn. 4.2.2), beschreibt das Strömungsmodell nach erfolgreicher Kalibrierung einen mittleren Zustand des genutzten Grundwasserleiters unter Einfluss der Grundwasserentnahmemengen im Jahr 2007. Die tatsächlichen Entnahmemengen 2007 gehen in die Modellierung ein. Es muss dabei von einer über das ganze Jahr gleichmäßigen Grundwasserförderung ausgegangen werden, da der überwiegende Teil derer, die Grundwasser entnehmen, nur Angaben zu Gesamtjahresmengen zur Verfügung stellen (Anhang A).

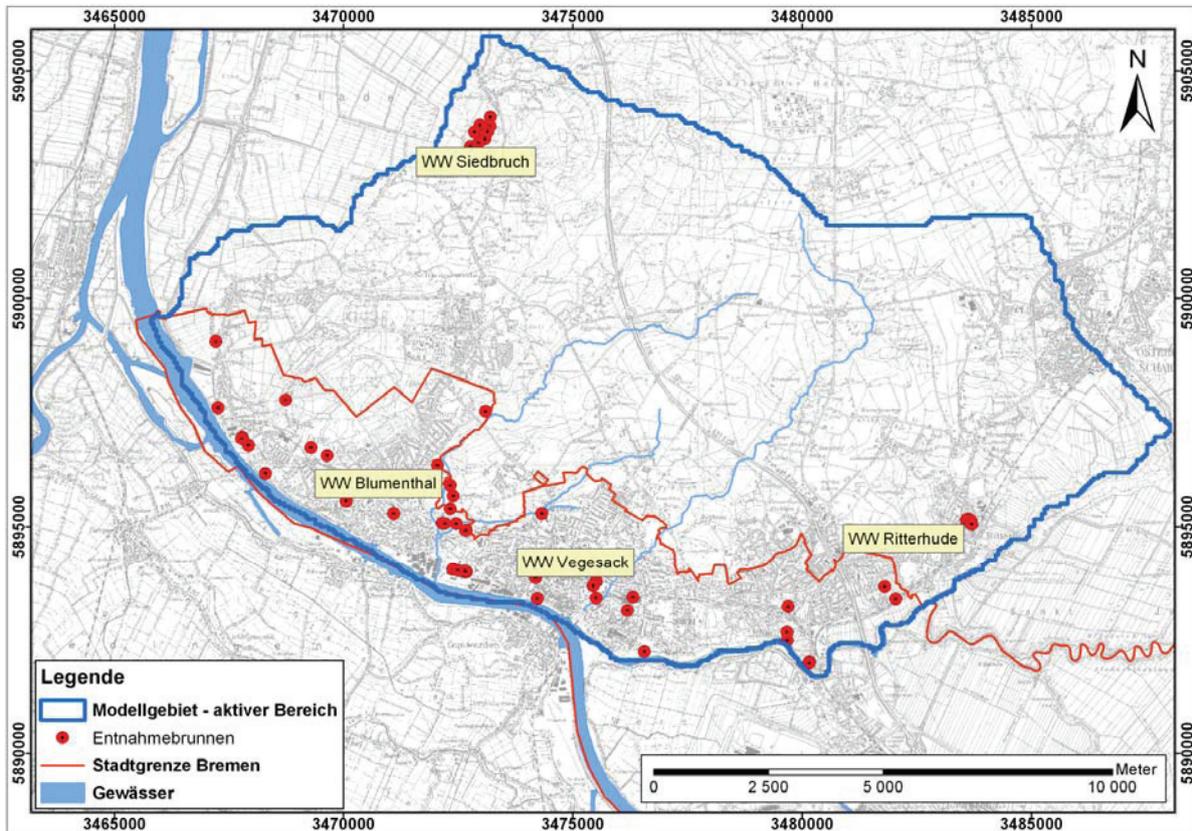


Abb. 15: Lage der im Strömungsmodell integrierten Grundwasserentnahmebrunnen

4.4 Wetter und Klima im Untersuchungszeitraum

Die Strömungsmodelle in dieser Arbeit sollen mittlere Zustände des genutzten Grundwasserleiters beschreiben. Vor diesem Hintergrund wird dargestellt, zu welchen Jahreszeiten die Stichtagsmessungen stattfinden und was für klimatische Bedingungen zu diesen Zeiten herrschen.

Es werden Stichtagsmessungen zum Ende und Anfang der Grundwasserneubildungsphase im März/April bzw. Oktober/November durchgeführt. Der Untersuchungszeitraum erstreckt sich von Frühjahr 2005 bis Herbst 2007.

Die klimatische Wasserbilanz ist die Differenz zwischen Niederschlagshöhe und der nach HAUDE (1955) berechneten Verdunstung, die hier über einem kurzrasigen Grasbestand bei ausreichender Wasserversorgung ermittelt wird (DWD 2009). Ist die klimatische Wasserbilanz positiv, so ist der gemessene Niederschlag größer als die Verdunstung. Ist sie negativ, so ist die Verdunstung größer als der Niederschlag.

In Abb. 16 sind klimatische Wasserbilanzen für verschiedene Zeiträume in Bremen als Summenkurven dargestellt. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die Klimatische Wasserbilanz im hydrologischen Winterhalbjahr (01. November – 01. Mai) überwiegend positiv und im hydrologischen Sommerhalbjahr schwankend bzw. im langjährigen Mittel negativ ist.

Dargestellt sind gemittelte Summenwerte für die Jahre 1961 bis 2004 und Summenkurven für die Jahre 2005 bis 2008. Die dunkle durchgehende Linie in Abb. 16 kennzeichnet die Werte des hydrologischen Jahres 2007 vom 01. November 2006 bis zum 31. Oktober 2007 und damit des Zeitraums eines Jahres direkt vor Durchführung der Stichtagsmessung im Herbst 2007. Es ist zu erkennen, dass 2007 im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 1961 bis 2004 ein etwas feuchteres Jahr ist. 2006 ist deutlich trockener und 2005 entspricht im Wesentlichen dem langjährigen Mittel.

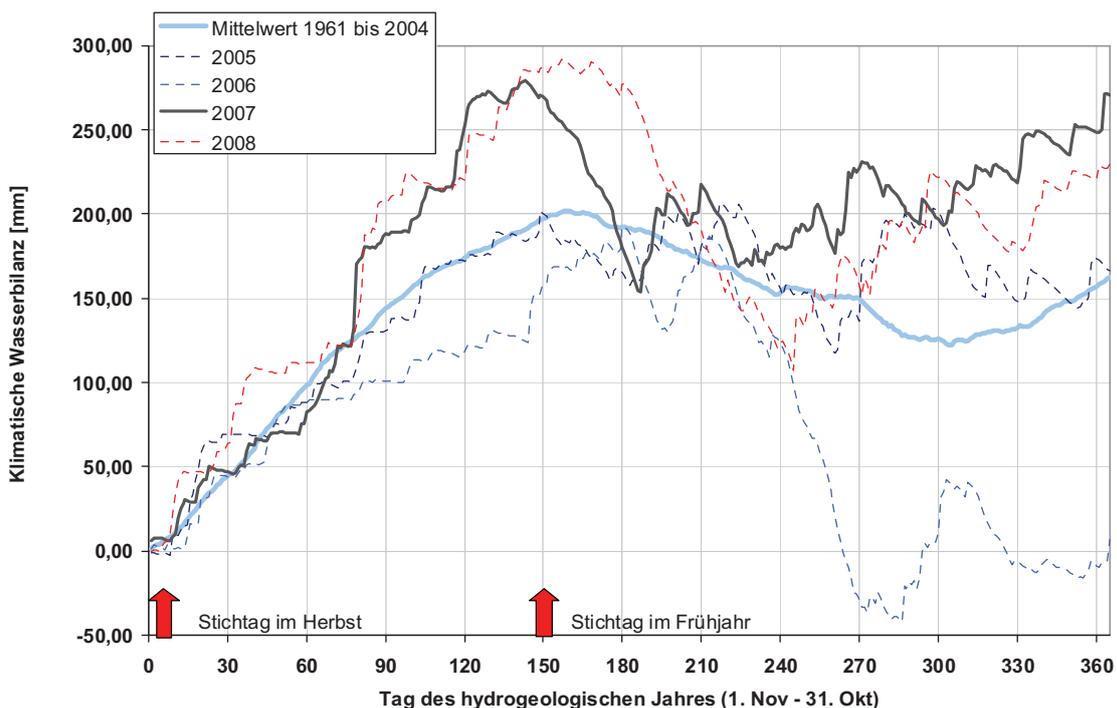


Abb. 16: Klimatische Wasserbilanzen für den Bereich Bremen als Summenkurven, dargestellt sind ein Mittelwert für die Jahre 1961 - 2004 und Einzelwerte für die Jahre 2005 - 2008 (DWD 2009)

5 Modellerstellung

Die Modellierung wird in mehreren Abschnitten durchgeführt. Zunächst wird ein 1-Schichtmodell erstellt, um darauf aufbauend ein 5-Schichtmodell zu erarbeiten, das den strukturellen Aufbau des Untersuchungsgebiets berücksichtigt und mit dem vorhandenen 3D-Strukturmodell (s. Abschn. 2.4) gekoppelt wird. Dies ist ein Unterschied zu vorangegangenen Arbeiten (MULL 1986, GEOUM 2006), die dieses Gebiet untersuchen. Bei MULL wird ausschließlich mit einem 1-Schichtmodell gearbeitet und GEOUM arbeitet mit einem 4-Schichtmodell, verzichtet aber auf die Kopplung mit einem 3D-Strukturmodell (s. Abschn. 4.1.1).

Das 1-Schichtmodell in dieser Arbeit wird auch zur Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten genutzt (s. Abschn. 5.3), da im 3D-Strukturmodell ausschließlich der generelle Schichtaufbau im Modellgebiet ermittelt wird. In Abschnitt 5.5 wird abschließend der Einbau von Messstellen und Grundwasserentnahmebrunnen im 5-Schichtmodell erläutert.

5.1 Konzept

Die Herangehensweise der Modellkopplung verfolgt das Ziel, die räumliche Ausdehnung von grundwasserhemmenden Schichten im Strömungsmodell bestmöglich zu berücksichtigen. Das hat unter anderem den Vorteil, dass auch räumlich isolierte und vom genutzten Grundwasserleiter getrennte Grundwasserleiter darstellbar sind (s. a. Abschn. 7.3). FOGG (1986) weist darauf hin, wie wichtig es ist, gerade in sedimentären Grundwasserleitern die Heterogenität einzelner Schichten zu berücksichtigen.

Das Strömungsmodell wird durch entsprechende Rasterzellen diskretisiert. Für das Modell wird zunächst eine Zellgröße von 125 m x 125 m gewählt. Das Modell hat eine Ausdehnung von 23,375 km von West nach Ost und 14,75 km von Nord nach Süd (aktive und inaktive Zellen) und ist somit zunächst durch 187 x 118 Zellen aufgebaut. Im Zuge der Modellierung wird das Modell in verschiedenen Bereichen verfeinert und der im Strukturmodell ermittelte geologische Aufbau eingebaut (s. Abschn. 5.4). Die abschließende Modellvariante arbeitet mit 5 Schichten und verwendet 261 x 211 Zellen (Abb. 17). Es ergeben sich somit 275.355 Knotenpunkte. Für jeden aktiven Knotenpunkt wird nach der Eingabe von Randbedingungen und Eingangsdaten (s. Abschn. 2.3, Kap. 4 und Abschn. 5.2) eine Wasserbilanz und ein Grundwasserstand entsprechend Abschnitt 2.1 berechnet.

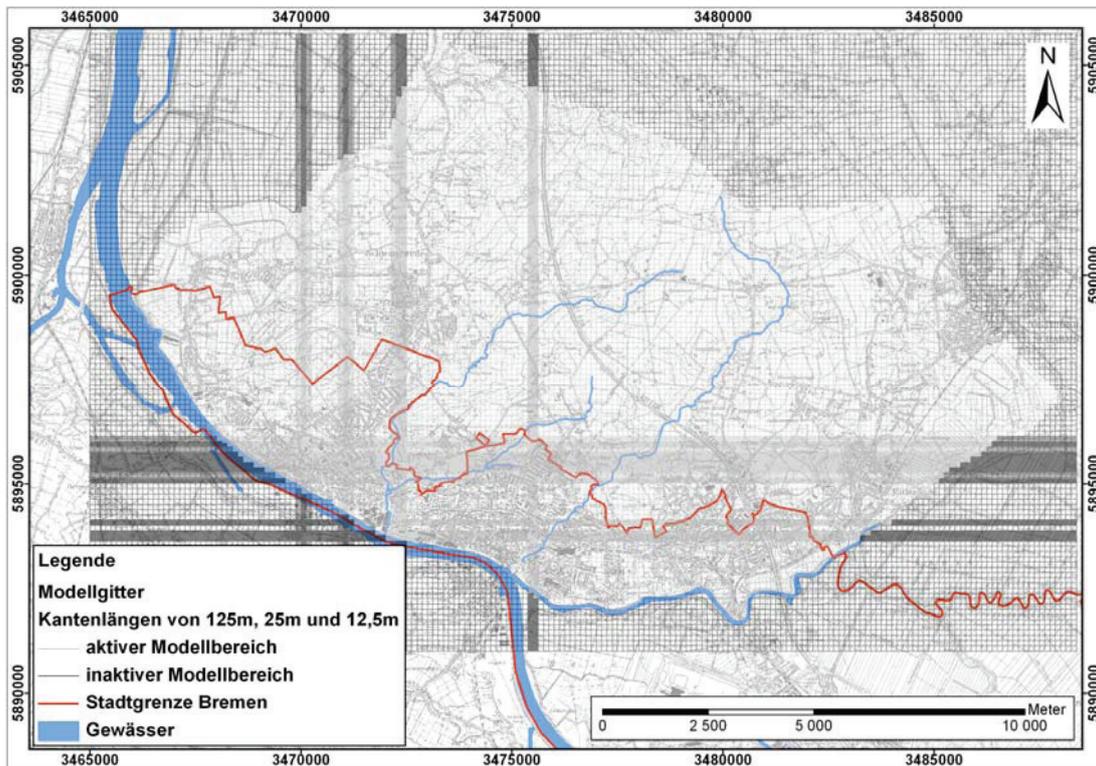


Abb. 17: Modellgitter, die dunklen Streifen kennzeichnen Verfeinerungen im Gitter

5.2 Aufbau des Strömungsmodells

Nachdem die Modellausdehnung festgelegt ist, werden die genauen Modellgrenzen über aktive und inaktive Zellen definiert. Die Grenze zwischen aktivem und inaktivem Bereich bildet im Westen die Weser, im Süden und Südosten die Lesum und im Norden und Nordosten Wasserscheiden der GW-Druckspiegeloberfläche des genutzten Grundwasserleiters.

Von den horizontalen Grenzflächen werden zunächst die Modellober- und -unterkante eingegeben. Damit ist der strukturelle Aufbau des 1-Schichtmodells abgeschlossen. Als nächstes werden die Randbedingungen 1., 2. und 3. Art, die den Zu- und Abfluss des Modells steuern eingefügt (s. Abschn. 2.1 und Abschn. 5.2.2 bis 5.2.4).

Innerhalb des Modells werden Grundwasserquellen und Senken eingesetzt. Eine Quelle ist die Grundwasserneubildung (s. Abschn. 2.3). Sie wird flächendeckend jeder aktiven Modellzelle zugewiesen und beschreibt einen konstanten Zufluss. Die Entnahmehäuser (s. Abschn. 4.3.2) sind Grundwassersinken und markieren einen konstanten Grundwasserabfluss aus einer Modellzelle. Sie werden entsprechend ihrer geografischen Lage in die entsprechenden Zellen eingebaut. In Bereichen, in denen viele Messstellen in unmittelbarer

Nähe zu Entnahmehbrunnen liegen, ist eine Verfeinerung des Modells sinnvoll, um zu verhindern, dass Messstellen und Entnahmehbrunnen in gleichen Zellen aktiv sind. In den Bereichen der Wasserwerke Blumenthal und Vegesack (s. a. Abb. 15), wo große Mengen Grundwasser entnommen werden und eine hohe Messstellendichte in unmittelbarer Nähe zu den Entnahmehbrunnen vorhanden ist, wird das Modell verfeinert. In diesen Bereichen werden die Zellen auf eine Kantenlänge von 25 m bzw. 12,5 m verkleinert.

Zur Kalibrierung werden die verwendeten Grundwassermessstellen in das Modells eingebaut. Es werden Name und gemessener Grundwasserstand angegeben, so dass eine Zuordnung und ein Vergleich mit berechneten Werten möglich sind. Abschließend werden dem Modell noch ein Ausgangsgrundwasserstand und Eigenschaftswerte für den Schichtkörper zugewiesen. Es wird von gespannt – ungespannten Verhältnissen und einer variierenden Transmissivität aufgrund wechselnder Grundwassermächtigkeiten ausgegangen.

5.2.1 Horizontale Grenzflächen

Die Mächtigkeit des Modells wird durch die Modellober- und -basisfläche festgelegt.

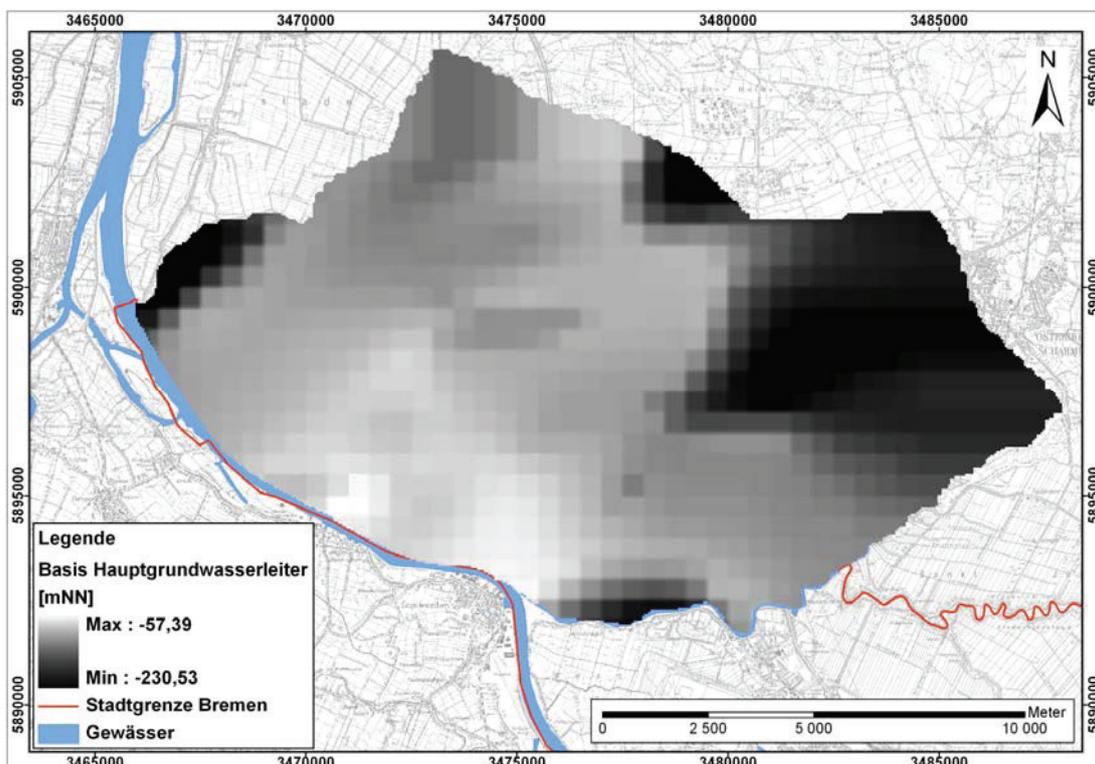


Abb. 18: Basis des genutzten Grundwasserleiters aus dem 3D-Strukturmodell

Die Topfläche des Modells wird durch das DGM (s. Abb. 14) bestimmt, die Basisfläche durch die im 3D-Strukturmodell (s. Abschn. 2.4) ermittelte Lage der Basis des genutzten Grundwasserleiters (Abb. 18). Weitere horizontale Grenzflächen ergeben sich ebenfalls aus dem 3D-Strukturmodell. Diese gehen nach Abschluss der Kalibrierung des 1-Schichtmodells in die Modellierung ein (s. Abschn. 5.4).

5.2.2 Randbedingungen 1. Art – vorgeschriebener Wasserstand

Das aktive Modellgebiet wird durch Zellen mit unterschiedlichen Randbedingungen begrenzt. Im Süden und Südosten wird das Gebiet durch die Flüsse Lesum und Weser begrenzt. Diese gehen mit mittleren Wasserständen als Festpotentialränder (Randbedingung 1. Art (DIRICHLET-Bedingung) mit zeitlich unabhängigen Standrohrspiegelhöhen (KINZELBACH & RAUSCH 1995)) in das Modell ein.

Für die Weserpegel Farge und Vegesack und den Lesumpegel Wasserhorst werden für die Zeiträume der Stichtagsmessungen Messwerte abgefragt. In den Monaten der Stichtagsmessungen liegen Messwerte im Minutenintervall vor, die mittleren Wasserstände sind am Ende von Anhang I gelistet. Die Daten für den Zeitraum des Stichtages im Herbst 2007 werden über den Verlauf von Lesum und Weser im Modellgebiet interpoliert und gehen dort als feste Grundwasserstände in die Modellierung ein (s. a. Abschn. 2.1).

5.2.3 Randbedingungen 2. Art – vorgeschriebener Zu- oder Abfluss

Im Norden und Nordosten wird das Gebiet durch Grenzstromlinien begrenzt. Es handelt sich dabei um Randbedingungen der 2. Art (NEUMANN-Bedingung), die hier für den Spezialfall ohne Zu- oder Abfluss an den Modellrändern eingesetzt werden (s. Abb. 19).

5.2.4 Randbedingungen 3. Art – Kombination 1. und 2. Art

Die Oberflächengewässer Aschwardener Flutgraben, Mühlenfleth, Blumenthaler Aue, Beckedorfer Beeke, Kifkenbruch, Schönebecker Aue und Ritterhuder Beeke werden als Polylinienzüge über das RIVER-Modul von PMWin (CHIANG 2005) in das Modell eingebaut. Es beachtet die Anbindung der Bäche an den Grundwasserleiter mittels einer Randbedingung der 3. Art (CAUCHY-Bedingung). Erreicht wird das durch eine Linear-Kombination der Randbedingungen 1. und 2. Art, d.h. die Gewässerbettmächtigkeit und deren Durchlässigkeitsbeiwert ergeben einen Leckage-Faktor, der den Austausch zwischen Oberflächengewässer (mit

einem konstanten mittleren Wasserspiegel) und Grundwasser regelt. Dabei wird das äußere Potential durch einen Widerstand abgeschwächt.

Genauso wird die Drainage im Westen mit mittleren Wasserständen über das DRAIN-Modul von PMWin (CHIANG 2005) als Polylinienzug in das Modell eingebaut. Eine detaillierte Anleitung zum Einbau der Randbedingungen 3. Art als Polylinienzug findet sich in Anhang H. Der Einbau als Polylinienzug gewährleistet bei geringmächtigen oberen Schichten, dass Oberflächengewässer den Grundwasserleiter automatisch in der richtigen Tiefe beeinflussen. Das ist dann ein Vorteil, wenn Oberflächengewässer tief in das Gelände einschneiden und ein grobes Modellraster den Einschnitt des Gewässers in der Morphologie nicht berücksichtigt.

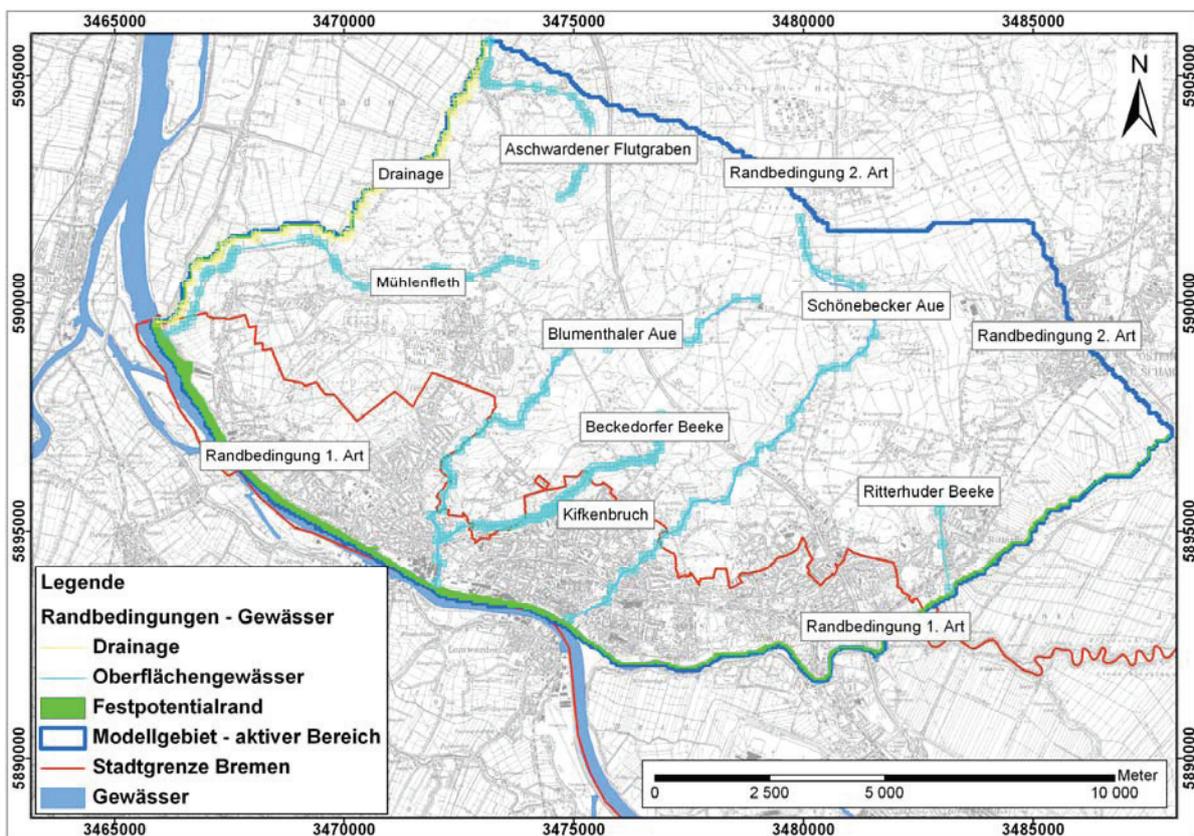


Abb. 19: Randbedingungen 1., 2. und 3. Art im Modellgebiet, die Oberflächengewässer und die Drainage sind Randbedingungen 3. Art

5.3 Kalibrierung im 1-Schichtmodell

Im Anschluss an den Modellaufbau erfolgt die Modellkalibrierung. Sie geschieht zunächst automatisiert durch Ermittlung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Modellschicht und der Ge-

wässer- und Drainagebetten mit dem Softwaremodul PEST (DOHERTY 2002 (s. Abschn. 2.2)). Dafür werden ausgehend von der Geologie des Untergrundes anfangs wenige grobe Zonen im Modell angelegt. Ihre Grenzen orientieren sich dabei an den im 3D-Strukturmodell ermittelten Faziesgrenzen. Für diese Zonen ermittelt PEST (DOHERTY 2002) Durchlässigkeitsbeiwerte genauso, wie für Gewässer- und Drainagebetten (Ausnahme s. Abschn. 4.2.2). Ein ähnliches Vorgehen beschreiben auch BACHMANN et al. (2007).

Es werden Grenzwerte für die Durchlässigkeitsbeiwerte vorgegeben ($\min = 1 \times 10^{-9}$ m/s, $\max = 1 \times 10^{-2}$ m/s), die sich an der Modellgebietsgenese und an Literaturwerten (HÖFLE et al. 1989, SCHLIMM 1996, ENTENMANN 1998, BERSEZIO et al. 1999) orientieren. Die automatisierte Kalibrierung wird durch eine manuelle Veränderung der Zonengrenzen und den Einbau zusätzlicher Zonen verbessert. Die endgültige Verteilung der Zonen ist in Abb. 20 dargestellt.

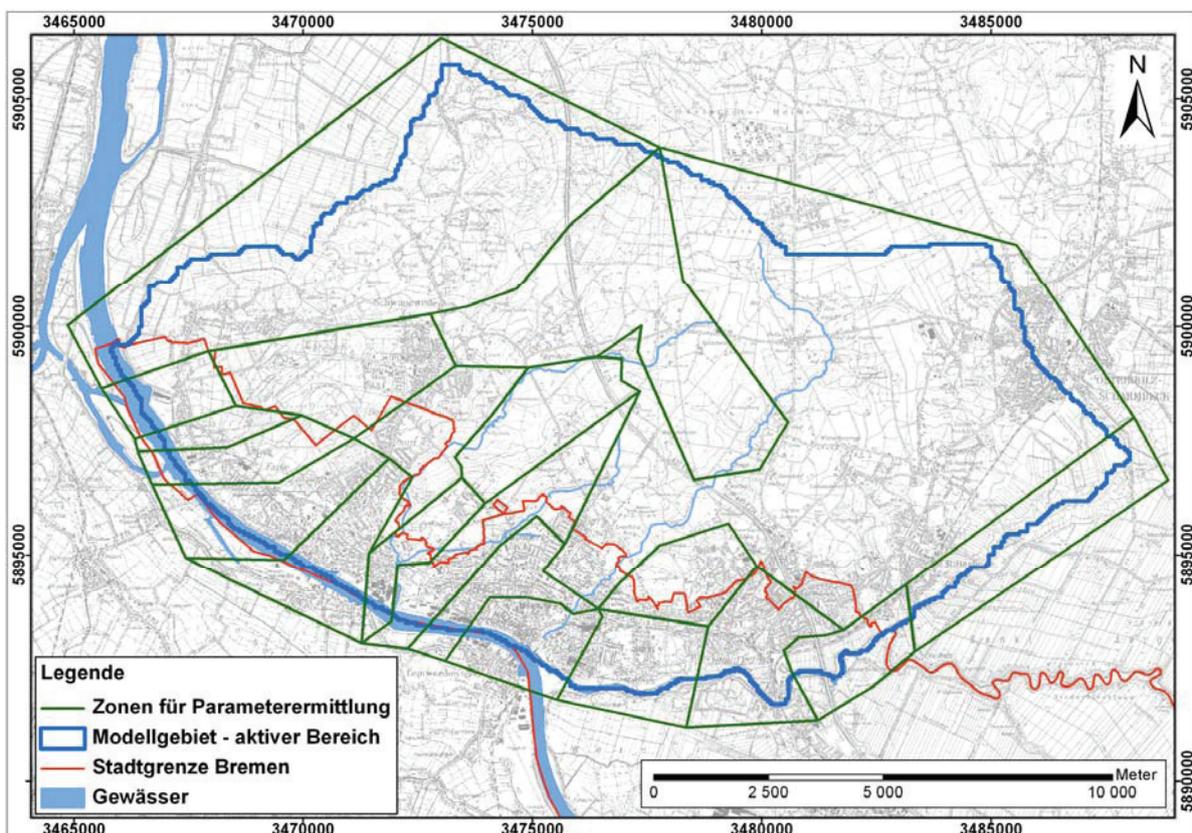


Abb. 20: Endgültige Zonen im Modellgebiet für die automatisierte Kalibrierung

Die Aufteilung der Zonen ist im südlichen Modellgebiet differenzierter als die im 3D-Strukturmodell ermittelte horizontale Ausdehnung der bindigen Schichten. Das ist ein Ergeb-

nis der manuellen Kalibrierung. Für jede Zone wird versucht, die nach der automatisierten Parameterermittlung noch vorhandenen Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten zu verbessern. Teilweise ergibt sich dabei die Notwendigkeit, Zonen aufzuteilen und den Grenzverlauf zu verändern. Es gibt lokale Bereiche, in denen mit diesem Vorgehen keine gute Anpassung erreicht wird und Abweichungen von mehr als 2 m zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen bestehen bleiben. Dort werden die Durchlässigkeitsbeiwerte in einzelnen Zellen manuell so lange verändert, bis sich die Anpassung auch auf diese Art nicht weiter verbessern lässt (s. Abschn. 7.2).

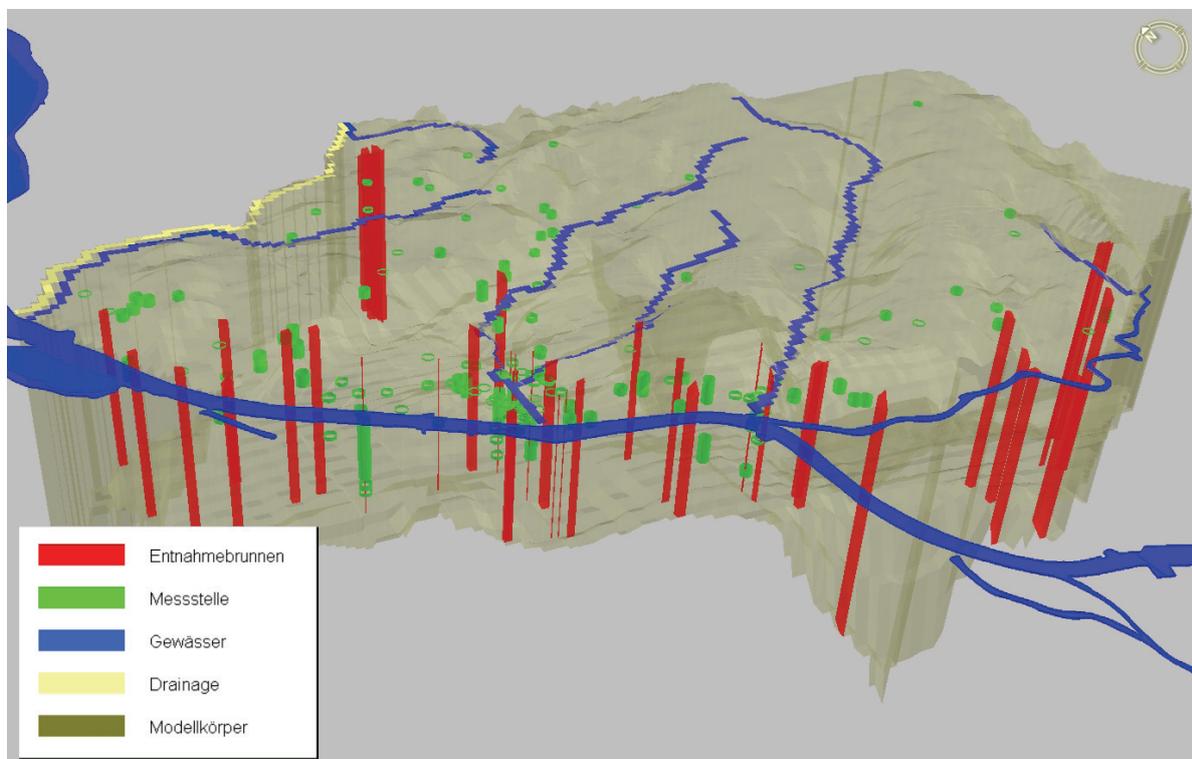


Abb. 21: räumliche Skizze des 1-Schichtmodells, Blickrichtung von Südwest nach Nordost, dreißigfach überhöht

Ist ein plausibles Ergebnis, in Hinblick auf die grundsätzliche Grundwasserfließrichtung entsprechend des konstruierten GW-Druckspiegelgleichenplans (s. Abb. 12), erreicht, dass eine gute Kalibrierung zeigt, werden die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte fest in das Modell eingebaut. Hiermit sind Auswertungen und Prognosen möglich. Anders als bei MULL (1986) wird hier auf die Berechnung einer zweiten Variante verzichtet (s. a. Abschn. 7.2). Ein Kriterium für eine gute Modellkalibrierung ist, dass die Wurzel der mittleren quadratischen Abwei-

chung (RMS) zwischen gemessenen und berechneten Wasserständen in Bezug zum gemessenen Gesamtgrundwassergefälle im Modellgebiet möglichst klein ist (ANDERSON & WOESSNER 2002).

Das 1-Schichtmodell zeichnet die Geländemorphologie und die Lage der bindigen, den genutzten Grundwasserleiter begrenzenden tertiären und quartären Schichten nach. Es berücksichtigt die vorhandenen Randbedingungen und die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte des Untergrundes und der Gewässer- und Drainagebetten. Vertikal ist das Modell undifferenziert (Abb. 21). Es ist gut zu erkennen, dass die Entnahmebrunnen über die gesamte Modellmächtigkeit aktiv sind.

Ein Ergebnis sind die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte (s. a. Abschn. 6.4), deren Zusammenhang mit der geologischen Struktur im Modellgebiet in Abschn. 7.2 erläutert wird. Das kalibrierte Modell bietet darüber hinaus die Möglichkeit, sowohl eine generelle Grundwasserströmung für das Modellgebiet als auch eine Wasserbilanz zu berechnen (s. Kap. 6).

5.4 Kopplung mit dem 3D-Strukturmodell

Die im 3D-Strukturmodell (s. Abschn. 2.4) für das Modellgebiet ermittelte vertikale Heterogenität des Untergrundes soll in das 1-Schichtmodell integriert werden, um die Modellanpassung an den realen Zustand weiter zu verbessern. EATON (2006) und OUELLON et al. (2008) verweisen auf den Einfluss räumlicher Heterogenität auf die modellierten Grundwasserströmungsverhältnisse. Um das Strömungsmodell vertikal zu differenzieren wird das 1-Schichtmodell mit dem 3D-Strukturmodell gekoppelt und dabei in ein 5-Schichtmodell transformiert (s. a. Tab. 6). Durch die Kopplung besteht darüber hinaus die Möglichkeit, Messstellen und Entnahmebrunnen entsprechend der tatsächlichen Teufe ihrer Verfilterung einzubauen.

Tab. 6: Vertikaler Aufbau im 5-Schichtmodell

Modellschicht	Beschreibung	Zustand des Grundwasserdruckspiegels	Hydrostrat. Kurzbezeichnung
1	sandiger Grundwasserleiter	gespannt/ungespannt	L1
2	bindiger Grundwasserhemmer	gespannt	H3
3	sandiger Grundwasserleiter	gespannt	L3
4	bindiger Grundwasserhemmer	gespannt	H4
5	sandiger Grundwasserleiter	gespannt	L4.1, L4.2, L4.3, HL4.3

Die Schichten 1, 3 und 5 kennzeichnen sandige, grundwasserleitende Schichten im Modellgebiet. Schicht 5 ist der genutzte Grundwasserleiter. Schicht 2 kennzeichnet die bindige Ausprägung der quartären Drenthe-Schichten und stellt einen Grundwasserhemmer dar. Schicht 4 ist die bindige Ausprägung der quartären Lauenburger-Schichten und stellt ebenfalls einen Grundwasserhemmer dar (s. a. Tab. 2, Abschn. 2.4). Die grundwasserhemmenden Schichten sind nicht über die gesamte Fläche des Modellgebiets ausgebildet (s. Abb. 22 und Abb. 23). In verschiedenen Bereichen stehen die grundwasserleitenden Schichten 1, 3 und 5 in direktem Kontakt miteinander.

