

Abbildung 2: Schematischer Vertikalschnitt durch den Talaquifer (Grundwasserzustand bei unterschiedlichen Flusswasserständen)

## 4 Datenerhebung

### 4.1 Oberflächengewässer

Wie in Kapitel 3.2 bereits erwähnt wurde, steuern die Wasserstände in den Oberflächengewässern das hydraulische Potential im Untersuchungsgebiet und stellen somit wesentliche Randbedingungen für das Grundwassermodell dar. Die Pegelstände werden vom LUA Brandenburg (Löcknitz, Pegel Lenzen), der BfG (im Auftrag der BfS; Löcknitz Pegel Wustrow) und vom Wasser und Schifffahrtsamt Magdeburg (Elbe) erhoben.

#### 4.1.1 Elbe

Die Wasserstände und Abflüsse der Elbe werden vom Wasser und Schifffahrtsamt Magdeburg an den Pegeln Wittenberge (Elbe km 453,9) und Lenzen (Elbe km 484,6) kontinuierlich aufgezeichnet, und als Tagesmittelwerte zur Verfügung gestellt. Für den Pegel Wittenberge liegen tägliche Abflusswerte für den Zeitraum 1899 - 1999 vor. Des Weiteren sind tägliche Wasserstandsmessungen vom 01.01.1987-31.07.1999 der Pegel Wittenberge und Lenzen vorhanden. Die langjährigen Pegelstände des Pegels Wittenberge wurden vom Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, im Rahmen vom BMBF Verbundprojekt „Morphodynamik der Elbe“ (FKZ 0339566) überarbeitet. Der Wasserspiegelverlauf der Elbe entlang des Projektgebietes, dessen Veränderung nach Rückdeichung sowie bei Überflutung nach Rückdeichung, wurde von der BAW Karlsruhe numerisch untersucht und in seiner räumlichen Verteilung zur Verfügung gestellt.

In Abbildung 3 sind die Wasserstände der Elbe ab dem Jahre 1995 dargestellt. Nachfolgend werden die wichtigsten Kenngrößen der Pegel tabellarisch dargestellt:

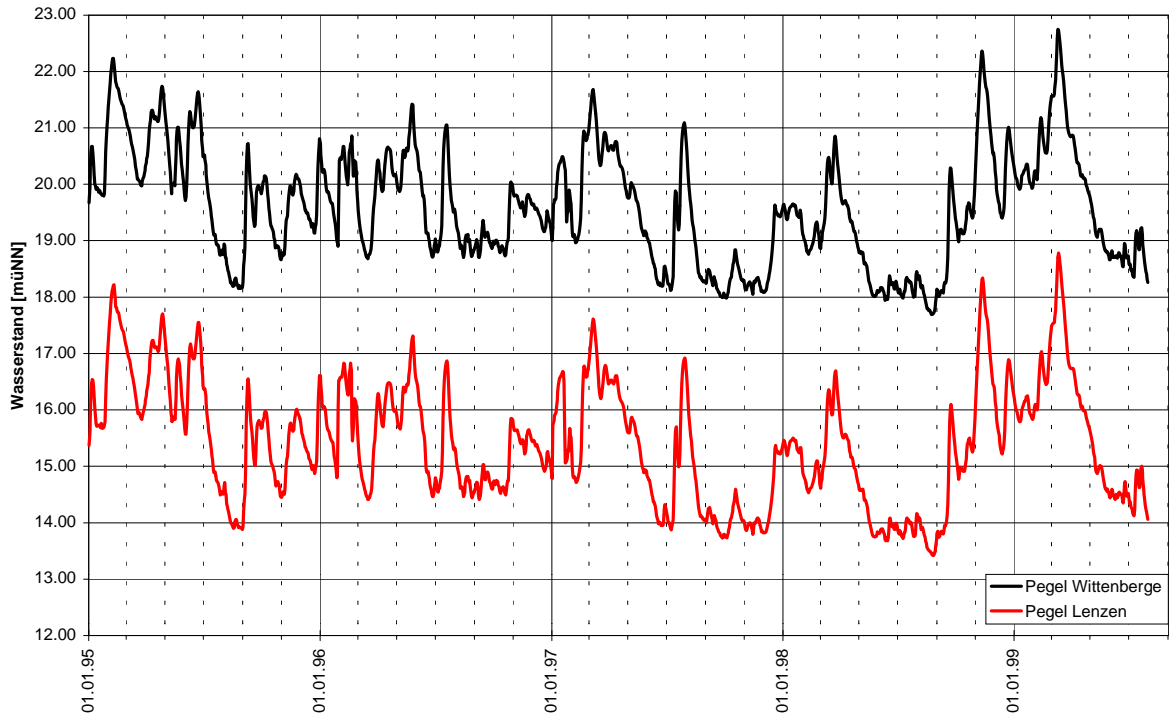


Abbildung 3: Wasserstände der Elbe am Pegel Wittenberge und Lenzen für die Jahre 1995 bis 1999

Pegel	Elbe-km	PN [müNN]	Hauptzahlen der Wasserstände d. Jahresreihe 1981-90 [müNN]				
			NW	MNW	MW	MHW	HW
Wittenberge	453,9	16,72	17,55	18,08	19,55	21,96	23,36
Lenzen	484,6	12,43	13,32	13,88	15,41	17,95	19,36

Tabelle 4.1: Hauptzahlen der Wasserstände der Elbe der Jahresreihe 1981-90 am Pegel Wittenberge und Lenzen (LUA Brandenburg 1995 aus ibs 1996)

Reihe	Gewässerkundliche Hauptzahlen für den Pegel Wittenberge [m <sup>3</sup> /s]					
	HHQ	MHQ	Min. HQ	MQ	MNQ	NNQ
1900 – 1995	3590	1910	744	672	272	120
1900 – 1931	3590	1890	1040	659	243	120
1932 – 1963	3431	1938	794	657	266	131
1964 – 1995	3280	1873	744	704	307	160

Tabelle 4.2: Gewässerkundliche Hauptzahlen des Pegels Wittenberge (Auswertung vom Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, im Rahmen vom BMBF Verbundprojekt „Morphodynamik der Elbe“ (FKZ 0339566), B. Büchele, pers. Mitteilung März 1999)

#### 4.1.2 Löcknitz

Hydraulisch kann die Löcknitz als die nördliche Berandung des Untersuchungsgebietes angesehen werden. Sie unterliegt einer Stauhaltung: zwischen Gandow und Lenzen liegt das Wehr "Gandow", welches vom Wasser- und Bodenverband Lenzen betrieben wird. Das Stauziel am Wehr Gandow liegt bei 14,68 müHN ~ 14,84 müNN. Kontinuierliche Aufzeichnungen über die am Wehr eingestellten Stauhöhen existieren nicht.

Die Wasserstände der Löcknitz werden langjährig am Pegel Gadow (Einzugsgebiet:  $A_{EO}=468\text{km}^2$ ), oberhalb vom Untersuchungsgebiet gemessen, jedoch können diese Werte nicht direkt auf das Untersuchungsgebiet übertragen werden, da zwischen Pegel und Untersuchungsgebiet nennenswerte Zuflüsse aus dem Bereich Schmaldiemen berücksichtigt werden müssen ( $A_{EO}$  am Pegel Lenzen =  $691,5\text{ km}^2$ ).

An der Brücke zwischen Wustrow und Gandow wurde im Rahmen des „hydrologischen Untersuchungsprogramm Gorleben“ von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Auftrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ein Gewässerpegel eingerichtet. An diesem wurden von Januar 93 – September 95 wöchentlich Wasserstände abgelesen, ab dem 16.09.95 bis zum 03.11.97 liegen dann tägliche Messwerte vor. Leider wurde der kontinuierliche Messbetrieb zum 4.11.97 eingestellt. Demzufolge liegen im Zeitraum vom 4.11.97 – 10.04.98 keine Messwerte für diesen Pegel vor. Ab dem 10.04.98 hat der Wasser- und Bodenverband Lenzen unregelmäßige Ableasungen etwa 2 mal die Woche vorgenommen. Für den Pegel Wustrow liegt eine Wasserstands- Abflussbeziehung vor.

An der Seetorbrücke in Lenzen wurde ab dem 01.11.97 vom Landesumweltamt Brandenburg (LUA) der Pegel Lenzen wieder in Betrieb genommen und täglich abgelesen. Für den Pegel Lenzen kann aufgrund der ungünstigen Lage der bisher durchgeführten Abflussmessungen keine eindeutige Wasserstands- Abflussbeziehung erstellt werden. Vom LUA Brandenburg wurden näherungsweise folgende Hauptwerte der Abflüsse für den Pegel Lenzen aus Analogiebetrachtungen zum Pegel Gadow abgeschätzt:

NNQ (Juli 1963)	NQ	MNQ	MQ	MHQ	HQ	HHQ ~HQ <sub>100</sub> (März 1956)
0,07	0,22	0,55	3,10	15,5	27,0	32,8

Tabelle 4.3: Näherungsweise berechnete Hauptwerte der Abflüsse [m<sup>3</sup>/s] der Löcknitz für den Pegel Lenzen (Schreiben LUA Brandenburg , November 98)

In Abbildung 4 sind die gemessenen Ganglinien der beiden Pegel dargestellt:

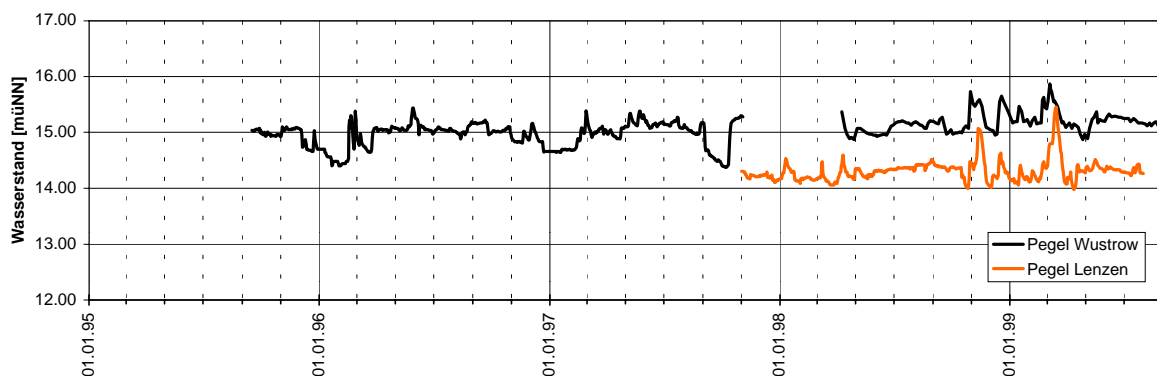


Abbildung 4: gemessene Wasserstände der Löcknitz an den Pegeln Lenzen (LUA Brandenburg) und Wustrow (BfG i.A. BfS) von 1995 – bis 1999

Aufgrund der lückenhaften Datenlage war es erforderlich, die fehlenden Zeiträume mit Hilfe der vorhandenen Messwerte zu ergänzen. Mit einer linearen Mehrfachregression auf Basis des Zeitraumes, in dem Messwerte sowohl für den Pegel Wustrow als auch für den Pegel Lenzen vorliegen, wurden die Datenlücken unter Zuhilfenahme einer Grundwassermessstelle ergänzt. Infolge der Stauhaltung ist die Regression bei Änderungen der Wehrstellungen am Wehr Gandow oder Breetz nicht korrekt. Der Einfluss dieser singulären Ereignisse lässt sich jedoch kaum rekonstruieren, da die Protokolle der Wehrhaltung unvollständig sind. Da die Löcknitz im Verhältnis zur Elbe keine sehr große Schwankungsbreite in der Wasserstandscharakteristik aufweist, erscheinen die hierbei entstehenden Fehler tolerierbar. Eine Bewertung des Einflusses dieser Vorgehensweise auf das Grundwassermodell erfolgt

in Kapitel 6.4. Zum jetzigen Zeitpunkt liegen Ganglinien der Pegel Lenzen und Wustrow für den Zeitraum vom 22.07.97 – 31.07.99 vor (vgl. Abbildung 5). Man beachte hierbei den durch die Stauhaltung bedingten Wasserstandsunterschied von ca. einem Meter, der auf die Grundwasserverhältnisse nachhaltige Auswirkungen hat, wie noch gezeigt wird.

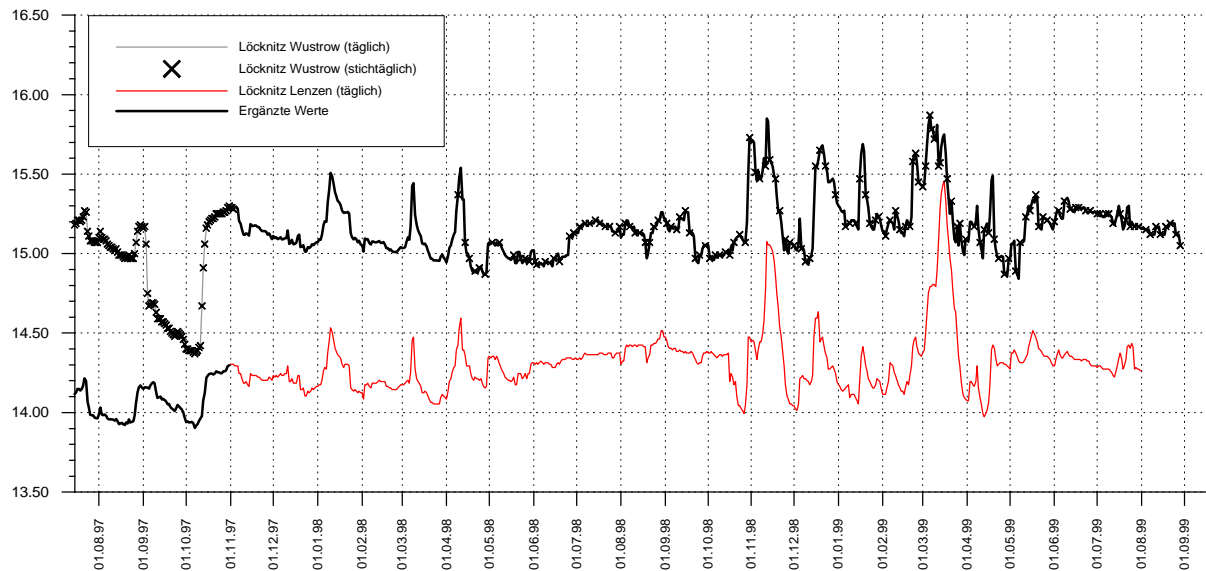


Abbildung 5: Wasserstand der Löcknitz am Pegel Wustrow und Lenzen, gemessene und ergänzte Werte. (Messwerte vom LUA Brandenburg (Lenzen) und der BfG (Wustrow))

### 4.1.3 Grabensystem

Die Funktion des Grabensystems besteht in der Bewässerung des Gebietes in Niedrigwasserzeiten während der Vegetationsperiode, bzw. Entwässerung des Gebietes bei Hochwasser. Die Bewässerung erfolgt über den Graben oberhalb vom Gandower Wehr bei Stauhaltung, die Entwässerung durch die Gräben unterhalb vom Wehr. Das Grabensystem wird mit einfachen Gleitschützen vom Wasser- und Bodenverband Lenzen nach Bedarf gesteuert.

