

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.

Um eine hinreichende Erfassung der Grundwasserdynamik im Untersuchungsgebiet zu erhalten, wurden 12 Beobachtungspegel eingerichtet. An den Stellen, die eine große Wasserstandsdynamik erwarten lassen, werden die Zeitreihen der Wasserstände mit Dataloggern in hoher zeitlicher Dichte (alle 8 Std.) erhoben.

Der Kalibrierungsprozess (Anpassung der berechneten Standrohrspiegelhöhen an die Naturmessungen durch Variation der Modellparameter) bezieht sich im folgenden auf die Durchlässigkeits-, Speicher- und Leakageparameter, die allgemein als Aquiferparameter bezeichnet werden. Das Ziel der inversen Parameterbestimmung besteht in der Ermittlung optimaler Schätzungen für diese Aquiferparameter und zwar so, dass einerseits die Konsistenz mit den aus den Naturmessungen ermittelten Werten gewährleistet ist und andererseits eine möglichst gute Anpassung der berechneten an die gemessenen Standrohrspiegelhöhen erreicht wird.

Der vergleichsweise aufwendige Prozess der (manuellen) Parameterbestimmung kann auf Grundlage nicht linearer Optimierungsverfahren erträglicher gestaltet werden (s. Kap. 6.2). Odenwald hat die Lösung des inversen Problems in einem statistischen Rahmen eingebettet, der es ermöglicht, nicht nur eine optimale Schätzung der Aquiferparameter zu ermitteln, sondern auch die mit diesen Schätzern verbundene Unsicherheit zu quantifizieren (Odenwald, 1994).

## **6.1 Kalibrierungs- und Validierungszeiträume**

Grundsätzlich liefert die Anwendung eines kalibrierten Modells auf Beobachtungswerte welche nicht zur Kalibrierung verwendet wurden, eine Möglichkeit zur Bewertung der Modellzuverlässigkeit. Bei diesem Vorgang spricht man von Modellvalidierung. Ein Modell kann als konsistent eingeschätzt werden, wenn die zusätzlichen Beobachtungszeiträume, die nach Möglichkeit unterschiedliche hydrologische Bedingungen beinhalten sollten, realistisch vom Modell abgebildet werden können (Kinzelbach und Rausch, 1995). In diesem Sinne wurde der Zeitraum vom 01.07.1998 – 15.02.99, in dem die Messungen auch der Oberflächengewässer weitgehend vollständig vorlagen, als Kalibrierungszeitraum herangezogen. Zur Validierung wurde der restliche Beobachtungszeitraum vom 22.07.97 – 31.06.98 und vom 16.02.99 – 31.07.99 verwendet. In diesem Zeitraum treten sehr große Änderungen in den Wasserständen auf, wodurch die Eignung des Modells, die Grundwasserdynamik korrekt abzubilden, nachgeprüft wird. Eine Bewertung der erzielten Modellzuverlässigkeit erfolgt bei der Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 6.4.

## 6.2 Inverse Parameterbestimmung

Die oben dargestellte Bestimmung der Modellparameter (Transmissivität, Speicherkoeffizienten und Leakagefaktoren) erfolgt in der Regel über eine manuelle Modellkalibrierung, was in den meisten Fällen einen erheblichen Zeitaufwand beansprucht. Diese mitunter ineffektive und subjektive Vorgehensweise hat darüber hinaus den Nachteil, dass sie keine Aussagen über die Zuverlässigkeit des Modells gestattet. Die inverse Modellierung, d.h. die Rückrechnung der Modellparameter (Durchlässigkeits-, und Speichereigenschaften sowie Leakageparameter) aus gemessenen Strömungszuständen stellt eine sehr effiziente Methode der Modellkalibrierung dar. Hierbei wird die Minimierung einer Zielfunktion (Abweichungen der Modellergebnisse von der Feldmessung) unter Anwendung von Optimierungsalgorithmen angestrebt. Wesentlicher noch, auf Grundlage einer solchen inversen Parameteridentifikation kann die Unsicherheit der Parameterschätzer quantifiziert werden, was eine bessere Grundlage für die Bewertung der Prognosefähigkeit des Grundwassermodells darstellt. Die Berücksichtigung zeitlich veränderlicher Spannungszustände des Aquifers (Übergang gespannt-ungespannt) sowie Übergänge von In- zu Exfiltration stellen hierbei eine Herausforderung an die Stabilität der eingesetzten Algorithmen dar.