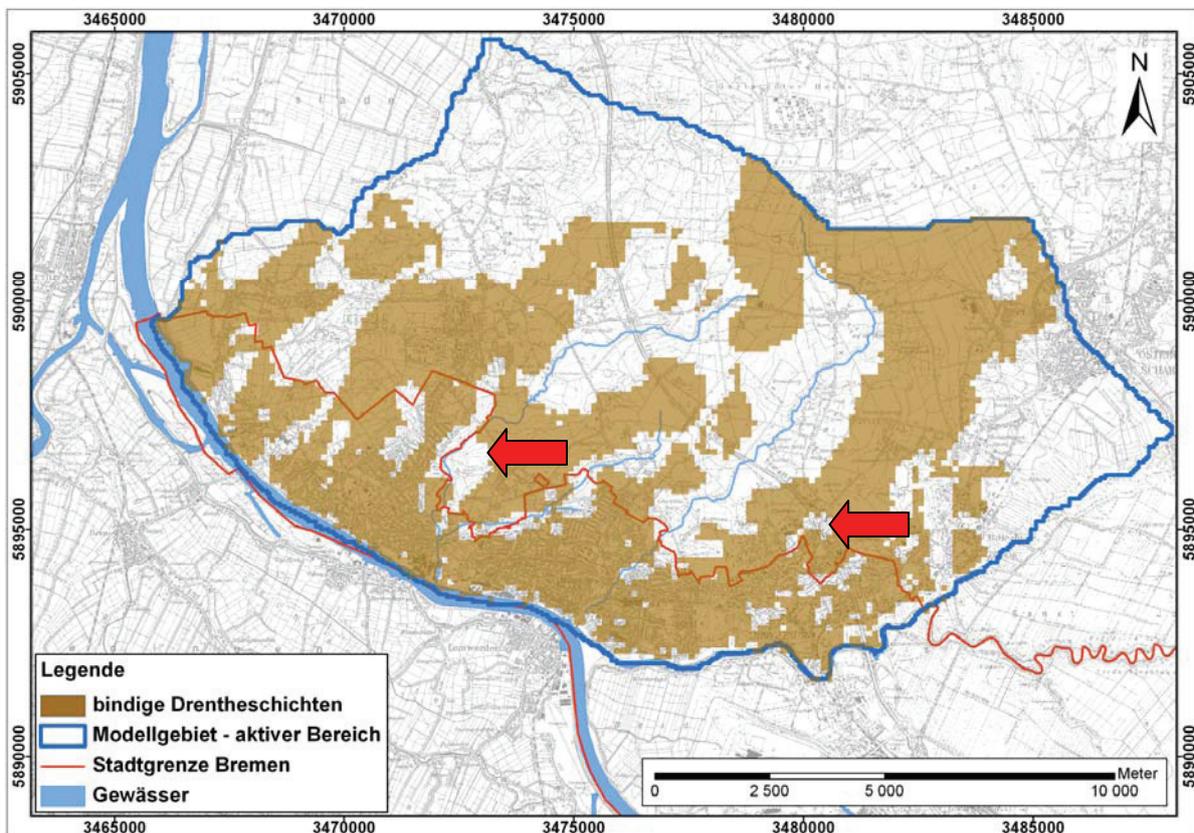


Abb. 22: Im 3D-Strukturmodell ermittelte Ausdehnung der bindigen Drenthe-Schichten (Schicht 2) im Modellgebiet, die Pfeile kennzeichnen hydraulische Fenster

Bei der Erstellung eines Mehrschichtmodells mit PMWin (CHIANG 2005) gibt es Einschränkungen der Software. Einzelne Modellschichten müssen im gesamten Modellgebiet vorhanden sein. Eine Modellschicht kann nicht innerhalb des Modellgebiets beginnen oder aufhören. Es ist somit nicht möglich auskeilende Schichten direkt darzustellen oder Schichtlinsen

einzubauen. Einen Ausweg, diese Einschränkung zu umgehen, bieten die Durchlässigkeiten einzelner Zellen. Die Geologie wird in diesem Fall nicht durch die Modellstruktur, sondern durch die Zuweisung von entsprechenden Durchlässigkeitsbeiwerten zu einzelnen Zellen erreicht. Anhand eines Beispiels soll dies verdeutlicht werden:

Obwohl das 3D-Strukturmodell unter anderem für den nördlichen Modellbereich keine bindigen Drenthe-Schichten ermittelt, muss Schicht 2 im Strömungsmodell an gleicher Stelle vorhanden sein. Wenn an dieser Stelle die Durchlässigkeitsbeiwerte denen der hangenden und liegenden Schichten entsprechen, ist die Einschränkung in Bezug auf das Modellergebnis zu vernachlässigen. Die im 3D-Strukturmodell für diese Stelle ermittelte Homogenität wird durch einheitliche Durchlässigkeitsbeiwerte berücksichtigt.

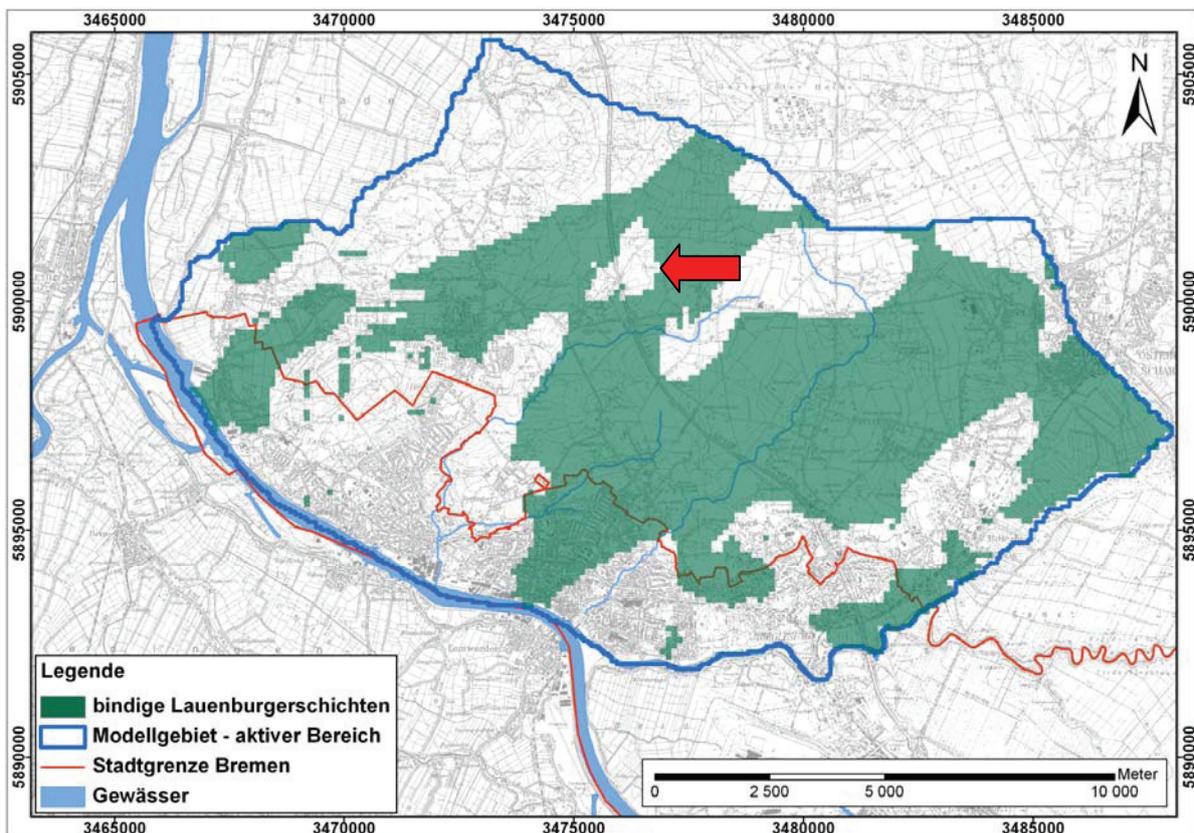


Abb. 23: Im 3D-Strukturmodell ermittelte Ausdehnung der bindigen Lauenburger-Schichten (Schicht 4) im Modellgebiet, der Pfeil zeigt ein hydraulisches Fenster

Die Ausdehnung und die Mächtigkeit der bindigen Schichten ermittelt das 3D-Strukturmodell. Es sind die Höhenlagen der Top- und Basisflächen der bindigen Schichten in mNN vorhan-

den. Sie werden im 5-Schichtmodell als Schichtgrenzen genutzt. Dort wo das Strukturmodell keine bindigen Schichten ermittelt, müssen die Schichtgrenzen manuell gesetzt werden, damit die einzelnen Schichten über die Modellausdehnung durchgängig sind (s. o.). An den Rändern ihrer Ausdehnung haben die bindigen Schichten zumeist eine Mächtigkeit von 0,1 m (s. Anhang F, G). In den Bereichen, in denen manuell Schichtgrenzen eingefügt werden, wird diese Schichtmächtigkeit beibehalten. Durch eine einheitliche Schichtmächtigkeit bzw. eine gleichmäßige Zu- und Abnahme der Schichtmächtigkeit sollen Abbruchfehler beim Lösen der Strömungsgleichung verhindert werden (ANDERSON & WOESSNER 2002). Bei der Modellierung im 5-Schichtmodell ist es zu keinen Abbruchfehlern gekommen.

5.4.1 Umrechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte

Die Struktur des 5-Schichtmodells ist jetzt an die des 3D-Strukturmodells gekoppelt und mit Ausnahme der durch die Software bedingten Einschränkungen identisch. Im nächsten Schritt werden die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Durchlässigkeitsbeiwerte bearbeitet.

Ein Ergebnis der Kalibrierung des 1-Schichtmodells sind die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte. Die Mächtigkeit des Modells ergibt sich aus der Differenz zwischen Geländeoberfläche (Abb. 14) und Basis des genutzten Grundwasserleiters (Abb. 18). Das Produkt aus Mächtigkeit und Durchlässigkeitsbeiwert berechnet für jede Zelle eine Transmissivität. Diese Transmissivitäten werden als Ausgangswerte angenommen und dienen als Grundlage für die Ermittlung abgestufter Durchlässigkeitsbeiwerte. Entsprechend der Genese und Ausbildung der fünf im Modell dargestellten Schichtpakete werden unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte zugewiesen. Es wird darauf geachtet, die Gesamttransmissivität nicht zu verändern, um eine bestmögliche Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen des 1-Schichtmodells und des 5-Schichtmodells zu erhalten.

Es sind jetzt die Gesamttransmissivität aus dem 1-Schichtmodell, die Ober- und Basisflächen der einzelnen Schichten und die Ausdehnung von bindigen Schichten im Modellgebiet zellgenau vorhanden. Tab. 7 zeigt ein Umrechnungsbeispiel.

Die Umrechnung wird in 9 Berechnungsschritten (A bis I) durchgeführt. Schritt A listet die Schichtmächtigkeiten M [m] der Modellschichten 1 bis 5 auf. Sie ergeben sich aus der Differenz der Ober- und Basisfläche jeder einzelnen Schicht. Die Summe entspricht der Mächtigkeit des 1-Schichtmodells. In Schritt B ist der Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,alt}$ [m/s] aus der 1-Schichtmodellierung aufgeführt (s. Abschn. 6.4 und Anh. D). Er ist über die Gesamtmäch-

tigkeit homogen und somit in allen Schichten gleich. Mit diesen Angaben wird die Transmissivität T_{alt} [m^2/s] jeder einzelnen Schicht nach:

$$T_{\text{alt (Schicht 1)}} = k_{f,\text{alt}} \times M_{\text{(Schicht 1)}} \quad (7)$$

errechnet. Sie ist in Schritt C aufgelistet und ergibt in der Summe die Gesamttransmissivität des 1-Schichtmodells. Nach ENTENMANN (1998) ergibt sich aus Messwerten im quartären Lockergestein ein k_f -Faktor von 0,145, wenn bindige Schichten gegenüber sandigen Schichten abgegrenzt werden sollen (Berechnungsschritt D). In Schritt E ist $k_{f,\text{neu}}$ (für die Schichten 2 und 4) nach:

$$k_{f,\text{neu (Schicht 2)}} = k_{f,\text{alt}} \times k_f\text{-Faktor} \quad (8)$$

berechnet. Schritt F errechnet dann T_{neu} gemäß:

$$T_{\text{neu (Schicht 2)}} = k_{f,\text{neu (Schicht 2)}} \times M_{\text{(Schicht 2)}} \quad (9)$$

für die Schichten 2 und 4. Die Transmissivitäten der Schichten 1, 3 und 5 bleiben zunächst unverändert.

Tab. 7: Zwischenergebnisse der Umrechnung der Transmissivität des 1-Schichtmodells in die Transmissivitäten der einzelnen Schichten des 5-Schichtmodells anhand eines Beispiels, die notwendigen Basisangaben kommen für Schritt A aus dem 3D-Strukturmodell, für Schritt B aus dem kalibrierten 1-Schichtmodell und für Schritt D wurden Literaturangaben verwendet

Nr.	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Schicht	M	$k_{f,\text{alt}}$	T_{alt}	k_f -Faktor	$k_{f,\text{neu}}$	T_{neu}	fehlende T	T_{neu}	$k_{f,\text{neu}}$
	[m]	[m/s]	[m^2/s]		[m/s]	[m^2/s]	[m^2/s]	[m^2/s]	[m/s]
1	20	0,0009	0,018			0,018		0,023904	0,001195
2	5	0,0009	0,0045	0,145	0,000131	0,000653		0,000653	
3	0,1	0,0009	0,00009			0,00009		0,000120	0,001195
4	10	0,0009	0,009	0,145	0,000131	0,001305		0,001305	
5	19	0,0009	0,0171			0,0171		0,022709	0,001195
Gesamt	54,1	0,0009	0,04869			0,037148	0,011543	0,04869	

rote Schrift = nötige Basisangaben

Schritt G (fehlende T) berechnet die Differenz zwischen der Gesamttransmissivität aus dem 1-Schichtmodell und der Summe der Neuberechneten Transmissivitäten. Da die Gesamttransmissivität erhalten bleiben soll, müssen die Transmissivitäten der Schichten 1, 3 und 5 entsprechend angepasst werden. Dies geschieht in Schritt H (T_{neu} für die Schichten 1, 3 und 5) unter Berücksichtigung der jeweiligen Mächtigkeit der einzelnen Schichten. Folgende Formel wird dabei angewendet (am Beispiel für Schicht 1):

$$T_{\text{neu (Schicht 1)}} = T_{\text{alt (Schicht 1)}} + \text{fehlende T} / (M_{\text{Schicht 1}} + M_{\text{Schicht 3}} + M_{\text{Schicht 5}}) \times M_{\text{Schicht 1}} \quad (10)$$

Schritt I ergibt sich dann zu:

$$k_{f,\text{neu (Schicht 1)}} = T_{\text{neu (Schicht 1)}} / M_{\text{(Schicht 1)}} \quad (11)$$

für die Schichten 1, 3 und 5.

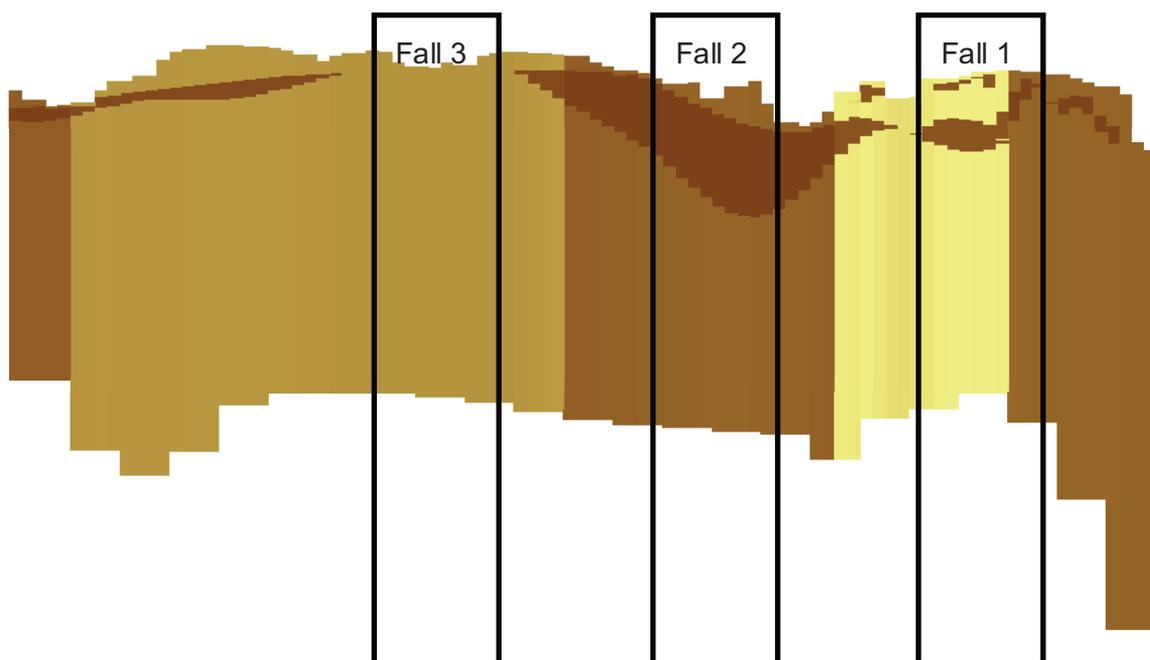


Abb. 24: Skizze eines Querschnitts des mit dem 3D-Strukturmodell gekoppelten Strömungsmodells, dunkle Farben kennzeichnen schlechte Durchlässigkeitsbeiwerte (bindige Schichten), helle Farben kennzeichnen gute Durchlässigkeitsbeiwerte (sandige Schichten)

Die Umrechnung erfolgt für jede einzelne Modellzelle. Durch Auswertung der Daten in Abb. 22 und Abb. 23 lassen sich drei mögliche Fälle unterscheiden. Im ersten Fall sind alle in Tab. 6 aufgelisteten Schichten übereinander ausgebildet. Dieser Fall ist in Tab. 7 illustriert. Im zweiten Fall ist nur eine bindige Schicht ausgebildet. In diesem Fall wird nur der Durchläs-

sigkeitsbeiwert einer Schicht (Schicht 2 oder Schicht 4, entsprechend der Ergebnisse des 3D-Strukturmodells) mit einem Faktor verringert. Die andere Schicht wird genauso wie die Schichten 1, 3 und 5 als sandige Schicht behandelt. Der dritte Fall beschreibt Bereiche, in denen keine bindigen Schichten ausgebildet sind. Hier werden die Ergebnisse aus Berechnungsschritt C ohne weitere Umrechnung übernommen.

In Abb. 24 sind die drei möglichen Fälle gekennzeichnet. Die deutlichen Unterschiede innerhalb einer Schicht entstehen bei der Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten im 1-Schichtmodell (s. Abschn. 5.3) und kennzeichnen die enge Verzahnung und teilweise abrupten Übergänge zwischen bindigen und sandigen Fazies im Modellgebiet.

5.4.2 Einbau der umgerechneten Durchlässigkeitsbeiwerte

Die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte werden in das 5-Schichtmodell transferiert. In Mehrschichtmodellen muss ein Wert für die vertikale Durchlässigkeit der Schichtkörper angegeben werden. LANGGUTH & VOIGT (2004) gehen davon aus, dass die vertikale Durchlässigkeit maximal einem Zehntel der horizontalen Durchlässigkeit entspricht. Dem entgegen sprechen VON SOOS & ENGEL (2008) von einer Verminderung um den Faktor 2 bis 10 zwischen horizontaler und vertikaler Durchlässigkeit. ENTENMANN (1998) wertet 700 Messergebnisse an Lockersedimenten aus und weist auf die gute Absicherung von Aussagen bezüglich bindiger Schichten und Schmelzwassersanden hin. Durch Superposition von Durchlässigkeitsbeiwerten einzelner Schichten werden Faktoren bis 1 ermittelt. Im 5-Schichtmodell werden für die vertikale Durchlässigkeit der bindigen Schichten (Schichten 2 und 4) der Faktor 1,5 und für die der sandigen Schichten (Schichten 1, 3 und 5) der Faktor 4 empirisch ermittelt und verwendet (s. a. Abschn. 7.3). Der strukturelle Aufbau des 5-Schichtmodells ist damit abgeschlossen und jede Zelle ist nun mit Durchlässigkeitsbeiwerten versehen, die die im 3D-Strukturmodell ermittelte räumliche Heterogenität widerspiegeln.

Die Randbedingungen aus der Modellierung im 1-Schichtmodell werden übernommen, ebenso die Eingangsdaten der Grundwasserneubildung (GROWA06V2 (KUNKEL et al. 2006), s. Abschn. 2.3) und eine Eingangsgrundwasserdruckspiegelhöhe. Im folgenden Abschnitt wird der durch die veränderte Modellstruktur beeinflusste Einbau von Grundwasserentnahmepunkten und Grundwassermessstellen beschrieben.

5.5 Einbau von Messstellen und Brunnen entsprechend ihrer Tiefenlage

Es wird unterschieden zwischen dem Einbau von Grundwasserentnahmebrunnen und Grundwassermessstellen. Zunächst werden die Grundwasserentnahmebrunnen (Senken – s. Abschn. 4.3.2) betrachtet. Im 5-Schichtmodell (Abb. 25) werden sie entsprechend der Tiefenlage ihrer Verfilterung berücksichtigt. Dafür wird im 3D-Strukturmodell überprüft, in welcher Schicht sich die jeweilige Verfilterung befindet. Ist dabei eine eindeutige Zuordnung möglich, wird der Grundwasserentnahmebrunnen in die ermittelte Schicht eingebaut. Erstreckt sich die Verfilterung über mehr als eine Schicht, geschieht der Einbau in der jeweils tiefsten Schicht. Ergänzend wird die vertikale Durchlässigkeit der darüber liegenden Schichten so gut eingestellt, dass das Wasser ungehindert nach unten strömen kann.

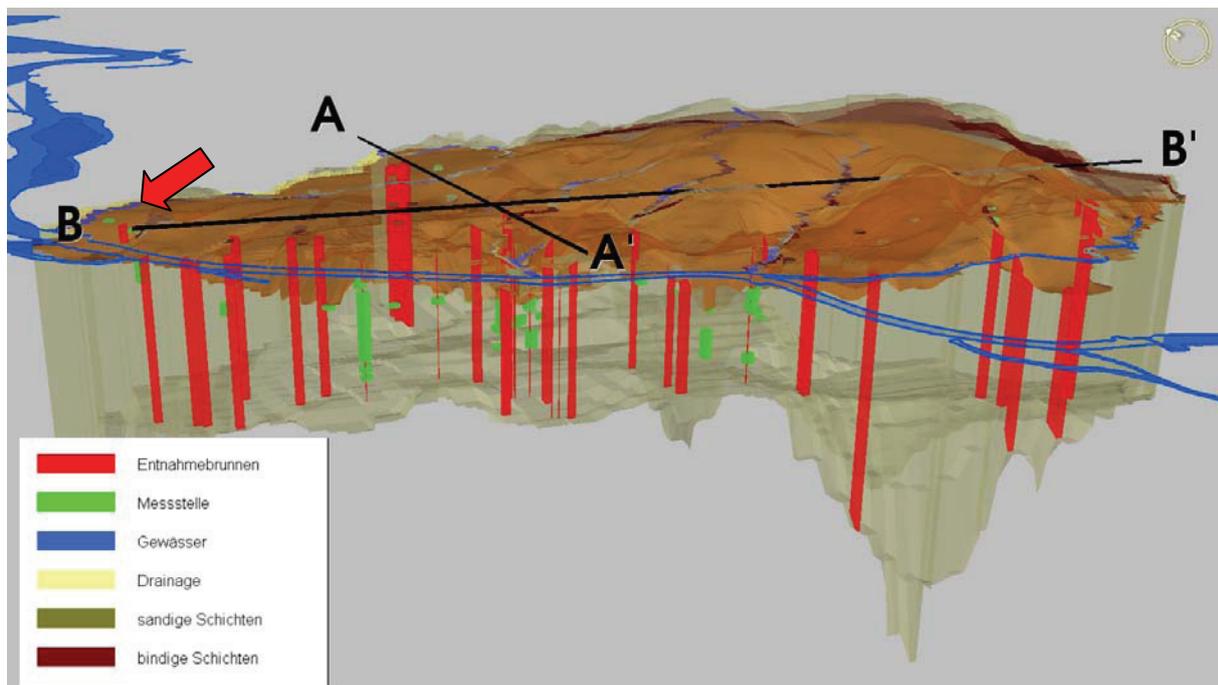


Abb. 25: räumliche Skizze des 5-Schichtmodells, dreißigfach überhöht, Blickrichtung von Südwest nach Nordost, die Linien A – A' und B – B' kennzeichnen die Verläufe der Schnitte aus Abb. 26, der Pfeil markiert einen oberflächennah verfilterten Entnahmebrunnen, die Messstellen sind mit einem Radius von 100 m dargestellt, die Entnahmebrunnen entsprechen in ihrer Ausdehnung der Zelle, in der sie aktiv sind

Auch für die Messstellen wird im 3D-Strukturmodell überprüft, in welcher Schicht sich die Verfilterung befindet. Dementsprechend werden die Messstellen eingebaut. Im 5-Schicht-

modell werden entsprechend der Heterogenität des Untergrundes verschiedene GW-Druckspiegelstände in verschiedenen Tiefenlagen ermittelt. Im Bereich einzelner Messstellen sind im Verlauf ihres Ausbaus bindige Schichten ausgebildet. Dort werden, je nach Lage in Bezug zu Filter, Mächtigkeit und Ausdehnung der bindigen Schichten, durch das 5-Schichtmodell für die Messstelle je nach Schicht unterschiedliche GW-Druckspiegelstände ermittelt. Bei der Kalibrierung ist es somit entscheidend, in welche Schicht die einzelnen Messstellen eingebunden sind.

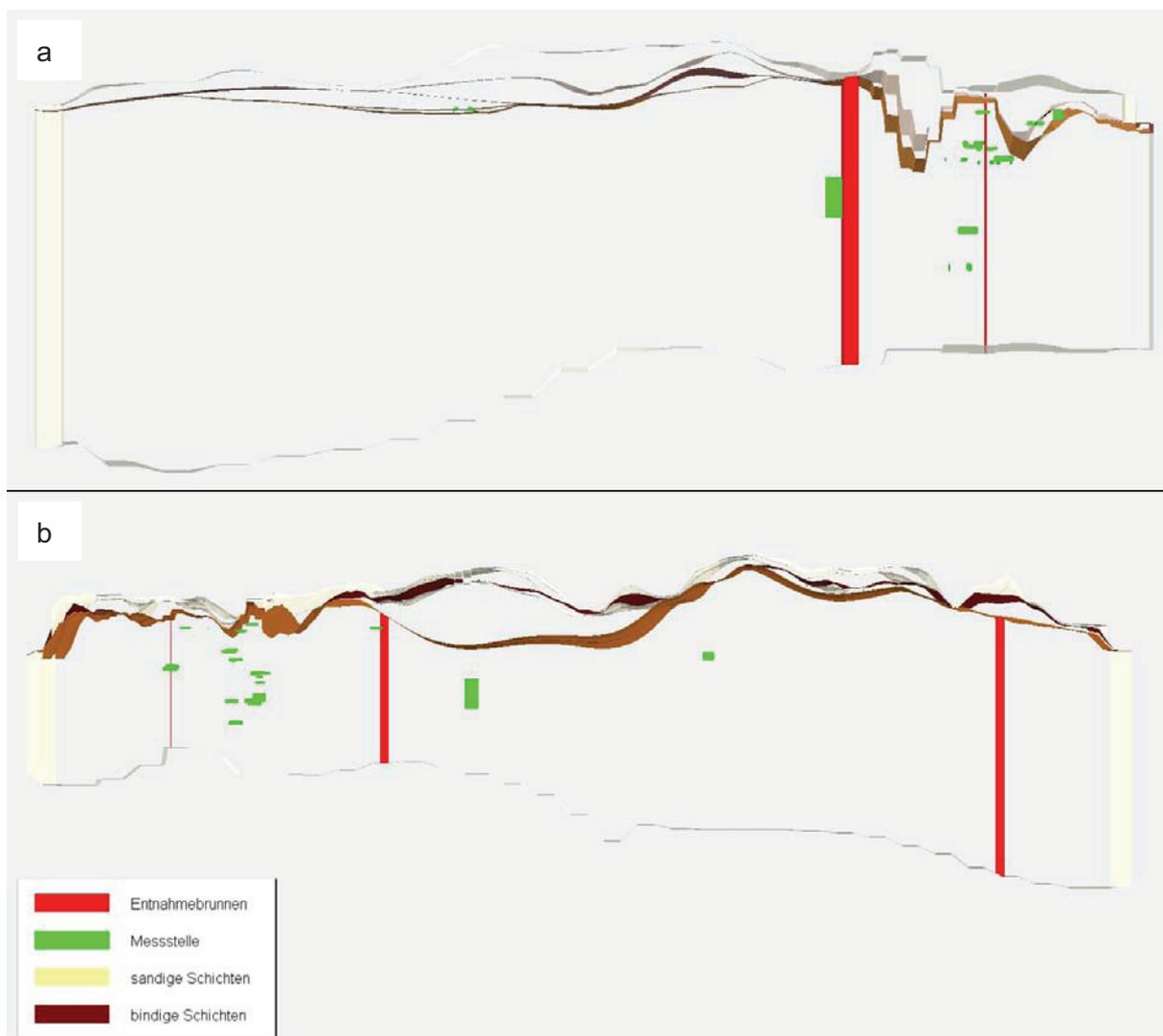


Abb. 26: Skizzen zweier Schnitte durch das Modellgebiet von Nord nach Süd (a) und von West nach Ost (b), dreißigfach überhöht, die Messstellen sind mit einem Radius von 100 m dargestellt, die Entnahmebrunnen entsprechen in ihrer Ausdehnung der Zelle, in der sie aktiv sind

Verläuft die Verfilterung einer Messstelle über eine Schichtgrenze, ist es grundsätzlich möglich, die Messstelle in den entsprechenden Schichten anteilig zu aktivieren. Dies ist bei den verwendeten Messstellen nicht notwendig.

Abb. 25 zeigt den räumlichen Aufbau des 5-Schichtmodells. Es wird deutlich, dass Messstellen über, zwischen und unter den bindigen Schichten verfiltert sind. In Abb. 26 ist gut zu erkennen, dass ein Großteil der Messstellen unterhalb der bindigen Schichten im sandigen, genutzten Grundwasserleiter verfiltert ist. Messstellen, die oberhalb bindiger Schichten als verfiltert dargestellt sind, liegen in Bereichen hydraulischer Fenster (s. a. Abb. 22, Abb. 23 und Anh. F).

6 Ergebnisse und Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellierung im 1-Schichtmodell und der Modellierung im 5-Schichtmodell als GW-Druckspiegelgleichenpläne (Abschn. 6.1, Abschn. 6.2) dargestellt. In Abschn. 6.3 findet ein Vergleich der Ergebnisse des 1-Schichtmodells mit denen des 5-Schichtmodells statt. Anschließend folgt eine Darstellung der ermittelten und eingesetzten Durchlässigkeitsbeiwerte. Abschn. 6.5 betrachtet die Wasserbilanzen der verschiedenen Modelle und abschließend sind die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse dargestellt, die die Einflüsse einzelner Daten auf das Modellergebnis aufzeigt.

6.1 Modellergebnisse des 1-Schichtmodells

Abb. 27 zeigt die modellierten GW-Druckspiegelgleichen aus dem 1-Schichtmodell.

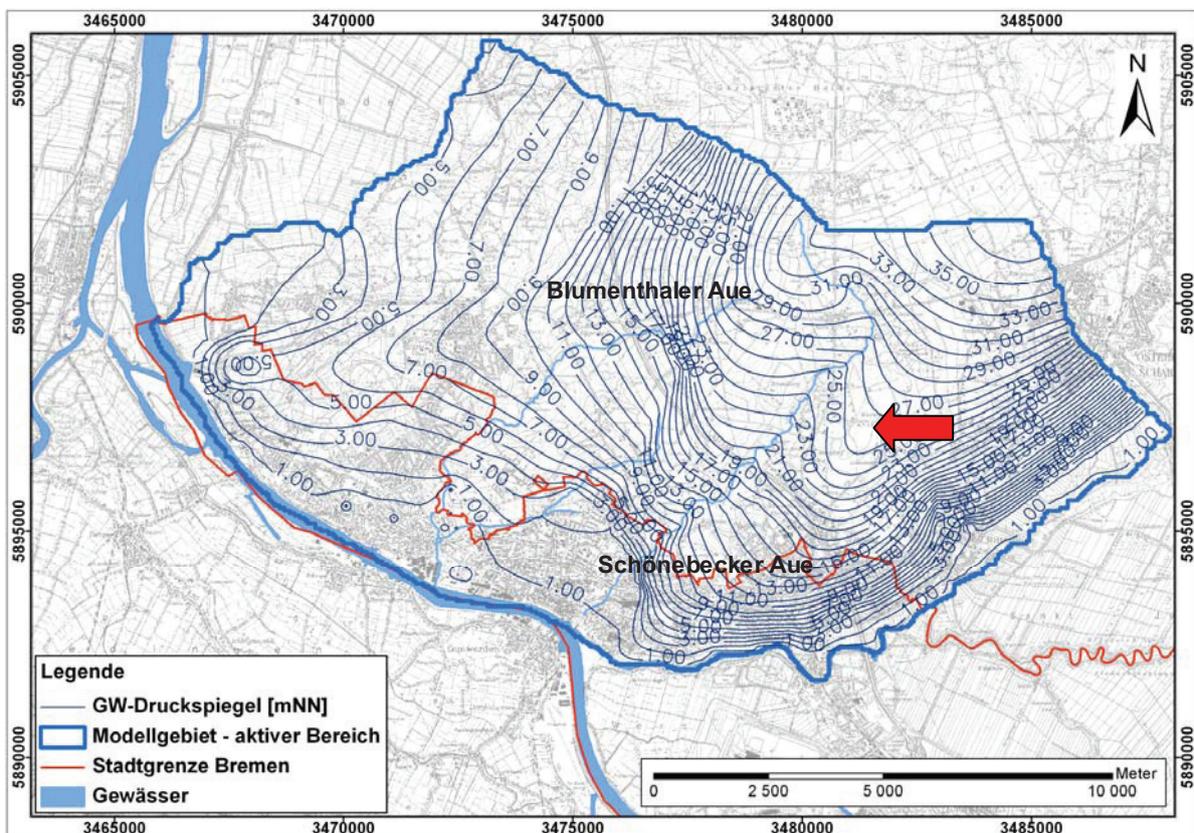


Abb. 27: Modellierte GW-Druckspiegelgleichen im 1-Schichtmodell, der Pfeil markiert eine GW-Druckspiegelhochfläche

Die wesentlichen Unterschiede zum konstruierten GW-Druckspiegelgleichenplan (Abb. 12) sind veränderte Einflüsse der Oberflächengewässer, sowie eine GW-Druckspiegelhochfläche östlich der Schönebecker Aue (s. Markierung) im Modellergebnis. Im Gegensatz zum konstruierten GW-Druckspiegelgleichenplan (Abb. 12) zeigt das Modellergebnis aus dem 1-Schichtmodell keinen Einfluss der Blumenthaler Aue auf den Grundwasserdruckspiegel. Die Schönebecker Aue hingegen beeinflusst im Modellergebnis den Grundwasserdruckspiegel mit kleinen Ausnahmen über ihren gesamten Verlauf.

Abb. 28 zeigt die Differenzen zwischen konstruiertem GW-Druckspiegelgleichenplan und im 1-Schichtmodell modellierten GW-Druckspiegelgleichenplan. Die größten Abweichungen (s. a. Abschn. 7.2) sind dabei im Oberlauf der Schönebecker Aue und in Bereichen mit geringer Messstellendichte. Auch in den Modellrandbereichen gibt es größere Abweichungen.

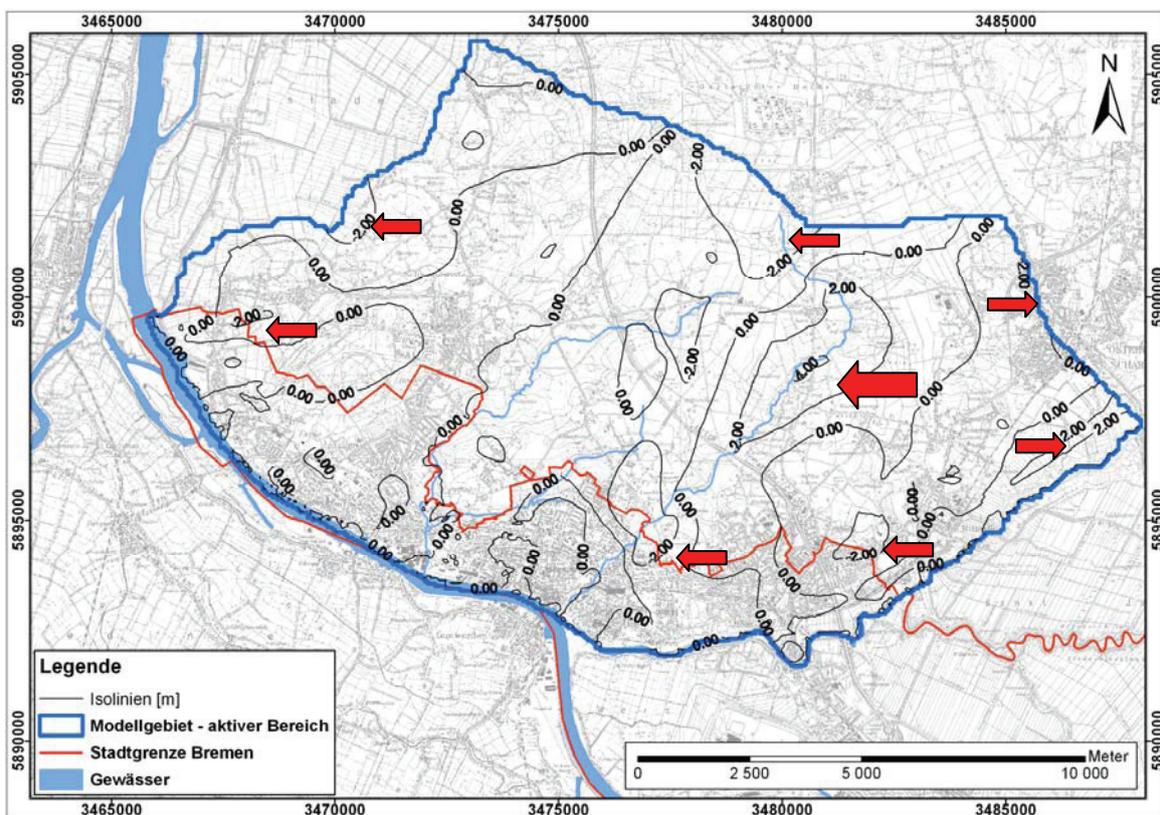


Abb. 28: Abweichungen zwischen Grundwasserständen des konstruierten GW-Druckspiegelgleichenplans und dem Modellergebnis im 1-Schichtmodell, Bereiche mit Abweichungen über 2 m sind durch kleine Pfeile, ein Bereich mit Abweichungen über 4 m durch einen großen Pfeil gekennzeichnet

Der Grundwasserdruckspiegel wird im 1-Schichtmodell mit den dargestellten Eingangsdaten (Abschn. 4.3) entsprechend der Beschreibung (Kap. 5) berechnet. Die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten sind in Abb. 29, Abb. 30, Abb. 31 und Anh. B dargestellt. Abb. 29 zeigt, dass die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten annähernd einer Normalverteilung entspricht.