Flemming, Inst. für Bodenkunde, Universität Hamburg, stellte im Rahmen einer Diplomarbeit fest, dass die hydraulische Funktionalität des Grabensystems vorwiegend durch das Vorhandensein von sogenannten "Sandfenstern" gesteuert wird. Als "Sandfenster" bezeichnet er einzelne Stellen im Einzugsgebiet des Grabensystems, an denen die Auelehmschicht aufgrund von natürlichen oder antropogenen Ursachen durchbrochen wurde. Durch diese Fehlstellen in der Deckschicht ergibt sich ein direkter hydraulischer Kontakt zum Aquifer, über den, je nach Randbedingung, Wassermengen in- oder exfiltrieren können. In dem untersuchten Zeitraum konnte Flemming vor allem die Wirksamkeit des Grabensystems für die Entwässerung des Gebietes feststellen. Für die Bewässerung konnte innerhalb der beschränkten Beobachtungsdauer nur ein vergleichsweise geringer Beitrag belegt werden. (Flem-

ming 1997). Es gibt Hinweise für eine durchaus nachhaltige Grundwasseranreicherung über die Sandfenster des Grabensystems. So war im Oktober '97 aufgrund einer Reparatur am Gandower Wehr kein Aufstau und somit keine Bewässerung durch das Grabensystem möglich. Innerhalb kurzer Zeit fielen die Grundwasserstände - selbst an weit entfernten Orten - um etwa 40 cm. Es ließ sich mit dem numerischen Modell nachvollziehen, dass diese raschen Absenkungen mit dem zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Grundwassergefälle zur Löcknitz hin erklärbar sind. Die Untersuchungen von Flemming weisen grundsätzlich die umfassende Interaktion zwischen dem Grundwasser und den Wasserständen im Grabensystem nach.

Flemming hat im Grabensystem von Oktober 96 bis März 97 Wasserstände gemessen. Da in diesem Zeitraum noch keine Grundwassermessstellen installiert waren, konnten diese Messwerte nicht zur Modellanpassung herangezogen werden. Es war im Rahmen dieses Projektes nicht möglich, die Wasserstände im Grabensystem regelmäßig aufzuzeichnen, so dass über Wasserstand und Durchflussmenge keine Informationen vorliegen. Da vom Wasser und Bodenverband ebenfalls keine Protokolle der Schützsteuerung vorliegen, mussten die Wasserstände in den Gräben pauschal mit einer einfachen empirischen Beziehung direkt an die Wasserstände der Löcknitz und der Elbe gekoppelt werden. Im Rahmen der Modellkalibrierung wird der hieraus resultierende Fehler bewertet.

#### 4.1.4 Qualmwasser

Im Projektgebiet existieren Qualmwasserzonen, diese Zonen sind Fehlstellen in der Deckschicht durch die Grundwasser bei Hochwasserzuständen austreten kann. Diese genau zu lokalisieren ist kaum möglich, da sie in der Regel bei Hochwasser überflutet werden. Bei einer Kartierung wurden die Oberflächengewässer, die sich in den Senken des Gebietes beim Hochwasser im März 1999 gebildet haben aufgenommen (persönliche Mitteilungen Rauhaut 1999).

Des Weiteren müssen zwei Bracks im Gebiet berücksichtigt werden, welche einen Austausch mit dem Grundwasser haben: das Landwehr-Brack neben dem Eichwald und das Pfahl-Brack im Westen des Projektgebietes. Die Wasserstände in den Bracks werden nicht erhoben. Es ist davon auszugehen, dass sie eine entlastende Wirkung auf den in diesen Bereichen häufig gespannten Grundwasserleiter haben.

## 4.2 Grundwasser

### 4.2.1 Eigenes Grundwassermessnetz

In Absprache mit der Projektleitung wurden die Arbeiten des Teilprojekts Grundwasser zum 1. Januar 1997 begonnen, mit einem Nachlauf von 4 Monaten gegenüber den anderen Projektpartnern. In dieser Zeit sollten die anderen Teilprojekte die Lage der für sie relevanten Untersuchungsflächen bestimmen. Diese Flächen waren nach Möglichkeit bei der Auslegung des Grundwasserbeobachtungsnetzes zu berücksichtigen. Nach Auswertung vorhandener hydrologischer Unterlagen und eingehender Ortsbegehung wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern für das Untersuchungsgebiet ein Beobachtungsnetz von 12 Grundwassermessstellen (GW02-GW13) festgelegt (s. Abbildung 6). Hierbei soll eine flächenorientierte Beobachtung der Grundwasserdynamik bei möglichst unmittelbarer Erfassung der Grundwasserverhältnisse einzelner Untersuchungsstandorte erzielt werden. Des Weiteren wurden die Beobachtungsmessstellen so ausgerichtet, dass unterschiedliche Transekte durch das Untersuchungsgebiet gelegt werden können. Diese sollen eine Abschätzung der Hauptrichtung der Grundwassergradienten und ihrer zeitlichen Änderung ermöglichen.

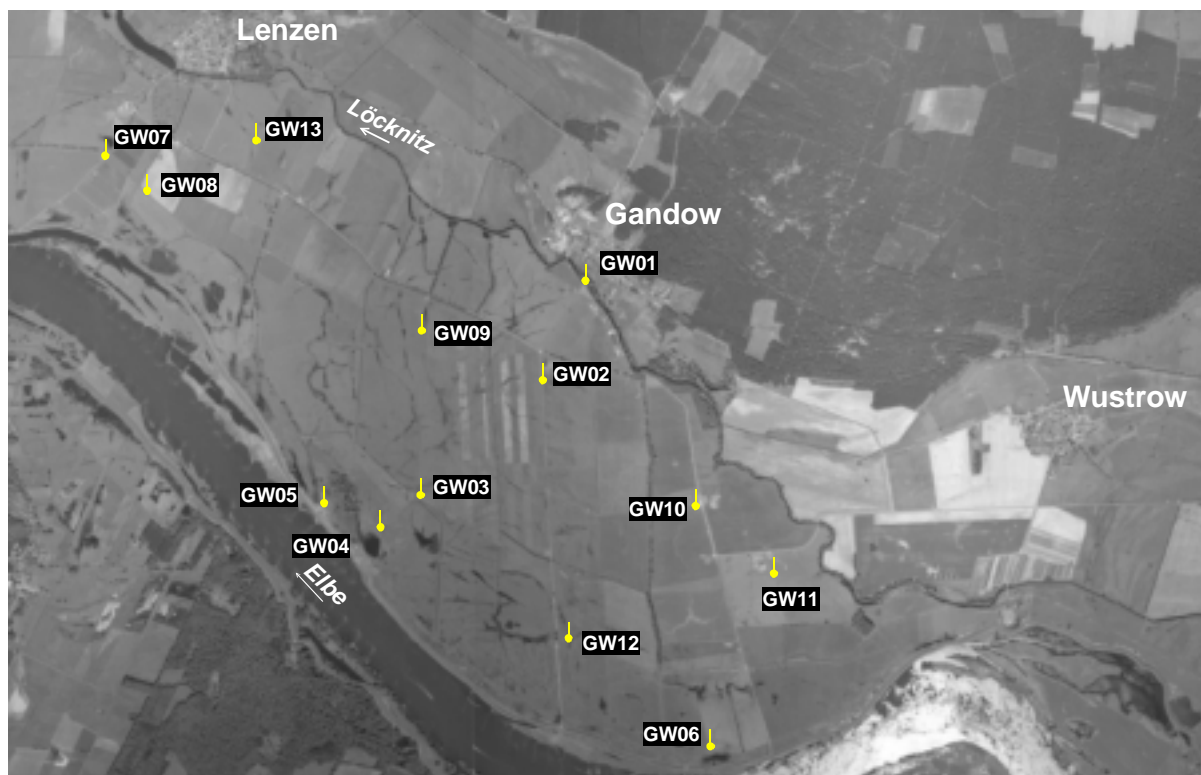


Abbildung 6: Lage der Grundwassermessstellen

Eine ortsansässige Bohrfirma mit langjähriger Erfahrung im Untersuchungsgebiet (Fa. Metscher, Wittenberge) wurde mit der Errichtung von 12 Beobachtungspegeln mit PVC-Ausbaumaterialien von DN 50 = 2" auf einer Tiefe von ca. 5 m unter Geländeoberkante bei 1 m Filterstrecke (Kiesbelagfilter) beauftragt. Bei der Niederbringung der Beobachtungsstellen wurden Schichtenverzeichnisse angelegt sowie Bodenproben gewonnen, aus denen die lokalen Durchlässigkeiten geschätzt werden können. Ferner wurde die Absenkung und der Pumpendurchfluss beim Klarpumpen als Maß für die Ergiebigkeit aufgezeichnet.

Elf Messstellen wurden am 22.07.97 mit automatischen Dataloggern zur Erfassung des Grundwasserstandes nach dem Einperlprinzip (Orphimedes, Fa. OTT) bestückt, die eine hochaufgelöste Erfassung der Grundwasserdynamik erlauben. Die Geräte werden mit einem Messintervall von 8 Stunden betrieben, welches, vor allem in Flussnähe, eine hinreichende Auflösung der Grundwasserdynamik erlaubt. Die Messstellen werden ca. alle 4 Wochen ausgelesen und regelmäßig mit einem Lichtlot auf Konsistenz hin überprüft.



Abbildung 7: Auslesen der automatischen Datalogger Ott Orphimedes

Das Messsystem hat sich in der über 2 Jahre andauernden Messphase bewährt, jedoch traten regelmäßig Probleme bei Hochwasser auf, wenn die Messgeräte überflutet wurden. Der hierfür von der Firma



Ott entwickelte Überflutungsschutz wies Mängel auf, so dass mittlerweile alle Messgeräte mindestens einmal ausgetauscht werden mussten. Wengleich die Kooperation der Firma Ott gut war und vergleichsweise schnell Ersatzgeräte geliefert wurden, entstanden hierdurch Datenlücken. Am Institut für Wasserbau wurde der Überflutungsschutz weiterentwickelt, so dass das Hochwasser März 1999 größtenteils erfasst werden konnte.

Die Messergebnisse sind in der Abbildung 8 für die eher von der Elbe beeinflussten Standorte und in Abbildung 9 für die eher von der Lößnitz beeinflussten Standorte der Wasserstände von Elbe bzw. Lößnitz gegenübergestellt.

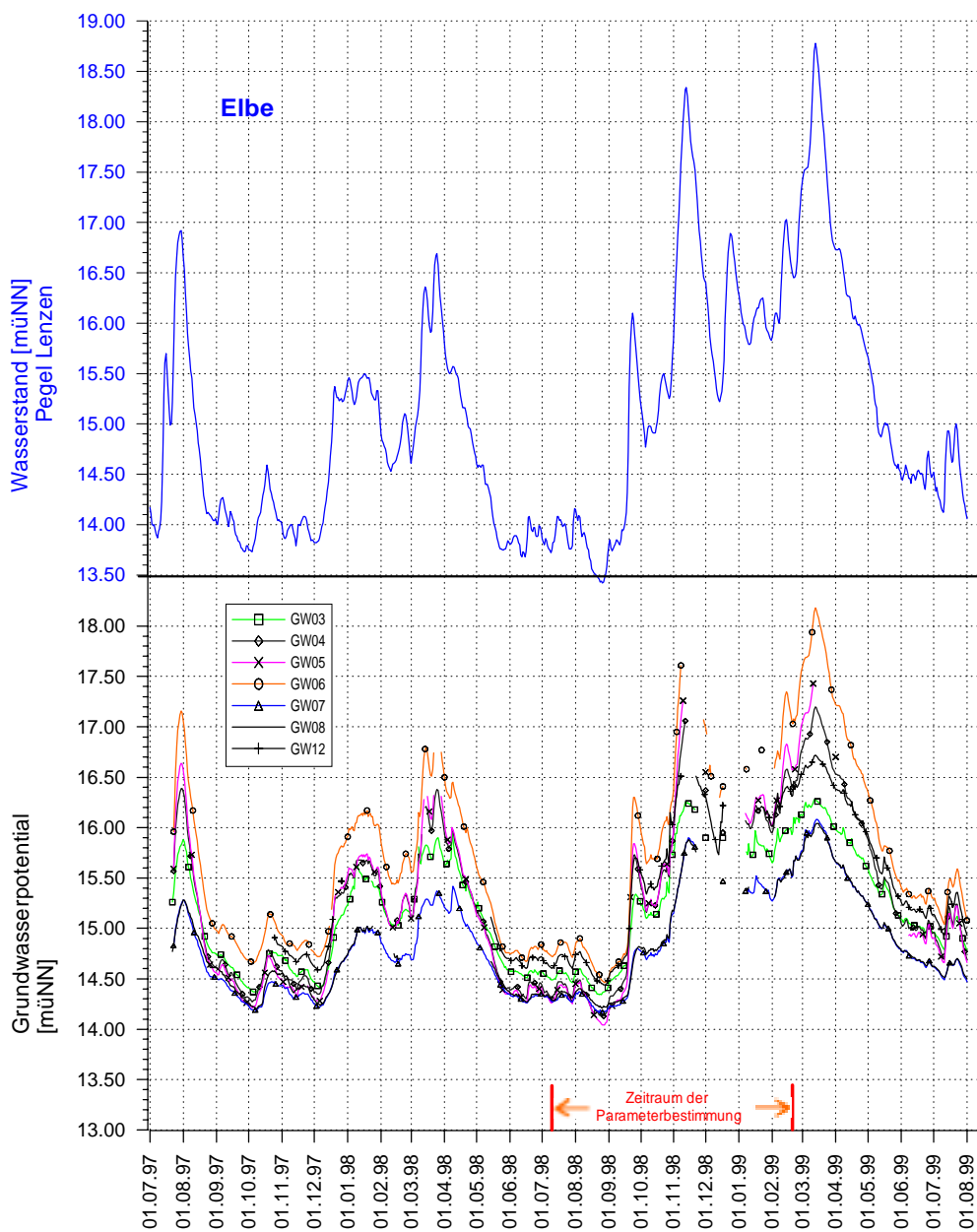


Abbildung 8: Wasserstände der stärker mit der Elbe korrelierenden Grundwassermessstellen



Abbildung 9: Wasserstände der stärker mit der Löcknitz korrelierenden Grundwassermessstellen

#### 4.2.2 Weitere Grundwassermessstellen

Das Landesumweltamt (LUA) Brandenburg betreibt im Projektgebiet eine Messstelle (GW01), welche direkt an der Löcknitz gelegen ist. Diese wird vom LUA etwa wöchentlich abgelesen. Bei einem Vergleich mit den Messwerten an den von uns neu gesetzten Messstellen stellte sich jedoch heraus, dass die Messwerte stark gedämpft sind, und die Dynamik der Wasserspiegelschwankungen der Löcknitz nicht abgebildet wird. Wahrscheinlich ist die Messstelle verockert und sie wird deshalb nicht von uns berücksichtigt.