Details zur Implementierung sind von Odenwald ausführlich dokumentiert (Odenwald, 1994). Hier soll eine kurze Erläuterung der Vorgehensweise dargestellt werden. Die Parameteridentifizierung wird im Wechselspiel zweier ineinander geschachtelter Berechnungsschleifen durchgeführt. Die innere Iteration betrifft die Grundwasserstände und die äußere die Modellparameter. Ausgehend von vorabgeschätzten Modellparametern werden zunächst die Standrohrspiegelhöhen zeitschrittweise berechnet. Dies erfolgt durch Lösung des Gleichungssystems für horizontal-ebene Grundwasserströmungen. Von diesen, für alle Diskretisierungsknoten berechneten Standrohrspiegelhöhen werden nur diejenigen für die Optimierungsschleife benötigt, für die im jeweils aktuellen Zeitschritt Grundwasserstandsmessungen (kontinuierliche Zeitreihen oder Stichtagsmessungen) vorliegen. Diese Messpunkte stellen jeweils eine Teilmenge der gesamten Diskretisierungsknoten dar. Für die jeweils aktuellen Messstellen werden - als Maß für die Abweichung zwischen Modell und Beobachtung - die gewichteten Grundwasserstandsresiduen (Differenz zwischen gemessenen und berechneten Standrohrspiegelhöhen) ermittelt. Nach Abschluss der zeitschrittweisen Berechnung der Standrohrspiegelhöhen sind die Grundwasserstandsresiduen für alle Messstellen und Messzeitpunkte ermittelt. Um die größtmögliche Information aus den Beobachtungen zugänglich zu machen, sollten die Berechnungszeitpunkte möglichst alle Messzeitpunkte enthalten. Aus den Grundwasserstandsresiduen lassen sich durch Lösung eines nichtlinearen Optimierungsproblems Aquiferparameter bestimmen, die eine bessere Übereinstimmung (Verringerung der Residuen) erbringen. Die Parameteriteration wird abgebrochen, sobald der Betrag der Parameteränderungen kleiner als eine vorgegebene Abbruchschranke ist. Aus dieser

Beschreibung ist ersichtlich, dass das eigentliche Grundwassermodell (Vorwärtsberechnung) für den vorgegebenen Modellierungszeitraum mehrfach durchlaufen werden muss, was entsprechend lange Berechnungszeiten zur Folge hat.

Basierend auf dem erstellten Datenmodell Lenzen wurden umfangreiche Untersuchungen zur inversen Identifizierung von Aquiferparametern, zur Identifizierbarkeit unterschiedlicher hydrogeologischer Bereiche, zum Einfluss der Anzahl und Lage der Grundwasserbeobachtungsstellen sowie zur Bedeutung fehlerbehafteter Wasserstandsmessungen oder falsch angenommener Modellstrukturen durchgeführt. Es konnte herausgearbeitet werden, in welchem Maße diese Faktoren und Vorgaben die Güte der Parameteridentifizierung und letztlich die Zuverlässigkeit der Modellvorhersagen beeinflussen (Holfelder und Montenegro, 1999). Die Modellkalibrierung erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden die Modellergebnisse bei manueller Variation der Modellparameter innerhalb sinnvoller Grenzen mit den Zeitreihen der Grundwasserbeobachtungen verglichen. Hierbei können Erkenntnisse über Bedeutung und Sensitivität einzelner Parameter gewonnen, und die getroffenen Annahmen überprüft werden. Bei diesem Arbeitsschritt werden die hydrogeologischen Grundannahmen (Modellstruktur) überprüft und - falls erforderlich - modifiziert. In einem zweiten Schritt wird eine inverse Parameterbestimmung zur Optimierung der vorher geschätzten Parameter durchgeführt. Diese Vorgehensweise liefert optimalen Parameterschätzer für die jeweils herausgearbeitete Modellstruktur.