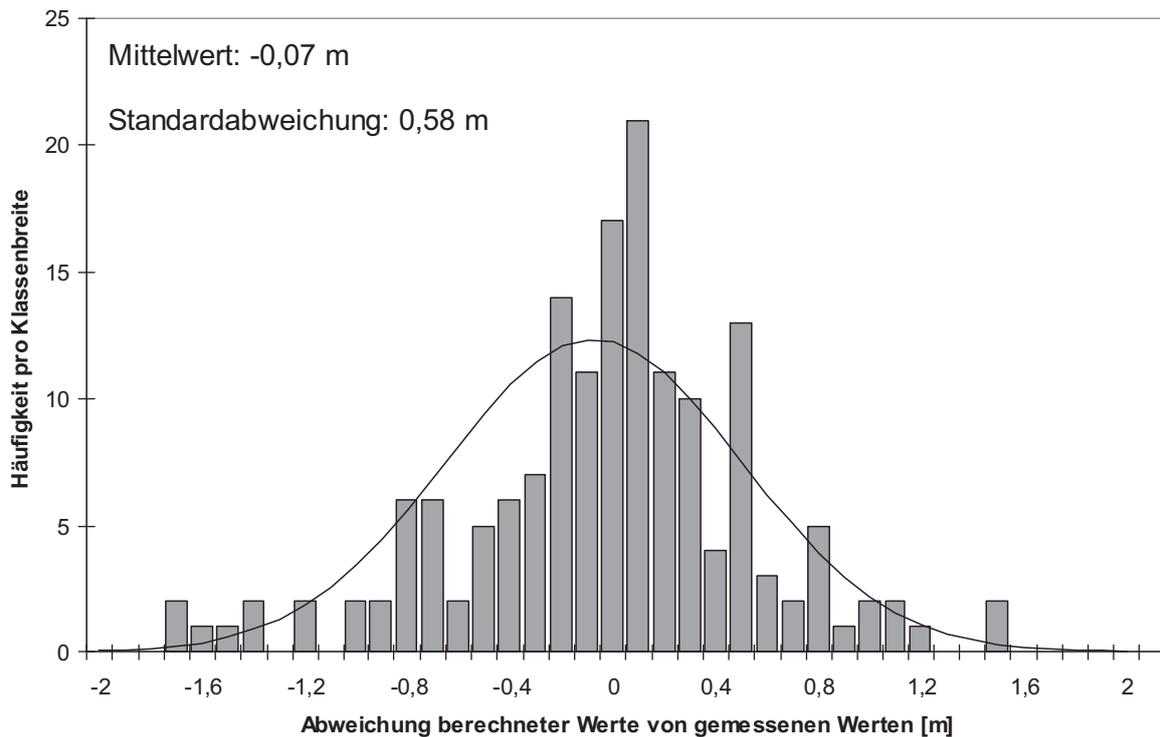


Abb. 29: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen Grundwasserständen, die mit dem kalibrierten 1-Schichtmodell berechnet werden und im Herbst 2007 gemessenen, zusätzlich ist die Gaußsche Normalverteilungskurve dargestellt

Wie in Abschn. 5.3 erwähnt, besteht ein Qualitätskriterium darin, dass die RMS in Bezug auf die gemessene Gesamtpotentialdifferenz möglichst klein (ANDERSON & WOESSNER 2002) ist. Dieses Kriterium wird erfüllt. Das Modell wird auf eine Varianz zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen von $0,34 \text{ m}^2$ kalibriert. Die Spannweite der Abweichungen bewegt sich zwischen $-1,79 \text{ m}$ und $1,48 \text{ m}$. Für die RMS ergibt sich ein Wert von $0,58 \text{ m}$ und die Gesamtpotentialdifferenz des genutzten Grundwasserleiters beträgt im Modellgebiet

38,86 m (-0,8 mNN bis 38,06 mNN). Damit errechnet sich ein Anteil der RMS an der Gesamtpotentialdifferenz von 1,49 %.

In Abb. 30 sind die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Wasserstandsdaten nach der 1-Schichtmodellierung dargestellt. Die größten Differenzen auf bremischem Gebiet treten in unmittelbarer Nähe zu den Grundwasserentnahmebrunnen der Wasserwerke Blumenthal und Vegesack (s. a. Abb. 15) im Verlauf der Blumenthaler Aue und der Schönebecker Aue auf. Auch auf niedersächsischem Gebiet treten sie in relativer Nähe zu Oberflächengewässern auf, allerdings nicht in der Nähe von Grundwasserentnahmebrunnen. Ein zusätzlicher Bereich, in dem größere Differenzen bestehen bleiben, ist im Westen des Modellgebiets. Dort sind weder größere Grundwasserentnahmen noch Oberflächengewässer in der Nähe. Die Ergebnisse des 3D-Strukturmodells weisen allerdings für den Untergrund an dieser Stelle auf eine enge Verzahnung und kleinräumige Wechsel von bindigen und sandigen Schichten hin.

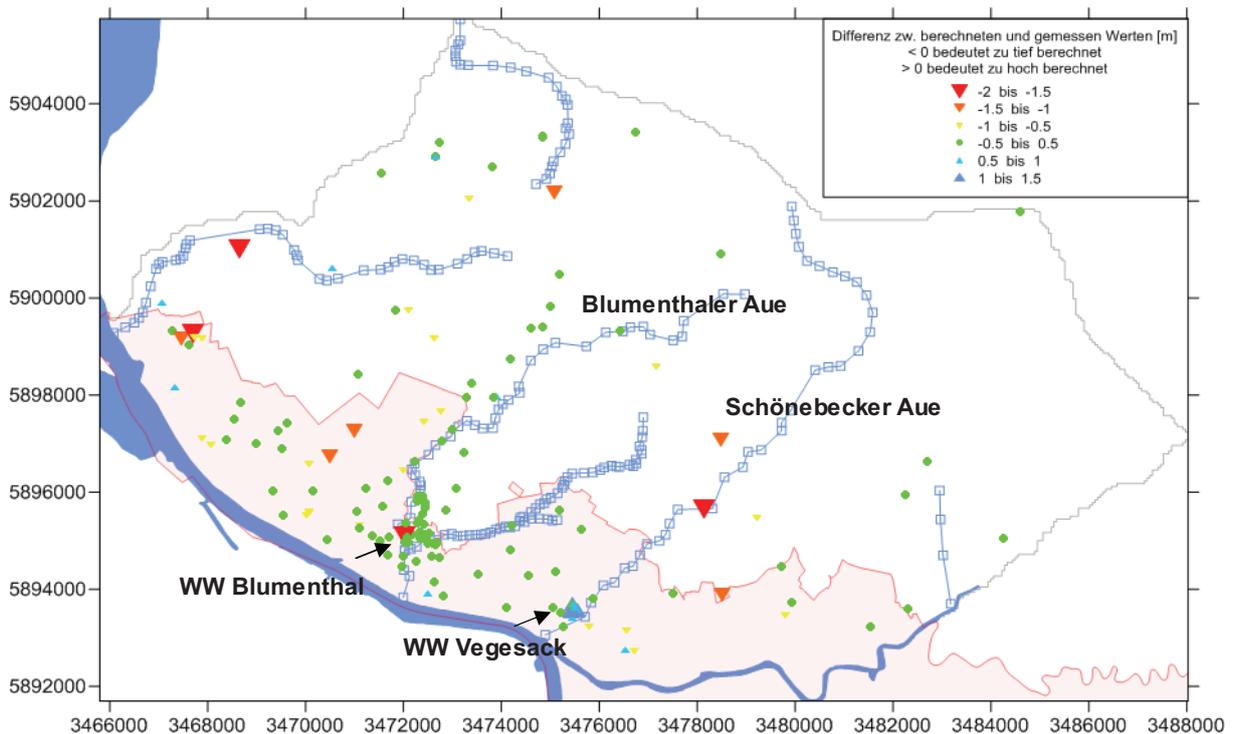


Abb. 30: Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen nach der Kalibrierung des 1-Schichtmodells

Abb. 31 zeigt die Korrelation zwischen gemessenen und berechneten Wasserstandswerten für jede einzelne Messstelle. In dieser Abbildung wird deutlich, wie stark die Messstellendichte nach Nordosten abnimmt, wo die Grundwasserstände bis auf über 37 mNN ansteigen. Schlussfolgerungen und eine Bewertung der Ergebnisse erfolgen in Abschnitt 7.2.

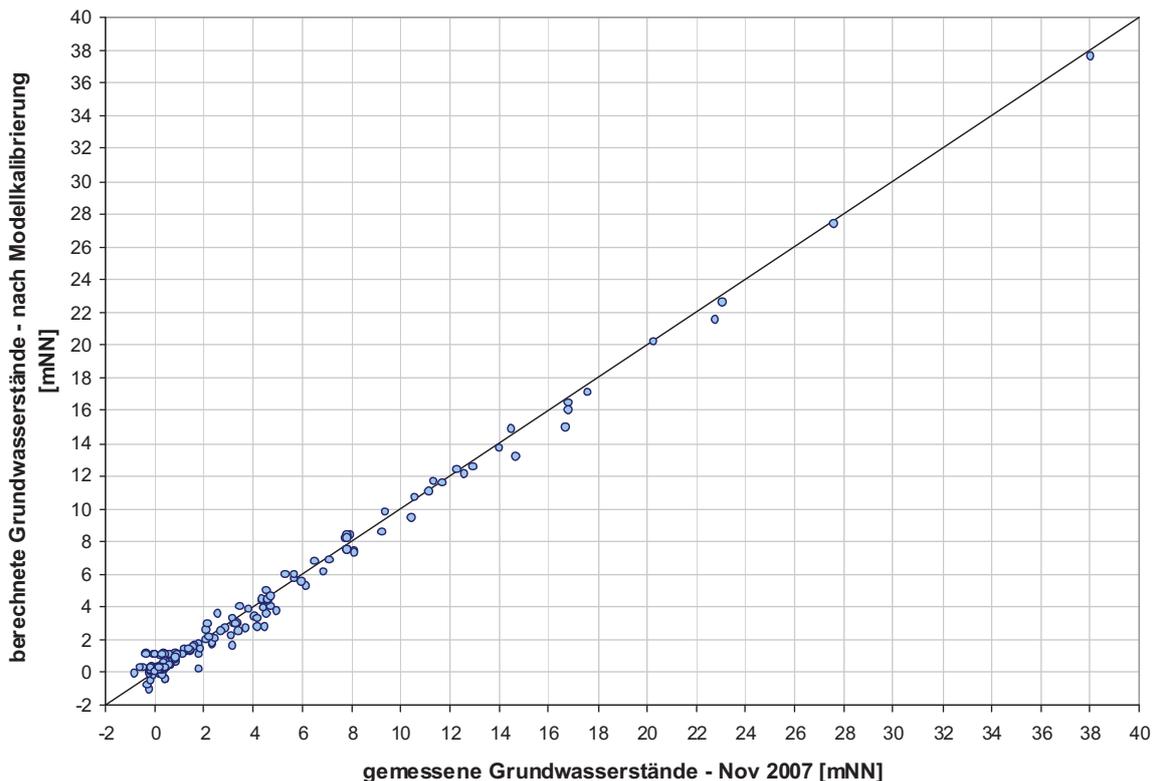


Abb. 31: Korrelation gemessener und berechneter Grundwasserstände nach der Modellkalibrierung im 1-Schichtmodell, auf der Linie stimmen gemessene und berechnete Werte überein

6.2 Modellergebnisse des 5-Schichtmodells

Abb. 32 stellt die modellierten GW-Druckspiegelgleichen des genutzten Grundwasserleiters aus dem 5-Schichtmodell dar. Wie beim konstruierten GW-Druckspiegelgleichenplan sind die Hauptgrundwasserentnahmen der Wasserwerke gut zu erkennen. Darüber hinaus entspricht der Einfluss der Oberflächengewässer im Wesentlichen dem Ergebnis des konstruierten GW-Druckspiegelgleichenplans. Die Blumenthaler Aue beeinflusst den Grundwasserdruckspiegel nur unwesentlich. Die Schönebecker Aue zeigt weniger Einfluss als im Ergebnis der 1-Schichtmodellierung, aber mehr als im konstruierten Ergebnis. Im Ergebnis der 5-Schicht-

modellierung wird, wie im Ergebnis der 1-Schichtmodellierung, eine Grundwasserhochfläche östlich der Schönebecker Aue modelliert, die in dieser Deutlichkeit im konstruierten GW-Druckspiegelgleichenplan nicht auftaucht.

In Hinblick auf die generelle Grundwasserfließrichtung und das Grundwassergefälle gibt es die größten Unterschiede in Bereichen mit einer geringen Eingangsdatendichte. Im Süden und Westen sind die Unterschiede der drei beschriebenen Ergebnisse minimal.

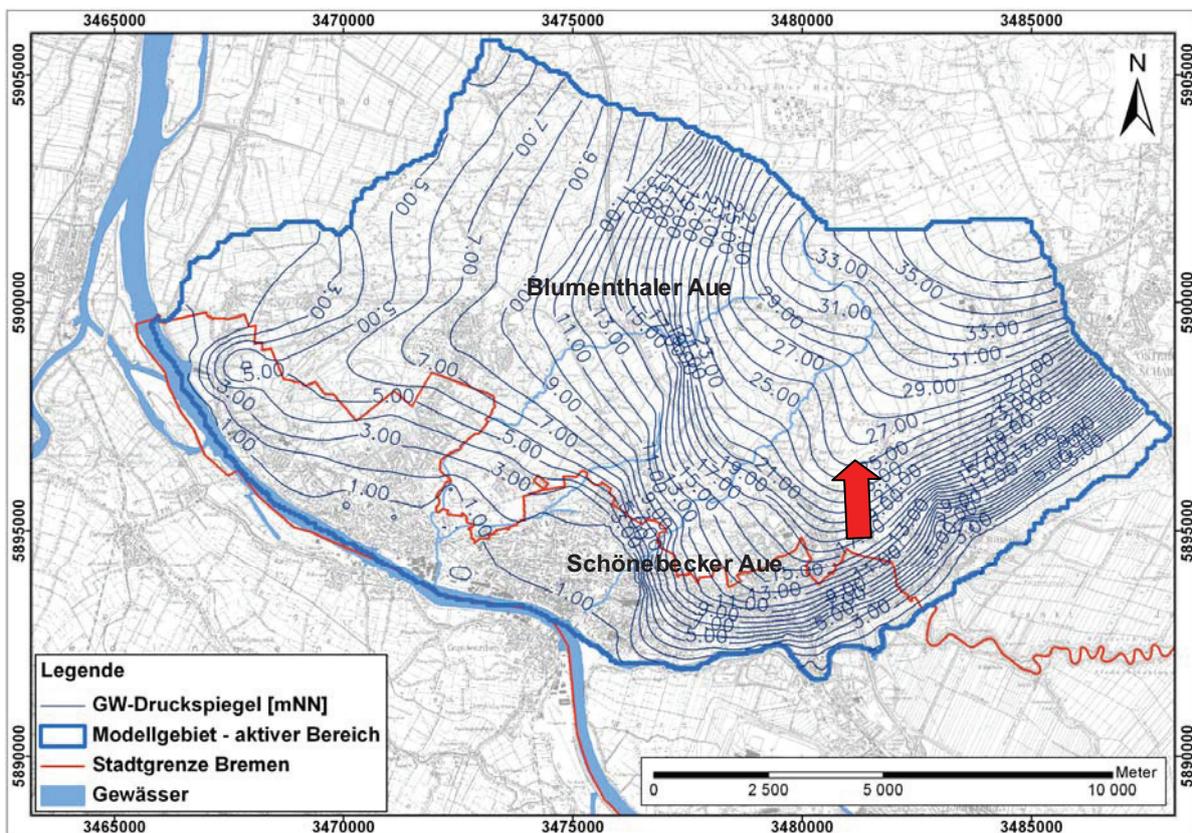


Abb. 32: Modellerte GW-Druckspiegelgleichen des genutzten Grundwasserleiters im 5-Schichtmodell, der Pfeil markiert eine GW-Druckspiegelhochfläche

Die Abweichungen zwischen dem konstruierten GW-Druckspiegelgleichenplan und dem Modellergebnis des 5-Schichtmodells für den genutzten Grundwasserleiter sind in Abb. 33 dargestellt. Die größten Abweichungen sind hier im Unterlauf der Schönebecker Aue und ebenfalls in Bereichen mit einer geringen Messstellendichte zu beobachten.

Der Grundwasserdruckspiegel wird auch im 5-Schichtmodell mit den ermittelten Eingangsdaten (Abschn. 4.3) entsprechend der Beschreibung (Kap. 5) berechnet. Die Abweichungen

zwischen gemessenen und berechneten Werten für die 163 verwendeten Messstellen sind in Abb. 34, Abb. 35, Abb. 36 und in Anh. B dargestellt.

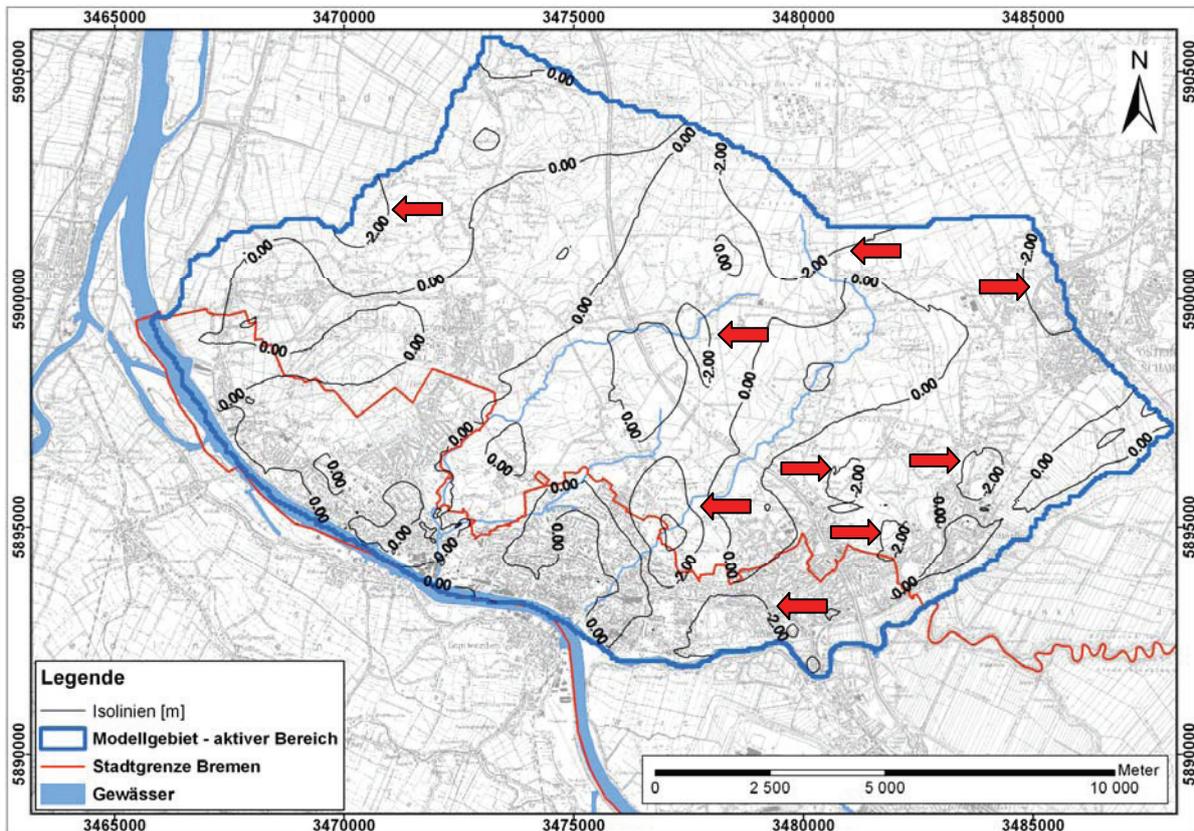


Abb. 33: Abweichungen zwischen Grundwasserständen des konstruierten GW-Druckspiegelgleichensplans und dem Modellergebnis im 5-Schichtmodell für den genutzten Grundwasserleiter, Bereiche mit Abweichungen über 2 m sind durch kleine Pfeile markiert

Das 5-Schichtmodell wird auf eine Varianz zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen von $0,33 \text{ m}^2$ kalibriert. Die größte negative Abweichung beträgt $-1,48 \text{ m}$ und die größte positive Abweichung $1,53 \text{ m}$. Als RMS wird ein Wert von $0,57 \text{ m}$ ermittelt und damit ein Anteil an der Gesamtpotentialdifferenz ($-0,8 \text{ mNN}$ bis $38,06 \text{ mNN}$) von $1,47 \%$. Die Güte der Kalibrierung des 5-Schichtmodells entspricht in dieser Hinsicht nahezu der des 1-Schichtmodells. Die folgende Abb. 34 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten. Im direkten Vergleich mit Abb. 29 fällt auf, dass die Abweichungen im negativen Bereich hier geringfügig besser sind.

Größere Abweichungen sind auch im Bereich der Hauptgrundwasserentnahmebrunnen auf bremischem Gebiet sowie im Westen und im Zentrum des Modellgebiets in Niedersachsen feststellbar (Abb. 35). Es ist zu erkennen, dass in südlichen Bereichen des Modellgebietes, in denen ein niedriger Grundwasserstand herrscht, mehr Werte zu hoch berechnet werden als im 1-Schichtmodell. Insgesamt werden bei der 5-Schichtmodellierung mehr Messwerte zu hoch berechnet als bei der 1-Schichtmodellierung.

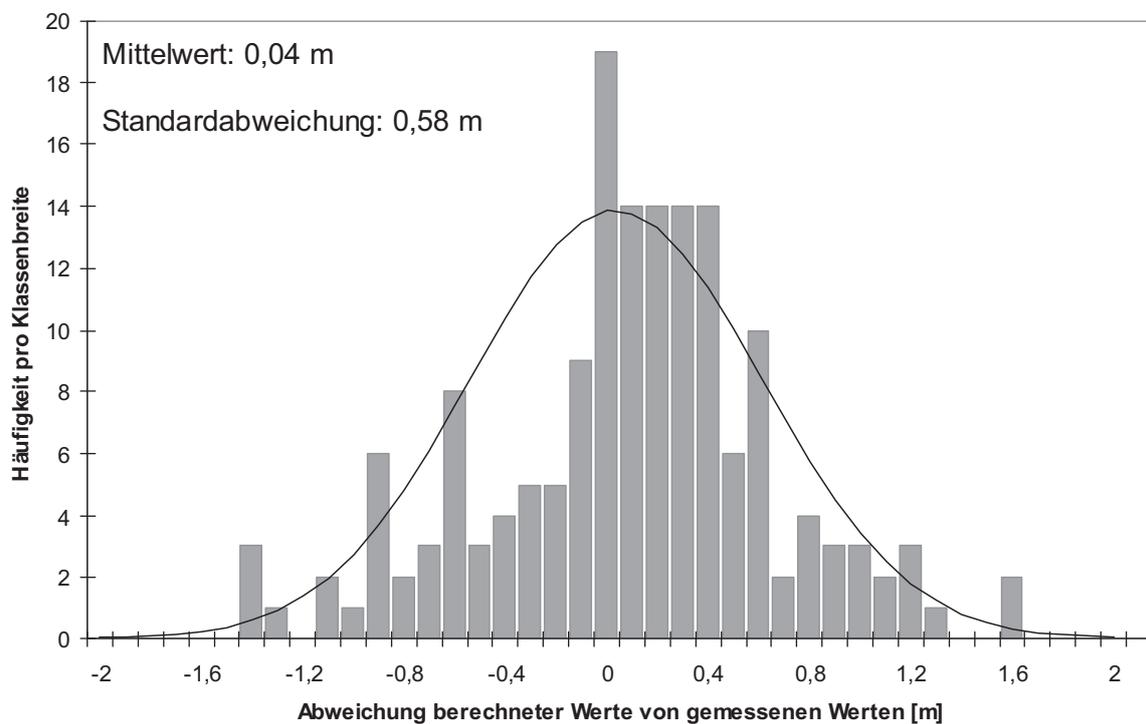


Abb. 34: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen Grundwasserständen, die mit dem kalibrierten 5-Schichtmodell berechnet werden und im Herbst 2007 gemessen, zu Vergleichszwecken ist die Gaußsche Normalverteilungskurve dargestellt

Die Varianz im 5-Schichtmodell ist geringfügig besser als im Ergebnis der 1-Schichtmodellierung. Der Anteil der RMS an der Gesamtpotentialdifferenz ist mit 1,49 %, bzw. 1,47 % bei beiden Ergebnissen fast identisch. Abb. 36 zeigt die Korrelation zwischen berechneten und gemessenen Werten für die 163 verwendeten Messstellen bei der 5-Schichtmodellierung. Zur Kalibrierung im 5-Schichtmodell erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse in Abschn. 7.3.

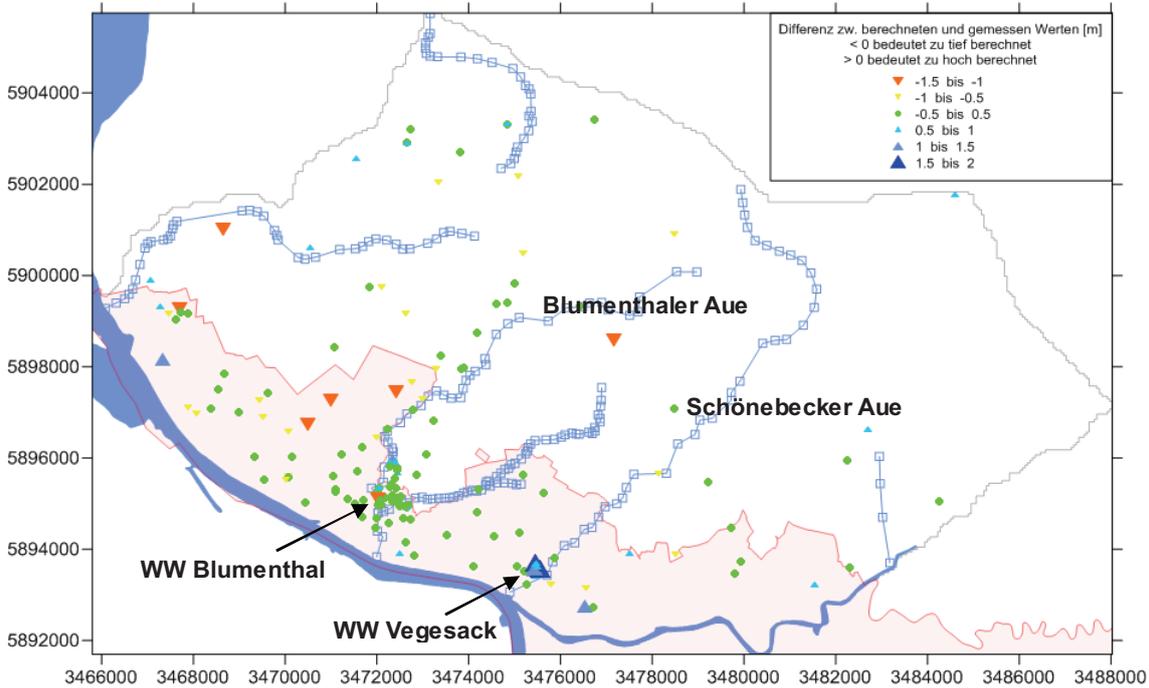


Abb. 35: Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen nach der Kalibrierung des 5-Schichtmodells

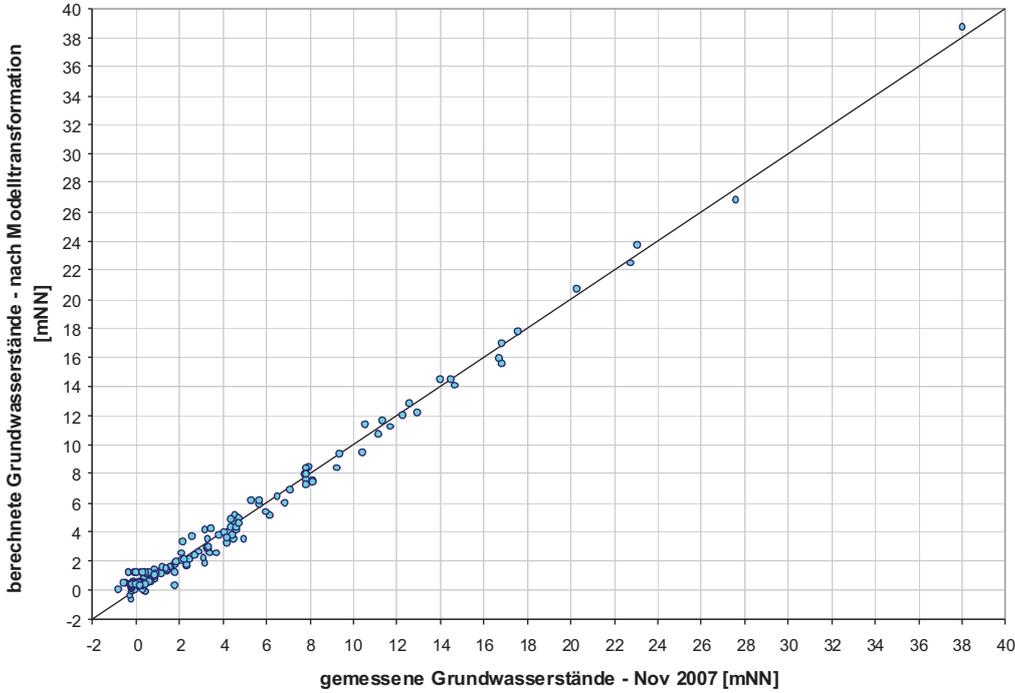


Abb. 36: Korrelation gemessener und berechneter Grundwasserstände nach der Modellkalibrierung im 5-Schichtmodell, die Linie kennzeichnet eine Übereinstimmung

6.3 Vergleich zwischen 1-Schichtmodell und 5-Schichtmodell

In Abb. 37 ist die Differenz zwischen der im 1-Schichtmodell ermittelten GW-Druckspiegeloberfläche und der im 5-Schichtmodell für Schicht 5 ermittelten gezeigt. Im Bereich der Schönebecker Aue sind positive Werte dargestellt. Das bedeutet, dass der Grundwasserdruckspiegel für diesen Bereich im 1-Schichtmodell höher berechnet wird als im 5-Schichtmodell. Westlich davon, im Bereich des Oberlaufs der Blumenthaler Aue, verhält es sich umgekehrt.

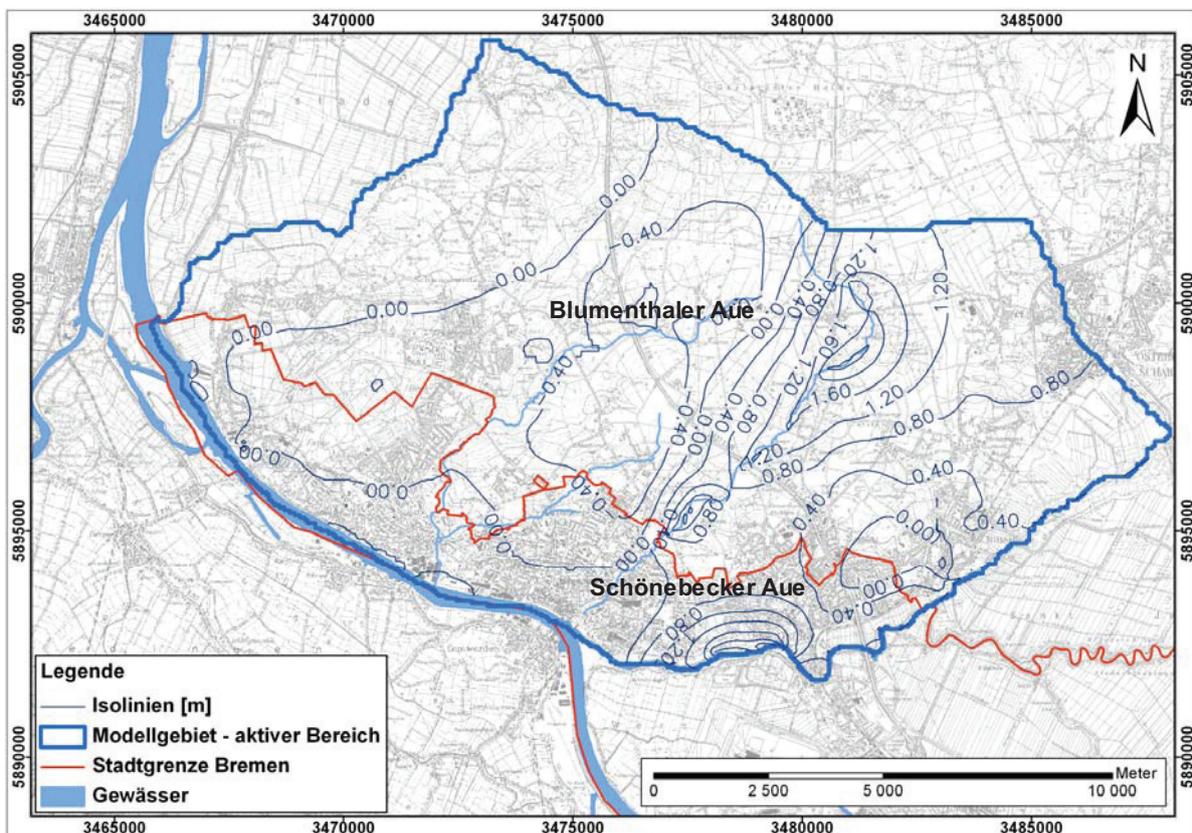


Abb. 37: Differenzen zwischen dem im 1-Schichtmodell modellierten Grundwasserdruckspiegel und dem im 5-Schichtmodell modellierten genutzten Grundwasserdruckspiegel (Schicht 5)

Tab. 8 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierungen im 1-Schichtmodell und im 5-Schichtmodell zusammenfassend in der Übersicht. Die maximalen Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten unterscheiden sich bei den beiden Modellvarianten um mehrere Zentimeter. Die Varianz, die RMS und der Anteil der RMS an der (modellunabhängigen) Ge-

samtpotentialdifferenz sind für beide Modellvarianten nahezu gleich gut, obwohl in Abb. 37 zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Modellvarianten zu erkennen sind. Das liegt daran, dass die statistische Auswertung nur für die Punkte der eingegebenen Messstellen erfolgt, die größten Differenzen in Abb. 37 aber in Bereichen liegen, wo nur wenige Messstellen vorhanden sind.

Tab. 8: Ergebnisübersicht und -vergleich von 1-Schichtmodell und 5-Schichtmodell

	1-Schichtmodell	5-Schichtmodell
Anzahl Messstellen	163	163
max negative Abweichung [m]	-1,79	-1,48
max positive Abweichung [m]	1,48	1,53
Varianz [m ²]	0,34	0,33
RMS [m]	0,58	0,57
% der Gesamtpotentialdifferenz	1,49	1,47

6.4 Ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte

Die errechneten Durchlässigkeitsbeiwerte für verschiedene Regionen im Modellgebiet bewegen sich zwischen $3,2 \times 10^{-6}$ und $9,3 \times 10^{-4}$ m/s und beschreiben damit Eigenschaften von Schichten, die gering bis mittel durchlässig sind (SCHLIMM 1996). Die flächendeckende Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte ist in Anhang D dargestellt.

Abb. 38 zeigt die Häufigkeit der im 1-Schichtmodell ermittelten logarithmierten Durchlässigkeitsbeiwerte im Vergleich zur Normalverteilung.

Mit dem Modul PEST (DOHERTY 2002) werden bei der 1-Schichtmodellierung ebenfalls Durchlässigkeitsbeiwerte für die Gewässerbetten der eingebauten Oberflächengewässer und des Drainagesystems am westlichen Rand des Modellgebiets ermittelt. Die Werte für die Oberflächengewässer und die Drainage sind in Tab. 9 dargestellt (s. a. Abschn. 4.2.2).