Des weiteren liegen von anderen Projektpartnern weitere Grundwasserbeobachtungsstellen vor (z.B. die Untersuchungsfläche Dreifelderwirtschaft, Humboldt Universität Berlin; Intensivstandort Bodenfeuchtedynamik, Institut für Bodenkunde, Hamburg), die in unregelmäßigem Rhythmus mit einem Lichtlot beprobt werden.

Die Daten dieser zusätzlichen Messstellen wurden zur Beurteilung der Modellergebnisse herangezogen.

### 4.3 Meteorologische Daten

Die Meteorologischen Daten werden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) seit dem 1.12.1994 an der Wetterstation Lenzen erhoben. Für das Grundwassermodell ist der Niederschlag die wichtigste Eingangsgröße. Die Niederschlagsdaten finden allerdings keine direkte Anwendung im numerischen Grundwassermodell, sondern werden für Aussagen zur Grundwasserneubildung weiterverarbeitet.

In Abbildung 10 sind die Niederschläge der hydrologischen Jahre 1995 - 98 dargestellt. Betrachtet man die Jahressummen der Kalenderjahre, so waren die Jahre 1996 mit 473 mm/a und 1997 mit 503 mm/a eher trocken im Vergleich zu dem feuchten Jahr 1998 (Werte nur bis Ende Oktober vorhanden!) mit 598 mm in 10 Monaten. Das Jahr 1995 mit 535 mm Niederschlag in 11 Monaten (ohne Januar) schien eher Durchschnitt zu sein.

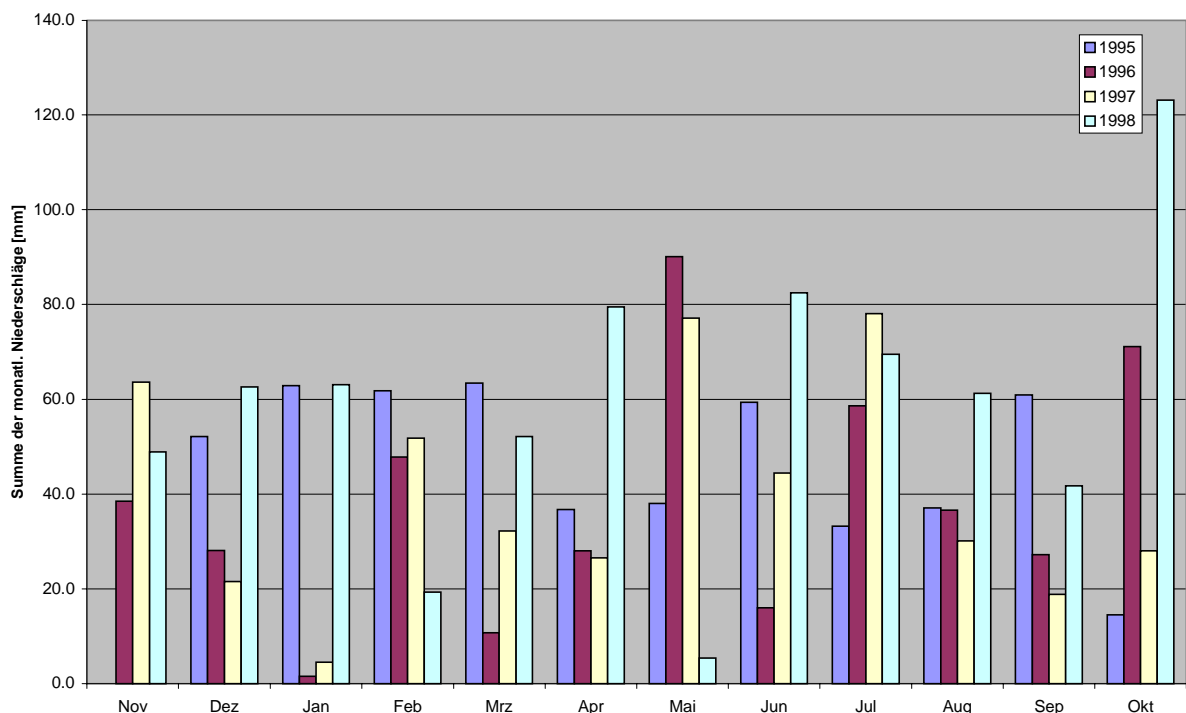


Abbildung 10: Summe der monatlichen Niederschläge für die hydrologischen Jahre 1995 – 98 (ohne Nov.1994) (Klimastation Lenzen , DWD)

In Abbildung 11 sind die täglichen Niederschläge und die Temperatur im Untersuchungszeitraum 01.07.97 - 01.10.98 dargestellt:

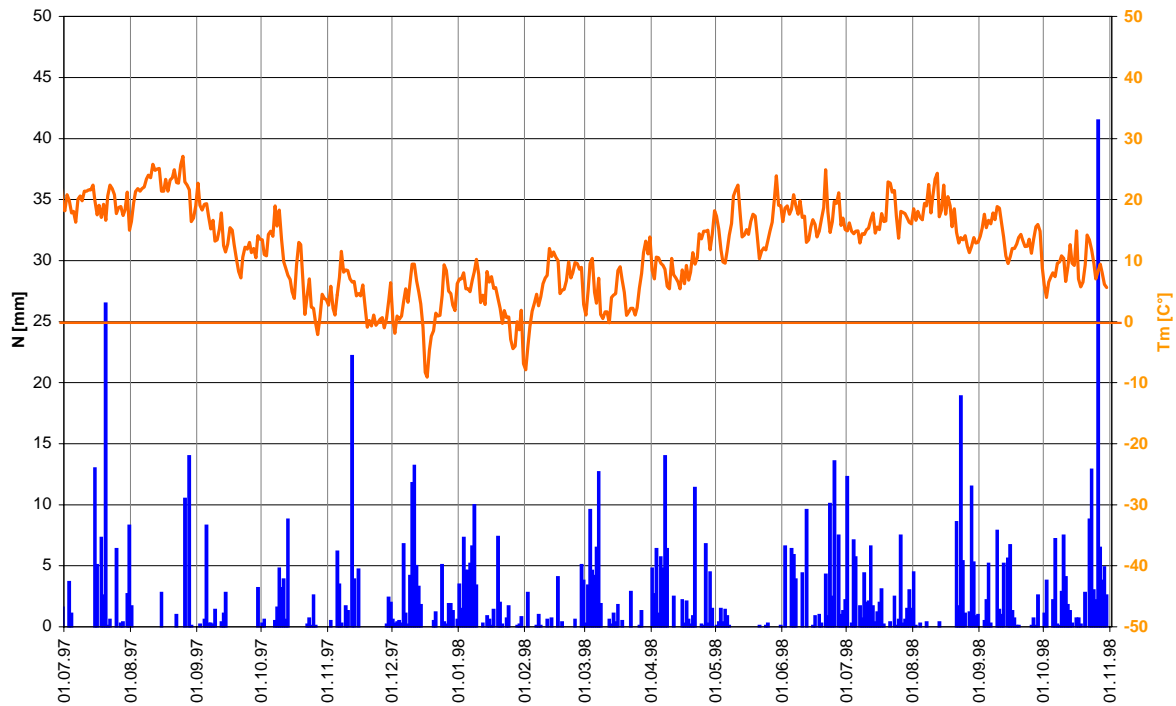


Abbildung 11: Täglicher Niederschlag und mittlere Tagestemperatur im Untersuchungszeitraum

#### 4.4 Hydrogeologische Bodenkennwerte

Für die Beschreibung der Grundwasserströmung in porösen Medien wird die (gesättigte) hydraulische Leitfähigkeit  $k_f$  als Durchlässigkeitsparameter benötigt. Bohrerdaten und Stechzylinderproben sind notwendig bei der Charakterisierung der relativen Durchlässigkeitsunterschiede an verschiedenen Standorten. Hieraus lassen sich Zonen unterschiedlicher Aquifereigenschaften ableiten. Bei der Niederbringung der Beobachtungspiegel wurden Bodenproben gewonnen, aus denen auf die lokale Durchlässigkeit geschlossen werden kann. Man muss jedoch beachten, dass diese lediglich lokale Werte repräsentieren, die nicht unbedingt die effektiven Durchlässigkeitseigenschaften des Aquifers widerspiegeln.

Daten aus Pumpversuchen sind wesentlich aussagekräftiger, da sie die Durchlässigkeit für einen größeren Bereich wiedergeben (Kinzelbach, 1995). Pumpversuche wurden an den Messstellen nicht durchgeführt, um die Kiesbelagfilter hydraulisch nicht zu beanspruchen (Kolmationsgefahr). Beim Klarpumpen konnte jedoch ein sehr rascher Anstieg auf den Beharrungszustand festgestellt werden, was auf einen engen hydraulischen Anschluss bei relativ großen Durchlässigkeiten schließen lässt.

Aus der Auswertung älterer Pumpversuche in der Nähe des Untersuchungsgebietes, welche die Firma Metscher (Wittenberge) zur Verfügung gestellt hat, lässt sich eine mittlere Durchlässigkeit von  $3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} - 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  ableiten. Diese ist durchaus konsistent mit der Ansprache des Aquifermaterials (Sand, Feinkies).

Die erhobenen Grundwasserstandsmessungen weisen als Folge der vergleichsweise großen Wasserstandsunterschiede zwischen Hoch- und Niedrigwasserperioden- vor allem in Flussnähe- eine ausgeprägte Dynamik auf. Das von diesen Schwankungen betroffene Bodenvolumen ist ungleich größer als bei einem Pumpversuch, so dass eine inverse Bestimmung der Durchlässigkeitsparameter im Kalibrierungsprozess als repräsentativer anzusehen ist (vgl. Kapitel 6.2).

Beim Einsatz eines instationären Grundwassermodells sind ferner Speichereigenschaften zu identifizieren. Sie bestimmen die Grundwasserdynamik unter zeitlich veränderlichen Randbedingungen. Kleine Speicherkoeffizienten führen zu raschen Reaktionen der Piezometerhöhen, größere dämpfen die Dynamik von Wasserstandsänderungen mit zunehmender Entfernung von der Anregungsstelle (hier: Oberflächengewässer). Diese Kenngrößen sind kaum direkt bestimmbar. Die Speicherkoeffizienten werden ebenfalls im Rahmen einer inversen Parameterbestimmung gewonnen (vgl. Kapitel 6.2).

## 5 Numerisches Grundwassermodell

Zur Untersuchung der oben angeführten Fragestellungen wird ein Finite-Elemente-Modell zur horizontal-ebenen Berechnung der zeitlich veränderlichen Grundwasserströmung eingesetzt. Mit dem numerischen Modell wird für diskrete Punkte (Netzknoten) die räumliche Verteilung und der zeitliche Verlauf des Grundwasserstandes im Untersuchungsgebiet berechnet, aus der sich andere Größen (z.B. Flurabstände, Fließgeschwindigkeiten, Leakageraten, u.a.) ableiten lassen. Hieraus können für ausgesuchte Zeitpunkte z.B. die räumliche Verteilung des Grundwasserstandes (z.B. Isolinienpläne in Kap. 7.4.2) dargestellt oder an vorgegebenen Orten die Zeitreihe einer Zustandsvariablen (z.B. die Ganglinie des Flurabstandes) ausgewertet werden. Einen wichtigen Schritt stellt hierbei die Parameterbestimmung und die Bewertung der Zuverlässigkeit der Modellergebnisse dar, auf die in Kap. 6.4 eingegangen wird. Mit einem hinreichend validierten Modell lassen sich für vorgegebene Szenarien für ausgesuchte Standorte beispielsweise Dauerlinien ableiten. Solche Modellrechnungen können das Erkennen räumlicher Muster der Grundwasserdynamik (maximale Wasserstandsschwankungen, minimale Flurabstände usw.) unterstützen. Diese Modellvorhersagen stellen eine wichtige Referenz für andere Projektpartner dar, um Prognosen hinsichtlich des Bodenwasserhaushaltes und letztlich für die Entwicklung der Biozönose in Auen machen zu können.

Die Deichrückverlegung wird großflächige Überflutungen der Aue ermöglichen, die im Rahmen von Szenarien modellmäßig abzubilden sind. Aufgrund der unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen zwischen der in die Aue einlaufenden Hochwasserwellen und der Fließprozesse im Grundwasser, wird keine vollständige Kopplung eines hydrodynamischen und eines Grundwassermodells angestrebt. Vielmehr sollen die Ergebnisse der hydrodynamischen Berechnung (Bundesanstalt für Wasserbau) als Randbedingungen auf das Grundwassermodell aufgebracht werden. Der hierbei gemachte Fehler erscheint im Vergleich zu den sonstigen Unsicherheiten (z.B. bei der Abschätzung des effektiven hydraulischen Anschlusses über Leakagefaktoren) tolerierbar.

## 5.1 Beschreibung des Modellaufbaues

Im Untersuchungsraum wird der oberste Grundwasserleiter nach unten hin von einer regional ausbreiteten, gering durchlässigen Schicht begrenzt, welche als Grundwasserbasis fungiert. Hinweise auf vertikale Zuflusskomponenten liegen keine vor und sind auch nicht zu erwarten. Das Grundwassermodell kann somit zweidimensional, horizontal-eben konzipiert werden. Gerade bei der Untersuchung der Fließverhältnisse in einem geschichteten System (Auelehmschicht über Sand) ist der Übergang von gespannten zu ungespannten Strömungsverhältnissen hinreichend zu modellieren. Im gespannten Aquifer kann es zu einer raschen Ausbreitung von Grundwasserdruckwellen kommen, da die dämpfende Wirkung der Speicherung nicht gegeben ist. Die Berücksichtigung der Übergänge von gespannten zu ungespannten Verhältnissen ist bei der Interpretation von Beobachtungsmessstellen von Relevanz. Um diese geschichtete Struktur abbilden zu können, sind grundsätzlich dreidimensionale Modellansätze erforderlich. Odenwald konzipierte ein Finite-Elemente Modell zur Berechnung horizontal-ebener, instationärer Grundwasserströmungen, mit dem sich der Übergang gespannt/ungespannt adäquat beschreiben lässt (Odenwald, 1994). Dieses Modellkonzept erlaubt eine quasi-3-D Beschreibung der Strömungsprozesse beim Übergang von gespannten zu ungespannten Verhältnissen. Als zusätzliche Eingabegröße ist die räumliche Verteilung der Deckschichtmächtigkeiten erforderlich. Die Herleitung des Ansatzes sowie die Grundgleichungen sind bei Odenwald bis ins Detail gehend dargestellt (Odenwald 1994). Die Gültigkeit dieses Ansatzes bei der Abbildung gespannter und ungespannter Zustände wurde mit einem vertikal-ebenen, gesättigt-/ungesättigten Modell (Montenegro, 1995) überprüft.