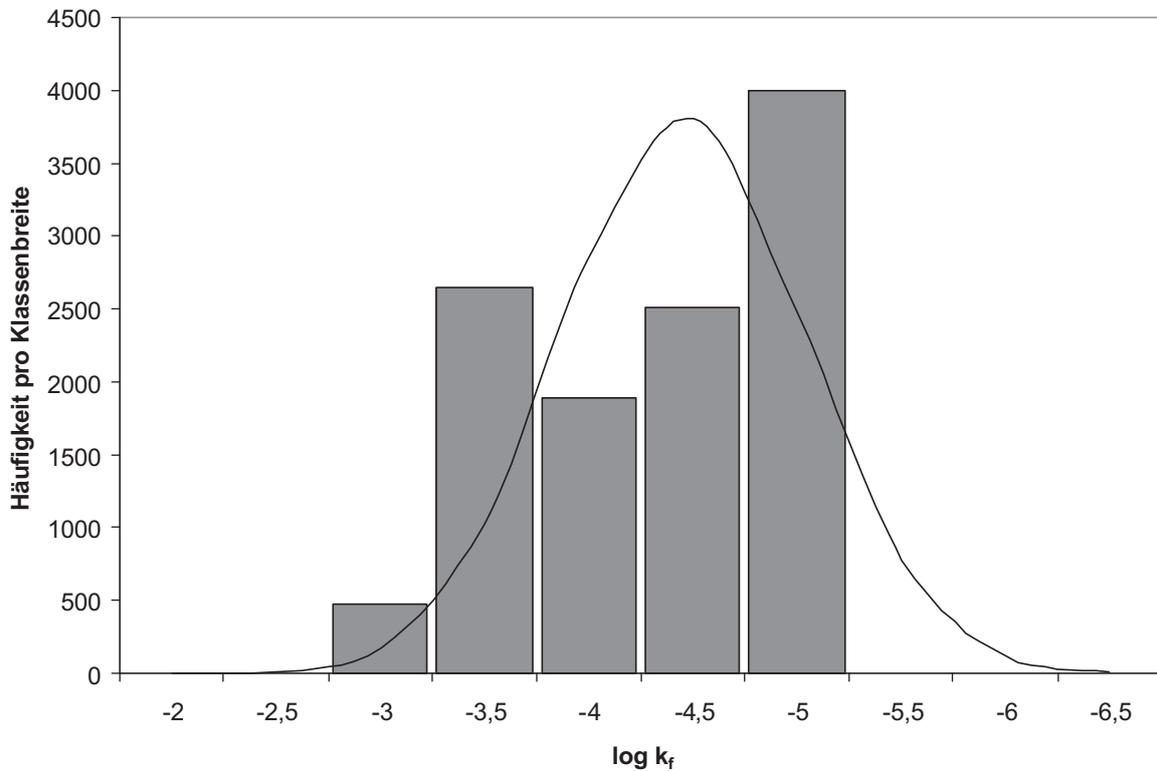


Abb. 38: Verteilung der logarithmierten Durchlässigkeitsbeiwerte im 1-Schichtmodell und Gaußsche Normalverteilungskurve

Tab. 9: Übersicht der ermittelten Durchlässigkeiten der Gewässerbetten

	Min [m/s]	Max [m/s]
Aschwardener Flutgraben	8×10^{-7}	8×10^{-7}
Mühlenfleth	2×10^{-6}	2×10^{-6}
Blumenthaler Aue	3×10^{-7}	3×10^{-6}
Beckedorfer Beeke	2×10^{-7}	6×10^{-7}
Schönebecker Aue	2×10^{-9}	2×10^{-6}
Ritterhude Beeke	8×10^{-5}	8×10^{-5}
Drainage	7×10^{-7}	7×10^{-6}

Für die 5-Schichtmodellierung ergeben sich nach der Kopplung von dem 1-Schichtmodell und dem 3D-Strukturmodell differenziertere horizontale und vertikale Durchlässigkeitsbeiwerte für die einzelnen Schichten. Die folgende Tab. 10 zeigt die Ergebnisse in der Übersicht.

Tab. 10: Übersicht der ermittelten Durchlässigkeiten im 5-Schichtmodell

		Min [m/s]	Max [m/s]		Min [m/s]	Max [m/s]
Layer 1	horizontal	3×10^{-6}	1×10^{-3}	vertikal	8×10^{-7}	3×10^{-4}
Layer 2	horizontal	5×10^{-7}	9×10^{-4}	vertikal	5×10^{-8}	6×10^{-4}
Layer 3	horizontal	3×10^{-6}	1×10^{-3}	vertikal	8×10^{-7}	3×10^{-4}
Layer 4	horizontal	5×10^{-7}	9×10^{-4}	vertikal	5×10^{-8}	6×10^{-4}
Layer 5	horizontal	3×10^{-6}	1×10^{-3}	vertikal	8×10^{-7}	3×10^{-4}

Die ermittelten Werte entsprechen den Eigenschaften von sandigen bis schluffigen Sedimenten (SCHLIMM 1996). In den Schichten 2 und 4, die den bindigen Fazies der Drenthe und Lauenburger Schichten entsprechen, sind die Werte in Richtung zu schluffigen, undurchlässigeren Sedimenten (als Folge der Umrechnung in Abschn. 5.4) verschoben.

Die Modellierung im 5-Schichtmodell ergibt differenziertere Häufigkeitsverteilungen der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte in den einzelnen Schichten. Auch diese sind in der folgenden Abb. 39 gegen die Normalverteilung aufgetragen und dargestellt.

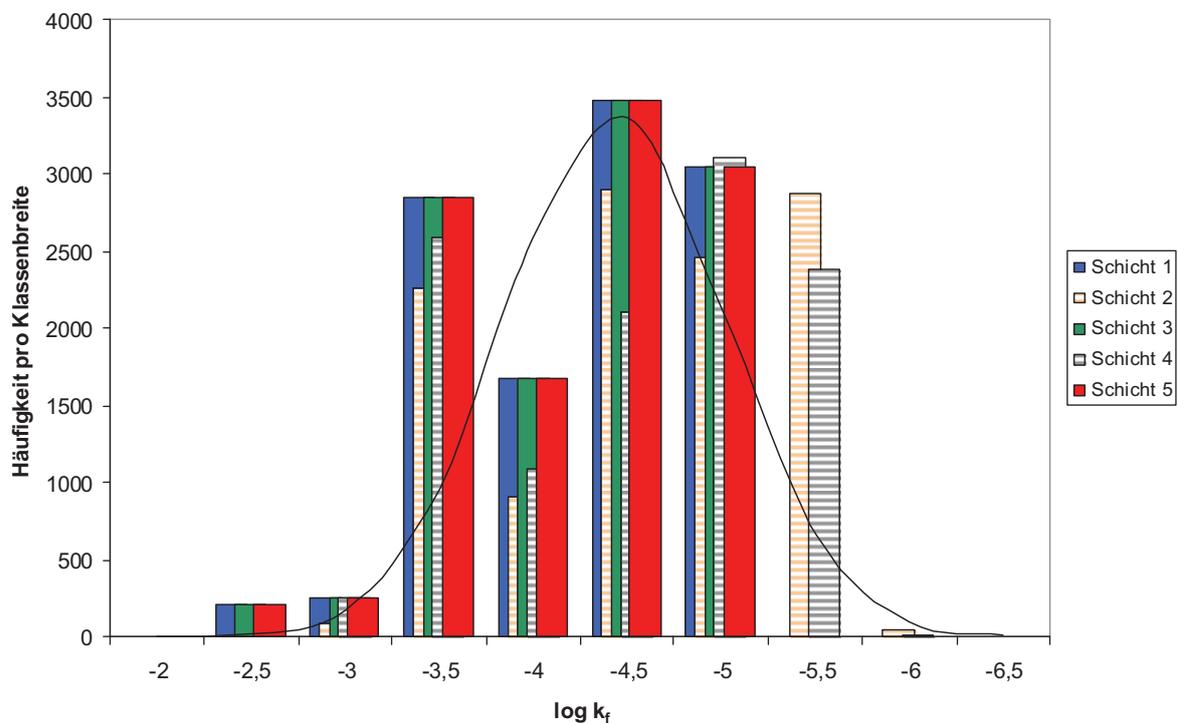


Abb. 39: Verteilung der logarithmierten Durchlässigkeitsbeiwerte in den Schichten 1 bis 5 des kalibrierten 5-Schichtmodells zusammen mit der Gaußschen Normalverteilungskurve

Entsprechend dem Einbau bei der Modellkopplung ist eine Verschiebung der Häufigkeiten in Richtung geringerer Durchlässigkeiten in den Schichten 2 und 4 feststellbar.

Die bei der 1-Schichtmodellierung ermittelten Werte für Oberflächengewässer und Drainage gehen unverändert in die 5-Schichtmodellierung ein. Eine ausführliche Diskussion, eine Bewertung der Ergebnisse und ein Vergleich zwischen 1-Schichtmodell und 5-Schichtmodell erfolgt in Abschn. 7.2 und Abschn. 7.3.

6.5 Wasserbilanzen für das Modellgebiet

Es soll gezeigt werden, wie viel Wasser in das Modellgebiet eingetragen und wie viel über die Vorfluter ausgetragen wird. Dazu werden Wasserbilanzen für das 1-Schichtmodell und das 5-Schichtmodell betrachtet.

In einem ersten Schritt werden hier die Gesamtwasserbilanzen dargestellt. In Abschnitt 7.4 folgt die Darstellung der Wasserbilanzen für Teilbereiche des Modellgebiets, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den Wasserbilanzen vorangegangener Arbeiten (MULL 1986, GEOUM 2006) zu erhalten.

Zunächst wird die Wasserbilanz für das 1-Schichtmodell betrachtet (Tab. 11). Die Neubildungs- und Entnahmemengen ergeben sich aus den Eingangsdaten. Die Zu- und Abflüsse über Oberflächengewässer, Drainagen und Festpotentialränder werden über das in PMWin (CHIANG 2005) integrierte Tool WATERBUDGET im Anschluss an die Kalibrierung ermittelt.

Tab. 11: Gesamtwasserbilanz (gerundet) für das 1-Schichtmodell

	Zufluss [Mio. m ³ /a]		Abfluss [Mio. m ³ /a]		Differenz [Mio. m ³ /a]
		%		%	
Ränder	0,6	1,86	11,9	36,91	-11,3
Neubildung	29,78	92,37	-		29,78
Entnahme	-		8,14	25,25	-8,14
Oberflächengewässer	1,86	5,77	9,84	30,52	-7,98
Drainagen	-		2,36	7,32	-2,36
<u>Summe</u>	32,24		32,24		0,0

Die Zu- und Abflüsse über die Oberflächengewässer werden in Tab. 12 noch einmal differenziert betrachtet. Die Summenwerte in Tab. 12 entsprechen den Einzelwerten bei „Oberflächengewässer“ in Tab. 11.

Tab. 12: Wasserbilanz (gerundet) für die Oberflächengewässer im 1-Schichtmodell

Infiltration / Exfiltration [m ³ /a] durch Oberflächengewässer			
	Zufluss	Abfluss	Differenz
Aschwardener Flutgraben	22 000	2 277 000	-2 255 000
Mühlenfleth	263 000	3 619 000	-3 356 000
Blumenthaler Aue	423 000	453 000	-30 000
Beckedorfer Beeke	554 000	-	554 000
Schönebecker Aue	83 000	2 894 000	-2 811 000
Ritterhuder Beeke	517 000	599 000	-82 000
<u>Summe</u>	1 863 000	9 842 000	-7 979 000

Tab. 13 zeigt die Gesamtwasserbilanz für das 5-Schichtmodell. Auch hier sind sowohl beim Zufluss die Grundwasserneubildung als auch beim Abfluss die Grundwasserentnahmen als Eingangsdaten (Randbedingungen) vorgegeben. Die Zu- und Abflüsse der Oberflächengewässer werden in Tab. 14 für das 5-Schichtmodell im Detail betrachtet. Ein Vergleich der Wasserbilanzen beider Modelle ergibt eine Differenz von 0,74 Mio. m³/a (4 mm/a) im Gesamtwasserumsatz für das ganze Modellgebiet. Im 1-Schichtmodell wird dabei geringfügig mehr Wasser umgesetzt als im 5-Schichtmodell. Der Unterschied resultiert ausschließlich aus geänderten Zu- und Abflüssen über die Ränder und die Oberflächengewässer.

Tab. 13: Gesamtwasserbilanz (gerundet) für das 5-Schichtmodell

	Zufluss [Mio. m ³ /a]		Abfluss [Mio. m ³ /a]		Differenz [Mio. m ³ /a]
		%		%	
Ränder	0,3	1,0	12,1	38,4	-11,8
Neubildung	29,8	94,6	-		29,8
Entnahme	-		8,1	25,7	-8,1
Oberflächengewässer	1,4	4,4	8,8	27,9	-7,4
Drainagen	-		2,5	8,0	-2,5
<u>Summe</u>	31,5		31,5		0

Tab. 14: Wasserbilanz (gerundet) für die Oberflächengewässer im 5-Schichtmodell

Infiltration / Exfiltration [m ³ /a] durch Oberflächengewässer			
	Zufluss	Abfluss	Differenz
Aschwardener Flutgraben	18 000	2 259 000	-2 241 000
Mühlenfleth	225 000	3 461 000	-3 236 000
Blumenthaler Aue	346 000	284 000	62 000
Beckedorfer Beeke	554 000	-	554 000
Schönebecker Aue	115 000	2 152 000	-2 037 000
Ritterhuder Beeke	137 000	626 000	-489 000
<u>Summe</u>	1 396 000	8 781 000	-7 385 000

Eine Diskussion und Bewertung der Ergebnisse erfolgt in Abschn. 7.4. Eine grafische Darstellung der Gesamtwasserbilanzen findet sich ergänzend in Anhang C.

6.6 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse soll zeigen, wie sehr die Modellergebnisse von verschiedenen Modelldaten beeinflusst sind. Im Folgenden wird die Reaktion des 5-Schichtmodells auf die Veränderung einzelner Eingangsdaten und der Durchlässigkeitsbeiwerte beschrieben. Als Maß wird dabei die Varianz betrachtet (Tab. 15).

Die Anbindung der Oberflächengewässer hat einen deutlichen Einfluss auf die Modellergebnisse. Eine Verbesserung der Durchlässigkeitsbeiwerte des Gewässerbettes um Faktor 10 führt zu einer Varianz von $0,76 \text{ m}^2$ und insgesamt zu niedrigen Wasserständen im Modellgebiet. Die Grundwasserstände im Verlauf der Oberflächengewässer sind deutlich sichtbar beeinflusst. Bei einer Verringerung der Durchlässigkeit um Faktor 10 ergeben sich eine Varianz von $1,57 \text{ m}^2$ und insgesamt zu hohe Wasserstände für das Modellgebiet. Die Mächtigkeit des Gewässerbettes und die Breite des Gewässers haben weniger Einfluss auf die Modellergebnisse. Eine Erhöhung der Mächtigkeit des Gewässerbettes um 10 cm führt zu einer, im Vergleich zur ursprünglichen Varianz, nahezu unveränderten Varianz von $0,33 \text{ m}^2$. Eine Verbreiterung der Flüsse um 1 m, die unabhängig durchgeführt und betrachtet wird, ergibt ebenfalls eine Varianz von $0,33 \text{ m}^2$.

Bei der Drainage im Westen des Modellgebiets wird der Einfluss auf das Modellergebnis durch eine Veränderung der Durchlässigkeitsbeiwerte überprüft. Sie werden dazu ebenfalls um Faktor 10 erhöht und erniedrigt. Die Erhöhung führt dabei zu einer Varianz von $0,53 \text{ m}^2$ und die Erniedrigung zu einer Varianz von $0,42 \text{ m}^2$. Sichtbare Auswirkungen ergeben sich im Nordwesten des Modellgebiets, am Modellrand, wo eine verbesserte Anbindung der Drainage zu 1 m bis 2 m tieferen Wasserständen und eine verschlechterte Anbindung zu 1 m bis 2 m höheren Wasserständen führen.

Eine Veränderung der Grundwasserentnahmen ergibt geringfügig schlechtere Varianzen und nur lokal um die Grundwasserentnahmebrunnen eine Veränderung der Grundwasserstände. Wird die Grundwasserentnahme aller Entnahmebrunnen gleichmäßig um 10 %, auf dann $8,95 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$, erhöht, errechnet sich eine Varianz von $0,34 \text{ m}^2$. Wenn sie um 10 %, auf dann $7,32 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$, verringert wird, beträgt die Varianz $0,37 \text{ m}^2$.

Die Grundwasserneubildung beeinflusst das Modell deutlicher. Eine Veränderung führt zu sichtbaren Änderungen im Wasserstand am Nordostrand des Modellgebiets und zu schlech-

teren Varianzen. Eine einheitliche Erhöhung der Grundwasserneubildung um 10 % auf 32,76 Mio. m³/a ergibt eine Varianz von 0,49 m² und ca. 3 m erhöhte Wasserstände im Nordosten. Die Verringerung der Grundwasserneubildung um 10 % auf 26,8 Mio. m³/a führt zu einer Varianz von 0,56 m² und um bis zu 2 m tieferen Wasserständen im Nordosten (s. a. Abschn. 7.3).

Tab. 15: Sensitivität des 5-Schichtmodells auf die Veränderung verschiedener Eingangsdaten und der Durchlässigkeitsbeiwerte

Datensatz	Veränderung	Varianz [m ²]	Varianz [m ²]
		1-Schichtmodell	5-Schichtmodell
Durchlässigkeit der Gewässerbetten	Verbesserung um Faktor 10	1,42	0,76
	Verschlechterung um Faktor 10	1,97	1,57
Durchlässigkeit der Drainage im Nordwesten	Verbesserung um Faktor 10	0,56	0,53
	Verschlechterung um Faktor 10	0,41	0,42
Mächtigkeit des Gewässerbettes	Erhöhung um 10 cm	0,34	0,33
Gewässerbreite	Verbreiterung um 1 m	0,34	0,33
Grundwasserentnahme	Erhöhung um 10 %	0,38	0,34
	Erniedrigung um 10 %	0,36	0,37
Grundwasserneubildung	Erhöhung um 10 %	0,37	0,49
	Erniedrigung um 10 %	0,63	0,56
vertikale Durchlässigkeit der Modellschichten	Verbesserung um Faktor 5	-	0,34
	Verschlechterung um Faktor 0,5	-	0,35
horizontale Durchlässigkeit der Modellschichten	Verbesserung um 10 %	0,55	0,59
	Verschlechterung um 10 %	0,34	0,82
vertikale und horizontale Durchlässigkeit der Modellschichten	Verbesserung um 10 %	-	0,60
	Verschlechterung um 10 %	-	0,83

Werden die Durchlässigkeiten der einzelnen Schichten variiert, zeigt sich ein unterschiedlich starker Einfluss. Eine Verschlechterung oder Verbesserung der vertikalen Durchlässigkeiten um 10 % zeigt keinen messbaren Einfluss auf die Varianz. Eine Verschlechterung um den Faktor 0,5 oder eine Verbesserung um den Faktor 5 vergrößert die Varianz ab der zweiten Komastelle. Das Gesamtbild der Grundwasserdruckspiegels bleibt nahezu unverändert. Die horizontale Durchlässigkeit hat einen größeren Einfluss auf die Varianz und die Modellergebnisse. Wird die horizontale Durchlässigkeit um 10 % verringert, so ergibt sich eine Varianz von 0,82 m² und Wasserstände die im Nordosten des Modellgebiets um bis zu 4 m zu

hoch berechnet werden. Zusätzlich ist die Grundwasserhochfläche (s. a. Abb. 32) deutlicher im Modellergebnis ausgeprägt. Bei einer Verbesserung der horizontalen Durchlässigkeit um 10 % errechnet sich die Varianz zu $0,59 \text{ m}^2$. Die Wasserstände im Nordosten des Modellgebiets werden dabei über 3 m zu niedrig berechnet.

Eine Sensitivitätsanalyse des 1-Schichtmodells ergibt bei gleicher Veränderung der Datensätze wie im 5-Schichtmodell, ähnliche Reaktionen und Beeinflussungen der Modellergebnisse. In Tab. 15 sind die Veränderungen in den Datensätzen und die daraus resultierenden Veränderungen in der Varianz in der Übersicht dargestellt.

7 Diskussion / Modellaussagen

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse diskutiert und bewertet. Es werden dabei die Ergebnisse der durchgeführten Stichtagsmessungen, der 1-Schichtmodellierung und der 5-Schichtmodellierung betrachtet. Abschnitt 7.4 zeigt die Wasserbilanzen verschiedener Arbeiten (s. a. Abschn. 4.1.1) im Modellgebiet und vergleicht sie miteinander, um zeitliche Veränderungen im genutzten Grundwasserkörper und die Auswirkungen unterschiedlicher Modellkonzepte auf Modellergebnisse darzustellen. Abschließend werden die Rasterverfeinerung im Zuge der Modellierung und die daraus entstandenen Vor- und Nachteile erläutert.

7.1 Stichtagsmessungen

Die ermittelten Messwerte unterscheiden sich nicht grundsätzlich von denen anderer Arbeiten im Untersuchungsgebiet (MULL 1986, GEOUM 2006, INGENIEURGESELLSCHAFT DR. SCHMIDT MBH 2009). Festgestellte Abweichungen sind auf saisonale Schwankungen und regionale Veränderungen in der Bewirtschaftung des Grundwasserleiters zurückzuführen, u. a. verringerte Grundwasserentnahmen im Bereich der Bremer Wollkämmerei AG (s. Abschn. 7.4). Vergleiche unterschiedlicher Messkampagnen erlauben es, Messfehler und systematische Fehler in der Datenübertragung weitgehend auszuschließen. Durch die Recherche vor Ort und die Klassifizierung der einzelnen Messstellen (s. a. Abschn. 4.2.2) wird eine begründete Vorauswahl aus den im Modellgebiet vorhandenen Messstellen getroffen (s. a. Abb. 9). Die zum Vergleich vorhandenen Messwerte kommen von 163 Messstellen, die weder tidebeeinflusst, noch zwischenzeitlich trocken gefallen oder nachweislich in isolierten Grundwasserleitern verfiltert sind.

Die aus den Messwerten konstruierten GW-Druckspiegelgleichenpläne unterscheiden sich in einigen Bereichen deutlich von denen anderer Arbeiten im Untersuchungsgebiet (GEOUM 2006, INGENIEURGESELLSCHAFT DR. SCHMIDT MBH 2009) und stimmen für andere Regionen gut überein (MULL 1986). Zwar beschreiben alle Arbeiten eine generelle Grundwasserfließrichtung von Nordost nach Südwest, aber in Abschnitten der Oberflächengewässer Blumenthaler Aue, Beckedorfer Beeke und Schönebecker Aue weichen die Ergebnisse signifikant voneinander ab (s. a. Abschn. 7.4). Diese Abweichungen im Bereich der Oberflächengewässer sind auf eine unterschiedliche Anbindung derselben an den Grundwasserleiter bei der Modellerstellung zurückzuführen und spiegeln sich deutlich in den unterschiedlich großen In- und Exfiltrationsmengen der Oberflächengewässer wieder.

Anders als bei GEOUM (2006) und INGENIEURGESELLSCHAFT DR. SCHMIDT MBH (2009) wird bei der Konstruktion des GW-Druckspiegelgleichenplans zunächst untersucht, in welchen Abschnitten die Oberflächengewässer im Modellgebiet potentiell in den genutzten Grundwasserleiter einschneiden und ihn tatsächlich beeinflussen. Artesische Bereiche, die unter anderem im Verlauf der Schönebecker Aue nachgewiesen werden (s. a. Abb. 13), sprechen gegen einen durchgehenden Kontakt zwischen Oberflächengewässer und genutztem Grundwasserleiter. In solchen Abschnitten wird ein Gewässereinfluss bei der Konstruktion des GW-Druckspiegelgleichenplans ausgeschlossen und nicht berücksichtigt.

Insgesamt zeigen die GW-Druckspiegelgleichenpläne der verschiedenen Arbeiten in den jeweils überlappenden Bereichen eine ähnliche Gesamtpotentialdifferenz. In Teilbereichen werden aber unterschiedliche GW-Druckspiegelniveaus und ein unterschiedliches Gefälle des Grundwasserdruckspiegels ermittelt. Vermutlich wurden im Anschluss an frühere Messkampagnen bei der Konstruktion von GW-Druckspiegelgleichenplänen nicht ausschließlich Messstellen benutzt, die im genutzten Grundwasserleiter verfiltert sind. Vor diesem Hintergrund werden die Messstellen klassifiziert (Abschn. 4.2) und nur solche verwendet, die im genutzten Grundwasserleiter verfiltert sind. Eine Überprüfung der Modellergebnisse zeigt, dass ein Großteil der nicht im genutzten Grundwasserleiter verfilterten Messstellen in Bereichen liegt, wo abgekoppeltes (schwebendes) Grundwasser zu erwarten ist.

7.2 Kalibrierung im 1-Schichtmodell

In der Diskussion zur Kalibrierung im 1-Schichtmodell werden verschiedene Punkte betrachtet. Im Einzelnen sind das:

- Die Art und Weise der Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten
- Die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte selbst
- Der Einbau von geologischen Strukturen
- Der resultierende GW-Druckspiegelgleichenplan
- Abweichungen in Bereichen einzelner Messstellen

Die Kalibrierung wird ähnlich wie bei BACHMANN et al. (2007) durchgeführt. Die im Modellgebiet erstellten Zonen orientieren sich an der zuvor ermittelten Ausdehnung der bindigen Schichten im Untergrund. Für jede der Zonen bestimmt PEST (DOHERTY 2002) Durchlässigkeitsbeiwerte. Darüber hinaus gibt es durch die Anwendung von PEST (DOHERTY 2002) er-

mittelte Durchlässigkeitsbeiwerte für die Gewässer- und Drainagebetten. Das Verfahren selbst ist dabei nicht auf eine Maximalanzahl zu ermittelnder Parameter beschränkt. So werden bei BACHMANN et al. (2007) in einem Vorgang mehr als 430 Parameter ermittelt. Allerdings ist die Anzahl von möglichen Zonen und die Anzahl von möglichen Stützpunkten, die eine Zone aufbauen, durch PMWin (CHIANG 2005) begrenzt (s. Abschn. 2.2). Wie in Abschn. 5.3 beschrieben, werden für die Kalibrierung zunächst wenige grobe Zonen gebildet. Im Laufe der Kalibrierung zeigt sich, dass eine Verfeinerung der Zonengrenzen durch den Einbau von zusätzlichen Stützpunkten genauso wie das Hinzufügen von zusätzlichen Zonen zu besseren Ergebnissen in Hinsicht auf die Varianz zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen führt. Bei der vorhandenen hohen Messstellendichte im Südteil des Modellgebiets wird das besonders deutlich (s. a. Abb. 20). Die Beschränkung durch PMWin (CHIANG 2005), nicht mehr als 20 Zonen verwenden zu können, hat sich bei dem angewendeten Verfahren als Nachteil erwiesen. Es wird erwartet, dass ohne diese Limitierung genauere Ergebnisse in Hinblick auf die Güte der Kalibrierung möglich sind. In Hinblick auf die Fragestellung nach einem Übersichtsmodell und einer Grundlage für eine Modellkopplung wird dieser Nachteil vernachlässigt. Zusätzlich zur automatischen Kalibrierung ist es notwendig, an verschiedenen Stellen manuell nachzukalibrieren (s. Abschn. 5.3). Dadurch wird die Güte der Kalibrierung in Hinblick auf die Varianz der Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten verbessert. In Hinblick auf die Fragestellung nach grundsätzlicher Fließrichtung, Gradient und Wasserbilanz haben diese kleinräumigen Änderungen aber ebenfalls nur geringen Einfluss.

Die bei der Kalibrierung im 1-Schichtmodell ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte für den genutzten Grundwasserleiter entsprechen in ihrer Spannweite denen glaziofluvial gebildeter Sedimente und weisen auf die Verzahnung verschiedener Lithofazies hin (s. a. DE MARSILY et al. 1998, DOMENICO & SCHWARTZ 1998). Im Unterschied zur Feststellung von DOMENICO & SCHWARTZ (1998), dass geologische Parameter oft log-normal verteilt sind, weisen die für das 1-Schichtmodell ermittelten logarithmierten Durchlässigkeitsbeiwerte eine bimodale Verteilung auf. Eine Erklärung ist, dass bei DOMENICO & SCHWARTZ (1998) die Eigenschaften von Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern getrennt betrachtet werden und diese Trennung im 1-Schichtmodell nur eingeschränkt möglich ist. Durch die Zonierung (Abb. 20) lassen sich zwar Bereiche mit ausgeprägten Grundwassergeringleitern von solchen ohne unterscheiden, eine exakte Abgrenzung ist aber nicht möglich. In der in Abb. 38 dargestellten Häufigkeitsverteilung zeigen sich sowohl die Eigenschaften eines Grundwassergeringleiters als auch die eines Grundwasserleiters. ENTENMANN (1998) ermittelt bei der Auswertung eines Pumptests für Schichten aus Torf und Schmelzwassersanden eine ähnliche Verteilung.

Die im Modellgebiet ausgebildeten bindigen Schichten werden im 1-Schichtmodell nur bedingt berücksichtigt. Mit der Zonierung bei der Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten wird zwar die grundsätzliche Ausdehnung bindiger Schichten im Untergrund beachtet, eine Differenzierung über die Tiefe ist aber nicht möglich. Geologische Strukturen, die als Ursache für abgekoppelte Grundwasserleiter gelten, können nicht eingebaut werden. Für die Beantwortung von Fragen in Hinblick auf Auswirkungen bindiger Strukturen im Untergrund auf den genutzten Grundwasserleiter ist das 1-Schichtmodell nicht ausreichend.

Das 1-Schichtmodell liefert also einen Überblick zum allgemeinen Grundwasserströmungsverhalten in Bremen-Nord (s. a. Abb. 12, Abb. 27 und Abb. 28), aber keine Antworten zu spezielleren Fragestellungen. Wesentliche Abweichungen zum konstruierten Grundwassergleichplan sind hier im Bereich des Oberlaufs der Schönebecker Aue zu beobachten, wo artesische Verhältnisse nicht ausreichend berücksichtigt werden können und als Folge davon der Grundwasserdruckspiegel im 1-Schichtmodell zu niedrig berechnet wird.

Für den Anteil der RMS am gemessenen Gesamtpotential wird bei der Modellierung im 1-Schichtmodell ein Wert von 1,49 % erreicht. MANDLE (2002) weist darauf hin, dass die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Werten weniger als 10 % des gesamten gemessenen Grundwassergradienten im Modellgebiet betragen soll und ANDERSON & WOESSNER (2002) schreiben, dass die Differenz in Bezug zum Grundwassergradienten möglichst klein sein soll. Das erreicht das 1-Schichtmodell und auch im Vergleich mit anderen Arbeiten (s. TIMMONS et al. 2006 und ZIPPEL & HANNAPPEL 2008) wird hier allgemein von einer guten Kalibrierung gesprochen.

Die größten Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten entsprechen vom Betrag den Schwankungen der Messwerte an einzelnen Messstellen während der Stichtagmessungen von 2005 bis 2007 (Abb. 10, Abb. 30, Anhang B und Anhang I). Auch für Ausschnitte des Modellgebiets erreichen zuvor durchgeführte Arbeiten eine Kalibrierung mit ähnlich großen Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Werten. Die von MULL (1986) berechneten Grundwasserstände weichen im Mittel um 0,2 m von gemessenen ab und die von GEOUM (2006) berechneten im Mittel um 0,5 m. Die Abweichungen sind dort am größten, wo sich in Bremen Entnahmebrunnen der Wasserwerke befinden oder in Niedersachsen nur eine geringe Messstellendichte vorhanden ist. Ein systematischer Fehler in den übermittelten Entnahmemengen kann grundsätzlich zwar nicht ausgeschlossen werden und hätte Auswirkungen auf die Parameterermittlung und die Güte der Kalibrierung. Nach intensiver Überprüfung langjähriger Datenaufzeichnungen und einem Abgleich mit anderen Arbeiten (MULL 1986, GEOUM 2006) wird aber davon ausgegangen, dass die übermittelten

Grundwasserentnahmemengen korrekt sind. Es wird vermutet, dass die Ursache der Abweichungen in der Homogenisierung der Grundwasserentnahmemengen (Abschn. 4.3.2) liegt. Fehler im Modell der Grundwasserneubildung (Abschn. 2.3), ungenau ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte oder Messfehler im Gelände können aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Darüber hinaus wird vermutet, dass die Diskretisierung im Bereich der Grundwasserentnahmebrunnen (Abschn. 5.2) nicht ausreichend ist, um hier zu besseren Ergebnissen zu kommen. Da die Ergebnisse in Hinblick auf die Fragestellung zufriedenstellend sind und eine Gitterverfeinerung auch mit Nachteilen verbunden ist (Abschn. 7.5), wird hier darauf verzichtet, das Gitter weiter zu verfeinern. Bei einer Weiterentwicklung des Modells (Abschn. 8.1) sollte dieser Punkt beachtet werden.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass eine Veränderung verschiedener Eingangsdatensätze unterschiedliche Auswirkungen auf die Güte der Modellkalibrierung und das Modellergebnis hat. Sie liefert eine Erklärung für große Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten. Eine Veränderung der Grundwasserentnahmen um 10 % verschlechtert die Güte der Kalibrierung in Hinblick auf die Varianz nur geringfügig und führt nur in direkter Umgebung von Grundwasserentnahmebrunnen zu unterschiedlichen Wasserständen. Es wird vermutet, dass die Berücksichtigung von tatsächlichen Grundwasserentnahmemengen, die einen direkten zeitlichen Bezug zu den durchgeführten Stichtagsmessungen haben, die Güte der Kalibrierung verbessert (s. a. Abschn. 4.3.2). Eine deutliche Veränderung der Durchlässigkeiten in den Gewässerbetten und der Drainage um Faktor 10 hat eine größere Auswirkung auf die Güte der Kalibrierung und das Ergebnis im 1-Schichtmodell. Es muss dabei beachtet werden, dass die Änderungen über den gesamten Verlauf der Gewässer und der Drainage durchgeführt werden. Bei einer Detailbetrachtung verbessern geringere Änderungen in begrenzten Abschnitten die Güte der Kalibrierung, ohne das Gesamtergebnis wesentlich zu beeinflussen. Voraussetzung dafür ist allerdings eine bessere Kenntnis von lokalen Strukturen und kleinen hydraulischen Fenstern im Untergrund.

Eine Veränderung der Grundwasserneubildung um 10 % ohne die gleichzeitige Änderung anderer Daten beeinflusst die Güte der Modellkalibrierung und das Modellergebnis sichtbar. Wird eine solche Änderung zu Beginn der Modellierung durchgeführt, ist davon auszugehen, dass sich auch Auswirkungen auf die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte ergeben. Da sowohl LEMKE & ELBRACHT (2008) als auch HERMANN et al. (2009) darauf hinweisen, dass GROWA06V2 (KUNKEL et al. 2006) als Eingangsdatensatz für eine mittlere Grundwasserneubildung im Lockergestein plausible Werte liefert, ist eine Änderung nicht sinnvoll.

7.3 Kopplung mit dem 3D-Strukturmodell

Im folgenden Abschnitt wird die Modellkopplung in Zusammenhang mit den Grundsatzfragen diskutiert. Es wird auf die Tiefenlage von Messstellen und Entnahmehbrunnen eingegangen und überprüft, ob das gekoppelte Modell Aussagen des 3D-Strukturmodells bestätigt oder nicht.

Die Modellkopplung selbst erfolgt in zwei Schritten durch die Übertragung von Schichtgrenzen aus dem 3D-Strukturmodell in das Strömungsmodell, wie in Abschn. 5.4 beschrieben. Im Zuge der Modellkopplung werden die Durchlässigkeitsbeiwerte für die verschiedenen Schichten ermittelt und eingebaut. Eine Betrachtung der Häufigkeiten für die auf das 5-Schichtmodell umgerechneten, logarithmierten Durchlässigkeitsbeiwerte (Abb. 39) zeigt für die einzelnen Schichten trotz der Trennung von Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern weiterhin eine bimodale Verteilung. Entsprechend der Umrechnung ist die Häufigkeitsverteilung der logarithmierten Durchlässigkeitsbeiwerte für die bindigen Schichten in Richtung schlechterer Durchlässigkeiten verschoben, die für die sandigen Schichten in Richtung besserer Durchlässigkeiten. Die Form der Verteilung erklärt sich für die Schichten 2 und 4 dadurch, dass in Bereichen, in denen keine bindigen Schichten vorhanden sind, sandige Schichten eingebaut werden (s. Abschn. 5.4), die zwar das Modellergebnis nicht beeinflussen, aber die Häufigkeitsverteilung der logarithmierten Durchlässigkeitsbeiwerte. Eine mögliche Erklärung für die Form der Verteilung in den Schichten 1, 3 und 5 ist, dass auf eine Differenzierung innerhalb der sandigen Schichten verzichtet wurde und sich hier Fazieswechsel widerspiegeln.

Die gesamte Umrechnung der im 1-Schichtmodell ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte auf die im 5-Schichtmodell verwendeten Schichtpakete ergibt auch mit der etwas größeren Gesamtspanne plausible Werte für glaziofluvial gebildete Schichten (s. a. DE MARSILY et al. 1998). Die Kalibrierung ist dabei in ihrer Güte mit der des 1-Schichtmodells vergleichbar. Es zeigt sich jedoch, dass die hier berechneten GW-Druckspiegelgleichungen besser den für den genutzten Grundwasserleiter konstruierten entsprechen (Abb. 33).

Im 5-Schichtmodell werden Messstellen und Grundwasserentnahmehbrunnen in unterschiedlichen Tiefen eingebaut. Obwohl es meist nur möglich ist, eine Messstelle oder einen Grundwasserentnahmehbrunnen mit Filterstrecken von einigen Metern undifferenziert in Schichten einzubauen, die mehrere 10er Meter mächtig sind, ist der Einbau in die direkt beeinflusste hydrostratigrafische Einheit eine Verbesserung gegenüber dem 1-Schichtmodell. Der Einbau von Grundwasserentnahmehbrunnen in unterschiedlichen Modellschichten, zusammen mit der korrekten Berücksichtigung von hydraulischen Fenstern und bindigen Linsen, ist eine

wesentliche Verbesserung, da konkrete Auswirkungen sehr viel genauer ermittelt werden können. Eine weitere Verbesserung ergibt sich beim Einbau von Oberflächengewässern. Während im 1-Schichtmodell die eingebauten Oberflächengewässer die einzig vorhandene Schicht beeinflussen, werden im 5-Schichtmodell tiefendifferenzierte Einflüsse eingebaut. Die wesentlichen Ergebnisse und Unterschiede der 1-Schichtmodellierung und der 5-Schichtmodellierung sind in Tab. 16 aufgeführt.

Tab. 16: Vergleich von Aufwand der Modellerstellung und Nutzen der Ergebnisse zwischen 1-Schichtmodell und 5-Schichtmodell

	1-Schichtmodell	5-Schichtmodell
Zeitaufwand	mittel	hoch
Zellen	55071	275355
RMS [% der Gesamtpot.diff.]	1,49	1,47
Grundwasserfließrichtung	NE nach SW	NE nach SW
Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s]	$3,2 \times 10^{-6}$ bis $9,3 \times 10^{-4}$	5×10^{-7} bis 1×10^{-3}
Abgekoppeltes Grundwasser	nein	ja
Auswirkungen Grundwasserentnahmen	allgemein ermittelbar	in verschiedenen Schichten ermittelbar

Durch die Kopplung stehen nun Grundwasserdruckspiegel für verschiedene Schichten zur Verfügung. Abb. 40 zeigt die Differenz der GW-Druckspiegelhöhen der Schichten 1 und 5 im 5-Schichtmodell und weist damit auf die Notwendigkeit hin, bei entsprechender Fragestellung ein gekoppeltes Strömungsmodell einem einfachen Strömungsmodell vorzuziehen. Positive Abweichungen in Abb. 40 sind ein Hinweis auf abgekoppeltes Grundwasser, negative Abweichungen ein Hinweis auf artesische Verhältnisse. Abgekoppeltes Grundwasser ist danach östlich der Schönebecker Aue in verschiedenen Bereichen zu erwarten. Weitere Differenzen werden für einen kleinen Bereich im äußersten Westen des Modellgebiets ermittelt. Im Oberlauf der Schönebecker Aue selbst, ist mit artesischen Verhältnissen zu rechnen. Dies ist eine Bekräftigung der Hinweise aus Abb. 13. Die Hinweise auf artesische Verhältnisse im Osten und Nordwesten des Modellgebiets lassen sich hier nicht bestätigen.

Die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Wasserständen im Bereich einzelner Messstellen im 5-Schichtmodell sind mit denen im 1-Schichtmodell vergleichbar (s. a. Tab. 8). Allerdings ist die maximale negative Abweichung ein wenig geringer. Die größten Abweichungen bestehen auch hier in der Nähe großer Grundwasserentnahmen, im Verlauf von Oberflächengewässern und im durch das 3D-Strukturmodell ermittelten Grenzbereich

zwischen bindigen und sandigen Schichten im Untergrund. Eine Verfeinerung des Modells im Bereich von großen Grundwasserentnahmen ($> 0,2 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$) führt lokal zu einer besseren Korrelation von gemessenen und berechneten Grundwasserständen.

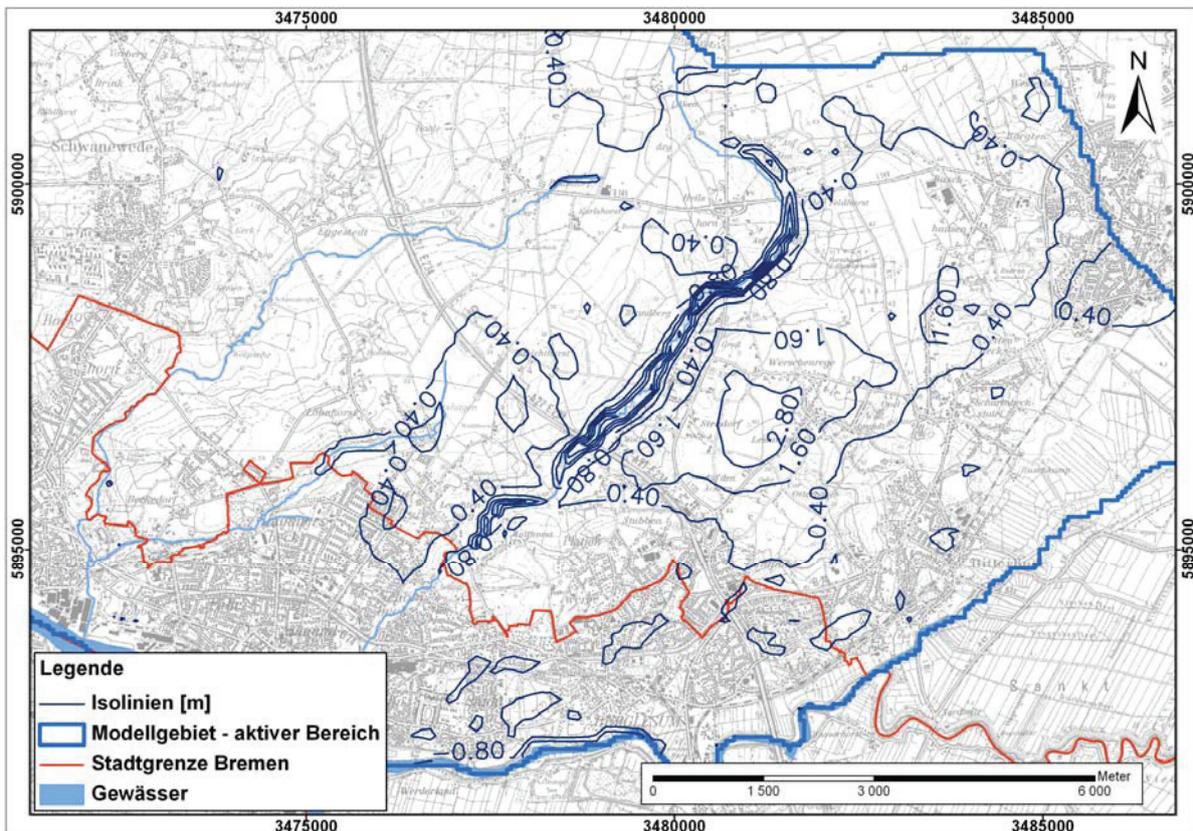


Abb. 40: Ausschnitt des Differenzplans zwischen modellierter GW-Druckspiegelfläche von Schicht 1 und Schicht 5 im 5-Schichtmodell,

Es wird erwartet, dass sich auch hier mit der Berücksichtigung differenzierterer Grundwasserentnahmemengen und einer noch genaueren Kenntnis der Strukturen im Untergrund (s. Abschn. 7.2) eine Verbesserung der Modellierung erreichen lässt. Insgesamt bestätigt die Betrachtung aller Ergebnisse des gekoppelten Modells den im 3D-Strukturmodell ermittelten geologischen Aufbau des mitteltiefen Untergrunds in Bremen-Nord.

7.4 Wasserbilanzen

Vor dem Hintergrund der Bewirtschaftung des Grundwasserleiters in Bremen-Nord ist es wichtig, dass der Wasserhaushalt zuverlässig bekannt ist (s. a. SCHULZ 2006). Die berechneten Wasserbilanzen werden nebeneinander gestellt und diskutiert. Darüber hinaus werden Wasserbilanzen für Ausschnitte des Modellgebiets mit denen vorangegangener Arbeiten (MULL 1986, GEOUM 2006) verglichen. Im Ergebnis werden verschiedene Bilanzmengen miteinander in Beziehung gebracht und dadurch Rückschlüsse bezüglich der Bewirtschaftung des Grundwasserkörpers in den vergangenen Jahren gezogen.

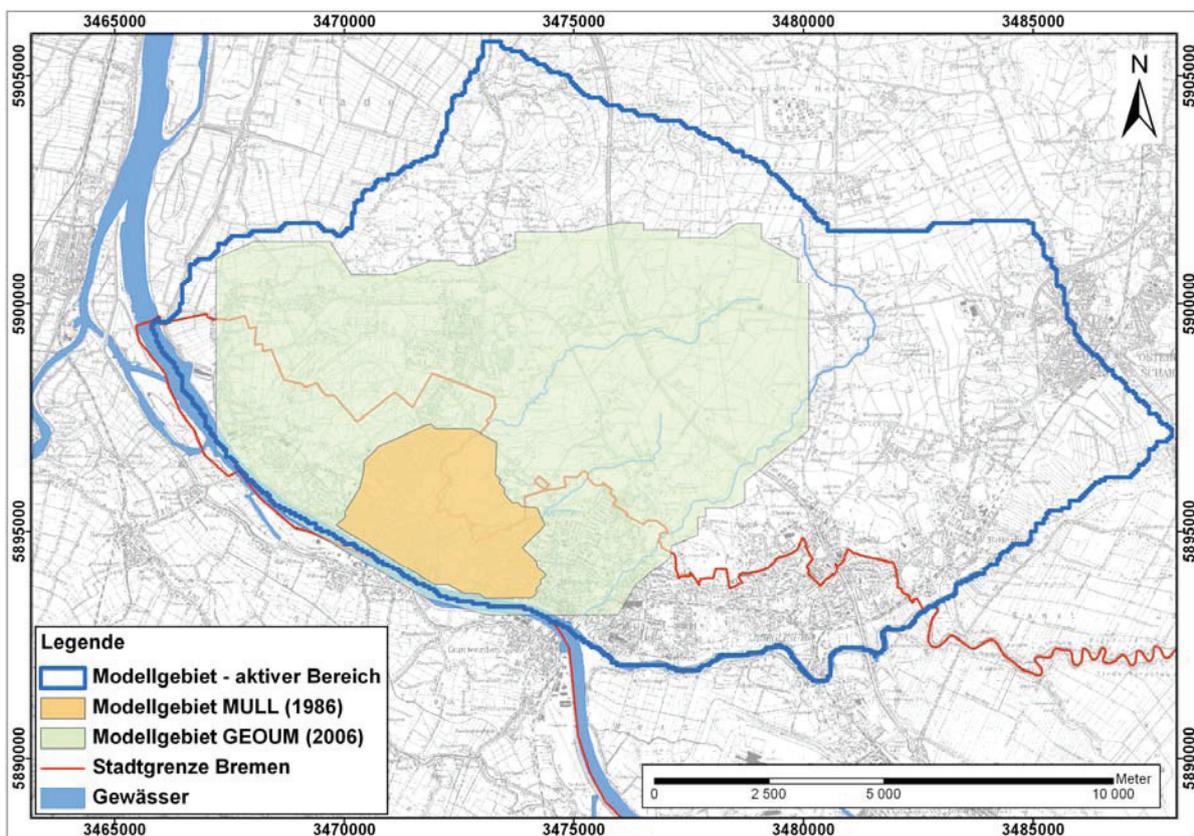


Abb. 41: Modellgebiete vorhandener Strömungsmodelle in Bremen-Nord im Vergleich zum Modellgebiet dieser Arbeit

Die berechnete Wasserbilanz des 1-Schichtmodells enthält 0,76 Mio. m^3/a (4 mm/a) Grundwasser mehr als die des 5-Schichtmodells. Die Grundwasserneubildung und die Grundwasserentnahmemengen sind in beiden Modellvarianten gleich. Der Unterschied entsteht durch geänderte Zu- und Abflüsse über die Ränder, die Oberflächengewässer und das Drainage-

system. Im Folgenden werden diese Unterschiede vernachlässigt, die Ergebnisse beider Modelle in Hinblick auf die Wasserbilanz als gleich betrachtet. Es werden die Ergebnisse des 5-Schichtmodells denen anderer Modelle (MULL 1986, GEOUM 2006) gegenüber gestellt. Obwohl im gekoppelten Modell für jede Schicht eine Wasserbilanz berechnet wird, werden nur die Gesamtwasserbilanzen betrachtet, da nur für sie Vergleichswerte zur Verfügung stehen. Es soll überprüft werden, ob sich in den vergangenen Jahren in der Nutzung des Grundwasserleiters etwas verändert hat, um Aussagen zur Prognosefähigkeit des 5-Schichtmodells zu machen.

Tab. 17: Vergleich der Wasserbilanzen (gerundet) verschiedener Modelle (MULL 1986 und 5-Schichtmodell)

	MULL (1986) [Mio. m ³ /a]		5-Schichtmodell [Mio. m ³ /a]	
	Zufluss	Abfluss	Zufluss	Abfluss
Grundwasserneubildung	1,4	-	2,1	-
Entnahmen	-	-6,0	-	-4,7
Weserzufluß, -abfluß	1,2	-0,5	0,1	-0,2
Randzufluß, -abfluß	2,2	-	5,4	-3,0
In-, Exfiltration Oberflächengewässer	1,7	-	0,3	-0,1

Tab. 18: Vergleich der Wasserbilanzen (gerundet) verschiedener Modelle (GEOUM 2006 und 5-Schichtmodell)

	GEOUM (2006) [Mio. m ³ /a]	5-Schichtmodell [Mio. m ³ /a]	
	gesamt	Zufluss	Abfluss
Grundwasserneubildung	14,3	14,7	-
Entnahmen	-7,2	-	-6,7
Weserzufluß, -abfluß	-7,1	0,3	-3,1
Randzufluß, -abfluß	-	3,6	-6,2
In-, Exfiltration Oberflächengewässer	0,1	1,2	-4,0

In Abb. 41 sind die Modellgebiete vorangegangener Arbeiten (MULL 1986, GEOUM 2006) in Bremen-Nord dargestellt. Für diese Bereiche werden mit dem 5-Schichtmodell Wasserbilanzen gerechnet. In Tab. 17 und Tab. 18 sind die neu berechneten Wasserbilanzen denen der Arbeiten von MULL (1986) und GEOUM (2006) gegenübergestellt. Bei MULL (1986) gibt es zwei Zustände (geringe und mittlere Niederschläge) für die Modellkalibrierung (s. a. Abschn. 8.1). Die Daten in Tab. 17 entstammen aus dem Strömungsmodell, das auf den Zustand von 1984 (mittlere Niederschläge) kalibriert ist.

Bei der berücksichtigten Grundwasserneubildung und bei den eingebauten Grundwasserentnahmemengen gibt es kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen (Tab. 17, Tab. 18). Die etwas geringere Grundwasserentnahmemenge im 5-Schichtmodell, verglichen mit der bei MULL (1986), ist auf eine zwischenzeitlich verminderte Grundwasserentnahme der Bremer Wollkämmerei (bzw. ihrer Nachfolger) zurückzuführen. Es zeigt sich aber, dass gerade bei der In- und Exfiltration von Oberflächengewässern große Unterschiede berechnet werden. Verschiedene Ergebnisse hinsichtlich des geologischen Modellaufbaus im Bereich der Oberflächengewässer sind eine mögliche Ursache. FLECKENSTEIN et al. (2006) und FREI et al. (2009) zeigen, welchen Einfluss die geologische Heterogenität des Untergrundes auf die Anbindung von Oberflächengewässern an den genutzten Grundwasserleiter haben. In Abschn. 4.2.2, Abb. 13, wird das für den regionalen Maßstab deutlich. Der mittlere Abschnitt der Schönebecker Aue ist durch bindige Schichten im Liegenden vom genutzten Grundwasserleiter abgekoppelt und hat in diesem Bereich nur wenig Einfluss auf ihn. Der deutlich stärkere Zustrom von Weserwasser in den genutzten Grundwasserleiter (Uferfiltrat) bei MULL (1986) im Vergleich zu den Ergebnissen des 5-Schichtmodells ist darauf zurückzuführen, dass in der Zwischenzeit die Grundwasserentnahme im wesernahen Bereich stark vermindert wurde. Grundsätzlich wird aber nach wie vor von einem durch wesernahe Grundwasserentnahmen verursachten Zustrom von Uferfiltrat ausgegangen. Tab. 18 zeigt, dass auch außerhalb des von MULL (1986) bearbeiteten Gebiets damit zu rechnen ist, da die im 5-Schichtmodell berechnete Menge von $0,1 \text{ m}^3/\text{a}$ auf $0,3 \text{ m}^3/\text{a}$ leicht ansteigt.

Die deutlichen Unterschiede bei den Randzu- und -abflüssen zwischen den einzelnen Modellen sind auf die verschiedenen zu Grunde liegenden Modellkonzepte und die daraus resultierenden Randbedingungen zurückzuführen (s. a. Abschn. 4.1.1).

7.5 Vor- und Nachteile einer Gitterverfeinerung

Das 1-Schichtmodell und das 5-Schichtmodell sind durch ein Gitter aufgebaut, das aus Zellen mit einer Kantenlänge von 125 m besteht. In Teilbereichen des Gitters, wo die Hauptgrundwasserentnahmembrunnen eingebaut sind (s. Abb. 17), haben die Zellen eine Kantenlänge von 25 m bzw. 12,5 m. Diese Verfeinerung ist in solchen Bereichen sinnvoll, in denen auf engem Raum viele Eingangsdaten vorhanden sind (s. a. Abschn. 5.2). Es muss dabei beachtet werden, dass nach einer teilweisen Modellverfeinerung kein reguläres Modellgitter mehr vorliegt und der Import von heterogenen Datensätzen nur noch eingeschränkt möglich ist. Eingangsdaten wie Grundwasserneubildung oder Top- und Basisfläche des Modells lie-

gen oft als Rasterdaten mit einer gleichmäßigen Zellgröße vor und können nur nach einer entsprechenden Umrechnung fehlerlos ins PMWin (CHIANG 2005) übertragen werden. Zwar ist im ArcView (ESRI 2005) eine stufenlose Verfeinerung eines Rasters möglich, ein irreguläres Gitter kann aber nicht ohne großen Aufwand erzeugt werden.

Bei entsprechenden Fragestellungen ist es sinnvoll, zunächst ein Übersichtsmodell zu erstellen, das ein gleichmäßiges Modellgitter und große Zellen verwendet. Anschließend wird ein Bereich ausgeschnitten und als eigenständiges Modell weiter bearbeitet. Hier ist es möglich ein reguläres Gitter beizubehalten, indem alle Modellzellen gleichmäßig verfeinert werden, ohne das dabei die Gesamtanzahl der Zellen so groß wird, dass eine einfache und schnelle Handhabung des Modells nicht mehr gewährleistet ist.

Generell sollte eine heterogene Diskretisierung gewählt werden, die Bereiche in denen viele Eingangsdaten vorliegen stärker auflöst, als Randbereiche, die von geringerem Interesse sind. Wenn nur wenige Eingangsdaten (Messstellen, Grundwasserentnahmehbrunnen, Informationen zu Oberflächengewässern) eines Gebietes vorliegen oder der strukturelle Aufbau eines Gebietes nur unzureichend beschrieben ist, führt eine Gitterverfeinerung nicht zu genaueren Ergebnissen. Sie bedeutet nur einen erhöhten Rechenaufwand.

In der vorliegenden Arbeit kommt es durch die Gitterverfeinerung zu geringeren Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten für Messstellen in direkter Umgebung von Grundwasserentnahmehbrunnen. Die grundsätzliche Aussage des Modells in Bezug zur allgemeinen Grundwasserfließrichtung, zum Grundwassergefälle und zum Grundwasserumsatz wird dadurch nicht verbessert. Es wird grundsätzlich empfohlen, eine teilweise Gitterverfeinerung aufgrund der beschriebenen Einschränkungen nur am Ende einer Modellierung durchzuführen.

8 Ausblick / Modellpflege

Die folgenden Abschnitte zeigen, inwieweit die Modelle weiterentwickelt werden können und wie sich ihre Ergebnisse als Randbedingungen oder Eingangsdaten für die Beantwortung von Fragestellungen verwenden lassen, die sich nur auf Ausschnitte des Modellgebiets beziehen. Abschließend werden die Modellkopplung unter Verwendung der Softwareanwendungen GOCAD (EARTH DECISION SCIENCES 2005) und PMWin (CHIANG 2005) betrachtet und Hinweise für die Erstellung zukünftiger Modelle gegeben.

8.1 Anwendungsmöglichkeiten des 1-Schichtmodells

Das 1-Schichtmodell dient als Übersichtsmodell für den Bereich Bremen-Nord und als Grundlage für die Kopplung mit einem 3D-Strukturmodell. Aus dem 1-Schichtmodell wird die grundsätzliche Grundwasserfließrichtung deutlich. Die im Grundwasserleiter bewegten Wassermengen werden bilanziert und im Zuge der Kalibrierung werden Durchlässigkeitsbeiwerte für den Untergrund ermittelt. Durch den Einbau neuer Daten lässt sich das 1-Schichtmodell überprüfen, aktualisieren und weiterentwickeln (BECKER et al. 2008). Es können dabei sowohl neue Messstellen eingebaut, als auch für bestehende Messstellen und Grundwasserentnahmebrunnen aktuelle Werte eingesetzt werden. Im Nordteil des Modellgebiets in Bereichen mit einer geringen Messstellendichte (s. Abb. 9) ist der Bau zusätzlicher Messstellen und ihre Berücksichtigung bei zukünftigen Modellierungen sinnvoll. Eine Überprüfung der Strömungsverhältnisse ist darüber hinaus auch durch eine Modellierung in FEFLOW (WASY 2006) denkbar. Dabei wird unter Verwendung identischer Eingangsdaten auch gezeigt, wie sich unterschiedliche mathematische Modelle (FD- und FE-Verfahren) auf die Lösung einer konkreten Fragestellung auswirken.

In Verbindung mit Daten einer neuen, erweiterten Messkampagne ist eine Weiterentwicklung des 1-Schichtmodells zu einem instationären Modell dann sinnvoll, wenn sich beispielsweise Fragestellungen hinsichtlich der Reaktion des genutzten Grundwasserleiters auf unterschiedliche Wasserhaushalte bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ergeben. Die Ermittlung von Wasserständen in den Messstellen und Oberflächengewässern und die Berechnung einer Grundwasserneubildung für einen klimatischen Zustand, der deutlich vom langjährigen Mittel abweicht, sind dabei unerlässlich. Durch Anwendung eines solchen Modells ist es zusätzlich möglich, die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte bei verschiedenen klimatischen Szenarien zu überprüfen.

Für den Fall, dass eine Modellpflege des 3D-Strukturmodells zu erheblichen Änderungen führen sollte, besteht eine weitere Anwendungsmöglichkeit darin, das 1-Schichtmodell erneut als Grundlage für die Kopplung mit einem 3D-Strukturmodell zu verwenden. Die Pflege und Aktualisierung des 3D-Strukturmodells ist immer auch im Interesse der Belastbarkeit des gekoppelten Modells. FAUNT et al. (2009) weisen darauf hin, dass die Güte eines gekoppelten Strömungsmodells maßgeblich mit der Güte und Auflösung des 3D-Strukturmodells zusammenhängt.

Grundsätzlich kann das 1-Schichtmodell für die Beantwortung von Fragestellungen, die kleinere Ausschnitte des Modellgebiets betreffen, wie zum Beispiel die konkreten Auswirkungen einer veränderten Grundwasserentnahmemenge auf den Grundwasserdruckspiegel oder die Überprüfung einer bestehenden Grundwasserentnahmemenge, genutzt werden. Dazu sollten aus dem 1-Schichtmodell diese Bereiche ausgeschnitten und gezielt weiterentwickelt werden. Verschiedene Methoden dazu sind bei MEHL et al. (2006) beschrieben. Ist ein gekoppeltes Modell wie das 5-Schichtmodell vorhanden, sollte dieses aus den in Kapitel 7 genannten Gründen bevorzugt zur Beantwortung solcher Fragestellungen angewendet werden.

8.2 Anwendung gekoppelter 3D-Struktur-Strömungsmodelle

Das gekoppelte Modell wird zur Beantwortung von hydrogeologischen Fragen im Bereich Bremen-Nord eingesetzt. ECKEL & RAISSI (2009) empfehlen die Anwendung eines Grundwasserströmungsmodells als Prognosewerkzeug im Rahmen von Wasserrechtsanträgen. Aufgrund der differenzierteren Ergebnisse (Abschn. 7.3), ist hier immer die Anwendung des gekoppelten Modells der des 1-Schichtmodells vorzuziehen. Das 5-Schichtmodell kann zur Bestimmung von Einzugsgebieten von Grundwasserentnahmebrunnen genutzt werden, Hinweise auf das Strömungsverhalten im genutzten Grundwasserleiter liefern und zu einem besseren Verständnis des untersuchten Grundwassersystems beitragen (s. a. CAMPBELL et al. 2010). Eine Bilanzierung des genutzten Grundwasserleiters ist ebenfalls möglich. Für die Bestimmung von lokalen Fließwegen empfiehlt es sich, wie beim 1-Schichtmodell, das 5-Schichtmodell als Ausgangsdatensatz zu behandeln, einen Teilbereich auszuschneiden und diesen weiterzuentwickeln.

Die Aktualisierung und Weiterentwicklung sollte auch hier nicht außer Acht gelassen werden. Durch Integration neuer Daten und eine Nachkalibrierung sind eine höhere Modellgenauigkeit, aktualisierte Aussagen und eine verbesserte Prognosegenauigkeit erreichbar (FH-DGG 2002). Ein Beispiel für die Modellpflege liefern TIMMONS et al. (2006).

In Bremen besteht bereits seit vielen Jahren, gerade in Hinblick auf die örtliche Wasserversorgung mit Grundwasser, ein großes Interesse am strukturellen Aufbau und dem Verhalten der vorhandenen Grundwasserleiter (s. KURTH 1895, KURTH 1897). Die Ergebnisse der 5-Schichtmodellierung werden für die Lokalisierung von Bereichen mit abgekoppeltem Grundwasser in Bremen-Nord (Abb. 40) genauso genutzt, wie für die Bestimmung von Bereichen mit artesisch gespanntem Grundwasser (Abb. 13). Es ist darüber hinaus möglich, aus den Ergebnissen der 5-Schichtmodellierung den Flurabstand des Grundwassers abzuleiten. Eine natürliche Schutzfunktion der Deckschichten ist damit abschätzbar. Mit seinen Ergebnissen ist das 5-Schichtmodell unter anderem in den Bereichen Bau, Naturschutz und Altlastensanierung anwendbar. Weiterhin lassen sich Veränderungen bei der Bewirtschaftung des genutzten Grundwasserleiters und ihre Auswirkungen darstellen, wenn die Ergebnisse dieses Modells mit den Ergebnissen anderer Arbeiten (s. a. Abschn. 7.4) verglichen werden.

Weitere Einsatzgebiete sind die Überprüfung von Randbedingungen oder die Bereitstellung von Vergleichswerten für weitere wissenschaftliche Arbeiten im Bereich Bremen-Nord durch das kalibrierte 5-Schichtmodell. Die Verteilung von Durchlässigkeitsbeiwerten im 5-Schichtmodell und die der eingebauten Oberflächengewässerbetten lassen sich solchen gegenüberstellen, die über eine gemessene Temperaturverteilung im Gewässerbett (s. a. KALBUS et al. 2008) ermittelt werden.

8.3 Modellkopplung bei Verwendung der beschriebenen Software

Das dargestellte Vorgehen bei der Modellkopplung weist sowohl Vor- als auch Nachteile auf. Positiv sind die Ergebnisse u. a. in Hinblick auf unterscheidbare Grundwasserleiter (s. a. Abb. 40) und die Anbindung von Oberflächengewässern. Nachteile sind der erhöhte Arbeits- und Zeitaufwand bei der Modellerstellung durch den beschriebenen Zwischenschritt der Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten (Abschn. 5.3) und die nur eingeschränkt ermittelbare Heterogenität der Durchlässigkeitsbeiwerte in einzelnen Schichtpaketen. Letztere kann aber bei der Strömungsmodellierung entscheidend sein (WEBB & ANDERSON 1996). Hierauf gründet die nachfolgende Überlegung für zukünftige Modellierungen und Modellkopplungen unter Verwendung der Softwareanwendungen GOCAD (EARTH DECISION SCIENCES 2005) und PMWin (CHIANG 2005).

Es sollte versucht werden, die räumliche Verteilung von Durchlässigkeitsbeiwerten im Strukturmodell zu ermitteln und diese dann direkt in ein Mehrschichtströmungsmodell zu überführen. Dafür muss bereits bei der Strukturmodellierung ein räumliches Raster definiert werden,

das ohne Veränderung in das Strömungsmodell übertragbar ist. Ein räumlich reguläres Raster ist bei der Verwendung von GOCAD (EARTH DECISION SCIENCES 2005) und PMWin (CHIANG 2005) für einen Datentransfer geeignet (s. a. SPOTKE et al. 2005). Eine Möglichkeit zur Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten bei der Strukturmodellierung bietet die Ableitung aus der petrografischen Beschreibung einzelner Schichten (s. FUCHS 2010). Es ist dabei sinnvoll, Klassen zu bilden und nicht jede einzelne Schicht zu berücksichtigen. In vielen Bohrverzeichnissen sind aufeinander folgende Schichten dokumentiert, die oft nur wenige Zentimeter mächtig sind und sich in ihrer petrografischen Beschreibung geringfügig unterscheiden. Wenn in solchen Fällen für jede unterschiedliche Schichtbeschreibung ein eigener Durchlässigkeitsbeiwert ermittelt wird, wird die vertikale Modellauflösung im Verhältnis zur Aussagekraft unverhältnismäßig fein.

Insgesamt ist es wichtig, eine passende Modellauflösung zu wählen. Grundsätzlich richtet sich die Diskretisierung bei der Strukturmodellierung nach Dichte der vorhandenen Bohrungen und Genese der zu bearbeitenden Schichten. Ist der einzige Zweck eines Strukturmodells die Kopplung mit einem Strömungsmodell, so sollte auch die Datendichte in Hinblick auf Messstellen und Entnahmebrunnen bei der Festlegung von Zellgrößen beachtet werden.

In Hinsicht auf die Fragestellung nach einem Übersichtsströmungsmodell für den Bereich Bremen-Nord und dem technischen Ablauf der Kopplung eines 3D-Strukturmodells mit einem Strömungsmodell ergeben sich bei Verwendung der beschriebenen Software keine Mängel. Das gekoppelte Modell liefert ein funktionierendes Prognosewerkzeug für den genutzten Grundwasserleiter in Bremen-Nord. Es ist für Fragestellungen in Bezug auf eine zukünftige Bewirtschaftung des Grundwasserleiters genauso nutzbar, wie für eine quantitative Bestimmung des Anteils an Uferfiltrat in einem geförderten Grundwasser.

MASSMANN & SCHULZ (2002) weisen darauf hin, dass ein Grundwasserkörper schon in zwei Dimensionen substanzielle Unterschiede in der Struktur aufweist, die für Prozesse im Grundwasser von entscheidender Bedeutung sind. Vor dem Hintergrund, dass immer schnellere Computer bei gleicher Modellkomplexität zu immer kürzeren Rechenzeiten führen, ist dies ein weiterer Grund bei der Übertragung von geologischen Strukturen in ein Strömungsmodell auf Vereinfachungen zu verzichten. Wenn ein 3D-Strukturmodell vorhanden ist, sollte es als Grundlage für ein Strömungsmodell verwendet und mit diesem gekoppelt werden. Das hier vorgestellte Verfahren der Modellkopplung lässt sich dabei ohne Einschränkung auf andere Regionen mit Grundwasserleitern im Lockergestein übertragen.

Literaturverzeichnis

ANDERSON M. P. & W. W. WOESSNER (2002). Applied Groundwater Modeling. Academic Press, San Diego.

BACHMANN D., B. BECKER, A. VAN LINN & J. KÖNGETER (2007). Das Großraum-Grundwassermodell Rurscholle. Grundwasser 12(1): 26-36.

BEAR J., M.S. BELJIN & R.R. ROSS (1992). Fundamentals of groundwater modeling, Ground Water Issue, USEPA, EPA/540/S-92/005.

BECKER B., J. KÖNGETER, W. S. KLAUDER & C. REUTER (2008). Modellierung der Randüberströme zwischen Erftscholle, Rurscholle und Venloer Scholle durch Kopplung von Großraum-Grundwassermodellen. Grundwasser 13(1): 15-26.

BENDER K. (2003). Grundwasserströmungsmodell für den Großraum Rhein-Neckar. Grundwasser 8(1): 41-49.

BERSEZIO R., A. BINI & M. GIUDICI (1999). Effects of sedimentary heterogeneity on groundwater flow in a Quaternary proglacial delta environment: Joining facies analysis and numerical modelling. Sedimentary Geology 129(3-4): 327-344.

BUTSCHER C. & P. HUGGENBERGER (2007). Implications for karst hydrology from 3D geological modeling using the aquifer base gradient approach. Journal of Hydrology 342(1-2): 184-198.

CALDERÓN PALMA H. & L. BENTLEY (2007). A regional-scale groundwater flow model for the Leon-Chinandega aquifer, Nicaragua. Hydrogeology Journal 15(8): 1457-1472.

CARNEIRO J. & J. M. CARVALHO (2010). Groundwater modelling as an urban planning tool: issues raised by a small-scale model. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 43(2): p. 157-170.

CHIANG, W.-H. (2005). 3D-Groundwater Modeling with PMWIN, 2nd edition: New York, NY, Springer, 398 p.

CHIANG, W.-H. (2009). Seer3D - A Visualization System for Environmental Data and Groundwater Models. Simcore Software.

CAMPBELL S. D. G., J. E. MERRITT, B. DOCHARTAIGH, M. MANSOUR, A. G. HUGHES, F. M. FORDYCE, D. C. ENTWISLE, A. A. MONAGHAN & S. C. LOUGHLIN (2010). 3D geological models and their hydrogeological applications: supporting urban development a case study in Glasgow-Clyde, UK. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 161: 251-262.

CULSHAW M. G. (2005). From concept towards reality: developing the attributed 3D geological model of the shallow subsurface. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 38: p. 231-284.

DE MARSILY G., F. DELAY, V. TELES & M. T. SCHAFMEISTER (1998). Some current methods to represent the heterogeneity of natural media in hydrogeology. *Hydrogeology Journal* 6(1): 115-130.

DÖRHÖFER G. & V. JOSOPAIT (1980). Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. *Geologisches Jahrbuch C, Band 27, Hannover*

DOHERTY J. (2002). *PEST: Model-Independent Parameter Estimation*, 4th ed. Corinda, Australia: Watermark Numerical Computing.

DOMENICO P. A. & F. W. SCHWARTZ (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons, Inc.

DUFRESNE D. P. & C. W. DRAKE (1999). Regional groundwater flow model construction and wellfield site selection in a karst area, Lake City, Florida. *Engineering Geology* 52(1-2): 129-139.

EATON T. T. (2006). On the importance of geological heterogeneity for flow simulation. *Sedimentary Geology Heterogeneity in Sedimentary Aquifers: Challenges for Characterization and Flow Modeling*. Geological Society of America Annual Meeting, *GeoScience Horizons* 2003, 184(3-4): 187-201.

ECKL H. & F. RAISSI (2009). Leitfaden für hydrogeologische und bodenkundliche Fachgutachten bei Wasserrechtsverfahren in Niedersachsen. Mit Beiträgen von K. DAMM, J. GOENS, M. HEINISCH, K.-H. KIEGER, J. MÜLLER, U. MÜLLER, & A. WEUSTINK, *Geoberichte* 15: 99 S., 39 Abb., 10 Tab.; Hannover (LBEG).

EHLERS J. (1994). *Allgemeine und historische Quartärgeologie*. Stuttgart, Enke Verlag

EL IDRYSY H. & F. DE SMEDT (2006). Modelling groundwater flow of the Trifa aquifer, Morocco. *Hydrogeology Journal* 14(7): 1265-1276.

ENTENMANN W. (1998). Hydrogeologische Untersuchungsmethoden von Atlanten. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag.

FAYERS F. J. & J. W. SHELDON (1962). Use of a High-Speed Digital Computer in Study of Hydrodynamics of Geologic Basins. *Journal of Geophysical Research* 67(6): p. 2421-2431.

FERRIS J. G. (1951). Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility. *International Association of Hydrological Sciences Publication* 33, 148-155.

FERRIS J. G. (1963). Cyclic water-level fluctuations as a basis for determining aquifer transmissibility. In: *Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown* (Ray Bental, Ed.). pp. 305-318. U. S. Geological Survey. Reston, VA, United States. 1963.

FREEZE R. A. & P. A. WITHERSPOON (1966). Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow: 1. Analytical and Numerical Solutions to Mathematical Model. *Water Resources Research* 2(4): p. 641-656.

FH-DGG (2002). Hydrogeologische Modelle - Ein Leitfaden mit Fallbeispielen. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft; Heft 24. Hannover, Arbeitskreis "Hydrogeologische Modelle und Grundwassermanagement" der Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft.

FLECKENSTEIN J. H., R. G. NISWONGER & G. E. FOGG (2006). River-Aquifer Interactions, Geologic Heterogeneity, and Low-Flow Management. *Ground Water* 44(6): 837-852.

FOGG G. E. (1986). Groundwater Flow and Sand Body Interconnectedness in a Thick, Multiple-Aquifer System. *Water Resour. Res.* 22(5): 679-694.

FREI S., J. H. FLECKENSTEIN, S. J. KOLLET & R. M. MAXWELL (2009). Patterns and dynamics of river-aquifer exchange with variably-saturated flow using a fully-coupled model. *Journal of Hydrology* 375(3-4): 383-393.

GDFB – GEOLOGISCHER DIENST FÜR BREMEN (2003). Grundwasser- und Geotechnische Planungskarte Bremerhaven. Seestadt Bremerhaven, Umweltschutzamt.

GEOINFORMATION BREMEN (2005). Digitales Geländemodell DGM (Auflösung 10 m). Bremen.

GRÜTZMANN J. & J. REICHLING (2006). Geologie des Weser-Elbe-Dreiecks im Gebiet von Bremen und Bremerhaven. In: CORDES H., J. FEDER, F. HELLBERG, D. METZING & B. WITTIG

(Hrsg.) (2006). Atlas der Farn- und Blütenpflanzen des Weser-Elbe-Gebietes. Beihefte zum Jahrbuch der Wittheit zu Bremen / II. Hauschild. Bremen.

GOSSEL W. (2008). Schnittstellen bei der Kopplung von Modellierungssystemen der Hydrogeologie. Fakultät Naturwissenschaften III der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, ULB Sachsen-Anhalt.

GOSSEL W., R. STOLLBERG & P. WYCISK (2009). Regionales Langzeitmodell zur Simulation von Grundwasserströmung und Stofftransport im Gebiet der Unteren Mulde/Fuhne. Grundwasser 14(1): 47-60.

HARBAUGH A. W. & M. G. McDONALD (1996). Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model. Open-File Report 96-486. U.S. Geological Survey.

HARBAUGH A. W., E. R. BANTA, M. C. HILL & M. G. McDONALD (2000). MODFLOW-2000, The U.S. geological survey modular groundwater model-user guide to modularization concepts and the groundwater flow process. US Geological Survey Open-File Report 00-92.

HATİPOĞLU Z., L. MOTZ & C. BAYARI (2009). Characterization of the groundwater flow system in the hillside and coastal aquifers of the Mersin-Tarsus region (Turkey). Hydrogeology Journal 17(7): 1761-1778.

HAUDE W. (1955). Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. - Mitt. Dt. Wetterd. 2 (11), Bad Kissingen (Dt. Wetterd.).

HERRMANN F., C. JAHNKE, F. JENN, R. KUNKEL, H.-J. VOIGT, J. VOIGT & F. WENDLAND (2009). Groundwater recharge rates for regional groundwater modelling: A case study using GROWA in the Lower Rhine lignite mining area, Germany. Hydrogeology Journal 17(8): 2049-2060.

HÖFLE H.-C., W. HOFMANN, U. JÜRGENS, H. KUNTZE & H. KUSTER (1989). Bremen-Nord aus geowissenschaftlicher Sicht. In: STABENAU H. (Hrsg.) (1989). Lebensraum Bremen Nord – Geschichte und Gegenwart. Jahrbuch der Wittheit zu Bremen 31. Döll. Bremen.

HÖFLE H.-C. (1990). Quartärgeologische Exkursion in das westliche Elbe-Weser-Dreieck. Berichte aus dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen, 10 S., 5 Abb., 1 Tab.; Bremen.

ILLIES H. (1955). Pleistozäne Salzstockbewegungen in Norddeutschland und ihre regionale Anordnung. Geologische Rundschau 43(1): 70-78.