Ein lediglich zweidimensionales Modell hat gegenüber einem explizit 3-D Modell einen enormen Rechenzeitvorteil, der beim Einsatz von Optimierungsverfahren zur inversen Parameterbestimmung voll zum tragen kommt (vgl. Kap. 6.2).

## 5.2 Dynamische Aspekte

Das hydraulische System wird, wie bereits erwähnt, maßgeblich von Elbe und Löcknitz bestimmt. Die Elbe weist eine ausgesprochene Dynamik auf, die wesentlich für die hydraulische Interaktion mit dem Grundwasser und letztlich für Stoffaustausch und -umsetzung ist. Diese Dynamik ist bis ins Detail gehend abzubilden, was ein instationäres Grundwassermodell voraussetzt.

In Hinblick auf Überflutungsszenarien wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau numerische und experimentelle Untersuchungen (Luftmodelle) zur Überflutung nach der Rückdeichung durchgeführt. Die hierbei im Überflutungsgebiet bestimmten Wasserstände werden als Randbedingung auf das Grundwassermodell aufgebracht. Diese vereinfachte Vorgehensweise nicht gekoppelter Modellkomponenten erlaubt eine Abschätzung der infiltrierenden Wassermengen während der Überstauung. Die Methode ist zulässig, da diese Austauschmengen zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser im Vergleich zum oberflächigen Abfluss vernachlässigbar gering sind. Die zeitliche Auflösung richtet sich nach der Dynamik der beobachteten Prozesse. Somit ist davon auszugehen, dass Flutrinnen und Mulden einen intensiven Wasseraustausch mit dem Grundwasser erfahren. Im Grundwassermodell erscheinen Tagesschritte als ausreichend.

## 5.3 Räumliche Erstreckung des Grundwassermodells

### 5.3.1 Horizontale Abgrenzung

Aufgrund des unmittelbaren hydraulischen Anschlusses der Fließgewässer an das Grundwasser, bieten sich diese als nördliche und südliche Modellränder an. Im Westen und im Osten werden weite Flächen über das Untersuchungsgebiet hinaus in die Grundwassermodellierung einbezogen und dort die direkte Verbindung zwischen Elbe und Löcknitz als Begrenzung festgelegt. Hierdurch minimiert sich der hydraulische Einfluss dieser beiden Ränder auf das eigentliche Untersuchungsgebiet. Die Abgrenzung des Gebietes im numerischen Modell sind in Abbildung 12 dargestellt. Die Festlegung der Randbedingungen wird in Kap. 5.5 erläutert.

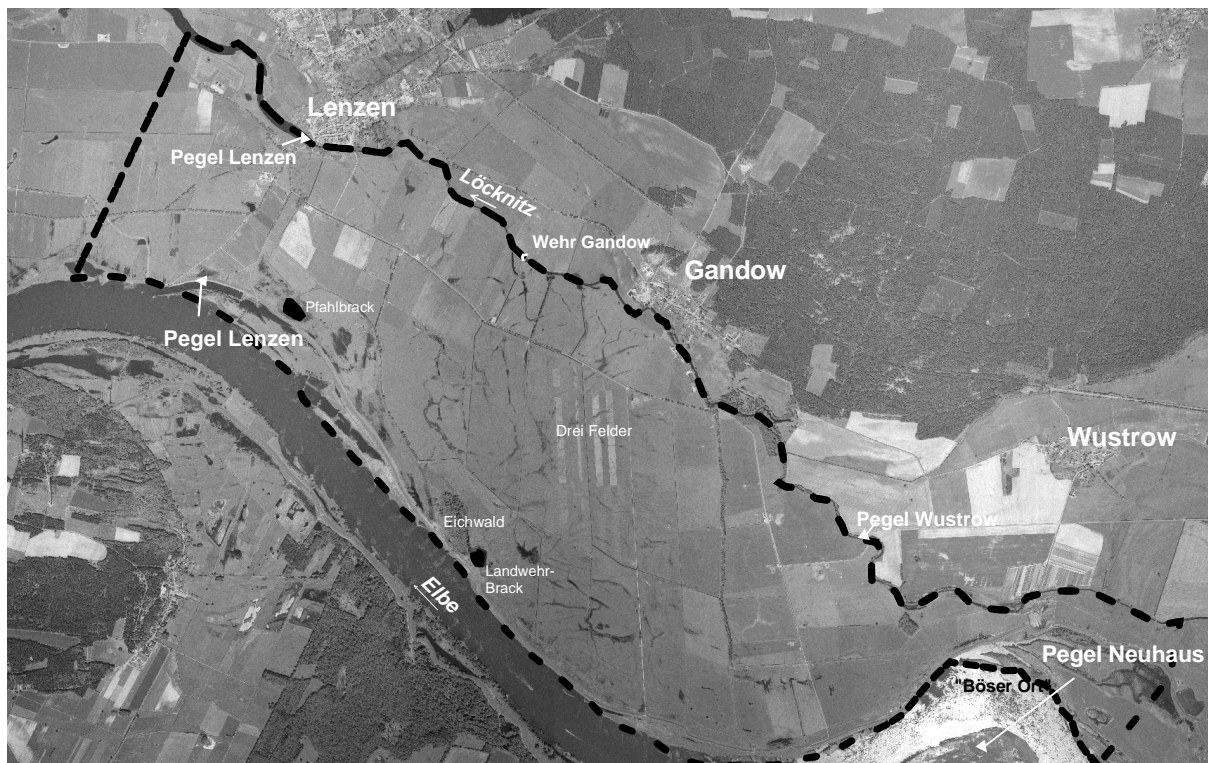


Abbildung 12: Abgrenzung des Gebietes im numerischen Modell

### 5.3.2 Festlegung der vertikalen Struktur

Die vertikale Erstreckung des Modellgebietes erfolgt in der Regel anhand von Bohrprofilen und daraus konstruierten Aquiferschnitten. Der Aufbau der Deckschichten wird in Kapitel 5.3.4 dargestellt. Die mittlere Mächtigkeit des Grundwasserleiters im Untersuchungsraum musste aus der hydrogeologischen Studie im Rahmen der Untersuchungen zum Endlager "Gorleben" abgeschätzt werden, was nur ein grober Anhaltspunkt sein dürfte. Für die Berechnungen wurde auf dieser Grundlage von einer Aquiferbasis in der Tiefe von 50 m unter NN ausgegangen, wodurch im Untersuchungsgebiet der Aquifer eine Mächtigkeit von etwa 60 m hat. Man beachte, dass im Kontext eines horizontal-ebenen Modells die Aquifermächtigkeit nicht explizit aufgelöst wird. Vielmehr geht die Transmissivität, das Produkt aus Mächtigkeit und Durchlässigkeit, in das Modell ein. Aus diesem Grund sind die Auswirkungen der Unsicherheiten in der Aquifermächtigkeit im Vergleich zu den Unsicherheiten bei der Abschätzung der Durchlässigkeit eher als gering zu bewerten.

### 5.3.3 Einbindung der Topografie

Die Topografie des Untersuchungsgebietes wurde einerseits durch eine stereophotogrammetrische Auswertung eines Bildfluges vom November 1996 ermittelt, welcher von der LAGS in Auftrag gege-



ben wurde. Andererseits liegen Rasterdaten einer Laser Scan Befliegung vom März 1997 für das Untersuchungsgebiet vor, welche vom LVermA Brandenburg durchgeführt wurde. Alle Informationen liegen als Rasterdaten im 10 m x 10 m Raster vor (M. Hape, LAGS Brandenburg, persönliche Mitteilung). Für das Grundwassermodell wurde die Rasterweite mit geostatistischen Mitteln auf 25 m erweitert (Abbildung 13). Diese Höhen werden anschließend auf die Netzknoten durch Interpolation übertragen. Der Einfluss der Topografie auf die Berechnungsergebnisse ist gering, da im gespannten Aquifer die Deckschichtunterkante maßgeblich wird.

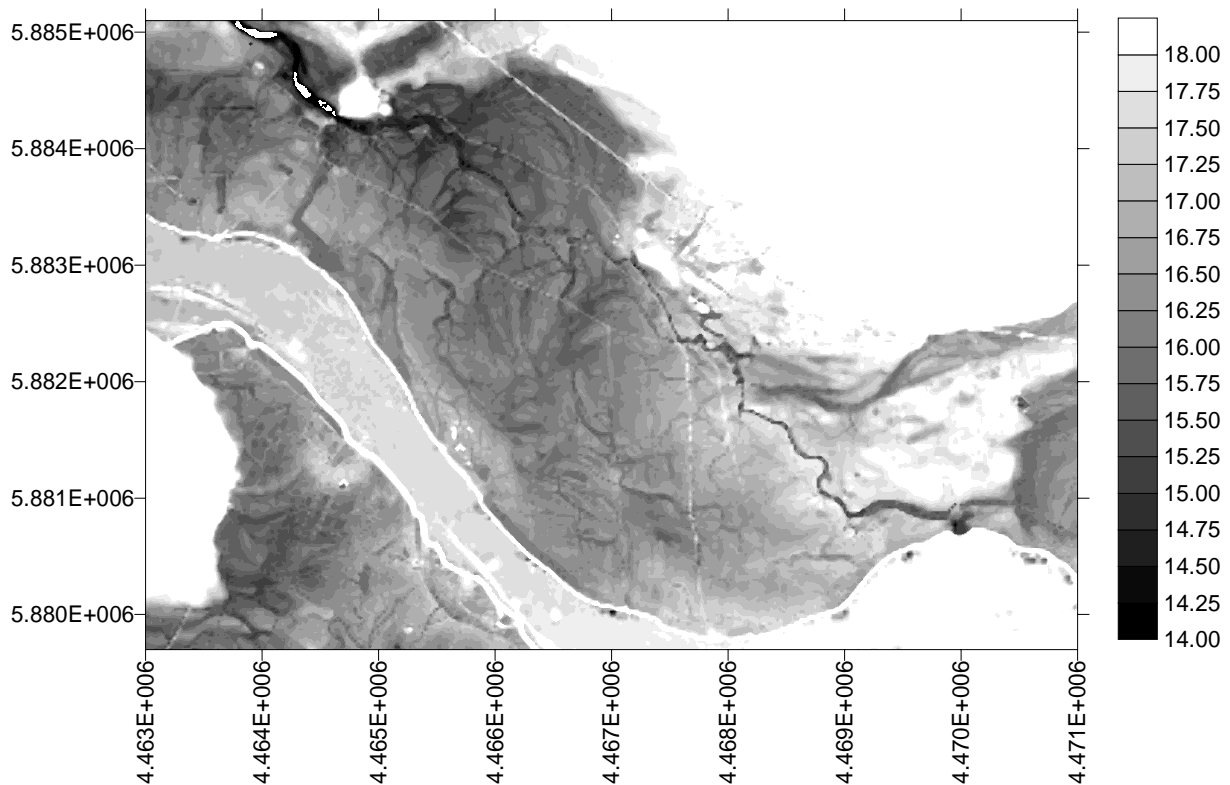


Abbildung 13: Topografie des Untersuchungsgebietes

### 5.3.4 Ermittlung der Deckschichtmächtigkeiten

Im Untersuchungsgebiet kann die Deckschicht aus Auelehm einen Einfluss auf das Grundwassersystem haben. Sobald der Grundwasserspiegel an die Deckschicht stößt, gehen die Grundwasserverhältnisse von ungespannten zu gespannten Zuständen über und damit ändert sich die Grundwasserdynamik wesentlich.

Um die beobachtete Spannbreite des hydraulischen Systems zu veranschaulichen, werden die Zustände an zwei verschiedenen Tagen gegenübergestellt. Einmal bei Hochwasser (Abbildung 14), einmal bei Niedrigwasser in der Elbe (Abbildung 15). Dargestellt wird die modellierte räumliche Verteilung der Grundwasserstände als Karte und als Vertikal- Schnitt. Der Vergleich zeigt, wie veränderlich das

Grundwasserregime sein kann. Während bei Hochwasser die Strömungsrichtung von der Elbe zur Lößnitz zeigt, kehrt sich diese bei Niedrigwasser um, und Grundwasser strömt von der Lößnitz in Richtung Elbe. Bei dem Vergleich der Vertikalschnitte sieht man den für Talaquifere typischen Übergang von gespannten zu ungespannten Zuständen.

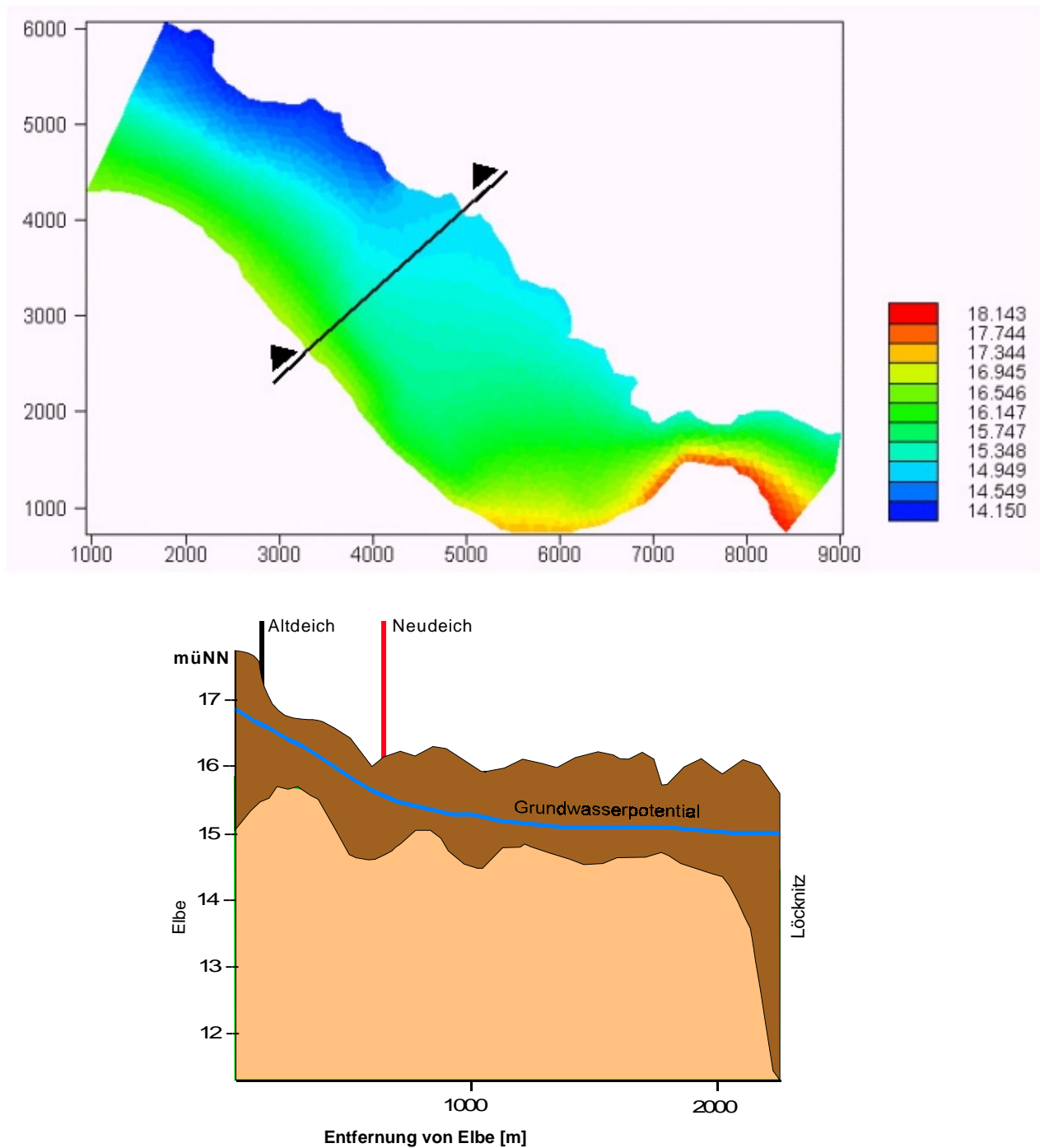


Abbildung 14: Simulierte Grundwasserpotentiale bei Hochwasserstand der Elbe am 31.07.1997 (Draufsicht und Schnitt)

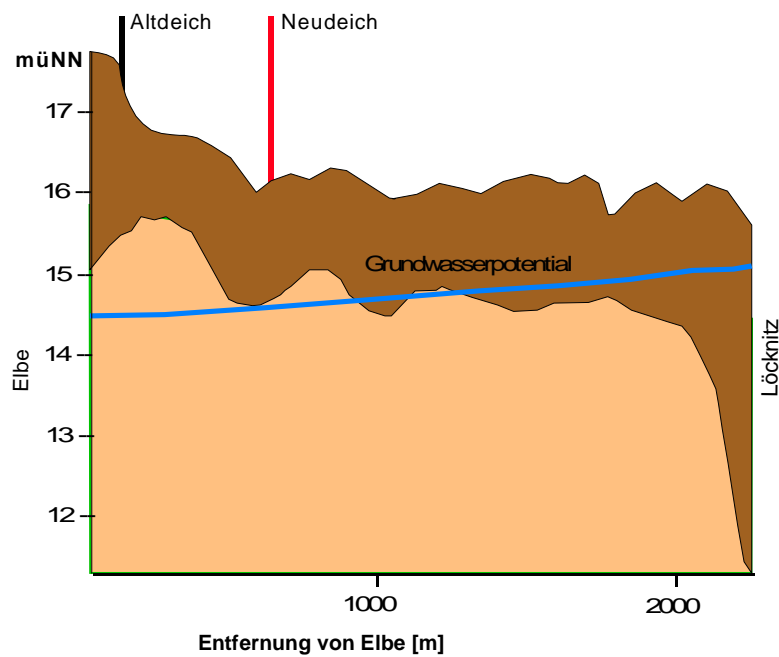
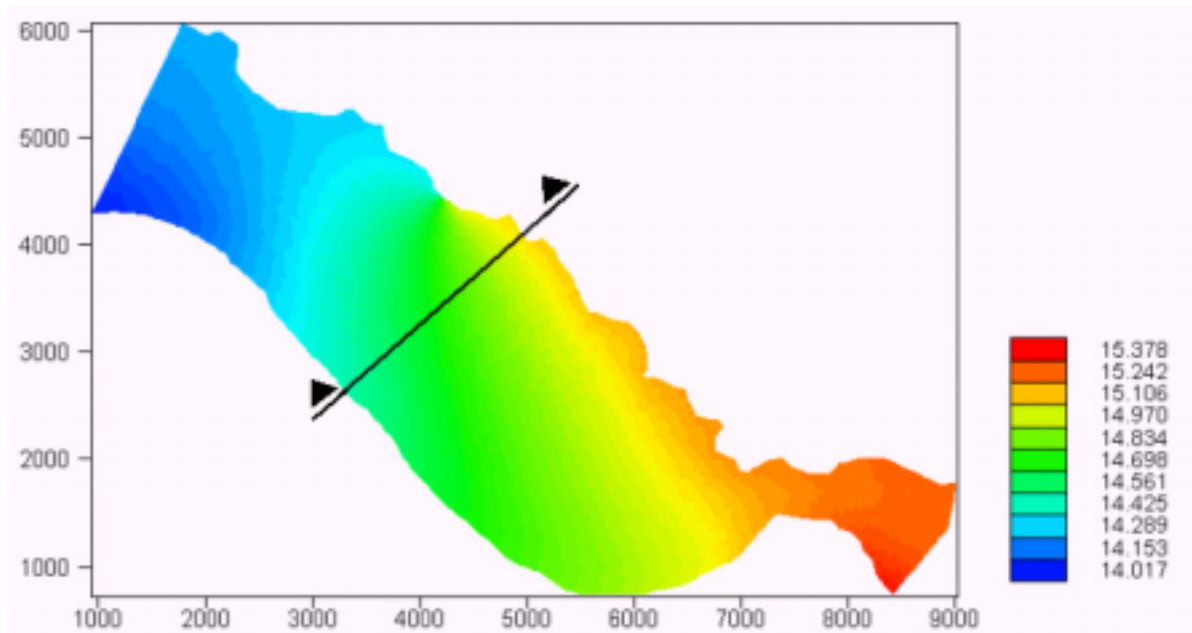


Abbildung 15: Simulierte Grundwasserpontentiale bei Niedrigwasserstand der Elbe am 18.11.1997 (Draufsicht und Schnitt)

Die vertikale Abbildung der Deckschichtmächtigkeiten im Modellgebiet erfolgte anhand von Bohrprofilen und Daten, die:

1. im Rahmen der Anlage des Grabensystems und der Wege erhoben wurden (Gutachten zu den Meliorationsmaßnahmen)

2. vom Teilprojekt Bodenkunde (Universität Hamburg) erhoben wurden
3. bei der Erstellung der Grundwassermessstellen entstanden sind

Alle Informationen wurden von der Arbeitsgruppe Bodenkunde, Universität Hamburg ausgewertet, und in eine Datenbank eingebunden. Es ergaben sich ca. 560 Bohrpunkte im Modellgebiet. Diese punktuellen Informationen wurden anschließend mit Hilfe geostatistischer Methoden (Kriging) auf die Fläche interpoliert. Da die Topografie der Deckschichtunterkante eher räumliche Strukturen erkennen lässt als die Deckschichtmächtigkeit, wurden die erhobenen Mächtigkeiten auf NN bezogen, hierzu wurden die Geländehöhen der Laser Scan Befliegung verwendet. Bereiche, bei denen die generierte Deckschichtunterkante über der Geländeoberkante lagen, wurden korrigiert. Abschließend konnten die Ergebnisse wieder in Mächtigkeiten umgerechnet werden. Diese sind in Abbildung 16 dargestellt.

Die Übertragung von punktuellen Informationen in die Fläche ist generell nicht problemlos durchzuführen, es sei nun auf die Unsicherheiten bei der Erstellung hingewiesen. Einerseits wurden die Böden von unterschiedlichen Personen bei den Bohrungen angesprochen, was Differenzen in der Definition des Bodenaufbaues (z.B. der tiefsten undurchlässigen Schicht) zur Folge haben kann. Die punktuellen Informationen sind also schon per se mit Ungenauigkeiten behaftet. Aufgrund der methodischen Vorgehensweise wird die Deichlinie mit größerer Mächtigkeit abgebildet, auch wenn in diesem Bereich die Auelehmdecke mit großer Wahrscheinlichkeit nicht so mächtig ist. Im Deichvorland (und im mit Qualmwasser überfluteten Deichhinterland) ist zu berücksichtigen, dass die Topografie von einer Befliegung bei Hochwasser stammt, und dementsprechend die Geländehöhen ungenau ermittelt wurden. In Abbildung 16 kann man erkennen, dass aufgrund einer einzelnen Bohrung die Mächtigkeit an einzelnen Stellen abweicht, und die Bohrung von einer einzelnen Isolinie umgeben wird. Diese „Inseln“ sind Effekte des geostatistischen Interpolationsverfahrens. Das Relief der Deckschichtunterkante ist nach Untersuchungen der Bodenkunde Hamburg entlang dreier Transekte sehr ausgeprägt und gekennzeichnet von Rillenstrukturen. Diese kleinräumige Strukturen können durch ein geostatistisches Verfahren nicht korrekt abgebildet werden. Die Information der Deckschichtmächtigkeit ist demzufolge mit Fehlern behaftet, was einen Einfluss auf die Übergänge gespannt – ungespannt in der Simulation haben wird. In Abbildung 17 ist der Einfluss dieses Überganges auf die Berechnungsergebnisse am Beispiel der Messstelle GW03 dargestellt. Man erkennt, dass bei einer Simulation unter vollgespannten Verhältnissen im Untersuchungsgebiet die Dynamik der Wasserspiegelschwankungen wesentlich ausgeprägter ist, und noch stärker mit den Fließgewässern korreliert. Wird das gesamte Gebiet als ungespannt behandelt, also die Deckschicht vernachlässigt, so findet eine wesentlich stärkere Dämpfung statt, das System reagiert sehr träge. Es wird somit deutlich, dass es trotz dieser Unsicherheiten besser ist, diese Daten anstelle einer konstanten Mächtigkeit zu verwenden.

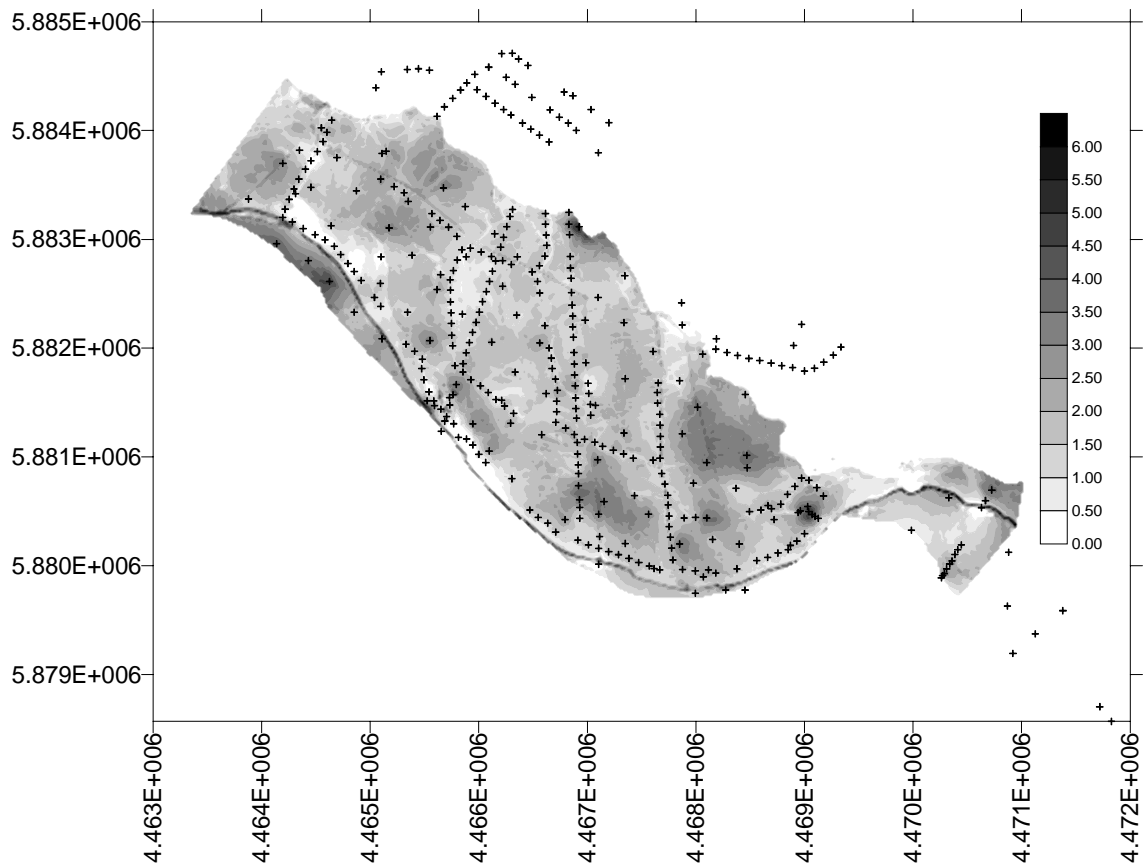


Abbildung 16: generierte Verteilung der Deckschichtmächtigkeiten [m] im Untersuchungsgebiet (Kreuze markieren die Bohrpunkte)

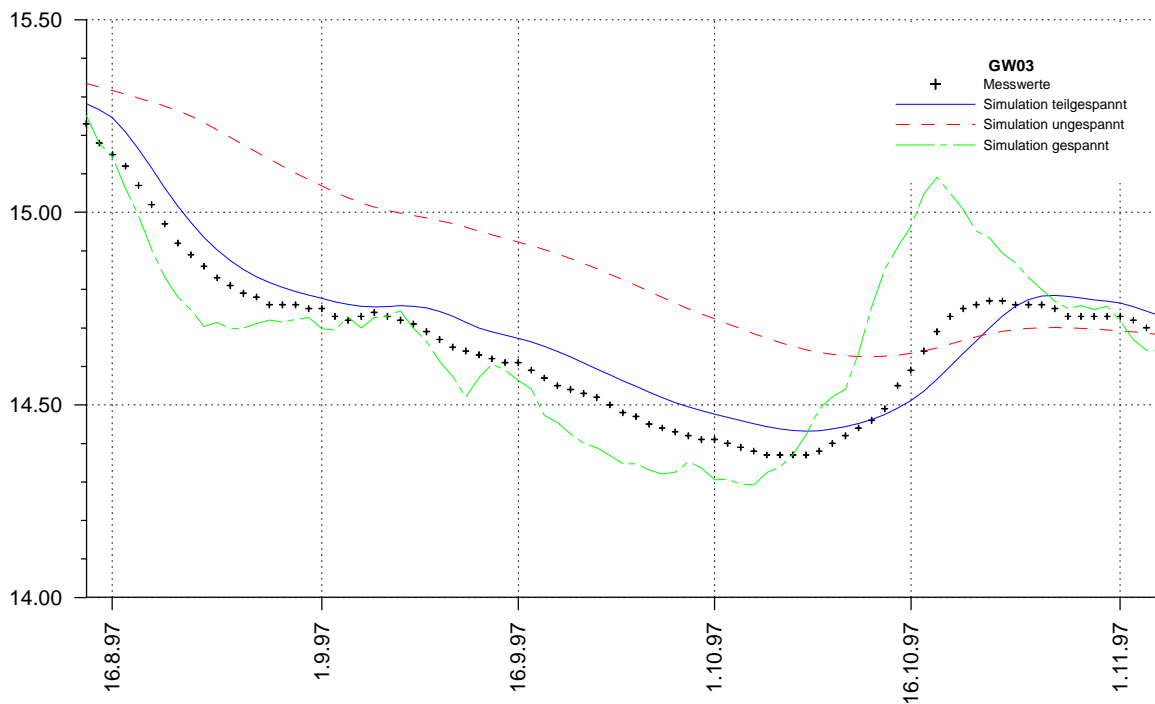


Abbildung 17: Einfluss des Übergangs gespannt-ungespannt auf die Simulation am Beispiel der Grundwassermessstelle GW03

## 5.4 Diskretisierung

Die Geometrie des Modellgebietes liegt in Form eines digitalen Geländemodells vor, was eine effiziente Netzdiskretisierung ermöglicht. Das Untersuchungsgebiet wurde durch ein örtlich verfeinertes FE-Dreiecksnetz mit Kantenlängen von etwa 50 – 100 m diskretisiert (s. Abbildung 18), das eine genaue Abbildung der komplexen Gebietsgeometrie und des Grabensystems erlaubt.