KALBUS E., C. SCHMIDT, F. REINSTORF, R. KRIEG & M. SCHIRMER (2008). Wie Flussbett-Temperaturdaten zur Ermittlung der Aquifer-Heterogenität beitragen können. *Grundwasser* 13(2): 91-100.

KALLIORAS A., F. PLIAKAS & I. DIAMANTIS (2009). Simulation of Groundwater Flow in a Sedimentary Aquifer System Subjected to Overexploitation. *Water, Air, & Soil Pollution*.

KESSLER H., S. MATHERS & H. G. SOBISCH (2009). The capture and dissemination of integrated 3D geospatial knowledge at the British Geological Survey using GSI3D software and methodology. *Computers & Geosciences* 35(6): p. 1311-1321.

KINZELBACH W. & R. RAUSCH (1995). *Grundwassermodellierung – Einführung mit Übungen*, Berlin, Stuttgart, Gebrüder Borntraeger.

KRESIC N. (2007). *Hydrogeology and groundwater modeling*, CRC Press.

KUNKEL R., H. BOGENA, B. TETZLAFF & F. WENDLAND (2006). Digitale Grundwasserneubildungskarte von Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Hamburg und Bremen: Erstellung und Auswertungsbeispiele. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50, H5: 212-220.

KUNKEL R. & F. WENDLAND (2002). The GROWA98 model for water balance analysis in large river basins - the river Elbe case study. *Journal of Hydrology* 259(1-4): 152-162.

KURTH H. (1895). Ueber die gesundheitliche Beurtheilung der Brunnenwässer im bremischen Staatsgebiet, mit besonderer Berücksichtigung des Vorkommens von Ammoniumverbindungen und deren Umwandlungen. *Medical Microbiology and Immunology*, Springer Berlin / Heidelberg. 19: 1-60.

KURTH H. (1897). Über Grundwasserbewegungen im bremischen Gebiet. *Abhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins zu Bremen*, Band 15, S. 182ff.

KUSTER H. & K.-D. MEYER (1979). Glaziäre Rinnen im mittleren und nordöstlichen Niedersachsen. *Eiszeitalter und Gegenwart* 29. 135 – 156, 5 Abb., 3 Tab., 1 Kt.; Hannover.

LANGGUTH H.-R. & R. VOIGT (2004). *Hydrogeologische Methoden*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag.

LBEG – LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE (2008). BÜK 50 - nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte von Niedersachsen 1:50000. – Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS®); Hannover.

LEMKE D. & ELBRACHT, J. (2008). Grundwasserneubildung in Niedersachsen. Ein Vergleich der Methoden Dörhöfer & Josopait und GROWA06V2. – GeoBerichte 10: 61 S., 19 Abb., 24 Tab., Anh.; Hannover.

LERCH C. & A. HOPPE (2007). Development of a geological 3D-model for improved calculations of groundwater vulnerability. Grundwasser 12(2): 144-153.

LGN – LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN (2005). Digitales Geländemodell DGM (Auflösung 12,5 m). Hannover.

LGN – LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION NIEDERSACHSEN (Hrsg.) (2003). ATKIS® - Amtliches topographisches Karteninformationssystem – DLM 25.2. – Hannover.

MANDLE R. J. (2002). Groundwater Modeling Guidance. Groundwater Modeling Program, Michigan Department of Environmental Quality.

MASSMANN G. & H. D. SCHULZ (2002). Two-Dimensional Two Step Modelling of 250 Years of Transport and Reactions in a Virtual Anoxic Aquifer (Oderbruch, Eastern Germany). In: SCHULZ H.D. & G. TEUTSCH (Eds.): Geochemical Processes – Conceptual Models for Reactive Transport in Soil and Groundwater. DFG-Wiley-VCH, pp. 173-190.

MCDONALD M. G. & A. W. HARBAUGH (2003). The History of MODFLOW. Ground Water 41(2): 280-283.

MEHL S., M. C. HILL & S. A. LEAKE (2006). Comparison of Local Grid Refinement Methods for MODFLOW. Ground Water 44(6): 792-796.

NEUß M. & G. DÖRHÖFER (2007). Hinweise zur Anwendung numerischer Modelle bei der Beurteilung hydrogeologischer Sachverhalte und Prognosen in Niedersachsen. Geofakten. Hannover. (LBEG).

NLÖ – NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE (Hrsg.) (1995). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Weser- und Emsgebiet 1990. Hildesheim.

OUELLON T., R. LEFEBVRE, D. MARCOTTE, A. BOUTIN, V. BLAIS & M. PARENT (2008). Hydraulic conductivity heterogeneity of a local deltaic aquifer system from the kriged 3D distribution of hydrofacies from borehole logs, Valcartier, Canada. Journal of Hydrology 351(1-2): 71-86.

PINDER G. F. & J. D. BREDEHOEFT (1968). Application of Digital Computer for Aquifer Evaluation. Water Resources Research 4(5): p. 1069-1093.

PIOTROWSKI J. A. & S. RUMOHR (1995). Finite-Differenzen-Modelle in der Hydrogeologie am Beispiel der Grundwasserströmung zwischen der Bornhöveder Seenkette und dem Großen Plöner See. *Schr. Naturwiss. Ver. Schlesw.-Holst. Bd. 65* S. 107-126; Kiel.

POETER E. P. & M. C. HILL (1999). UCODE, a computer code for universal inverse modeling. *Computers & Geosciences* 25(4): 457-462.

PREUSS H., R. VINKEN & H.-H. VOSS (2009). Symbolschlüssel Geologie – Symbole für die Dokumentation und automatische Datenverarbeitung geologischer Feld- und Aufschlußdaten, 328 S. Niedersachsen (1991). 5. überarbeitete Fassung.

RENGER M. & G. WESSOLEK (1990). Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderung auf die Grundwasserneubildung. *Mitt. Inst. für Wasserwesen, Univ. der Bundeswehr München, Heft 386* (1990), 295-307.

REUTTER E. (2005). Hydrostratigrafische Gliederung Niedersachsens. *Geofakten. Hannover, NLFb. 21*: 10pp.

ROSS M., M. PARENT & R. LEFEBVRE (2005). 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal* 13(5-6): p. 690-707.

ROYSE K. R., H. KESSLER, N. S. ROBINS, A. G. HUGHES & S. J. MATHERS (2010). The use of 3D geological models in the development of the conceptual groundwater model. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 161: 237-249.

SCHLIMM W. (1996). Hydrogeologische Karten in Nordrhein-Westfalen – Ein Beitrag zur Daseinsvorsorge. – *Geol. Jb., A 144*: 321 – 340, 9 Abb., 1 Tab.; Hannover.

SCHUBERT T., Ed. (1997). Hydrogeologische Kartieranleitung. *Geologisches Jahrbuch. Stuttgart, Schweizerbart*.

SCHULZ H. D. (2006). Das ganz ungerecht verteilte Süßwasser. *Geo-Union Alfred-Wegener-Stiftung*, S. 32-35.

SOPHOCLEOUS M. (2004). Groundwater recharge, in *Groundwater* [Eds.: SILVEIRA L., S. WOHNLICH & E. J. USUNOFF], in *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the UNESCO, Eolss Publishers, Uxford, UK.

SPOTTKE I., E. ZECHNER & P. HUGGENBERGER (2005). The southeastern border of the Upper Rhine Graben: a 3D geological model and its importance for tectonics and groundwater flow. *International Journal of Earth Sciences* 94(4): 580-593.

STREIF H. (2001). Die geologische Entwicklung des Wesertales und der Weser. In: *Unterweserbericht 1999*. ARGE Weser, Hildesheim.

VON SOOS P. & J. ENGEL (2008). Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor. In: WITT K. J. (Hrsg.) (2008). *Grundbau - Taschenbuch. Teil 1: Geotechnische Grundlagen*. 7. Auflage. Ernst & Sohn. Berlin.

WEBB E. K. & M. P. ANDERSON (1996). Simulation of Preferential Flow in Three-Dimensional, Heterogeneous Conductivity Fields with Realistic Internal Architecture. *Water Resour. Res.* 32(3): 533-545.

WYCISK P., H. FABRITIUS, R. RUSKE & H. WEIß (2002). Das digitale geologische Strukturmodell Bitterfeld als neuer Baustein in der Sanierungsforschung. *Grundwasser* 7(3): 165-171.

WYCISK P., W. GOSSEL & H. FABRITIUS (2005). Geologische 3D-Modellierung und ihre Anwendungsmöglichkeiten in Bergbau- und Industriefolgelandschaften. – *Wissenschaftliche Mitteilungen*, 28: 163-170, 5 Abb.; Freiberg.

WYCISK P., T. HUBERT, W. GOSSEL & C. NEUMANN (2009). High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites. *Computers & Geosciences*, 35(1): 165-182.

ZIPPEL M. & S. HANNAPPEL (2008). Ermittlung des Grundwasserdargebotes der Berliner Wasserwerke mittels regionaler numerischer Grundwasserströmungsmodelle. *Grundwasser* 13(4): 195-207.

ZYVOLOSKI G. (2007). FEHM: A control volume finite element code for simulating subsurface multi-phase multi-fluid heat and mass transfer. Los Alamos National Laboratory.

Unveröffentlichte Literatur

BLANKENBURG J., J. GRÜTZMANN, M. HELMS, S. JENSEN, B. PANTELEIT & G. SCHMIDT (2008). Geoplan Bremen - Geowissenschaftliche Planungskarte Bremen - Teil 1 Bremen Nord -. Abschlußbericht 1.1.2005 - 31.12.2007. - Geologischer Dienst für Bremen. Bremen, GDfB: 48 S. mit 31 Karten.

HOFFMANN J. (2007). Aquiferparameterermittlung an tidebeeinflussten Grundwasserleitern in Bremen-Nord. FB Geowissenschaften. Bremen.

INGENIEURGESELLSCHAFT DR. SCHMIDT MBH (2009). Numerisches Grundwasserströmungsmodell für das Wasserwerk Siedbruch. Stade.

MULL R. (1986). Bericht zum Gutachten Grundwassermodell Bremen-Nord. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau. Hannover.

GEOUM (2006). Anlage zum Wasserrechtsantrag für das Wasserwerk Bremen-Blumenthal: Bericht zur Modellierung der Grundwasserströmungsverhältnisse. 42 S., GeoUm Büro Geowissenschaften & Umwelt, überarbeitet von GeoHydroConsult.

Internetquellen

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2009). Klimadaten im KL-Standardformat.

http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?nfpb=true&pageLabel=dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima_Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten_kostenfrei%2FAusgabe_standardformat_node.html%3F__nnn%3Dtrue (17.04.2009).

FAUNT C. C., D. SWEETKIND & T. HANSON (2009). Application of Three-Dimensional Geologic Models in Developing Groundwater-Flow Models.

<http://www.isgs.illinois.edu/research/3DWorkshop/2009/pdf-files/faunt.pdf> (30.04.2010).

FUCHS S. (2010). Deterministische kf-Wert-Schätzung nach petrographischer Bohrgutansprache. Grundwasser. Online first.

<http://www.springerlink.com/content/f272178042x8w544/?p=8ff156a142264a2aa1baae2abeefd4c4&pi=0> (31.05.2010).

HAITJEMA H. M., D. T. FEINSTEIN, R. J. HUNT & M. A. GUSYEV (2010). A Hybrid Finite-Difference and Analytic Element Groundwater Model. Ground Water. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00672.x> (04.06.2010).

LBEG – LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE (2008b). Kartenserie Hydrogeologie, Lage der Grundwasseroberfläche 1:200000, Kartenserver des NIBIS®, Hannover. <http://memas01.lbeg.de/lucidamap/index.asp?> (30.04.2010).

LÜHR H.-P. (2003). Die Entwicklung der Grundwasserberechnungen der letzten Jahrzehnte – vom elektrischen Papier zum numerischen Grundwassermodell – BAW-Kolloquium “Wechselwirkung Bauwerk – Grundwasser”. <http://www.baw.de/downloads/veranst/programme/wechselwirkung.pdf> (15.02.2010).

RIVERAA. (2007). From Geology to Hydrogeology. www.isgs.illinois.edu/research/3DWorkshop/2007/pdf-files/rivera.pdf (30.04.2010).

TIMMONS D. & A. SPRINGER (2006). Prescott AMA groundwater Flow Model Update Report. <http://www.adwr.state.az.us/AzDWR/Watermanagement/AMAs/PrescottAMA/WaterManagement.htm> (30.04.2010).

STREIF H. (2007). Das Quartär in Niedersachsen und benachbarten Gebieten – Gliederung, geologische Prozesse, Ablagerungen und Landschaftsformen. http://www.lbeg.niedersachsen.de/live/live.php?navigation_id=784&article_id=723&psmand=4 (11.06.2010).

Software

BLUE MARBLE GEOGRAPHICS (2009). GeoObjects – Software. Betriebssystem Windows. Maine. www.blumarblegeo.com (01.06.2010).

ESRI (2005). ArcMAP 9.1 ArcView – Software. Betriebssystem Windows. Redlands. www.esri.com (01.06.2010).

EARTH DECISION SCIENCES (2005). GOCAD 2.1.2 – Software. Betriebssystem Windows. Nancy. www.pdgm.com (01.06.2010).

FUGRO CONSULT GMBH (2008), GeODin 5.1 – Software. Betriebssystem Windows. Berlin. www.geodin.com (01.06.2010).

INSIGHT (2009). GSI3D – Software. Betriebssystem Windows. Nottingham. www.gsi3d.org
(01.06.2010).

WASY (2006). FEFLOW – Software. Betriebssystem Windows. Berlin. www.wasy.de
(01.06.2010).

WHI (2005). Visual MODFLOW – Software. Betriebssystem Windows. Waterloo.
www.swstechnology.com (01.06.2010).

Anhang

Anhang A: Entnahmebrunnen und -mengen im Modellgebiet

Anhang B: Messstellen, gemessene und berechnete Wasserstände

Anhang C: Wasserbilanzen des 1-Schichtmodells und des 5-Schichtmodells

Anhang D: Verteilungen der k_f -Werte im 1-Schichtmodell und im 5-Schichtmodell

Anhang E: Technische Struktur im 5-Schichtmodell

Anhang F: Mächtigkeiten der bindigen Schichten im Modellgebiet

Anhang G: Anleitungen

Anhang H: Einbau von Oberflächengewässern über die „Riverfunktion“

Anhang I: Ergebnisse der Stichtagsmessungen 2005 – 2007

Anhang J: Kopfblatt einer Messstelle

Anhang A

Entnahmebrunnen und -mengen im Modellgebiet

<u>Rechtswert</u>	<u>Hochwert</u>	<u>Grundwasserentnahmebrunnen HB-N</u>	<u>IST-Entnahme 2007 [m³/a]</u>
3472156	5895084	swb-Blumenthal BR7	272 267
3472206	5895074	swb-Blumenthal BR8 (5)	272 267
3472663	5894923	swb-Blumenthal BR10	272 267
3472394	5895677	swb-Blumenthal BR12	551 625
3472327	5895393	swb-Blumenthal BR13	438 614
3472458	5895070	swb-Blumenthal BR15	382 486
3470059	5895562	swb-Striekenkamp BR 16 (Bewilligung 1/93)	970 353
3471095	5895292	swb-Eggstedter Straße BR 17 (Bewilligung 2/97)	1 033 180
3472330	5895910	swb-Blumenthal BR18	735 031
3475510	5893780	swb-Vegesack (Bewilligung 1/97) BR B	211 363
3475447	5893687	swb-Vegesack (Bewilligung 1/97) BR A	499 650
3468294	5896161	hanseWasser KA Farge (II/40/1997)	845
3475510	5893410	Bauamt Bremen-Nord (II/38/1996)	1 600
3474229	5893408	Bauamt Bremen-Nord (II/130/1995)	500
3481809	5893670	Bauamt Bremen-Nord (II/47/1997)	1 600
3476197	5893139	Bauamt Bremen-Nord (II/48/1997)	800
3479696	5893226	Bauamt Bremen-Nord (II/49/1997)	1 600
3469648	5896555	Bauamt Bremen-Nord	800
3480174	5890841	Bauamt Bremen-Nord (I/28/2003)	1 600
3476565	5892232	Bauamt Bremen-Nord	2 000
3474327	5895288	Zajic, Ruht (V/109/1983)	91 234
3474190	5893860	Bremer Bäder ehm.-Fritz-Piaskowski-Bad-	10 500
3467215	5899048	hanseWasser Bremen GmbH-PW "Vor den Wischen"	39
3467265	5897598	hanseWasser Bremen GmbH-PW "Unterm Berg"	5
3482045	5893393	hanseWasser Bremen GmbH-PW "Marßel"	2 031
3468736	5897768	IVG Tanklager Farge	986
3469290	5896728	IVG Tanklager Farge	610
3473100	5897515	Golfclub Bremer Schweiz e.v. (II/75/2003)	27 228
3472048	5896350	Freibad Blumenthal (II/13/2005)	100
3480165	5892010	Bremer Schweiz I (V/29/1990)	35 522
3480155	5891985	Bremer Schweiz II (V/29/1990)	26 165
3479685	5892480	Bremer Schweiz III (II/81/2000)	23 856
3479672	5892669	Bremer Schweiz IV (II/4/2004)	52 470
3471672	5894106	BWK Weser III Fabrikgelände	597
3471640	5894042	BWK Weser IV Fabrikgelände	612
3472632	5894012	BWK Br. 5A	93 600
3472680	5894001	BWK Br. 6A	93 600
3472655	5894011	BWK Br. 7	180 326
3472388	5894052	BWK Br. 8	180 326
3472495	5894030	BWK Br. 9	180 326
3476316	5893435	Grohner Wandplattenfabrik (V/19/1968)	47 045

Rechtswert	Hochwert	<u>Grundwasserentnahmebrunnen HB-N</u>	IST-Entnahme 2007 [m³/a]
3467793	5896948	EON Kraftwerk Farge Br. 12	7 565
3467927	5896777	EON Kraftwerk Farge Br. 13	7 401
3467774	5896929	EON Kraftwerk Farge Br. 11 neu	180 443
3473200	5903990	WW Siedbruch/Meyenburg Br. 1	103 262
3473196	5903790	WW Siedbruch/Meyenburg Br. 2	103 262
3472770	5903340	WW Siedbruch/Meyenburg Br. 3	103 262
3473080	5903510	WW Siedbruch/Meyenburg Br. 4	103 262
3473150	5903670	WW Siedbruch/Meyenburg Br. 5	103 262
3472950	5903420	WW Siedbruch/Meyenburg Br. 6	103 262
3472980	5903810	WW Siedbruch/Meyenburg Br. 7	103 262
3472860	5903660	WW Siedbruch/Meyenburg Br. 8	103 262
3483585	5895146	WW Ritterhude Br. 4	89 168
3483623	5895157	WW Ritterhude Br. 5	112 451
3483692	5895127	WW Ritterhude Br. 6	123 163
3483703	5895055	WW Ritterhude Br. 8	104 016

Anhang B

Messstellen mit bei der Modellkalibrierung berechneten (ber.) und gemessenen (gem.) Grundwasserständen (Stichtag November 2007) und der jeweiligen Differenz (Diff.). Das Kürzel „n.v.“ kennzeichnet Messstellen, die für die Stichtage keine Messwerte geliefert haben, nicht im Hauptgrundwasserleiter verfiltert sind, die tidebeeinflusst sind oder außerhalb des Modellgebiets liegen. Die Daten sind nach dem Rechtswert sortiert.

Rechtswert	Hochwert	Messstellenname	Grundwasserstand [mNN]				
			1-Schichtmodell		5-Schichtmodell		Diff. [m]
			gem.	ber.	ber.	Diff. [m]	
3466720	5898615	GWM 1 Farge	n.v.				
3467055	5899906	GWM Nedderwarder Weg	0,27	1,05	0,78	1,21	0,94
3467290	5899314	GMS 190	0,87	1,24	0,37	1,40	0,53
3467332	5898151	FLB 123	2,6	3,56	0,96	3,68	1,08
3467436	5897159	GWM 3 Bernhardtring	n.v.				
3467469	5899151	P 1 Farge	4,2	2,79	-1,41	3,26	-0,94
3467617	5899022	P 4 Farge	4,35	4,43	0,08	4,81	0,46
3467711	5899264	P 2 Farge	4,51	2,79	-1,72	3,47	-1,04
3467720	5899180	P 3 Farge	4,55	3,62	-0,93	4,46	-0,09
3467774	5896929	TB 1 Eon	n.v.				
3467797	5899494	PR 104 Blumenthal	n.v.				
3467842	5896658	GWM 3 Eon	n.v.				
3467872	5899156	GMS 186	4,76	4,05	-0,71	4,88	0,12
3467891	5897094	GMS 182 Farge	2,33	1,74	-0,59	1,62	-0,71
3467925	5896535	GWM Kraftwerk Farge	n.v.				
3468070	5896975	GWM Witteborg	2,32	1,81	-0,51	1,76	-0,56
3468125	5896200	Pegelschreiber 407 Farge	n.v.				
3468135	5896794	GWM In den Wischen	n.v.				
3468168	5898385	PR 102 Blumenthal	n.v.				
3468190	5896230	Pegelschreiber 405 Farge	n.v.				
3468215	5896270	Pegelschreiber 408 Farge	n.v.				
3468370	5897073	FLB 107	2,88	2,68	-0,20	2,61	-0,27
3468534	5897495	GWM Am Depot	3,82	3,82	0,00	3,75	-0,07
3468535	5895920	Wasserweg 133 Farge	n.v.				
3468550	5895940	Wasserweg 134 Farge	n.v.				
3468660	5901000	UWO 164	3,19	1,60	-1,59	1,78	-1,41
3468670	5897850	PR 101 Blumenthal	4,37	4,45	0,08	4,29	-0,08
3468862	5895994	GMS 187	n.v.				
3468994	5896997	GWM B 2 Farge	3,24	3,01	-0,23	2,88	-0,36
3469337	5896013	PR 130 Blumenthal	1,45	1,25	-0,20	1,28	-0,17
3469434	5897264	GWM G 5 IVG	4,46	3,97	-0,49	3,76	-0,70
3469530	5896905	GWM BB 16 IVG	3,37	2,94	-0,43	2,77	-0,60
3469554	5895528	PR 136 Blumenthal	0,87	0,70	-0,17	0,77	-0,10

Rechtswert	Hochwert	Messstellenname	Grundwasserstand [mNN]					
			1-Schichtmodell			5-Schichtmodell		
			gem.	ber.		ber.		
					Diff. [m]		Diff. [m]	
3469616	5897426	GWM Werkstatt IVG	4,63	4,42	-0,21	4,14	-0,49	
3469879	5895187	PR 111 Blumenthal	n.v.					
3470011	5895527	PR 110 Blumenthal	0,42	-0,40	-0,82	-0,15	-0,57	
3470067	5895572	PR 109 Blumenthal	-0,22	-1,00	-0,78	-0,65	-0,43	
3470072	5895600	PR 91 Blumenthal	0,43	-0,45	-0,88	-0,18	-0,61	
3470073	5896570	PR 105 Blumenthal	3,1	2,29	-0,81	2,19	-0,91	
3470148	5896015	PR 113 Blumenthal	1,3	1,31	0,01	1,33	0,03	
3470295	5894852	FLB 121	n.v.					
3470431	5895011	GMS 197	0,57	0,57	0,00	0,60	0,03	
3470484	5896724	GWM 26 IVG	3,7	2,70	-1,00	2,56	-1,14	
3470550	5900610	PR 147 Hünenstein	3,51	4,07	0,56	4,21	0,70	
3470589	5895149	PR 160 I Blumenthal	n.v.					
3470589	5895149	PR 160 II Blumenthal	n.v.					
3470638	5896876	GWM 24 IVG	n.v.					
3470810	5898730	UWO 142	n.v.					
3470925	5894759	PR 123 Blumenthal	n.v.					
3470926	5895136	PR 128 Blumenthal	n.v.					
3471005	5897252	PR 100 Blumenthal	4,96	3,73	-1,23	3,52	-1,44	
3471012	5894377	BP Bahrs Plate	n.v.					
3471051	5895592	PR 129 Blumenthal	0,77	0,82	0,05	0,90	0,13	
3471068	5898420	GWM BB 7 Farge	6,49	6,80	0,31	6,42	-0,07	
3471088	5895264	PR 128 Blumenthal	-0,18	-0,45	-0,27	-0,17	0,01	
3471105	5895301	PR 126 Blumenthal	-0,25	-0,76	-0,51	-0,42	-0,17	
3471164	5895877	PR 124 Blumenthal	n.v.					
3471238	5896080	GMS 196	1,82	1,77	-0,05	1,75	-0,07	
3471272	5894219	GWM BWK 398	n.v.					
3471354	5895109	PR 39 Blumenthal	0,4	0,41	0,01	0,52	0,12	
3471435	5894718	PR 159 I Blumenthal	n.v.					
3471435	5894718	PR 159 II Blumenthal	n.v.					
3471532	5895002	PR 41 Blumenthal	0,7	0,46	-0,24	0,56	-0,14	
3471550	5902570	UWO 148	4,54	5,00	0,46	5,10	0,56	
3471564	5895709	FLB 101	1,13	1,21	0,08	1,26	0,13	
3471640	5894042	GWM BWK 505	n.v.					
3471679	5894715	PR 40 Blumenthal	0,59	0,47	-0,12	0,55	-0,04	
3471680	5896228	PR 125 Blumenthal	2,45	2,12	-0,33	2,10	-0,35	
3471697	5895061	PR 38 Blumenthal	0,5	0,44	-0,06	0,55	0,05	
3471810	5898438	PR 114 Blumenthal	n.v.					
3471832	5899732	GWM Schwaneweder Heide	7,11	6,92	-0,19	6,90	-0,21	
3471923	5895088	PR 133 Blumenthal	n.v.					
3471940	5894024	GWM BWK 608	n.v.					
3471962	5894475	BB 5 Amtsgericht	0,71	0,47	-0,24	0,53	-0,18	
3471965	5894120	GWM BWK 607	n.v.					
3471966	5895247	PR 3 Blumenthal	-0,47	0,32	0,79	0,47	0,94	
3471982	5895214	PR 2 Blumenthal	0,26	0,29	0,03	0,44	0,18	
3471990	5894675	PR 37 Blumenthal	0,46	0,39	-0,07	0,48	0,02	
3471991	5895188	PR 4 Blumenthal	n.v.					

Rechtswert	Hochwert	Messstellenname	Grundwasserstand [mNN]					
			1-Schichtmodell			5-Schichtmodell		
			gem.	ber.		ber.		
					Diff. [m]		Diff. [m]	
3471991	5895434	PR 11 Blumenthal	n.v.					
3472001	5895294	PR 9 Blumenthal	n.v.					
3472002	5894354	GWM BB 10	n.v.					
3472005	5896442	FLB 111	3,45	2,57	-0,88	2,54	-0,91	
3472007	5895151	PR 5 Blumenthal	n.v.					
3472013	5895273	PR 84 Blumenthal	0,5	0,30	-0,20	0,45	-0,05	
3472014	5894955	PR 12 Blumenthal	0,25	0,24	-0,01	0,38	0,13	
3472027	5895225	PR 1 Blumenthal	0,37	0,26	-0,11	0,41	0,04	
3472027	5895107	PR 6 Blumenthal	1,82	0,19	-1,63	0,34	-1,48	
3472044	5895376	PR 10 Blumenthal	-0,1	0,34	0,44	0,49	0,59	
3472051	5893853	GWM HB 1	n.v.					
3472058	5895338	PR 79 Blumenthal	0,48	0,30	-0,18	0,46	-0,02	
3472061	5894834	PR 27 Blumenthal	n.v.					
3472064	5894519	BB 1 Blumenthal	n.v.					
3472065	5894011	GWM HB 3	n.v.					
3472071	5895077	PR 17 Blumenthal	0,15	0,12	-0,03	0,28	0,13	
3472077	5894438	BB 3 Blumenthal	n.v.					
3472077	5894309	GWM BWK 465	n.v.					
3472084	5895124	PR 158 I Blumenthal	n.v.					
3472084	5895124	PR 158 II Blumenthal	n.v.					
3472091	5894963	PR 13 Blumenthal	-0,14	0,16	0,30	0,31	0,45	
3472092	5894469	GWM NW-Vegesack 2	n.v.					
3472093	5894390	BB 2 Blumenthal	n.v.					
3472098	5899732	GWM B 5 Schwanewede	8,1	7,34	-0,76	7,36	-0,74	
3472100	5895070	PR 16 Blumenthal	n.v.					
3472106	5893976	GWM BWK 336	n.v.					
3472119	5894327	GWM BB 6	n.v.					
3472122	5893931	GWM HB 2	n.v.					
3472123	5895185	PR 21 Blumenthal	n.v.					
3472137	5895079	PR 18 Blumenthal	n.v.					
3472158	5895270	PR 14 Blumenthal	n.v.					
3472190	5895121	PR 22 Blumenthal	-0,15	-0,06	0,09	0,12	0,27	
3472192	5894126	GWM NW-Vegesack 9	n.v.					
3472199	5895351	PR 26 Blumenthal	n.v.					
3472215	5893920	GMS 1	n.v.					
3472233	5896640	PR 88 Blumenthal	3,37	3,02	-0,35	2,98	-0,39	
3472240	5895583	PR 156 I Blumenthal	n.v.					
3472240	5895583	PR 156 II Blumenthal	n.v.					
3472255	5894025	GMS 3	n.v.					
3472262	5894567	PR 36 Blumenthal	0,16	0,32	0,16	0,42	0,26	
3472282	5895920	PR 73 Blumenthal	-0,15	0,24	0,39	0,36	0,51	
3472288	5895374	PR 80 Blumenthal	0,31	0,09	-0,22	0,28	-0,03	
3472295	5895820	PR 135 I Blumenthal	n.v.					
3472295	5895820	PR 135 II Blumenthal	0,47	0,28	-0,19	0,43	-0,04	
3472295	5895820	PR 135 III Blumenthal	n.v.					
3472301	5894083	BWK AB 1	n.v.					

Rechtswert	Hochwert	Messstellenname	Grundwasserstand [mNN]					
			1-Schichtmodell			5-Schichtmodell		
			gem.	ber.		ber.		
					Diff. [m]		Diff. [m]	
3472301	5894083	BWK AB 1	n.v.					
3472309	5895134	PR 23 Blumenthal	n.v.					
3472320	5894005	GMS 22	n.v.					
3472326	5895408	PR 77 Blumenthal	0,22	-0,02	-0,24	0,19	-0,03	
3472328	5895389	PR 78 Blumenthal	0,33	-0,15	-0,48	0,07	-0,26	
3472340	5895178	PR 24 Blumenthal	0,06	0,11	0,05	0,28	0,22	
3472345	5895954	PR 72 Blumenthal	-0,58	0,33	0,91	0,45	1,03	
3472351	5895060	PR 53 Blumenthal	-0,1	0,05	0,15	0,22	0,32	
3472365	5894800	PR 28 Blumenthal	n.v.					
3472367	5895914	PR 70 Blumenthal	n.v.					
3472369	5895922	PR 71 Blumenthal	0,36	0,13	-0,23	0,27	-0,09	
3472371	5894458	PR 35 Blumenthal	n.v.					
3472383	5896865	GMS 179	n.v.					
3472383	5895541	PR 86 Blumenthal	0,29	0,32	0,03	0,50	0,21	
3472384	5895927	PR 75 Blumenthal	-0,13	0,35	0,48	0,48	0,61	
3472385	5895685	PR 83 Blumenthal	n.v.					
3472385	5893750	GMS 26	n.v.					
3472392	5894069	BWK AB 2	n.v.					
3472395	5895550	PR 82 Blumenthal	n.v.					
3472396	5895088	PR 98 Blumenthal	-0,18	0,05	0,23	0,21	0,39	
3472397	5895293	PR 25 Blumenthal	n.v.					
3472411	5895342	PR 81 Blumenthal	0,32	0,23	-0,09	0,41	0,09	
3472428	5895044	PR 97 Blumenthal	-0,13	0,01	0,14	0,16	0,29	
3472430	5897437	PR 99 Blumenthal	6,19	5,26	-0,93	5,07	-1,12	
3472438	5895721	PR 85 Blumenthal	0,19	0,41	0,22	0,59	0,40	
3472440	5895687	PR 76 Blumenthal	-0,07	0,36	0,43	0,54	0,61	
3472442	5895131	PR 54 Blumenthal	-0,04	0,11	0,15	0,28	0,32	
3472445	5893970	GMS 21	n.v.					
3472449	5895791	PR 74 Blumenthal	0,38	0,58	0,20	0,75	0,37	
3472453	5895031	PR 51 Blumenthal	-0,09	0,03	0,12	0,17	0,26	
3472465	5895081	PR 95 Blumenthal	-0,22	-0,04	0,18	0,09	0,31	
3472473	5895101	PR 56 Blumenthal	-0,15	0,07	0,22	0,22	0,37	
3472474	5895047	PR 93 Blumenthal	-0,23	0,02	0,25	0,15	0,38	
3472482	5895048	PR 134 I Blumenthal	0,05	0,05	0,00	0,42	0,37	
3472482	5895048	PR 134 II Blumenthal	n.v.					
3472499	5894763	PR 29 Blumenthal	n.v.					
3472505	5894930	PR 52 Blumenthal	0,13	0,20	0,07	0,37	0,24	
3472505	5893915	GMS 4	-0,8	0,00	0,80	0,00	0,80	
3472511	5894964	PR 48 Blumenthal	n.v.					
3472521	5895582	PR ML 473 Blumenthal	n.v.					
3472526	5895582	PR ML 472 Blumenthal	n.v.					
3472528	5895140	PR 55 Blumenthal	0,08	0,27	0,19	0,44	0,36	
3472531	5895582	PR ML 471 Blumentahl	n.v.					
3472536	5895582	PR ML 470 Blumenthal	n.v.					
3472541	5895582	PR ML 469 Blumenthal	n.v.					
3472546	5895582	PR ML 468 Blumenthal	n.v.					

Rechtswert	Hochwert	Messstellenname	Grundwasserstand [mNN]					
			1-Schichtmodell		5-Schichtmodell			
			gem.	ber.		ber.		
					Diff. [m]		Diff. [m]	
3472570	5895582	PR ML 409 Blumenthal	n.v.					
3472585	5894666	PR 30 Blumenthal	0,13	0,34	0,21	0,47	0,34	
3472609	5894950	PR 47 Blumenthal	0,14	0,26	0,12	0,44	0,30	
3472618	5894148	GMS 118	-0,02	-0,11	-0,09	-0,01	0,01	
3472638	5894864	PR 161 I Blumenthal	n.v.					
3472640	5899164	PR 115 Blumenthal	9,27	8,57	-0,70	8,33	-0,94	
3472645	5894932	PR 46 Blumenthal	-0,14	0,27	0,41	0,43	0,57	
3472656	5894925	PR 45 Blumenthal	n.v.					
3472660	5902900	PB 19/1 Meyenburg	5,67	5,96	0,29	6,11	0,44	
3472660	5902900	PB 19/2 Meyenburg	5,31	5,96	0,65	6,11	0,80	
3472663	5894923	PR 44 Blumenthal	0,19	0,28	0,09	0,44	0,25	
3472665	5894925	PR BR 10 Blumenthal	n.v.					
3472665	5894923	PR 154 I Blumenthal	n.v.					
3472665	5894923	PR 154 II Blumenthal	n.v.					
3472666	5894018	BWK AB 4	n.v.					
3472674	5894942	PR 43 Blumenthal	0,24	0,28	0,04	0,44	0,20	
3472678	5894412	PR 34 Blumenthal	n.v.					
3472678	5895144	PR 155 I Blumenthal	n.v.					
3472678	5895144	PR 155 II Blumenthal	n.v.					
3472678	5894864	PR 161 II Blumenthal	n.v.					
3472691	5894976	PR 42 Blumenthal	0,35	0,35	0,00	0,51	0,16	
3472700	5894864	PR 162 I Blumenthal	n.v.					
3472700	5894864	PR 162 II Blumenthal	n.v.					
3472733	5894654	GMS 134	0,61	0,48	-0,13	0,59	-0,02	
3472733	5894654	PR 31 Blumenthal	n.v.					
3472740	5903200	PB 17 Meyenburg	5,7	5,76	0,06	5,93	0,23	
3472761	5897653	GMS 198	6,86	6,19	-0,67	5,94	-0,92	
3472785	5897065	GWM 216 Bockhorn	4,71	4,64	-0,07	4,52	-0,19	
3472803	5893866	GMS 25	0,2	0,29	0,09	0,33	0,13	
3472854	5895631	PR 87 Blumenthal	1,22	1,44	0,22	1,51	0,29	
3472858	5894559	PR 33 Blumenthal	n.v.					
3472963	5894732	PR 32 Blumenthal	n.v.					
3473004	5897290	GWM 2 Bockhorn	5,96	5,51	-0,45	5,32	-0,64	
3473072	5896086	PR 90 Blumenthal	2,14	2,60	0,46	2,53	0,39	
3473247	5896822	PR 89 Blumenthal	4,63	4,52	-0,11	4,29	-0,34	
3473300	5897945	GWM 1 Wölpscher Straße	7,83	7,53	-0,30	7,23	-0,60	
3473327	5902021	B 8 Metjensande	n.v.					
3473338	5902028	B 7 Metjensande	8,11	7,40	-0,71	7,51	-0,60	
3473350	5901883	GWM B 13 Metjensande	n.v.					
3473400	5898240	GWM Trenthöpen	7,79	8,20	0,41	7,90	0,11	
3473427	5904040	P 36 Meyenburg	n.v.					
3473515	5894315	PR 149 Blumenthal	1,15	1,08	-0,07	1,10	-0,05	
3473530	5897530	GWM 1 Bockhorn	n.v.					
3473820	5902700	P 33 Meyenburg	7,8	7,50	-0,30	7,61	-0,19	
3473835	5897955	PR 148 Blumenthal	7,82	8,23	0,41	7,89	0,07	
3473895	5899877	PR 138 Blumenthal	n.v.					