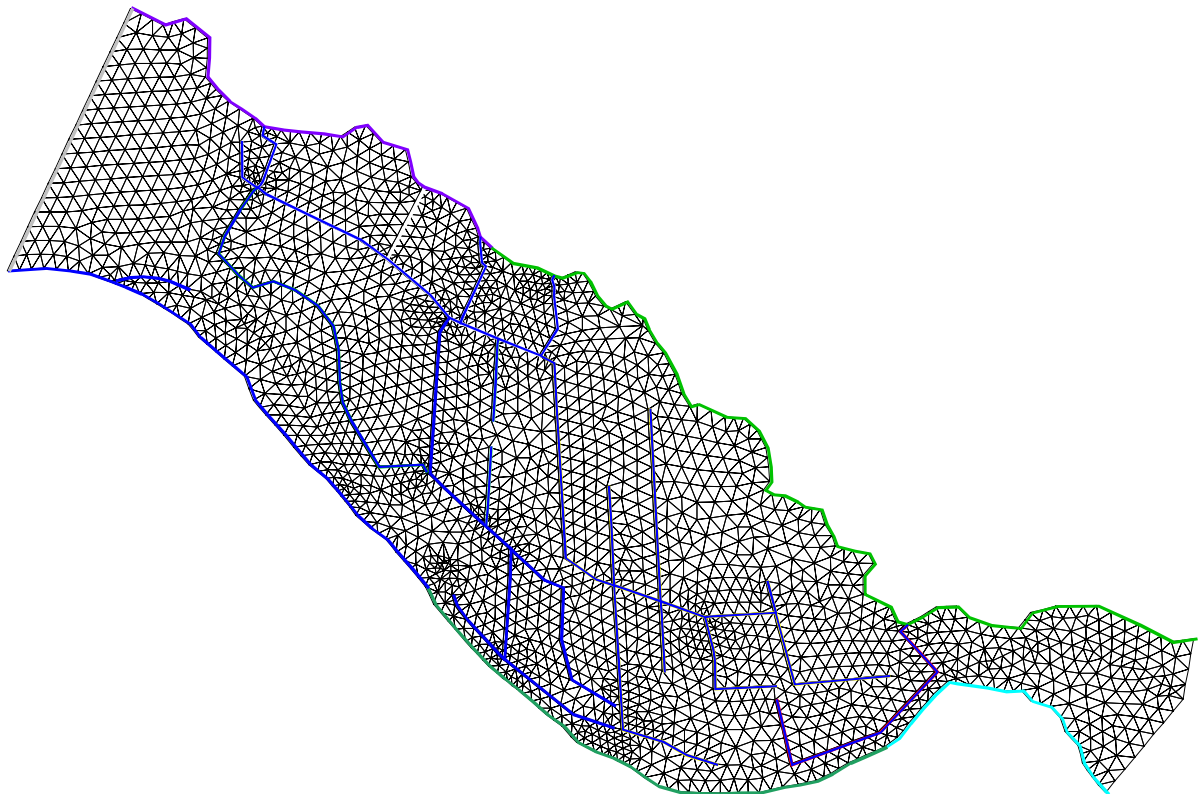


Abbildung 18: Finite Elemente Netz des Untersuchungsgebietes unter Berücksichtigung des Grabensystems

## 5.5 Randbedingungen

### 5.5.1 Randzuflüsse

Bei der Festlegung der Modellränder lässt sich in den wenigsten Fällen eine vollständige, eindeutige Charakterisierung (Festpotentialrand, undurchlässiger Rand) erreichen. So sind am westlichen und östlichen Modellrand des Untersuchungsgebietes diese Randzuflüsse der Größenordnung nach abzuschätzen. Im Kontext eines instationären Modells besteht die zusätzliche Schwierigkeit darin, dass diese Randbedingungen zeitlich veränderlich sind.

Der Einfluss dieser beiden Ränder nimmt mit zunehmender Entfernung ab und wird durch die dominanten Randbedingungen Elbe und Löcknitz verdrängt. Aus diesem Grund wurde der östliche und westliche Rand durch eine Vergrößerung der modellierten Flächen nach außen von dem eigentlichen Untersuchungsgebiet weg verschoben.

Der östliche Rand wird als undurchlässig angenommen. Vor dem Hintergrund des Wasserstandsunterschiedes der zwei Flüsse und deren unmittelbare Nähe wird das Grundwasser hauptsächlich parallel zu dieser Begrenzung fließen. Die Normalkomponente wäre in diesem Fall Null, so dass obige Annahme plausibel erscheint.

Für den westlichen Modellrand ist grundsätzlich ein Randausfluss aus dem Gebiet zu erwarten. Aus Wasserstandsbeobachtungen (s. Kap. 5.5.2: Westlicher Rand) in unterschiedlicher Entfernung zu Elbe und Löcknitz wurde der Versuch unternommen, für diesen Rand den Verlauf des Grundwasserstandes auf Grundlage von Superpositionsüberlegungen abzuschätzen. Bei Vorgabe einer Randbedingung dritter Art entlang dieses Randes wird eine Durchströmung dieses Randes ermöglicht. Eine Kontrollmöglichkeit bieten die Beobachtungsmessstellen GW07 und GW08 in diesem Bereich.

### 5.5.2 Oberflächengewässer

Die hydraulische Interaktion der Oberflächengewässer mit dem Grundwasser sowie der Qualmwasseraustritt wird mit einem Leakageansatz abgebildet. Je nach hydraulischem Potentialunterschied im Fluss/Graben und im Grundwasser findet eine In- oder Exfiltration statt. Zur Abschätzung des Austausches müssen Wasserspiegel- und Sohlhöhe von Oberflächengewässern und dem Grabensystem bestimmt werden. Diese Daten liegen zum Teil vor (Pegelaufzeichnungen, Einmessen usw.; vgl. Kapitel 4.1). Leakagefaktoren von Oberflächengewässern, die den Austausch charakterisieren, sind praktisch nicht direkt messbar und müssen bei der Parameterbestimmung im Rahmen einer Modellkalibrierung gewonnen werden.

Im Untersuchungsgebiet wurden Qualmwasserzonen beobachtet. Das Aufkommen von Qualmwasser hängt letztlich von der Beschaffenheit der Deckschicht und von den Wasserständen im Grundwasser, an Elbe und Löcknitz sowie im Grabensystem ab. Ihre Ausdehnung und hydraulische Wirksamkeit ist jedoch kaum zu erfassen. Flemming (1997) konnte einzelne, zum Teil nur wenige cm große ausgespülte Öffnungen in den Gräben und im Gebiet beobachten, über die erhebliche Mengen an Grundwasser ausströmte. Diese für die Vorhersage von Qualmwasser relevanten Prozesse können nicht mit einem auf Darcy beruhenden Leakageansatz beschrieben werden. Da das Auftreten dieser Qualmwasserröhren nur sehr schwer feststellbar ist, erscheint eine deterministische Berücksichtigung (etwa über punktförmige Senken-/Quellenterme) wenig erfolgversprechend. Ihre modellmäßige Erfassung kann

nur über einen flächenbezogenen effektiven Leakagekoeffizienten erfolgen. Die ermittelten Leakagekoeffizienten für das Grabensystem stellen somit flächenbezogene effektive Leakagekoeffizienten dar.

Im numerischen Modell werden folgende Gewässer mit dem Leakageansatz abgebildet (Abbildung 19):

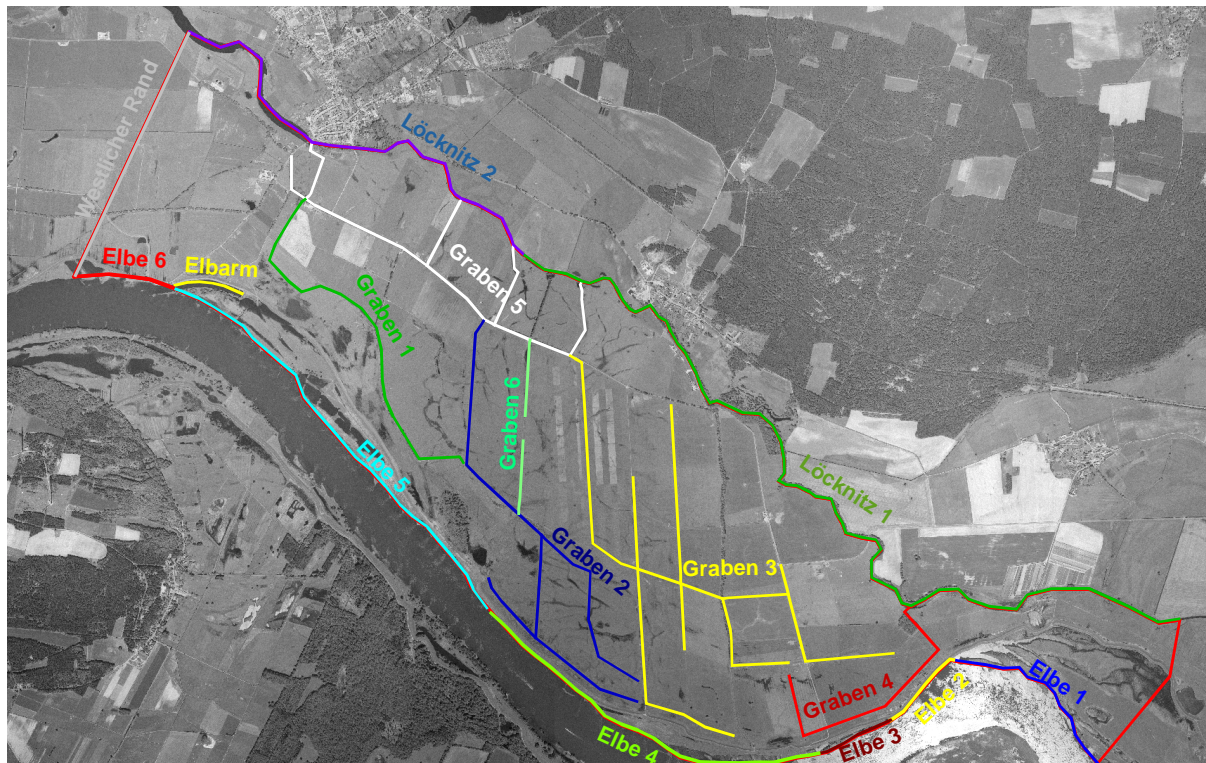


Abbildung 19: Im Modell berücksichtigte Leakagegewässer

## Elbe

Die Elbe wird in sechs Bereiche unterteilt, welchen unterschiedliche Austauschkoefizienten mit dem Grundwasser (Leakagefaktoren  $\lambda$  [1/s]) zugewiesen werden können. Die Bereiche trennen die Übergangsstellen zwischen den Mäandern. Generell wird der Elbe eine mittlere Breite von 300 m zugewiesen, und eine Sohlhöhe von 10 müNN, so dass ein stetiger hydraulischer Kontakt mit dem Grundwasser angenommen werden kann. Der Wasserstand in der Elbe wird linear zwischen 6 Stützstellen (Elbekilometer 476.1, 477.0, 477.6, 478.2, 484.6 (Pegel Lenzen), 485.0) interpoliert. Die Wasserstände an den einzelnen Stützstellen werden über Schlüsselkurven (Wasserstand als Funktion vom Abfluss) ermittelt. Diese Schlüsselkurven wurden aus den Ergebnissen der BAW- Karlsruhe erzeugt, die den Wasserspiegelverlauf der Elbe numerisch untersucht hat. Eine gemessene Abflussganglinie für den Pegel Lenzen ist zur Zeit noch nicht vorhanden, da bisher noch keine Schlüsselkurve aus Abflussmes-



sungen erstellt werden konnte. An deren Stelle wird die aus den Ergebnissen der BAW generierte Schlüsselkurve Pegel Lenzen an Elbe-km 484,6 verwendet.

### **Löcknitz**

Die Löcknitz wird lediglich in zwei Bereiche unterteilt, ein Bereich oberhalb und ein Bereich unterhalb vom Gandower Wehr. Die Breite wird generell auf 20 m gesetzt, und die Sohlhöhe auf 10 müNN wie bei der Elbe. Ein stetiger hydraulischer Kontakt zum Grundwasser wird auch hier angenommen. Der Wasserstand in der Löcknitz wird im Bereich ober und unterhalb vom Wehr Gandow mit einem konstanten Gefälle von 0,1 ‰ in Bezug zu den Pegeln Wustrow bzw. Lenzen gesetzt.

### **Grabensystem**

Die Gräben werden entsprechend der von Flemming (Flemming, 1997) vorgeschlagenen Struktur mit 5 Bereichen im Modell berücksichtigt. Jedem Grabenbereich kann ein Leakage-Faktor zugewiesen werden. Die Breite der Gräben wird konstant auf 1,5 m gesetzt. Da Daten zur Sohlhöhe nicht vorlagen und aufgrund der nicht vorhandenen Ressourcen diese nicht eingemessen werden konnten, wird für diese eine plausible Annahme getroffen. Den Gräben werden Gefälle im Bereich von 0,06 ‰ – 0,8 ‰ zugewiesen. Ihre Sohlhöhe liegt nun zwischen 14,6 müNN und 16,0 müNN. Bei Anlage des Grabensystems wurde Rücksicht darauf genommen, dass diese möglichst nicht die Deckschicht durchbrechen. Dies wurde bei der Festlegung der Sohlhöhen berücksichtigt. Wie schon unter 4.1.3 erläutert, liegen für das Grabensystem so gut wie keine Wasserstandsbeobachtungen vor.

In ersten Berechnungen wurde - in Ermangelung von Aufzeichnungen - der Wasserstand in den Gräben vollständig vernachlässigt. Hierdurch wurde die Entlastung über die Gräben überschätzt (zutretendes Grundwasser wird sofort abgeführt) und die Speisung des Grundwassers über die Gräben im Bewässerungsfall nicht abgebildet. Dabei erwies sich die bewässernde Funktion der Gräben als ein wichtiger Prozess, deren Vernachlässigung zu einer anhaltenden Unterschätzung der Grundwasserstände vor allem im nordwestlichen Bereich des Untersuchungsgebietes führte. Es wurde daher ein empirischer, physikalisch begründeter Zusammenhang für den Wasserstand in den Gräben ausgehend von den Fließbedingungen in Elbe und Löcknitz verwendet.

Dem Ansatz liegen folgende Beobachtungen zu Grunde:

- Bei Hochwasser der Elbe dienen die Gräben zur Entwässerung. Die hohen Grundwasserpotentiale infolge des Hochwassers führen zu einer Exfiltration in die Gräben. Zusätzlich werden sie durch oberflächlich zufließendes Qualmwasser gespeist. Im Hochwasserfall sind die Gräben voll.
- Bei Niedrigwasserperioden der Elbe wird Wasser von der Löcknitz zur Bewässerung in das Grabensystem eingeleitet. Das Gandower Wehr dient dabei zur Hebung des Wasserstands. Einige Grabenabschnitte, insbesondere in der Nähe der Elbe, fallen trocken, andere wie der Hauptgraben V führen dagegen permanent Wasser.

Den Einfluss der beiden Gewässer auf den Wasserstand in den Gräben wird nach folgendem Ansatz gewichtet und damit der Wasserstand in dem Grabensystem generiert:

$$W_{\text{Grab}} = \frac{2}{3} * W_{\text{Loe}} + \frac{1}{3} * W_{\text{Elb}}$$

mit:

- $W_{\text{Grab}}$ : Wasserstand im Grabensystem. Dieser wird für die einzelnen Grabenabschnitte zu Null, sobald der berechnete Wasserspiegel niedriger ist als die Sohlhöhe. Der entsprechende Grabenabschnitt wird dann im Modell als trocken angenommen und es kann nur noch Exfiltration stattfinden. Der Wasserspiegel im gesamten Grabensystem wurde als konstant angenommen, wodurch das ohnehin sehr geringe Wasserstandsgefälle im Grabensystem vernachlässigt wird. Der maximale Wasserstand (Vollfüllung der Gräben) wurde auf 16,0 müNN beschränkt.
- $W_{\text{Loe}}$ : Wasserstand der oberen Löcknitz. Angesetzt wurde der Wasserstand am Pegel Wustrow abzüglich 27 cm zur Berücksichtigung des Spiegelliniengefälles von Löcknitz und Grabensystem (mittlerer Zustand im Gebiet).
- $W_{\text{Elb}}$ : Wasserstand der Elbe. Da die Elbe entlang des gesamten Gebietes auf das Grabensystem wirkt, wurde für den Einfluss der Elbe der Pegelstand Lenzen plus 40 cm - quasi als mittlerer Wasserstand - verwendet. Bei Niedrigwasser werden die Gräben ausschließlich durch die Löcknitz gespeist. Es wird deshalb angenommen, dass der Einfluss der Elbe erst bei einem Pegelstand von 15,0 müNN beginnt.

In Abbildung 20 ist ein Teil der so berechneten Ganglinie dargestellt. Dieser Ansatz stellt eine Schätzung der Wasserstände des komplexen, manuell steuerbaren Grabensystems dar. Die Ergebnisse mit diesem Ansatz erwiesen sich als erfolgversprechend. Im Rahmen der Modellkalibrierung wird der hieraus resultierende Fehler bewertet.

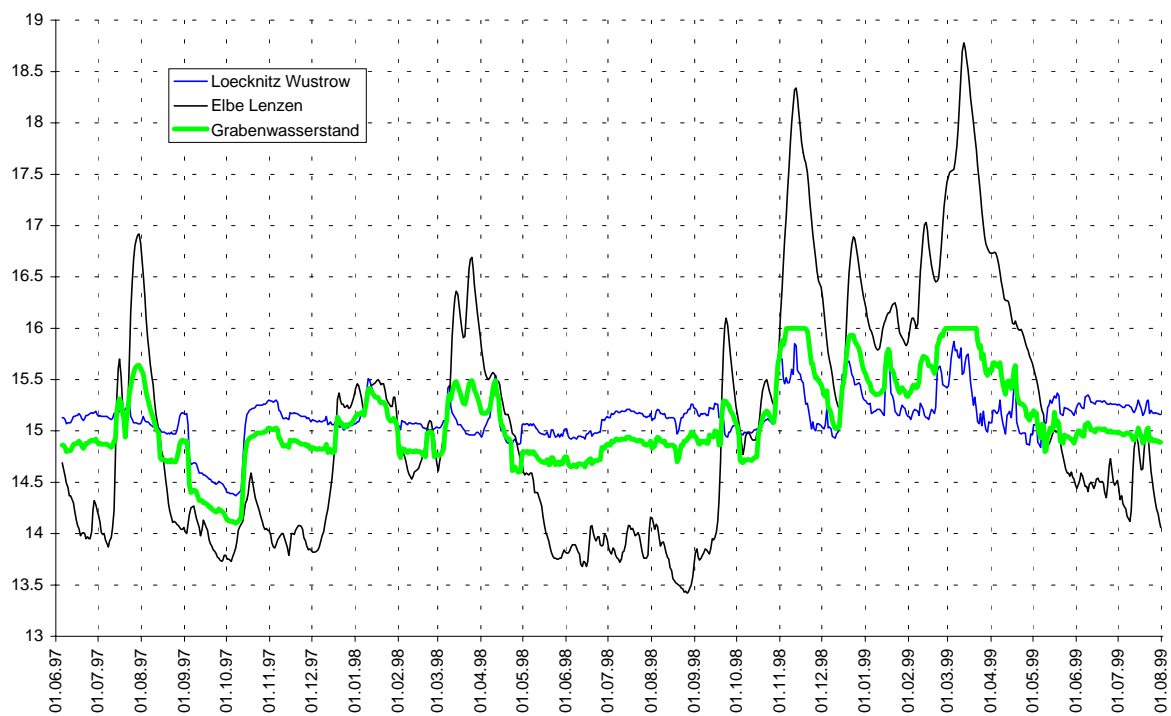


Abbildung 20: Angenommene Grabenwasserstände

### Westlicher Rand

Am westlichen Rand ergibt sich das Problem der nicht bekannten Randzuflüsse. Ursprünglich sollte hier aus den Wasserständen der Messstellen GW07 und GW08 ein Randzustrom aus den Potentialdifferenzen abgeleitet werden. Aufgrund der Messergebnisse, welche unterschiedliche Fließrichtungen erkennen lassen, die zudem zeitlich veränderlich sind und zweidimensionale Effekte widerspiegeln, musste dieser Ansatz verworfen werden. Um den Einfluss dieser schlecht identifizierten Randbedingung so gering wie möglich zu halten, wird der Modellrand möglichst in Richtung Westen gelegt. Es wird letztlich eine Randbedingung dritter Art ("weiche Leakage Randbedingung") gewählt, an der ein hypothetischer Wasserstand vorgegeben wird, der zwischen den Wasserständen der Elbe und Loecknitz linear interpoliert wird. Der Leakage-Faktor wird nicht separat identifiziert, sondern mit  $1 \cdot 10^{-8}$  1/s bei einer Breite von 30 m als relativ gering angesetzt.

### Bracks

Da Bracks ein wesentliches Strukturelement nach der Rückdeichung darstellen, erscheint die Untersuchung der Interaktionen mit dem Grundwasser angebracht. Im Modell wird das Landwehr-Brack am Eichwald abgebildet. Der Wasserstand im Brack wird in Abhängigkeit vom Grundwasserstand während der Simulation berechnet. Der Leakagekoeffizient wird zu  $1 \cdot 10^{-5}$  1/s abgeschätzt. Das Pfahlbrack

wird in Ermangelung einer nahegelegenen Messstelle und aufgrund seiner Lage am westlichen Rand des Untersuchungsgebietes nicht abgebildet.

### **Deichvorland**

Das Deichvorland (entlang Elbe 5 in Abbildung 19) wird von der Elbe bei Hochwasser überflutet. Ein Austausch mit dem Grundwasser findet dann prinzipiell auch über diese Flächen statt. Der Leakage-Faktor zur Beschreibung des flächigen Austausches über die Deckschicht wurde in Abhängigkeit der Mächtigkeit definiert. Im bestehenden Deichvorland sind die Mächtigkeiten größer als 1,5 m (Abbildung 16), so dass ein Austausch über diese Flächen vernachlässigt wird.

### **Qualmwasser**

Die Qualmwasserkartierung, die am 15./16. und 24./25. März 1999 durchgeführt wurde (Rauhaut et al 1999), brachte Erkenntnisse über die räumliche Verteilung des Austretens von Qualmwasser. Es ist allerdings nicht möglich von den aufgenommenen Qualmgewässern direkt auf die Austrittszonen zu schließen:

Die Qualmgewässer bilden sich an topografisch tief gelegenen Stellen unabhängig davon, ob an diesen selbst Qualmwasser austritt. Gespeist werden können sie aus topografisch höher gelegenen Austrittstellen. In weiten Bereichen kann das anfallende Qualmwasser über das Grabensystem ganz oder teilweise abgeführt werden, so dass sie nicht als Qualmgewässer kartiert werden können. Die Quantifizierung des Anfalls wird weiterhin durch die Niederschläge erschwert. Leitfähigkeitsuntersuchungen zeigten jedoch, dass die entstandenen Gewässer vor allem in der Nähe der Elbe auf Qualmwasser (längere Aufenthaltszeiten im Untergrund) beruhen. Es lässt sich eine Korrelation zwischen den aufgenommenen Qualmgewässern und der Deckschichtmächtigkeit feststellen.

Qualmwasseraustritt führt ähnlich wie das Grabensystem zu einer Entspannung des Grundwasserleiters. Da die Öffnungen in der Deckschicht, aus denen das Qualmwasser austritt, nicht direkt lokalisiert werden können, werden sie im Modell mit einem Leakage-Ansatz abgebildet. Hierbei werden die lokalen Fehlstellen, die zum hydraulischen Austausch führen, quasi auf eine Fläche bezogen. Die Größe des Austauschkoeffizienten lässt sich als ein Maß für die Anzahl der Fehlstellen je Flächeneinheit interpretieren. Ferner wird angenommen, dass Fehlstellen in Bereichen mit dünner Deckschicht mit höherer Wahrscheinlichkeit auftreten als bei stark-mächtigen Auelehmschichten. Somit wurde eine räumliche Verteilung der Leakagekoeffizienten abhängig von der Deckschichtmächtigkeit vorgenommen. Dieser Ansatz wurde für das gesamte Projektgebiet angewendet. Einzige Ausnahme besteht in der direkten Umgebung des Landwehr-Bracks. In diesem Bereich werden Austauschvorgänge zwi-

schen Grund- und Oberflächenwasser direkt (siehe Brack) simuliert. Die so generierten Leakagebereiche sind in Abbildung 21 dargestellt.

Es ist sehr schwer einen Wert für den Qualmwasser-Leakagekoeffizient ohne direkte Messungen der austretenden Qualmwassermenge und vorhandenen Gradienten zu bestimmen. Die Schätzung erfolgte anhand der beobachteten Grundwasserstände. Findet eine Exfiltration statt, so ist grundsätzlich eine Dämpfung (Enlastungswirkung) des Grundwasserpotentials zu erwarten. Solche Prozesse konnten aus den Beobachtungen tatsächlich identifiziert werden.

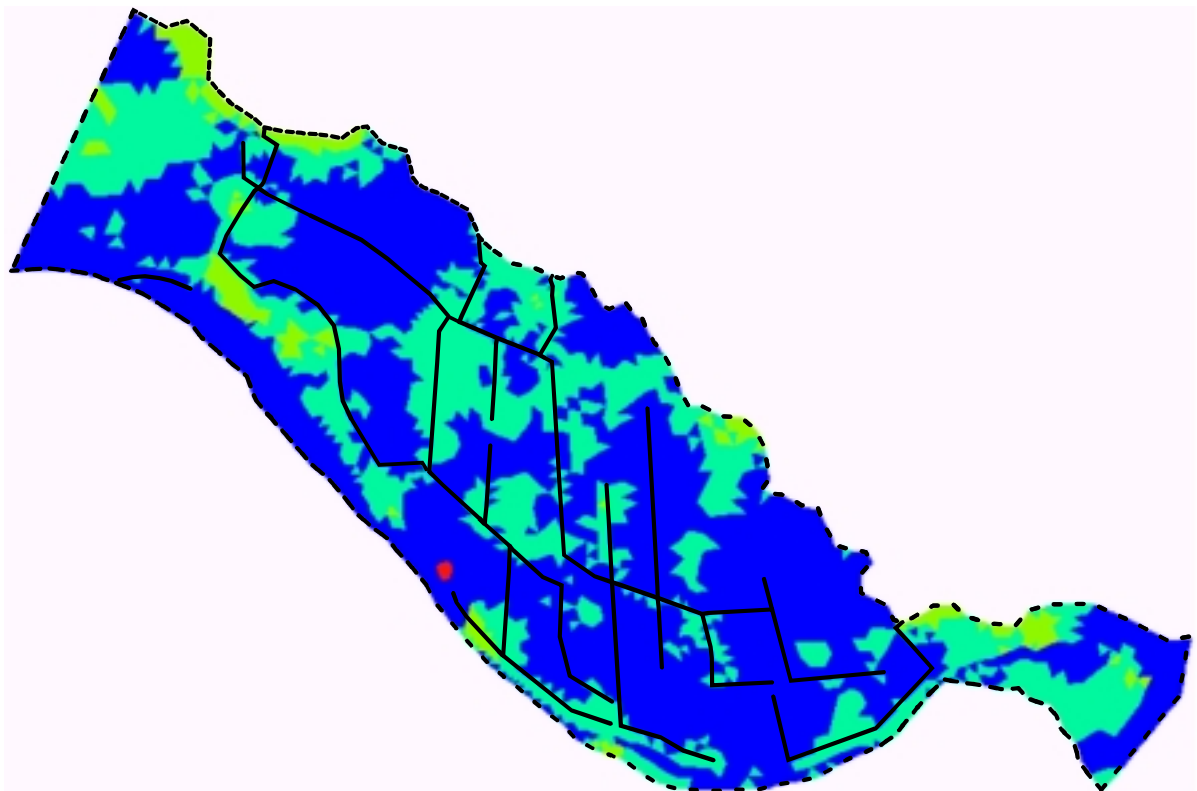


Abbildung 21: Leakagebereiche der Deckschicht (blau: undurchlässig, grün: leicht durchlässig, gelb: stark durchlässig, rot: Landwehr-Brack)

Bei diesem Ansatz kommt es zur Exfiltration, wenn der Grundwasserstand die Geländeoberkante erreicht. Ein Überstau, in Mulden etwa wird hierbei nicht berücksichtigt. Das heißt, dass die austretende Wassermenge grundsätzlich überschätzt wird, weil der hydraulische Gradient (infolge vernachlässigtem Überstau) fortwährend zu groß angenommen wird.