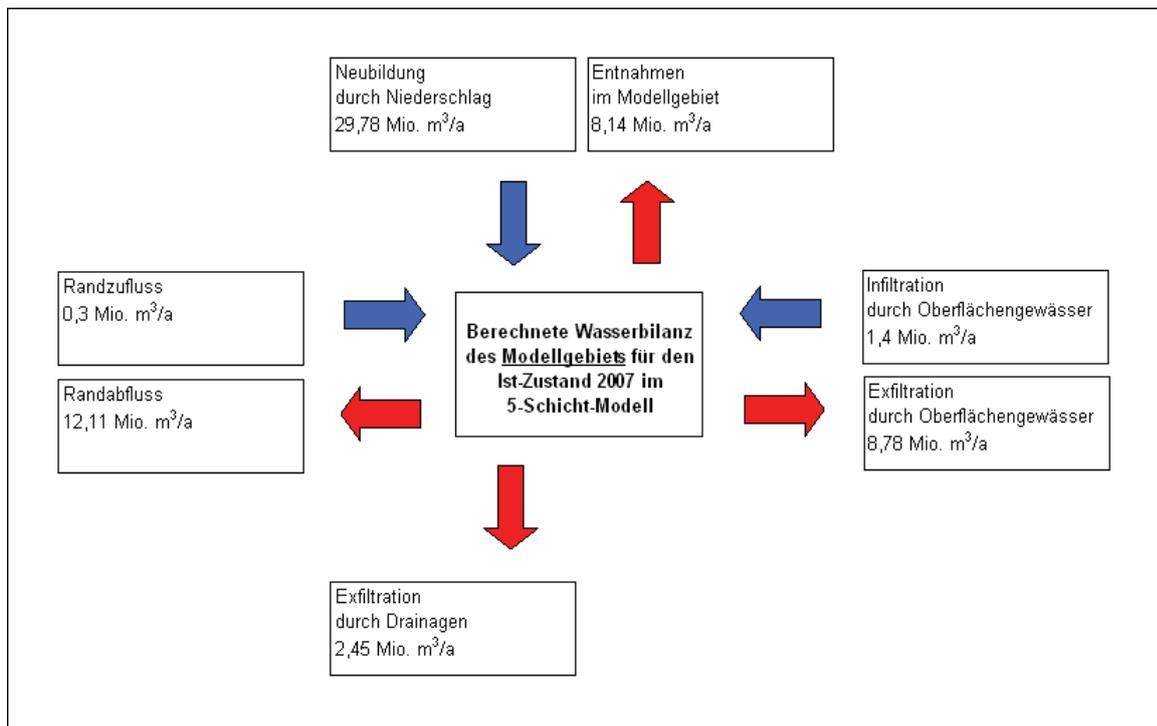
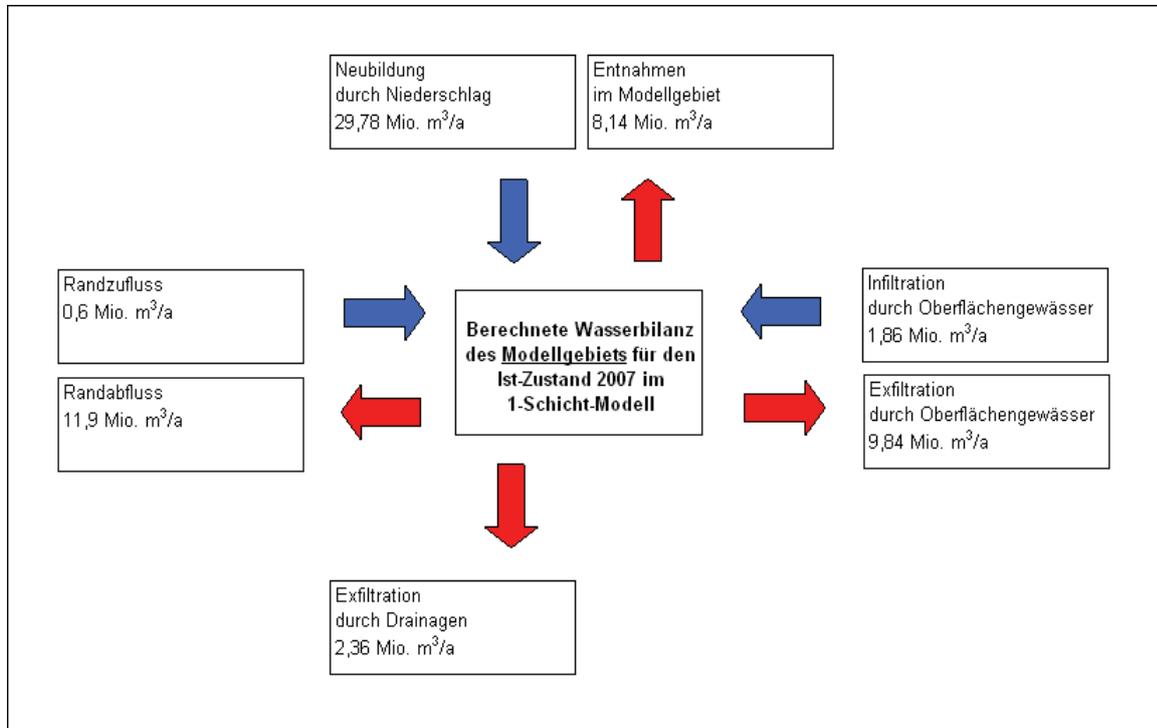
Rechtswert	Hochwert	Messstellenname	Grundwasserstand [mNN]				
			1-Schichtmodell		5-Schichtmodell		
			gem.	ber.		ber.	
					Diff. [m]		Diff. [m]
3473900	5897977	PR 131 Blumenthal	7,81	8,35	0,54	8,01	0,20
3473928	5895056	BR Viole	n.v.				
3474070	5896165	UWO 143	n.v.				
3474114	5893614	GWM BA 692	0,87	0,84	-0,03	0,88	0,01
3474125	5894035	PR 150 Blumenthal	n.v.				
3474129	5895838	GWM Aumund 543	n.v.				
3474180	5894800	FLB 112	1,63	1,64	0,01	1,58	-0,05
3474183	5898731	PR 146 Kreienmoor	9,35	9,78	0,43	9,37	0,02
3474201	5895306	GMS 195	2,09	2,04	-0,05	1,94	-0,15
3474242	5901791	PB 40 Schukamp	n.v.				
3474550	5894290	PR 151 Blumenthal	1,43	1,41	-0,02	1,40	-0,03
3474600	5899380	GWM B 2 Eggestedt	11,17	11,07	-0,10	10,69	-0,48
3474625	5896116	GWM B 1 Beckedorf	n.v.				
3474732	5893654	PR 29 Vegesack	n.v.				
3474838	5899408	GWM B 3 Eggestedt	11,71	11,60	-0,11	11,21	-0,50
3474840	5903300	UWO 140 I	7,94	8,36	0,42	8,43	0,49
3474840	5903332	UWO 140 II	7,85	8,33	0,48	8,41	0,56
3474858	5893716	PR 27 Vegesack	n.v.				
3474884	5893602	PR 28 Vegesack	n.v.				
3474940	5894736	PR 92 Vegesack	n.v.				
3475000	5899825	GWM B 1 Eggestedt	12,3	12,40	0,10	12,02	-0,28
3475049	5893626	PR 26 Vegesack	0,9	1,08	0,18	1,13	0,23
3475070	5902170	P 139 Blumenthal	10,46	9,42	-1,04	9,47	-0,99
3475102	5894377	FLB 115	1,55	1,58	0,03	1,56	0,01
3475178	5892920	GMS 2	n.v.				
3475182	5895639	PR 143 Blumenthal	2,73	2,52	-0,21	2,37	-0,36
3475190	5900490	UWO 141	12,94	12,56	-0,38	12,20	-0,74
3475209	5893067	PR 119 Vegesack	n.v.				
3475226	5893508	PR 25 Vegesack	0,63	1,05	0,42	1,11	0,48
3475261	5893230	PR 120 Vegesack	0,84	0,92	0,08	0,98	0,14
3475275	5893793	PR 24 Vegesack	n.v.				
3475331	5894039	PR 17 Vegesack	n.v.				
3475409	5893706	PR 18 Vegesack	n.v.				
3475410	5893616	PR 19 Vegesack	n.v.				
3475425	5893549	PR 20 Vegesack	0,05	1,11	1,06	1,16	1,11
3475428	5893580	PR 106 Vegesack	0,04	1,11	1,07	1,16	1,12
3475444	5893415	GMS 239	0,53	1,07	0,54	1,13	0,60
3475457	5893579	PR 10 Vegesack	-0,05	1,12	1,17	1,17	1,22
3475458	5893703	PR 11 Vegesack	-0,34	1,11	1,45	1,17	1,51
3475463	5893686	PR 108 I Vegesack	0,62	1,09	0,47	1,16	0,54
3475464	5893689	PR 108 II Vegesack	0,43	1,10	0,67	1,16	0,73
3475513	5893628	PR 137 Vegesack	0,31	1,15	0,84	1,20	0,89
3475513	5893629	PR 13 Vegesack	n.v.				
3475514	5893695	PR 14 Vegesack	n.v.				
3475531	5893755	PR 107 Vegesack	n.v.				
3475540	5893503	PR 4 Vegesack	n.v.				

Rechtswert	Hochwert	Messstellenname	Grundwasserstand [mNN]					
			1-Schichtmodell			5-Schichtmodell		
			gem.	ber.		ber.		
					Diff. [m]		Diff. [m]	
3475560	5893556	PR 8 I Vegesack	-0,32	1,16	1,48	1,21	1,53	
3475563	5893556	PR 8 II Vegesack	0,37	1,16	0,79	1,21	0,84	
3475566	5893556	PR 8 III Vegesack	n.v.					
3475588	5893442	GWM Gaswerk 95	n.v.					
3475600	5893528	PR 7 Vegesack	n.v.					
3475636	5895216	FLB 113	2,21	2,15	-0,06	2,05	-0,16	
3475660	5893190	GWM Tankstelle 97	n.v.					
3475713	5893289	GWM Edeka 96	n.v.					
3475742	5891855	FLB 365	n.v.					
3475792	5893217	GWM B 4 Grohn	1,83	1,12	-0,71	1,16	-0,67	
3475813	5892632	GMS 177	n.v.					
3475871	5893812	GMS 220	1,39	1,42	0,03	1,45	0,06	
3475933	5893559	FLB 118	n.v.					
3476289	5894422	PR 121 Vegesack	n.v.					
3476420	5899310	GWM Aue 1	14,48	14,85	0,37	14,47	-0,01	
3476540	5892760	GWM B 2 Grohn	2,16	2,93	0,77	3,35	1,19	
3476545	5893145	GMS 3	4,19	3,34	-0,85	3,55	-0,64	
3476621	5894007	PR 152 Vegesack	n.v.					
3476709	5892721	GWM B 6 Grohn	4,05	3,37	-0,68	3,97	-0,08	
3476722	5897311	PR 145 Blumenthal	n.v.					
3476750	5903410	UWO 147	11,35	11,64	0,29	11,64	0,29	
3476899	5891891	FLB 353	n.v.					
3476938	5892215	GMS 103	n.v.					
3477170	5898580	UWO 165	16,84	16,02	-0,82	15,51	-1,33	
3477510	5893900	GMS 188	10,58	10,72	0,14	11,34	0,76	
3477716	5891853	FLB 357	n.v.					
3477811	5892387	FLB 114	n.v.					
3478135	5895650	GWM Lamkens 217	16,73	14,94	-1,79	15,89	-0,84	
3478482	5900908	PR 144 Blumenthal	n.v.					
3478483	5900909	PR 140 Blumenthal	27,62	27,38	-0,24	26,76	-0,86	
3478495	5897075	PR 153 Blumenthal	22,79	21,51	-1,28	22,50	-0,29	
3478509	5893883	GMS 194	14,7	13,23	-1,47	14,01	-0,69	
3478511	5893522	GMS 204	n.v.					
3478675	5892035	GWM Werderland 501	n.v.					
3479150	5891560	GMS P 9	n.v.					
3479218	5895467	UWO 144	17,62	17,09	-0,53	17,72	0,10	
3479340	5902840	UWO 139	n.v.					
3479672	5892669	GWM BR 4 BS	n.v.					
3479674	5892667	GWM 4 I BS	n.v.					
3479676	5892490	GWM 3 I BS	n.v.					
3479685	5892480	GWM BR 3 BS	n.v.					
3479724	5894470	GWM B 1 Bördestraße	16,84	16,50	-0,34	16,99	0,15	
3479797	5893481	FLB 122	12,6	12,09	-0,51	12,80	0,20	
3479800	5893769	GMS 223	n.v.					
3479931	5893737	GWM BP 11 Auf dem Halm	14,05	13,75	-0,30	14,44	0,39	
3480020	5897365	GWM Stendorf	n.v.					

Rechtswert	Hochwert	Messstellenname	Grundwasserstand [mNN]					
			1-Schichtmodell		5-Schichtmodell			
			gem.	ber.		ber.		
					Diff. [m]		Diff. [m]	
3480155	5891986	GWM 2 II BS	n.v.					
3481183	5892273	GWM GK Lesum	n.v.					
3481185	5896548	PR 28 Ritterhude	n.v.					
3481287	5893444	GWM B 1 Burgdamm	n.v.					
3481436	5893282	GWM B 3 Burgdamm	n.v.					
3481460	5893859	FLB 108	n.v.					
3481546	5893224	GMS 193	3,2	3,37	0,17	4,14	0,94	
3481638	5891588	GMS 87	n.v.					
3482090	5895230	GWM B 1 Ritterhude	n.v.					
3482220	5897280	UWO 138	n.v.					
3482240	5895945	GWM B 4 Ritterhude	20,31	20,19	-0,12	20,72	0,41	
3482291	5893603	FLB 106	3,3	2,97	-0,33	3,47	0,17	
3482511	5892525	FLB 387	n.v.					
3482710	5896620	PR 19 Ritterhude	23,08	22,61	-0,47	23,66	0,58	
3482861	5891161	GMS 37	n.v.					
3483476	5904573	GWM PB 2 Hülseberg	n.v.					
3483874	5895316	PR 30 Ritterhude	n.v.					
3484250	5895045	FLB Borgwisch	1,9	1,50	-0,40	1,87	-0,03	
3484600	5901780	UWO 136	38,06	37,59	-0,47	38,63	0,57	
3485238	5891846	FLB 386	n.v.					
3486950	5897810	UWO 137 I	n.v.					
3486952	5897810	UWO 137 II	n.v.					
3487826	5904012	GWM 8 Sandhausen	n.v.					
3488114	5892218	FLB 385	n.v.					

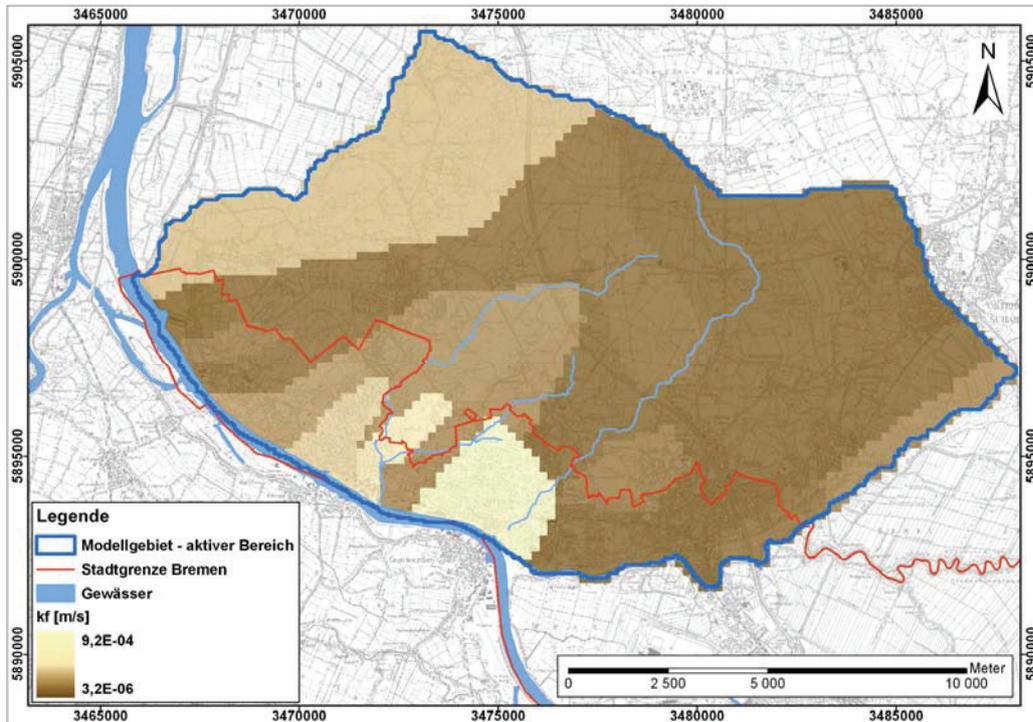
Anhang C

Wasserbilanzen für das Modellgebiet aus dem 1-Schichtmodell und dem 5-Schichtmodell

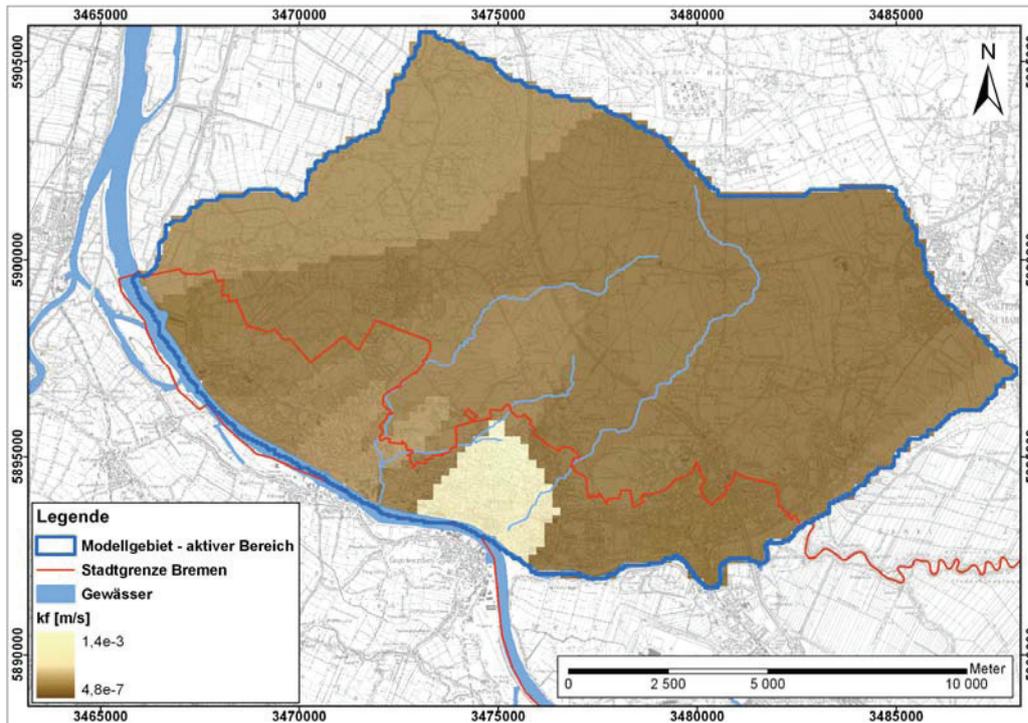


Anhang D

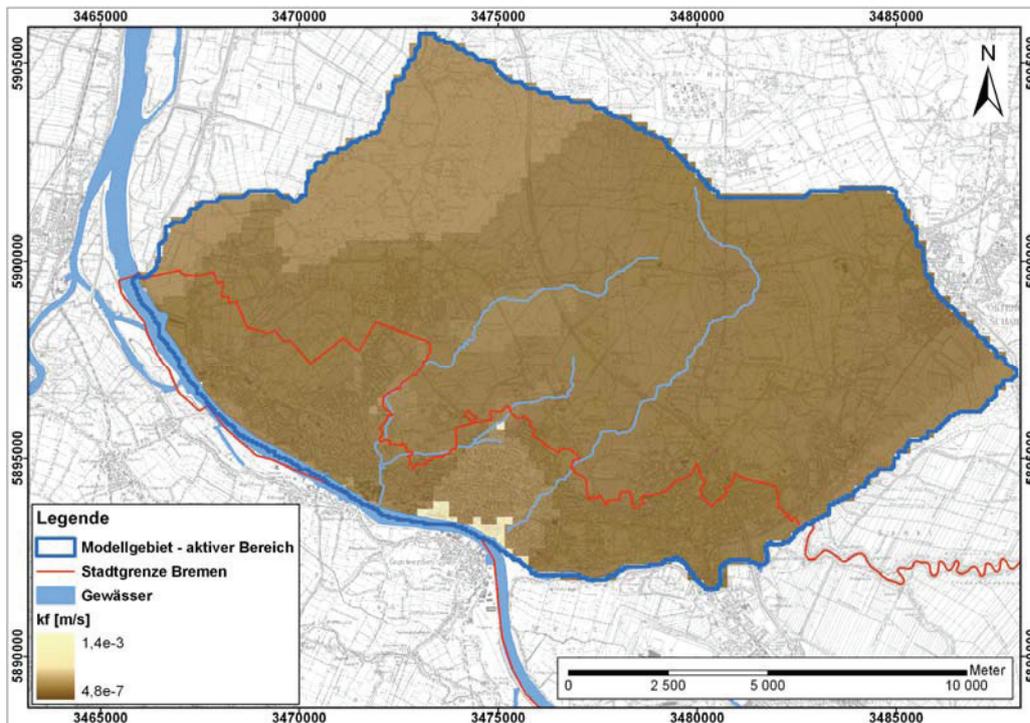
Verteilungen der k_f -Werte im 1-Schichtmodell und im 5-Schichtmodell



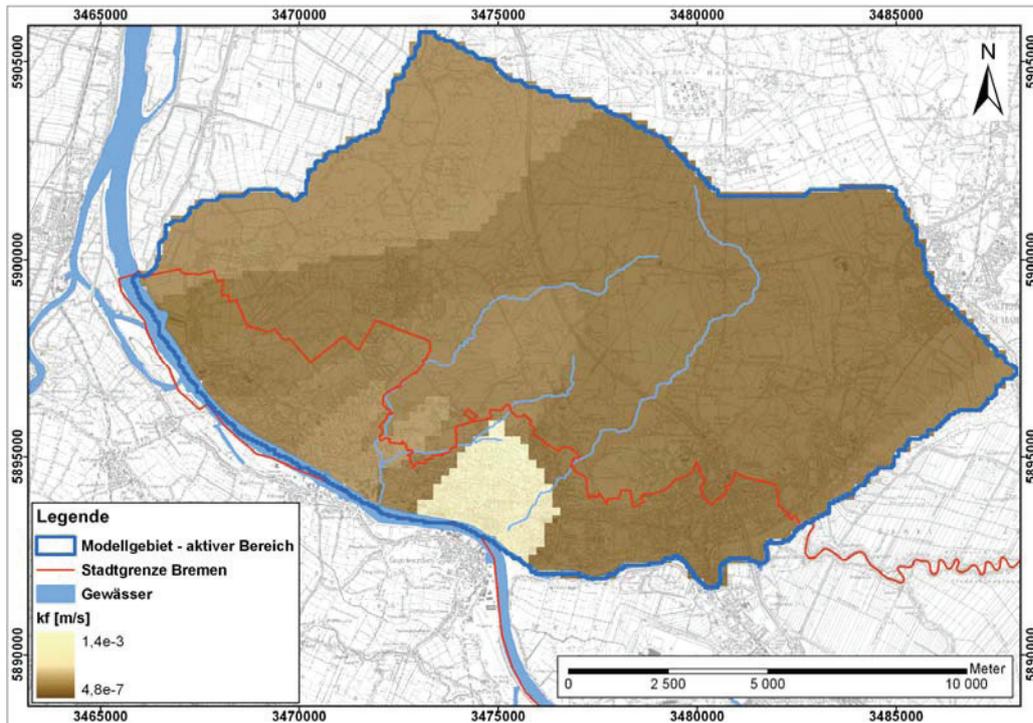
Die Verteilung der k_f -Werte im 1-Schichtmodell weist deutlich auf das Vorhandensein bindiger Schichten im Untergrund hin. Vergleiche mit Anhang F, Abb. 22 und Abb. 23 zeigen, dass Bereiche, in denen das 3D-Strukturmodell bindige Schichten ermittelt, geringere k_f -Werte haben, als Bereiche, wo nur sandige Schichten vorhanden sind. Die geringsten k_f -Werte werden in den Bereichen ermittelt, in denen die Mächtigkeit der bindigen Schichten insgesamt am größten ist.



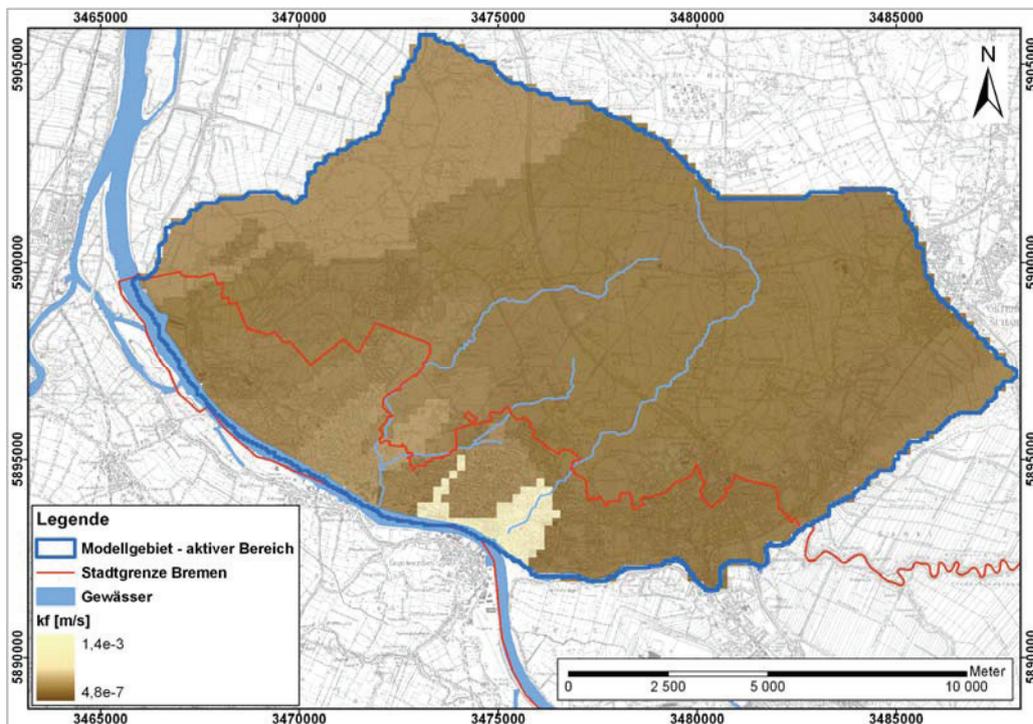
Die k_f -Wert-Verteilung in Schicht 1 des 5-Schichtmodells. Wesentliche Unterschiede zu den Verteilungen in den Schichten 2 und 4 sind dort, wo bindige Schichten im Untergrund sind. Die Gesamtspanne ist etwas größer als im 1-Schichtmodell.



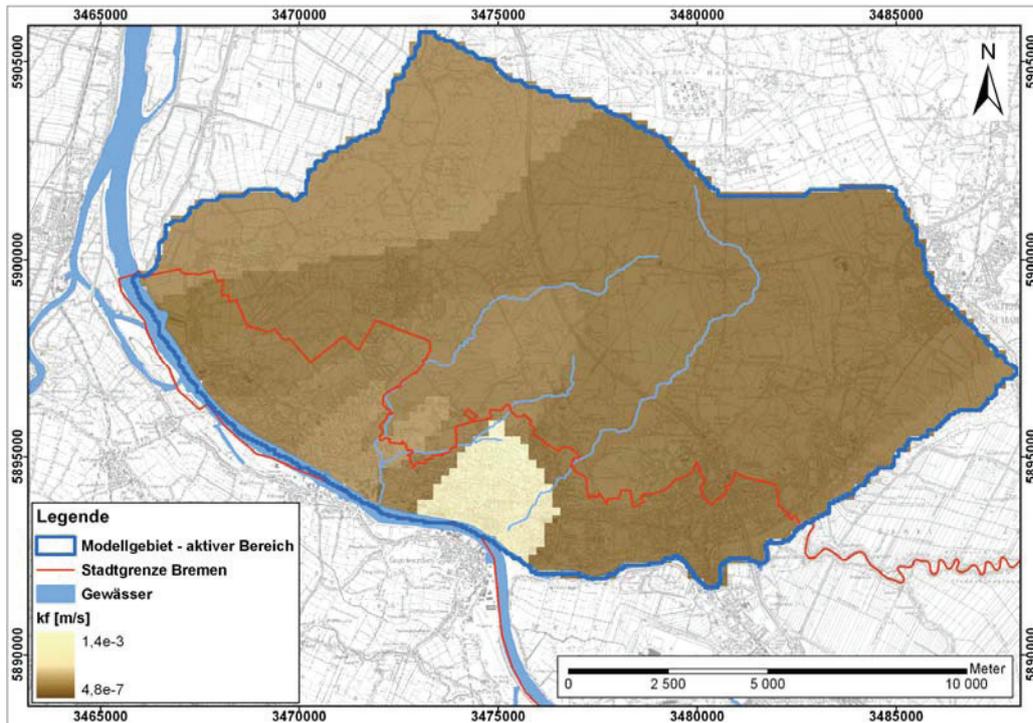
Die k_f -Wert-Verteilung in Schicht 2 des 5-Schichtmodells. Die bindigen Drenthe-Schichten sind durch geringere k_f -Werte gekennzeichnet.



Die k_f -Wert-Verteilung in Schicht 3 des 5-Schichtmodells. Sie entspricht im Wesentlichen der Verteilung in Schicht 1 des 5-Schichtmodells.



Die k_f -Wert-Verteilung in Schicht 4 des 5-Schichtmodells. Hier sind die bindigen Lauenburger-Schichten durch geringere k_f -Werte gekennzeichnet.

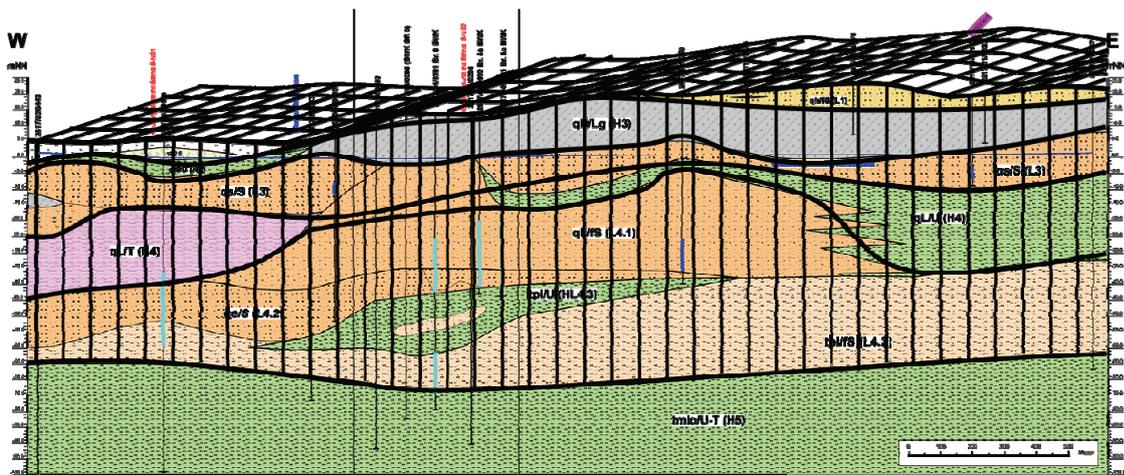


Die k_f -Wert-Verteilung in Schicht 5 des 5-Schichtmodells. Die Verteilung entspricht im Allgemeinen denen der Schichten 1 und 3.

Anhang E

Technische Struktur im 5-Schichtmodell

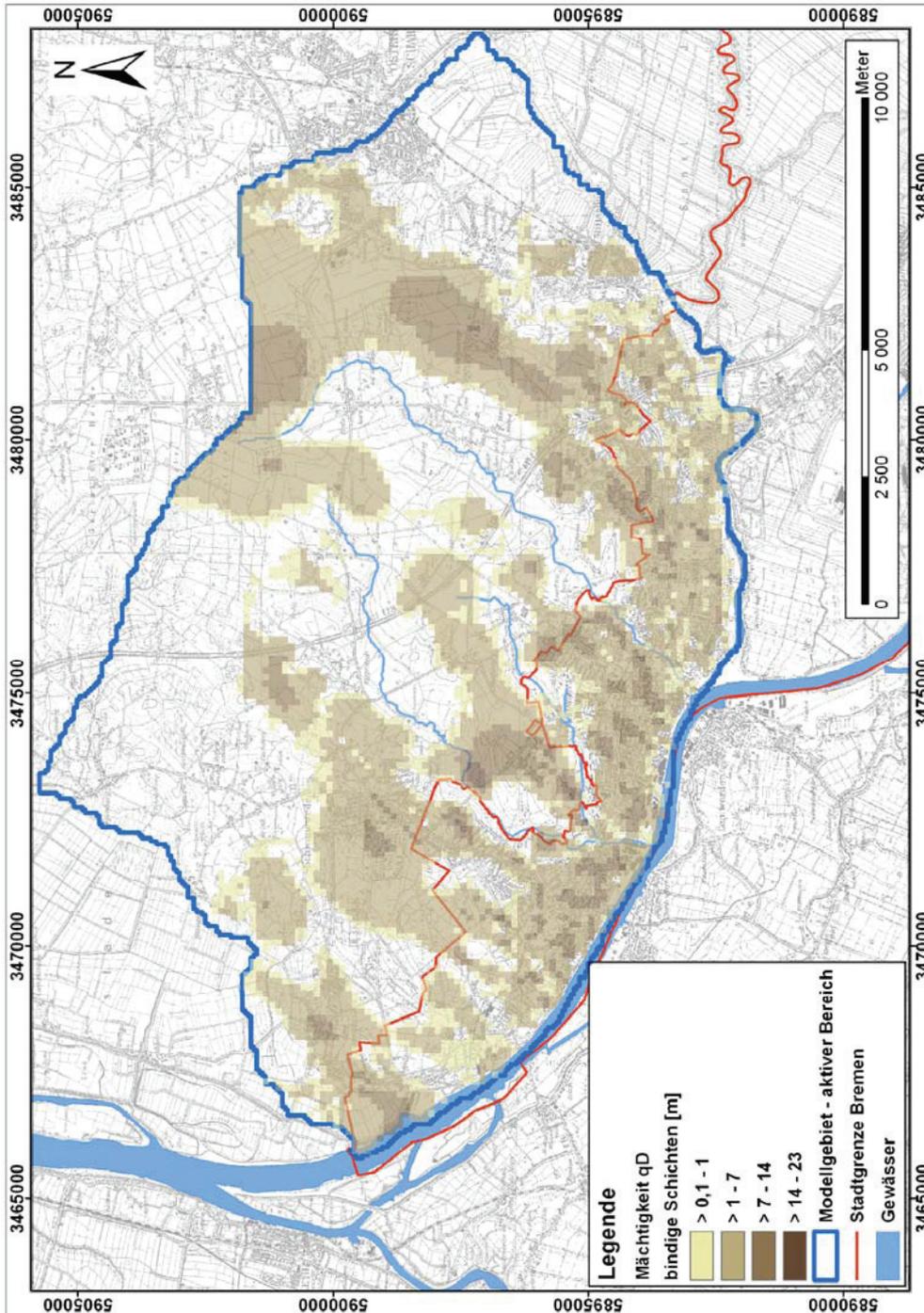
Der strukturelle Aufbau des Strömungsmodells wird am Beispiel der Skizze eines geologischen Schnittes gezeigt. Die Modellzellen sind in der horizontalen x-y-Fläche regulär, in z-Richtung irregulär. Der Schnitt hat eine Länge von ca. 3,5 km, die Kantenlänge der Zellen entspricht in der Skizze ca. 90 m.



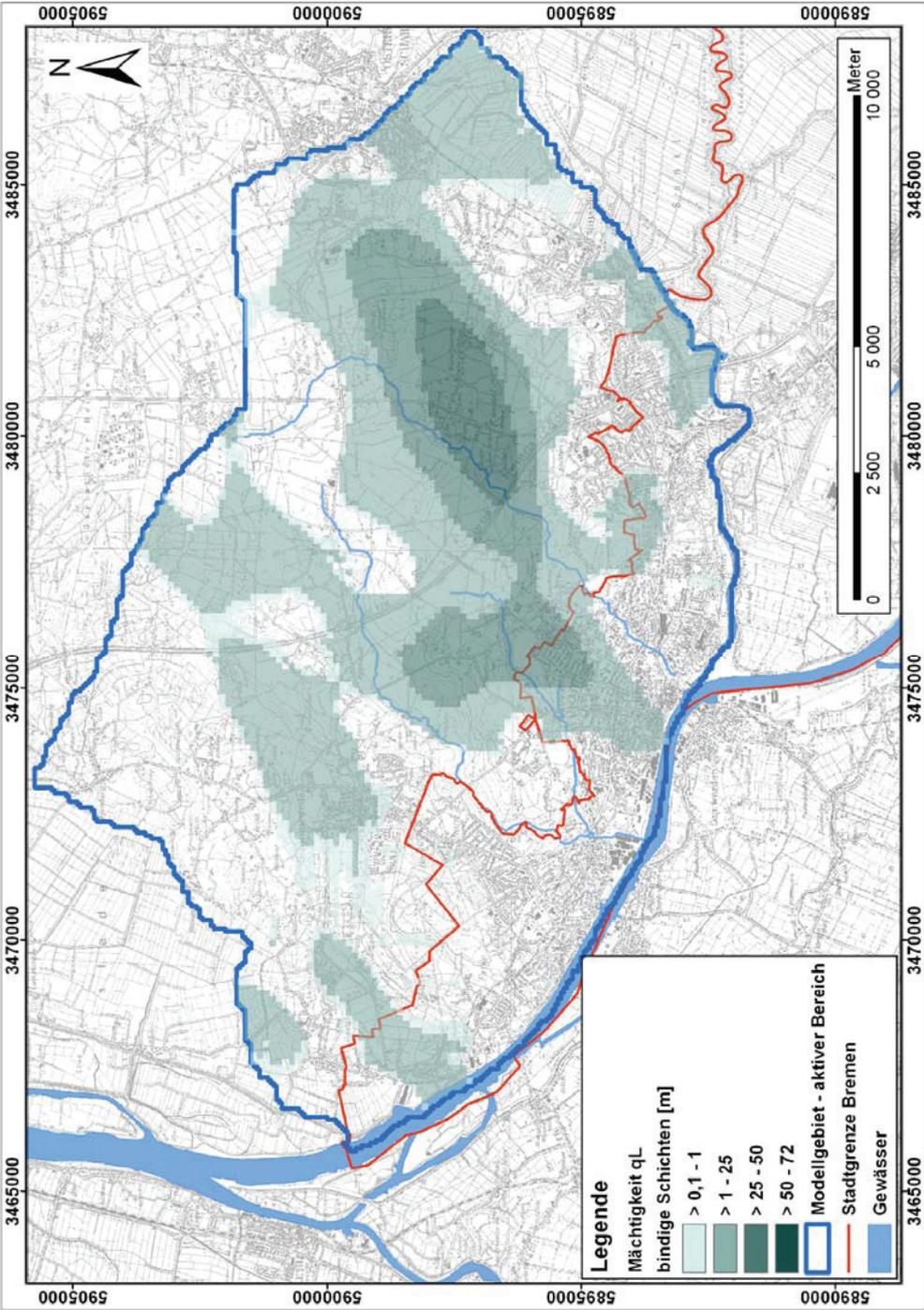
Anhang F

Mächtigkeiten der bindigen Schichten im Modellgebiet

Mächtigkeit der bindigen Drenthe-Schichten (Schicht 2 im 5-Schichtmodell)



Mächtigkeit der bindigen Lauenburger-Schichten (Schicht 4 im 5-Schichtmodell)



Kopplung von räumlichen Daten aus dem 3D-Strukturmodell mit dem Strömungsmodell

Die Ausdehnung der bindigen Schichten wird im 3D-Strukturmodell ermittelt (Abb. 22, 23). Die Lage wird ausgegeben und in PMWin (CHIANG 2005) in jedem Bearbeitungsmodul über das Menü „Options\Maps“ als Linienzug angezeigt. Die Ausgabe muss im Dateiformat „*.dxf“ oder „*.bln“ vorliegen. In einer Matrizendarstellung von PMWin (CHIANG 2005), die mit solch einer Ausdehnung einer bindigen Schicht hinterlegt ist, werden Zellen, die innerhalb der Ausdehnung liegen, mit einer „1“ gefüllt und die außerhalb liegenden mit einer „0“. Es ergibt sich eine Matrix, in der eine „1“ das Vorhandensein bindiger Schichten anzeigt und eine „0“ auf ein Fehlen, bzw. eine Verbindung von sandigen Schichten im Liegenden und Hangenden hinweist. Diese Matrizen werden für den Schichtkörper, der die bindigen Schichten der Drenthefazies enthält und den, der die bindigen Schichten der Lauenburgerfazies enthält erstellt, in eine Tabellenform exportiert und für eine Weiterverarbeitung bereit gestellt.

Der Umrechnungsübersicht (Tab. 7) entsprechend werden insgesamt 5 Tabellenblätter erstellt, die in ihrer Ausdehnung den 5 Modellschichten entsprechen (187 x 118 Zellen). Die Tabellenblätter, die den sandigen Schichten entsprechen (Schichten 1, 3 und 5) enthalten ausschließlich „0“. Die Daten der 5 Tabellenblätter werden anschließend in einem Blatt zusammengeführt. Die endgültige Form ist nach Spalten sortiert und enthält in den ersten Spalten die Koordinaten aller Zellmittelpunkte. In den folgenden Spalten sind die Eigenschaftswerte „sandig = 0“ oder „bindig = 1“ angegeben. Auf diese Datengrundlage wird die Umrechnung aus Tab. 7 angewendet.

In Bereichen, wo benachbarte Zellen mit einer „0“ gefüllt sind, bleibt der Durchlässigkeitsbeiwert gegenüber dem Ausgangswert aus der Modellierung des 1-Schichtmodells unverändert. In Bereichen, wo benachbarte Zellen mindestens eine „1“ enthalten, wird der Durchlässigkeitsbeiwert verändert unter der Maßgabe, die Transmissivität über die Gesamtmächtigkeit des Modells beizubehalten. Wird also der Durchlässigkeitsbeiwert in einer Zelle, die bindige Fazies enthält entsprechend des Beispiels in Tabelle 3 erniedrigt, wird er in darüber und darunter liegenden Zellen entsprechend erhöht. Im Ergebnis erhält man Matrizen, die für jede Modellzelle einen angepassten Durchlässigkeitsbeiwert enthalten.

Einbau von Messstellen und Grundwasserentnahmebrunnen in das Strömungsmodell

Es wird die Tiefenlage der Messstellen und Grundwasserentnahmebrunnen angepasst. Die Messstellen werden über das Tool „Head Observations“ schichtgenau (oder anteilig in verschiedenen Schichten) aktiviert. Die Grundwasserentnahmebrunnen werden in den Schichten eingebaut, in denen sie aktiv sind. Hierzu wird aus dem Modellaufbau zunächst eine Übersicht in Spalten erstellt. Für jede Zelle wird ein Rechts- und Hochwert angegeben und die jeweiligen Schichtgrenzen in mNN über den Modellaufbau in die Tiefe. Dann werden Grundwasserentnahmebrunnen und Messstellen ihrer geographischen Lage entsprechend den Zellen zugeordnet. Zu den Grundwasserentnahmebrunnen und Messstellen werden Anfang und Ende des eingebauten Filters in mNN angegeben. Zuletzt wird abgeglichen, in welchen Modellschichten die Grundwasserentnahmebrunnen und Messstellen aktiv, bzw. verfiltert sind. Von dieser Grundlage ausgehend werden sie entsprechend in das Modell eingebaut.

Anhang H: Einbau von Oberflächengewässern über die „Riverfunktion“

Der Einfluss von Oberflächengewässern (Randbedingung 3. Art) wird über das Modul „River“ in PMWin (CHIANG 2005) berücksichtigt. Die genaue Lage und Breite eines Oberflächengewässers ist durch Vorort-Erkundungen und aus Kartenmaterial ermittelt worden. Die Höhenlage des Gewässerbettes wird aus topografischen Karten und einem DGM abgeleitet. Mit Versickerungsmessungen sind Durchlässigkeiten der Gewässerbetten ermittelt worden.

Der Einbau der ermittelten Felddaten findet im Modul „River“ mit der Methode „Polygonzug (Polyline)“ statt. Dem Gewässerverlauf folgend werden Knotenpunkte eingegeben, an denen dem Gewässer feste Eigenschaftswerte zugewiesen werden. Es wird die Durchlässigkeit des Gewässerbettes, der Wasserspiegel im Gewässer, die Höhe des Gewässerbettes, die Breite des Gewässerbettes und die Mächtigkeit des Gewässerbettes angegeben. Zwischen den Knotenpunkten wird durch die Software interpoliert. Die Anzahl der verwendeten Knotenpunkte pro Gewässer ist nicht limitiert, sie ist entsprechend den vorhandenen Felddaten frei wählbar. Es ist möglich für jeden Knotenpunkt Durchlässigkeitsbeiwerte durch die Benutzung von PEST (DOHERTY 2002) zu ermitteln. Der Einfluss eines Oberflächengewässers auf eine bestimmte Modellschicht kann, unabhängig von den Eigenschaftswerten, entweder manuell oder automatisch durch die verwendete Software zugewiesen werden.

Anhang I: Ergebnisse der Stichtagsmessungen 2005 – 2007 der 163 genutzten Messstellen

Jahr	2005		2005		2006		2006		2007		2007	
		GW										
		[mNN]										
Messstellenname												
GWM Nedderwarder Weg			02.11.	0,15	27.03.	0,17	09.10.	0,15	28.03.	0,24	06.11.	0,27
GMS 190							10.10.	0,58	28.03.	1,11	06.11.	0,87
FLB 123	07.04.	2,8	02.11.	2,53	27.03.	2,5	09.10.	2,39	28.03.	2,83	06.11.	2,6
P 1 Farge			01.11.	4,24	27.03.	4,21	09.10.	4,05	28.03.	4,49	06.11.	4,2
P 4 Farge	06.04.	4,73	01.11.	4,43	27.03.	4,38	09.10.	4,24	28.03.	4,58	06.11.	4,35
P 2 Farge	06.04.	4,91	01.11.	4,59	27.03.	4,53	09.10.	4,76	28.03.	4,81	06.11.	4,51
P 3 Farge	06.04.	4,92	01.11.	4,63	27.03.	4,57	09.10.	4,44	28.03.	4,81	06.11.	4,55
GMS 186							10.10.	4,69	28.03.	4,89	06.11.	4,76
GMS 182 Farge							10.10.	1,93	28.03.	2,62	06.11.	2,33
GWM Witteborg	06.04.	2,53	01.11.	2,21	27.03.	2,37	09.10.	2,06	28.03.	2,54	06.11.	2,32
FLB 107	06.04.	3,17	01.11.	2,84	27.03.	2,82	09.10.	2,69	28.03.	3,15	06.11.	2,88
GWM Am Depot	04.04.	4,31	01.11.	3,89	27.03.	3,87	09.10.	3,68	28.03.	4,22	06.11.	3,82
UWO 164	02.04.	1,99	05.11.	1,58	03.04.	2,9	04.10.	1,45	02.04.	2	09.11.	3,19
PR 101 Blumenthal	06.04.	4,76	04.11.	4,48	30.03.	4,44	10.10.	4,27	27.03.	4,57	06.11.	4,37
GWM B 2 Farge	04.04.	3,47	01.11.	3,32	27.03.	3,26	10.10.	3,14	28.03.	3,37	06.11.	3,24
PR 130 Blumenthal	11.04.	1,29	03.11.	1,37	30.03.	1,32	10.10.	1,26	27.03.	1,42	06.11.	1,45
GWM G 5 IVG	04.04.	4,76	01.11.	4,67	27.03.	4,55	09.10.	4,45	28.03.	4,47	06.11.	4,46
GWM BB 16 IVG	04.04.	3,53	01.11.	3,46	27.03.	3,39	10.10.	3,26	28.03.	3,42	06.11.	3,37
PR 136 Blumenthal	05.04.	0,67	01.11.	0,69	30.03.	0,63	10.10.	0,71	27.03.	0,78	06.11.	0,87
GWM Werkstatt IVG			01.11.	4,8	27.03.	4,71	10.10.	4,58	28.03.	4,69	06.11.	4,63
PR 110 Blumenthal	11.04.	0,13	08.11.	0,4	30.03.	0,16	10.10.	0,11	27.03.	-0,01	06.11.	0,42
PR 109 Blumenthal	11.04.	-0,67	08.11.	-0,05	30.03.	-0,71	10.10.	-0,86	27.03.	-0,83	06.11.	-0,22
PR 91 Blumenthal	11.04.	0,12	08.11.	0,43	30.03.	0,03	10.10.	-0,05	27.03.	0,12	06.11.	0,43
PR 105 Blumenthal	06.04.	3,11	08.11.	2,98	30.03.	2,87	10.10.	2,76	27.03.	2,88	06.11.	3,1
PR 113 Blumenthal	11.04.	1,03	08.11.	1,16	30.03.	1,08	10.10.	0,92	27.03.	1,09	06.11.	1,3
GMS 197							10.10.	0,36	28.03.	0,6	06.11.	0,57
GWM 26 IVG	06.04.	3,5	02.11.	3,78	27.03.	3,73	10.10.	3,59	29.03.	3,64	06.11.	3,7
PR 147 Hünenstein			02.11.	3,57	27.03.	3,75	26.10.	3,44	27.03.	4,18	06.11.	3,51
PR 100 Blumenthal	06.04.	5,03	04.11.	5,05	30.03.	4,91	10.10.	4,85	27.03.	4,86	06.11.	4,96
PR 129 Blumenthal	11.04.	0,93	03.11.	0,65	30.03.	0,52	10.10.	0,68	27.03.	0,94	06.11.	0,77
GWM BB 7 Farge	04.04.	6,56	01.11.	6,57	27.03.	6,46	10.10.	6,4	28.03.	6,44	06.11.	6,49
PR 128 Blumenthal	11.04.	0,16	03.11.	-0,31	30.03.	-0,49	10.10.	-0,09	27.03.	0,23	06.11.	-0,18
PR 126 Blumenthal							18.10.	-0,14	27.03.	0,18	06.11.	-0,25
GMS 196							10.10.	1,57	28.03.	1,88	06.11.	1,82
PR 39 Blumenthal	05.04.	0,53	01.11.	0,16	30.03.	0,14	10.10.	0,28	27.03.	0,58	06.11.	0,4
PR 41 Blumenthal	11.04.	0,76	07.11.	0,45	30.03.	0,48	10.10.	0,5	27.03.	0,87	06.11.	0,7
UWO 148	02.04.	4,77	05.11.	4,33	03.04.	4,67	04.10.	4,25	02.04.	4,85	06.11.	4,54
FLB 101	04.04.	1,32	02.11.	0,98	28.03.	0,96	09.10.	0,8	29.03.	1,3	07.11.	1,13
PR 40 Blumenthal	11.04.	0,56	08.11.	0,33	30.03.	0,35	10.10.	0,31	27.03.	0,68	06.11.	0,59
PR 125 Blumenthal	11.04.	2,65	04.11.	2,43	30.03.	2,4	10.10.	2,21	27.03.	2,53	06.11.	2,45
PR 38 Blumenthal	11.04.	0,52	08.11.	0,27	30.03.	0,28	10.10.	0,16	27.03.	0,66	06.11.	0,5
GWM Schwaneweder Heide	06.04.	7,24	02.11.	7,12	27.03.	7,16	09.10.	6,97	28.03.	7,33	06.11.	7,11
BB 5 Amtsgericht	04.04.	0,67	02.11.	0,42	28.03.	0,52	09.10.	0,43	28.03.	0,9	06.11.	0,71
PR 3 Blumenthal	04.04.	0,84	01.11.	-0,85	30.03.	-0,2	10.10.	-0,77	27.03.	0,92	06.11.	-0,47
PR 2 Blumenthal	04.04.	0,38	01.11.	0,11	30.03.	-0,03	10.10.	-0,01	27.03.	0,56	06.11.	0,26
PR 37 Blumenthal	11.04.	0,33	07.11.	0,14	30.03.	0,27	17.10.	0,12	27.03.	0,59	06.11.	0,46

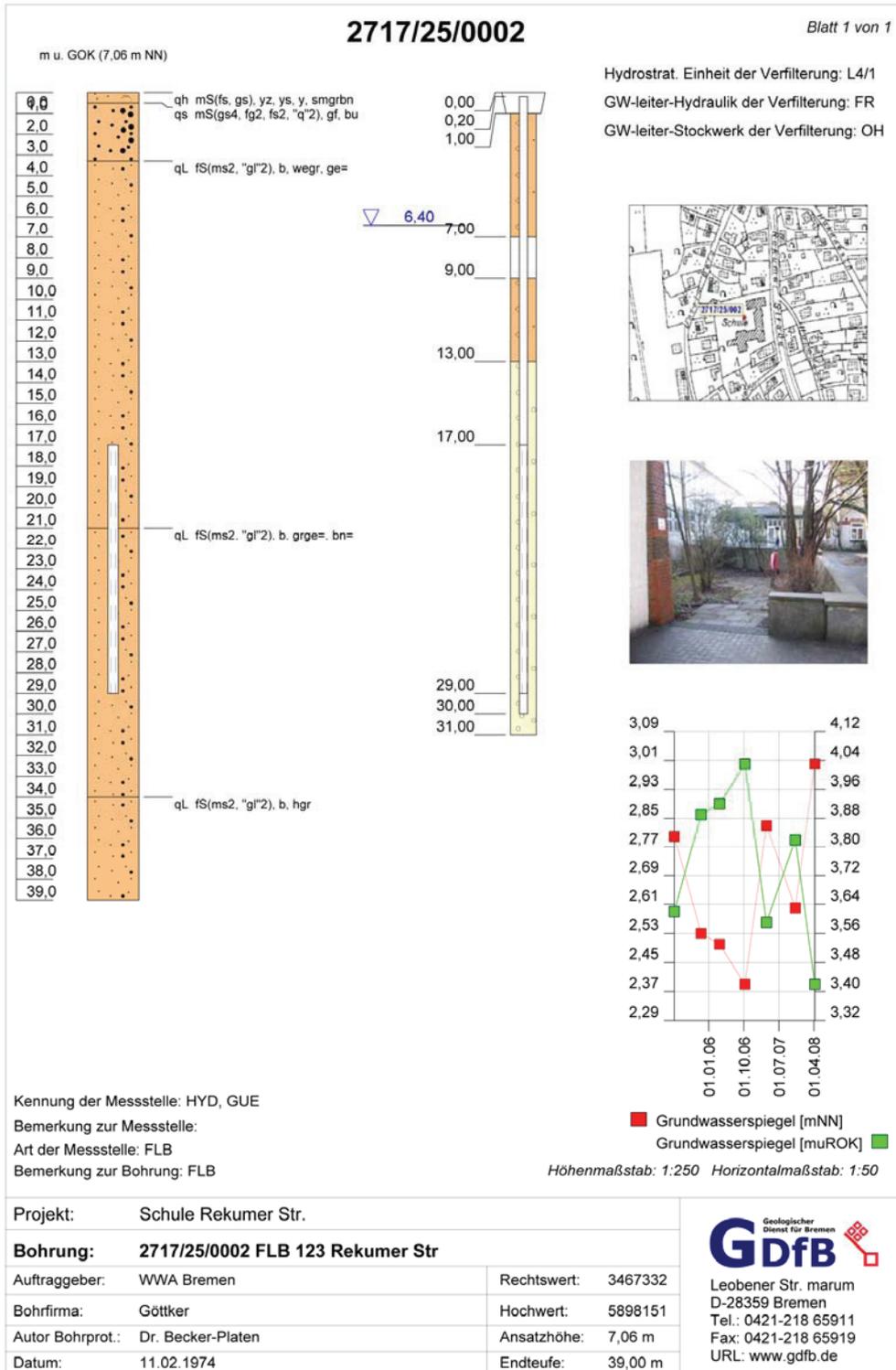
Jahr	2005		2005		2006		2006		2007		2007	
		GW										
		[mNN]										
Messstellenname												
FLB 111	06.04.	3,66	02.11.	3,47	27.03.	3,51	10.10.	3,22	28.03.	3,54	07.11.	3,45
PR 84 Blumenthal	04.04.	0,65	01.11.	0,37	30.03.	0,51	10.10.	0,21	27.03.	0,83	06.11.	0,5
PR 12 Blumenthal	04.04.	0,15	01.11.	-0,08	30.03.	0,08	10.10.	-0,24	27.03.	0,37	06.11.	0,25
PR 1 Blumenthal	04.04.	0,32	01.11.	0,06	30.03.	0,2	10.10.	-0,04	27.03.	0,5	06.11.	0,37
PR 6 Blumenthal	04.04.	1,18	01.11.	-0,01	30.03.	1,59	10.10.	-0,13	27.03.	0,37	06.11.	1,82
PR 10 Blumenthal	04.04.	0,39	01.11.	0,06	30.03.	0,27	10.10.	-0,16	27.03.	0,49	06.11.	-0,1
PR 79 Blumenthal									27.03.	0,6	06.11.	0,48
PR 17 Blumenthal	04.04.	-0,07	01.11.	-0,15	30.03.	-0,18	10.10.	-0,2	27.03.	0,25	06.11.	0,15
PR 13 Blumenthal	04.04.	-0,28	01.11.	-0,45	30.03.	-0,26	10.10.	-0,48	27.03.	-0,03	06.11.	-0,14
GWM B 5 Schwanewede	06.04.	7,82	02.11.	7,86	27.03.	7,85	09.10.	7,7	28.03.	8,28	06.11.	8,1
PR 22 Blumenthal	08.04.	-0,3	07.11.	-0,4	30.03.	-2,19	10.10.	-0,48	27.03.	-0,41	06.11.	-0,15
PR 88 Blumenthal	05.04.	3,5	01.11.	3,37	30.03.	3,39	10.10.	3,23	27.03.	3,5	06.11.	3,37
PR 36 Blumenthal	05.04.	0,03	01.11.	-0,09	30.03.	-0,09	10.10.	-0,29	27.03.	0,25	06.11.	0,16
PR 73 Blumenthal	04.04.	1,05	01.11.	0,69	30.03.	1,04	10.10.	-0,63	27.03.	-0,16	06.11.	-0,15
PR 80 Blumenthal	08.04.	-0,21	07.11.	-0,33	30.03.	-0,3	10.10.	-0,59	27.03.	0,03	06.11.	0,31
PR 135 II Blumenthal	04.04.	1,17	01.11.	0,74	30.03.	0,89	10.10.	-0,06	27.03.	0,08	06.11.	0,47
PR 77 Blumenthal	04.04.	-0,55	01.11.	-0,67	30.03.	-1,66	10.10.	-1,14	27.03.	-0,34	06.11.	0,22
PR 78 Blumenthal	04.04.	-1,05	01.11.	-1,08	30.03.	-1,11	10.10.	-1,71	27.03.	-0,79	06.11.	0,33
PR 24 Blumenthal	04.04.	-0,22	01.11.	-0,39	30.03.	-0,57	10.10.	-0,54	27.03.	-0,02	06.11.	0,06
PR 72 Blumenthal	04.04.	0,35	01.11.	0,17	30.03.	0,71	10.10.	-0,94	27.03.	-0,59	06.11.	-0,58
PR 53 Blumenthal	04.04.	-0,37	01.11.	-0,47	30.03.	-0,32	10.10.	-0,96	27.03.	-0,07	06.11.	-0,1
PR 71 Blumenthal	04.04.	0,89	01.11.	0,55	30.03.	0,74	10.10.	-0,12	27.03.	0,46	06.11.	0,36
PR 86 Blumenthal	08.04.	0,18	07.11.	-0,05	30.03.	0,03	10.10.	-0,4	27.03.	0,25	06.11.	0,29
PR 75 Blumenthal	04.04.	-0,38	01.11.	-0,3	30.03.	1,03	10.10.	-0,5	27.03.	-0,15	06.11.	-0,13
PR 98 Blumenthal	04.04.	-0,46	01.11.	-0,52	30.03.	-0,43	10.10.	-0,58	27.03.	-0,13	06.11.	-0,18
PR 81 Blumenthal	08.04.	-0,09	07.11.	-0,19	30.03.	-0,14	10.10.	-0,39	27.03.	0,16	06.11.	0,32
PR 97 Blumenthal									27.03.	-0,14	06.11.	-0,13
PR 99 Blumenthal	11.04.	6,26	04.11.	6,16	30.03.	7,24	10.10.	6,03	27.03.	6,16	06.11.	6,19
PR 85 Blumenthal	04.04.	0,4	01.11.	0,03	30.03.	0,25	10.10.	-0,34	27.03.	0,24	06.11.	0,19
PR 76 Blumenthal	04.04.	0,23	01.11.	-0,1	30.03.	0,07	10.10.	-0,72	27.03.	0,12	06.11.	-0,07
PR 54 Blumenthal	08.04.	-0,4	08.11.	-0,35	30.03.	-0,37	10.10.	-0,54	27.03.	-0,05	06.11.	-0,04
PR 74 Blumenthal	04.04.	0,62	01.11.	0,32	30.03.	0,51	10.10.	-0,15	27.03.	0,37	06.11.	0,38
PR 51 Blumenthal	04.04.	-0,46	01.11.	-0,46	30.03.	-0,67	10.10.	-0,5	27.03.	-0,05	06.11.	-0,09
PR 95 Blumenthal	04.04.	-0,62	01.11.	-0,58	30.03.	-0,6	10.10.	-0,67	27.03.	-0,28	06.11.	-0,22
PR 56 Blumenthal	04.04.	-0,53	01.11.	-0,53	30.03.	-0,5	10.10.	-0,67	27.03.	-0,17	06.11.	-0,15
PR 93 Blumenthal	04.04.	-0,65	01.11.	-0,6	30.03.	-0,59	10.10.	-0,68	27.03.	-0,27	06.11.	-0,23
PR 134 I Blumenthal	04.04.	-0,4	01.11.	-0,36	30.03.	-0,58	10.10.	-0,38	27.03.	0,08	06.11.	0,05
PR 52 Blumenthal	05.04.	-0,22	01.11.	-0,17	30.03.	-0,05	10.10.	-0,18	27.03.	0,18	06.11.	0,13
GMS 4			02.11.	-1,16	27.03.	-1,01	09.10.	-0,77	28.03.	-0,88	06.11.	-0,8
PR 55 Blumenthal	08.04.	-0,24	07.11.	-0,25	30.03.	-0,2	10.10.	-0,37	27.03.	0,2	06.11.	0,08
PR 30 Blumenthal	05.04.	-0,16	01.11.	-0,16	30.03.	-0,02	10.10.	-0,11	27.03.	0,22	06.11.	0,13
PR 47 Blumenthal	05.04.	-0,24	01.11.	-0,09	30.03.	-0,01	10.10.	-0,16	27.03.	0,28	06.11.	0,14
GMS 118							10.10.	0,01	28.03.	0,18	09.11.	-0,02
PR 115 Blumenthal	06.04.	9,32	03.11.	9,29	30.03.	9,23	10.10.	9,17	27.03.	9,32	06.11.	9,27
PR 46 Blumenthal	05.04.	-0,45	01.11.	-0,4	30.03.	-0,32	10.10.	-0,23	27.03.	-0,31	06.11.	-0,14
PB 19/1 Meyenburg	07.04.	5,95	01.11.	5,61	27.03.	5,75	09.10.	5,61	28.03.	6,15	06.11.	5,67
PB 19/2 Meyenburg	07.04.	5,6	01.11.	5,3	27.03.	5,42	09.10.	5,25	28.03.	5,81	06.11.	5,31
PR 44 Blumenthal	05.04.	-0,17	01.11.	-0,06	30.03.	0,08	10.10.	-0,1	27.03.	0,35	06.11.	0,19
PR 43 Blumenthal	05.04.	-0,11	01.11.	0,03	30.03.	0,1	10.10.	0,01	27.03.	0,34	06.11.	0,24
PR 42 Blumenthal	05.04.	0,01	01.11.	0,11	30.03.	0,08	10.10.	0,01	27.03.	0,45	06.11.	0,35

Jahr	2005		2005		2006		2006		2007		2007	
		GW										
		[mNN]										
Messstellenname												
GMS 134							10.10.	0,5	28.03.	0,52	06.11.	0,61
PB 17 Meyenburg	07.04.	5,98	01.11.	5,61	27.03.	5,78	09.10.	5,61	28.03.	6,22	08.11.	5,7
GMS 198	06.04.	7	01.11.	6,86	27.03.	6,87	10.10.	6,72	28.03.	6,91	06.11.	6,86
GWM 216 Bockhorn			01.11.	4,79	27.03.	4,96	10.10.	4,6	29.03.	4,72	07.11.	4,71
GMS 25	05.04.	0,29	31.10.	0,16	27.03.	0,15	09.10.	0,32	28.03.	0,35	06.11.	0,2
PR 87 Blumenthal							10.10.	0,74	27.03.	1,07	06.11.	1,22
GWM 2 Bockhorn	06.04.	6,05	02.11.	5,93	27.03.	5,97	09.10.	5,75	28.03.	5,99	07.11.	5,96
PR 90 Blumenthal	11.04.	1,89	08.11.	1,88	30.03.	1,97	10.10.	1,74	27.03.	1,35	06.11.	2,14
PR 89 Blumenthal	05.04.	4,05	01.11.	4,35	30.03.	4,41	10.10.	4,18	27.03.	4,38	06.11.	4,63
GWM 1 Wölpscher Straße	06.04.	8	02.11.	7,83	27.03.	7,83	09.10.	7,69	28.03.	8,02	07.11.	7,83
B 7 Metjensande	07.04.	8,37	01.11.	8,08	27.03.	8,12	09.10.	8,13	28.03.	8,58	06.11.	8,11
GWM Trenthöpen	06.04.	7,9	02.11.	7,8	27.03.	7,77	09.10.	7,7	28.03.	7,91	06.11.	7,79
PR 149 Blumenthal			02.11.	0,9	30.03.	0,89	26.10.	1,04	27.03.	1,18	06.11.	1,15
P 33 Meyenburg	07.04.	8	01.11.	7,76	27.03.	7,82	09.10.	7,76	28.03.	8,2	06.11.	7,8
PR 148 Blumenthal			02.11.	7,83	27.03.	7,87	10.10.	7,72	27.03.	8,06	06.11.	7,82
PR 131 Blumenthal	11.04.	8,09	03.11.	7,87	30.03.	7,95	10.10.	7,8	27.03.	8,12	06.11.	7,81
GWM BA 692	05.04.	0,7	02.11.	0,7	27.03.	0,6	09.10.	0,79	29.03.	0,92	06.11.	0,87
FLB 112	05.04.	1,38	02.11.	1,45	27.03.	1,5	09.10.	1,48	29.03.	1,64	07.11.	1,63
PR 146 Kreienmoor	11.04.	9,42	03.11.	9,34	30.03.	9,38	10.10.	9,21	27.03.	9,47	06.11.	9,35
GMS 195							10.10.	2,1	28.03.	2,27	06.11.	2,09
PR 151 Blumenthal			02.11.	1,15	30.03.	1,25	10.10.	1,26	27.03.	1,51	06.11.	1,43
GWM B 2 Eggestedt	06.04.	11,39	01.11.	11,14	27.03.	11,22	09.10.	11,06	28.03.	11,5	06.11.	11,17
GWM B 3 Eggestedt	06.04.	11,98	01.11.	11,7	27.03.	11,79	09.10.	11,62	28.03.	12,1	06.11.	11,71
UWO 140 I	02.04.	8,04	05.11.	7,81	03.04.	7,94	04.10.	7,83	02.04.	8,19	09.11.	7,94
UWO 140 II	02.04.	7,96	05.11.	7,74	03.04.	7,86	04.10.	7,75	02.04.	8,1	09.11.	7,85
GWM B 1 Eggestedt	06.04.	12,53	01.11.	12,29	27.03.	12,38	09.10.	12,24	28.03.	12,67	06.11.	12,3
PR 26 Vegesack	05.04.	0,7	02.11.	0,73	31.03.	0,83	11.10.	0,76	27.03.	1,03	06.11.	0,9
P 139 Blumenthal	06.04.	10,6	03.11.	10,43	30.03.	10,5	10.10.	10,37	27.03.	10,72	06.11.	10,46
FLB 115	05.04.	1,35	02.11.	1,35	27.03.	1,48	09.10.	1,41	29.03.	1,75	06.11.	1,55
PR 143 Blumenthal	11.04.	2,5	07.11.	2,54	30.03.	2,68	10.10.	2,58	27.03.	2,74	06.11.	2,73
UWO 141	02.04.	12,8	05.11.	12,66	03.04.	12,71	04.10.	12,65	02.04.	12,89	09.11.	12,94
PR 25 Vegesack	05.04.	0,39	02.11.	0,43	31.03.	0,62	11.10.	0,59	27.03.	0,89	06.11.	0,63
PR 120 Vegesack	11.04.	1,55	08.11.	1,6	30.03.	0,84	10.10.	0,75	27.03.	1,13	06.11.	0,84
PR 20 Vegesack	05.04.	-0,29	02.11.	-0,11	30.03.	0,18	10.10.	0,02	27.03.	0,54	06.11.	0,05
PR 106 Vegesack	11.04.	-0,19	08.11.	-0,05	30.03.	0,17	10.10.	0,07	27.03.	0,5	06.11.	0,04
GMS 239	06.04.	0,33	01.11.	0,33	27.03.	0,61	10.10.	0,43	28.04.	0,98	06.11.	0,53
PR 10 Vegesack	05.04.	-0,43	02.11.	-0,21	31.03.	-0,07	11.10.	-0,01	27.03.	0,43	06.11.	-0,05
PR 11 Vegesack	05.04.	-0,92	02.11.	-0,45	31.03.	-0,14	11.10.	-0,27	27.03.	0,2	06.11.	-0,34
PR 108 I Vegesack	05.04.	-1,15	02.11.	-0,58	31.03.	-0,32	10.10.	-0,36	27.03.	1	06.11.	0,62
PR 108 II Vegesack	11.04.	0,41	08.11.	0,53	30.03.	0,74	10.10.	0,62	27.03.	0,04	06.11.	0,43
PR 137 Vegesack	11.04.	0,07	07.11.	0,12	30.03.	0,4	10.10.	0,3	27.03.	0,81	06.11.	0,31
PR 8 I Vegesack	05.04.	-0,64	02.11.	-0,49	31.03.	-0,51	11.10.	-0,22	27.03.	0,16	06.11.	-0,32
PR 8 II Vegesack	05.04.	0,14	02.11.	0,25	31.03.	0,44	11.10.	0,35	27.03.	0,68	06.11.	0,37
FLB 113	05.04.	1,98	02.11.	2,04	27.03.	2,14	09.10.	2,03	29.03.	2,31	06.11.	2,21
GWM B 4 Grohn	05.04.	1,86	01.11.	1,7	27.03.	1,77	09.10.	1,69	29.03.	2	06.11.	1,83
GMS 220	06.04.	1,36	01.11.	1,27	27.03.	1,49	10.10.	1,35	28.03.	1,83	06.11.	1,39
GWM Aue 1			01.11.	14,26	27.03.	14,52	09.10.	14,26	28.03.	14,29	06.11.	14,48
GWM B 2 Grohn	05.04.	2,09	01.11.	2,04	27.03.	2,06	09.10.	2,07	29.03.	2,27	06.11.	2,16
GMS 3	05.04.	4,22	01.11.	4,25	27.03.	4,22	09.10.	4,19	29.03.	4,21	06.11.	4,19
GWM B 6 Grohn	05.04.	4,1	01.11.	4,02	27.03.	4,06	09.10.	4,01	29.03.	4,15	06.11.	4,05

Jahr	2005		2005		2006		2006		2007		2007	
		GW										
		[mNN]										
Messstellenname												
UWO 147	02.04.	11,37	05.11.	11,2	03.04.	11,3	04.10.	11,22	02.04.	11,51	09.11.	11,35
UWO 165	02.04.	16,83	05.11.	16,76	03.04.	16,78	04.10.	16,76	02.04.	16,86	09.11.	16,84
GMS 188	01.04.	10,68	01.11.	10,73	27.03.	10,66	10.10.	10,63	28.03.	10,61	06.11.	10,58
GWM Lamkens 217							09.10.	16,51	30.03.	16,83	07.11.	16,73
PR 140 Blumenthal	06.04.	27,45	03.11.	27,41	30.03.	27,45	18.10.	27,43	27.03.	27,55	06.11.	27,62
PR 153 Blumenthal			01.11.	21,98	30.03.	21,97	10.10.	22,2	27.03.	22,93	06.11.	22,79
GMS 194							10.10.	14,59	28.03.	14,69	06.11.	14,7
UWO 144	02.04.	17,64	05.11.	17,59	03.04.	17,51	04.10.	17,53	02.04.	17,6	09.11.	17,62
GWM B 1 Bördestraße	05.04.	16,83	01.11.	16,81	28.03.	16,72	09.10.	16,71	30.03.	16,82	07.11.	16,84
FLB 122	05.04.	12,73	01.11.	12,63	27.03.	12,66	09.10.	12,6	30.03.	12,78	07.11.	12,6
GWM BP 11 Auf dem Halm	05.04.	14,04	01.11.	14,01	27.03.	13,97	09.10.	14,03	30.03.	14,07	07.11.	14,05
GMS 193	06.04.	3,41	01.11.	3,24	27.03.	3,26	10.10.	3,12	28.03.	3,32	06.11.	3,2
GWM B 4 Ritterhude	05.04.	20,23	09.11.	20,01	31.03.	20,28			27.03.	20,31	10.12.	20,31
FLB 106	07.04.	3,42	01.11.	3,28	28.03.	3,31	09.10.	3,18	30.03.	3,37	07.11.	3,3
PR 19 Ritterhude									30.03.	23,28	07.11.	23,08
FLB Borgwisch	05.04.	1,89	01.11.	1,82	28.03.	1,92	09.10.	1,74	30.03.	1,89	07.11.	1,9
UWO 136	02.04.	39	05.11.	37,14	03.04.	38,79	04.10.	37,2	02.04.	39,15	09.11.	38,06
Oberflächengewässerpegel												
Weser bei Farge		0,42		0,49		0,63		0,39		0,31		0,57
Weser bei Vegesack		0,5		0,53		0,76		0,4		0,35		0,64
Lesum bei Wasserhorst		0,72		0,75		1,01		0,58		0,59		0,78

Bei den für die Oberflächengewässerpegel angegebenen Messwerten handelt es sich um über den Zeitraum der jeweiligen Stichtagsmessung gemittelte Werte.

Anhang J: Kopfblatt einer Messstelle mit Geodaten und Messwerten



Danksagung

Bedanken möchte ich mich ausdrücklich bei Herrn Prof. Dr. Horst D. Schulz für die Vergabe dieser Arbeit und die Übernahme des Erstgutachtens.

Für die Übernahme des Zweitgutachtens bedanke ich mich herzlich bei Prof. Dr. Tobias Mörz.

Den senatorischen Dienststellen Wirtschaft und Häfen sowie Umwelt, Bau, Verkehr und Europa der Stadt Bremen danke ich für die Finanzierung von GEOPLAN 1, in dessen Rahmen diese Arbeit entstehen konnte.

Die Kollegen vom Geologischen Dienst für Bremen waren mir eine große Hilfe. Ohne Dr. Joachim Blankenburg, Jörg Grützmann, Dr. Björn Panteleit, Günter Schmidt und Dr. Katherina Seiter wäre die Arbeit nicht das geworden, was sie jetzt ist.

Ein großer Dank gilt den Mitgliedern der AG-Geochemie der Universität Bremen, besonders Dr. Kay Hamer und Dr. Jürgen Schröter. Jens Gröger und Luzie Schnieders danke ich für viele Gespräche und den wertvollen Austausch von Erfahrungen.

Bei Herrn Dr. Stefan Kreiter möchte ich mich für die hilfreichen Anmerkungen kurz vor Fertigstellung der Arbeit bedanken.

Durch die Zusammenarbeit mit den Kollegen von SUBVE, swb AG, Hansewasser und Wasser- und Schifffahrtsamt (Bremen) war es möglich, diese Arbeit auf ein stabiles Datenfundament zu stellen.

Die Kollegen vom LBEG haben mir in vielen Gesprächen und durch vielfältige Unterstützung im kleinen und großen Maß geholfen.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mit ihren Korrekturvorschlägen zu wesentlichen Verbesserungen der Arbeit beigetragen haben.

Wieder einmal möchte ich Wiebke danken, die immer noch fachfremd aber dafür umso sorgfältiger in der Durchsicht der Arbeit war.

Lisbeth hat viel Geduld bewiesen und mich durch Hartnäckigkeit immer wieder dazu gebracht weiter zu machen und diese Arbeit zu einem Abschluss zu bringen. Dafür danke ich ihr sehr!

Lebenslauf

1975	Geburt in Bremen
1981	Einschulung Grundschule an der Uphuser Straße
1985	Schule im Ellener Feld
1991	Schulzentrum d. Sekundarbereichs 2 Walliser Straße
1994	Abitur
1994	Grundwehrdienst in Eckernförde
1995	Studium der Physik in Bremen
1997	Studium der Geologie/Paläontologie in Bremen
2001	Vordiplom in Geologie/Paläontologie
2004	Diplom in Geologie/Paläontologie
2005	Anstellung beim Geologischen Dienst für Bremen

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt, nur die angegebenen Quellen benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Bremen, den 03.11.2010

(Unterschrift)