### 5.5.3 Grundwasserneubildung

Die räumliche und zeitliche Verteilung der Grundwasserneubildung stellt grundsätzlich eine wesentliche Eingangsgröße für ein Grundwassermodell dar. In Flussauensystemen mit geringdurchlässigen

Auelehmdeckschichten spielt allerdings diese Wasserhaushaltskomponente eine eher untergeordnete Rolle.

Wenn Niederschlag im Boden einsickert, kann je nach Gegebenheiten Bodenspeicherung, Evapotranspiration oder Interflow stattfinden. Eine Restmenge des infiltrierten Wassers kann vertikal in die gesättigte Bodenzone absickern und trägt damit zur Grundwasserneubildung bei. Die vertikale Sickergeschwindigkeit (und damit der Zeitversatz zwischen Niederschlag und Neubildung) hängt nicht nur von den Bodeneigenschaften, wie Wasserdurchlässigkeit oder Retentionscharakteristik, sondern auch vom aktuellen Wassergehalt und somit vom Flurabstand des Grundwasserspiegels ab. Die Grundwasserneubildung ist dementsprechend nicht über das Jahr konstant, da sie im wesentlichen im Frühjahr stattfindet, wenn der Bodenspeicher der ungesättigten Bodenzone weitgehend aufgefüllt ist, und Niederschläge verhältnismäßig schnell zum Grundwasser hin absickern. Diese Jahreszeit ist geprägt von starken Niederschlägen bei geringer Evapotranspiration (Pflanzen und Bodenverdunstung) sowie Bodenvernässung durch das Tauen von Eis und Schnee.

In dem Untersuchungsgebiet bestimmt die relativ gering durchlässige Deckschicht die Versickerungsrate. So wird vor allem Grundwasserneubildung dort stattfinden, wo keine oder nur eine Deckschicht mit geringer Mächtigkeit vorhanden ist.

Im Modell werden die zeitlichen Schwankungen der Grundwasserneubildung abhängig von der Deckschichtmächtigkeit angenommen, indem Bereiche mit geringer Deckschichtmächtigkeit von Bereichen mit großer Deckschichtmächtigkeit unterschieden werden. Als gering mächtig werden hier Mächtigkeiten kleiner 1 m bezeichnet. Die Summe der angenommenen Grundwasserneubildung für das Frühjahr und das übrige Jahr ist in Tabelle 5.1 dargestellt:

<i>Deckschichtmächtigkeit</i>	<i>&lt; 1m</i>	<i>&gt;1m</i>
Jan. – Apr. (1-17 Kalenderwoche)	150 mm	100 mm
Mai – Dez. (18-52 Kalenderwoche)	50 mm	30 mm
Jahressumme	200 mm	130 mm
Mittlungsintervall	Woche	Monat

Tabelle 5.1: Festgelegte Grundwasserneubildung

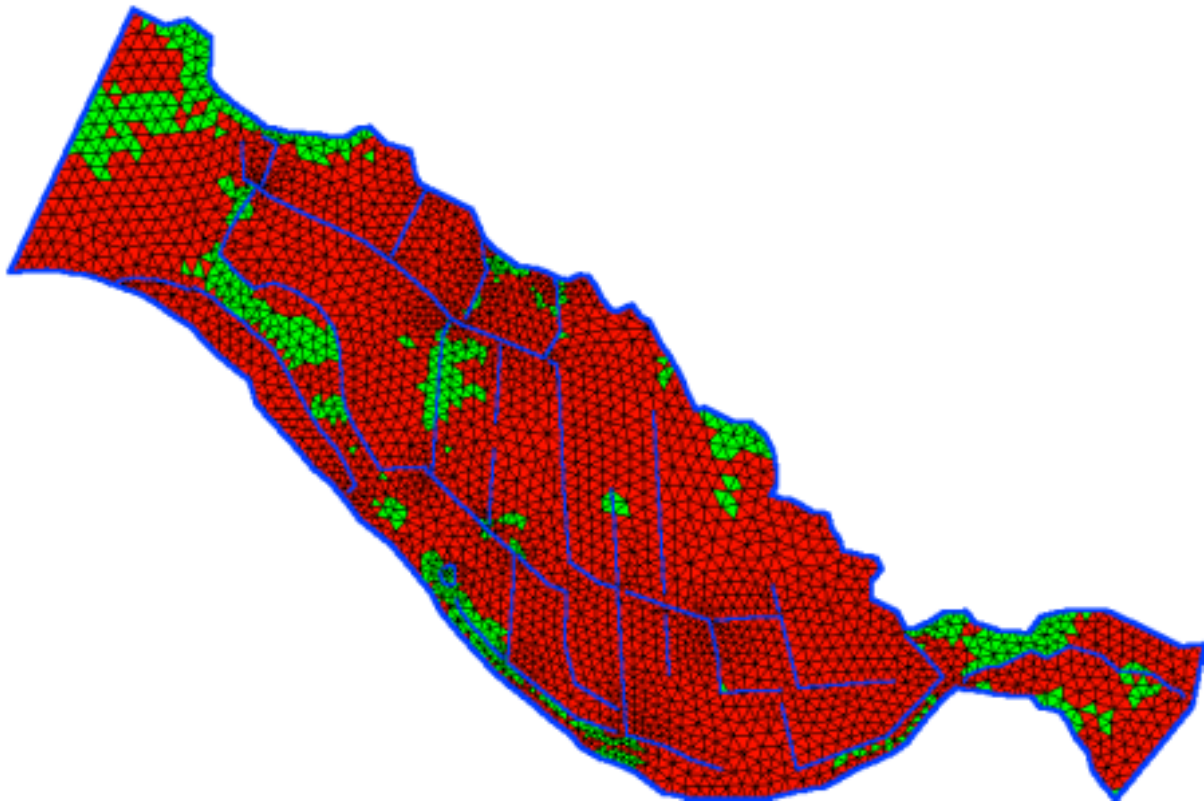


Abbildung 22: Grundwasserneubildung in Abhängigkeit der Deckschichtmächtigkeit (hellgrau: hohe Grundwasserneubildung; dunkelgrau: geringe Grundwasserneubildung)

Im Modell wurden zwei verschiedene Ansätze getestet:

### 1. Ansatz

Beim ersten Ansatz erfolgt die Grundwasserneubildung wie oben beschrieben je nach Deckschichtmächtigkeit und Jahreszeit gleichmäßig über die einzelnen Tage verteilt.

### 2. Ansatz

Beim zweiten Ansatz wird zusätzlich die Summe der vorab geschätzten Grundwasserneubildung je nach Niederschlag, der in der entsprechenden Periode gefallen ist, zeitlich aufgeteilt. Im Fall der geringmächtigen Deckschichten wird die Grundwasserneubildung auf die einzelnen Kalenderwochen im Verhältnis zum jeweils gefallenem Niederschlag berechnet (vgl. Abbildung 23). Demnach erfolgt in einer Woche mit geringem Niederschlag eine im Verhältnis geringere Grundwasserneubildung als in einer Woche mit hohen Niederschlägen. Die jahreszeitliche Verteilung ist ausgeprägt. Die Summe der Grundwasserneubildung in den Wochen des Frühjahres (1.-17. Kalenderwoche) beträgt 150 mm während die Jahressumme bei ca. 200 mm liegt.

Bei den mächtigen Deckschichten wird ähnlich verfahren, nur mit dem Unterschied, dass anstelle von einer Woche ein Monat als Mittelungsintervall verwendet wird. Damit wird der größere zeitliche Versatz zwischen dem Niederschlagsereignis und der Grundwasserneubildung aufgrund der höheren Pufferwirkung der mächtigeren Deckschichten berücksichtigt (vgl. Abbildung 24).

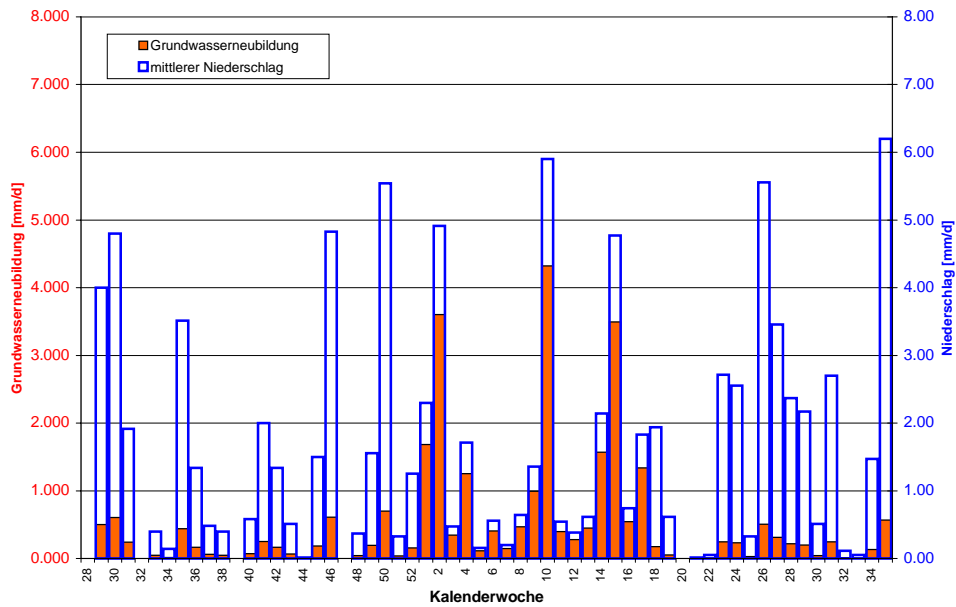


Abbildung 23: Im zweiten Ansatz angenommene Grundwasserneubildung bei Deckschichtmächtigkeiten kleiner 1 m (1997 bis 1998)

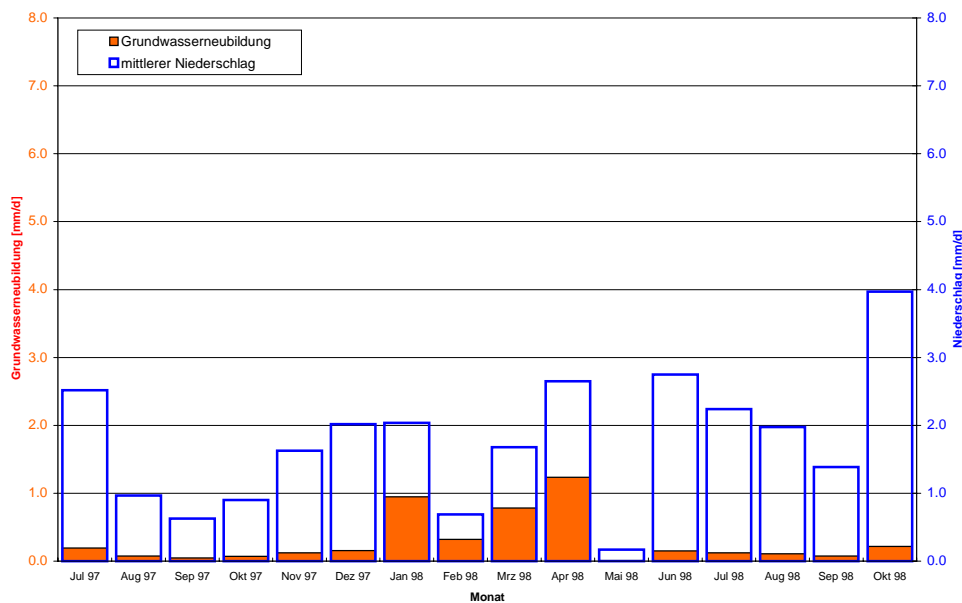


Abbildung 24: Im zweiten Ansatz angenommene Grundwasserneubildung bei Deckschichtmächtigkeiten größer 1 m



Beide Methoden stellen eine sehr vereinfachende Beschreibung der sehr komplexen Vorgänge der Grundwasserneubildung dar. Hierbei werden die teilweise sehr dynamischen Prozesse die z.B. durch Makroporenfluss auftreten können, nicht abgebildet. Die angenommene Menge und Verteilung der Grundwasserneubildung basieren auf Erfahrungswerten und wurden mit dem Teilprojekt Bodenkunde abgesprochen. Eine bessere Abbildung der Prozesse der Grundwasserneubildung könnte durch den Einsatz eines ungesättigten Modells zur Simulation der instationären Bodenfeuchtedynamik unter Berücksichtigung der Saugspannungs- und Sättigungsmessungen des TP Bodenkunde erfolgen. Bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet wäre dieser Ansatz sehr aufwendig. Wie bereits erwähnt, ist die Abschätzung der Neubildung grundsätzlich von großer Relevanz. Im Hinblick auf den dominanten Einfluss, den Elbe und Löcknitz auf die Grundwasserdynamik im Untersuchungsgebiet ausüben, hat die durch die geringdurchlässige Deckschichten bedingte ohnehin geringe Grundwasserneubildung nur nachrangige Bedeutung. Im Rahmen der Modellvalidierung, bei der beide Ansätze der Grundwasserneubildung getestet wurden<sup>1</sup>, zeigt sich, dass beide Ansätze nahezu zu gleichen Ergebnissen führen. Es darf damit der 1. Ansatz verwendet werden, was insbesondere für die Langzeitsimulation (1964-1999) wichtig ist, für die kaum Niederschlagsdaten vorhanden sind.

## 6 Parameterbestimmung und Modellvalidierung

Da sowohl die räumliche und zeitliche Verteilung der die Grundwasserströmung beeinflussenden Größen (Transmissivität, durchflusswirksame Porosität, Grundwasserneubildung, usw.) aufgrund der in der Regel geringen Anzahl von Naturmessungen unzureichend bekannt ist, ist eine Zonierung vorzunehmen. Hierbei werden Bereiche festgelegt, denen gleiche hydraulische Eigenschaften, Grundwasserneubildungsraten usw. zugewiesen werden. Die Auflistung der benötigten Eingangsgrößen in Kapitel 5 zeigt, dass einige dieser Daten nur punktuell vorliegen, ihre räumliche Verteilung nahezu unbekannt und daher abzuschätzen ist. Als Maß für die Güte des erstellten Modells wird der Vergleich zwischen den berechneten und den beobachteten Standrohrspiegelhöhen verwendet. Im allgemeinen ist die Übereinstimmung nur unzureichend, so dass eine Modellkalibrierung erforderlich wird. Hierbei sind die Modellparameter innerhalb sinnvoller Grenzen so zu variieren, bis eine ausreichende Übereinstimmung erzielt wird. Grundsätzlich ist anzustreben, so viele Informationen wie möglich unabhängig von der Modellkalibrierung beizubringen.

---

<sup>1</sup> In Kapitel 6.4 werden zur Modellvalidierung Modellergebnisse mit den Grundwassermessungen in Diagrammen gegenübergestellt. Der Bereich bis Okt.1998 ist mit dem 2.Ansatz modelliert, der Bereich danach mit dem ersten. Unabhängig vom Ansatz werden gleich gute Anpassungen erreicht.