### **6.3 Parameterbestimmung aus der Modellkalibrierung vom 01.07.98 – 15.02.99**

Die Modellkalibrierung umfasst die Identifizierung der Modellstruktur, d.h. der für das Gebiet charakteristischen Zonierung der Durchlässigkeiten und nutzbaren Speicherporositäten, die Ermittlung der Leakage Parameter der Oberflächengewässer sowie die Implementierung des Qualmwasseraustausches. Nach der Erstellung verschiedener Modellstrukturen stellte sich heraus, dass die beste Wiedergabe der Beobachtungen mit einem homogenen isotropen Aquifer, also mit einer konstanten Durchlässigkeit und Porosität im gesamten Gebiet erzielt werden konnten. Aus den vorhandenen hydrogeologischen Unterlagen (vgl. Kapitel 4.4) sind ebenfalls keine Hinweise auf besondere Strukturen (Schichtung, Tonlinsen usw.) zu finden, welche im Modell abgebildet werden müssten.

In Tabelle 6.1 sind die ermittelten hydraulischen Parameter für das Untersuchungsgebiet dargestellt. Man erkennt, dass im inversen Lauf die Porosität von 0,23 auf 0,25 erhöht wurde. Hierfür ausschlaggebend war die größere Dämpfung der Ganglinien in ungespannten Bereichen, die mit diesem Parameter erzielt werden konnte. Die ermittelte Durchlässigkeit liegt bei  $7,39 \cdot 10^{-4}$  m/s (bei einer mittleren Mächtigkeit von etwa 64 m). Wie bereits erwähnt, würden sich diese Werte ändern, falls die Aqi-

fermächtigkeit geringer angenommen worden wäre. Die gefunden Parameter sind in der Größenordnung konsistent, mit der Ansprache und sonstigen Informationen aus Pumpversuchen in der Nähe des Untersuchungsgebietes.

	$k_f$ [m/s]	$n_{sp}$ [-]
„manuell“	$7,80 \cdot 10^{-4}$	0,23
„Invers“	<b><math>7,39 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b>0,25</b>

Tabelle 6.1: Bei der Kalibrierung ermittelte Durchlässigkeiten  $k_f$  und Porositäten  $n_{sp}$

In Tabelle 6.2 sind die für das Grabensystem und die Randgewässer ermittelten Leakage Parameter aufgelistet (vgl. Abbildung 19). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Einfluss der Fließgewässer auf das Grundwasser stets proportional zum Produkt  $\lambda \cdot$  Gewässerbreite ist. Bemerkenswert erscheint die Tatsache, dass bei der inversen Parameteridentifizierung der gesamte Bereich der Elbe wesentlich undurchlässiger identifiziert wird, als zunächst angenommen (s. Zwischenbericht 1999). Dies ist eine Folge von umfangreicheren Datensätze, die eine bessere Modellkonzeption unterstützen. Die Verlängerung der Messreihe über das extreme Hochwasserereignis 1998/99, die dazugehörige Qualmwasserkartierung und vor allem die exakte Einmessung des Löcknitz Pegels bei Lenzen haben während der Bearbeitungszeit gesicherte Erkenntnisse über die hydraulischen Wechselwirkungen im Grundwassersystem gebracht, was sich in modifizierte Modellstruktur und -parameter niederschlägt. Hierin erweist das Optimierungsverfahren zur inversen Parameteridentifikation erhebliche Vorteile gegenüber einer manuellen Modellkalibrierung. Bei dieser Diskussion darf man nicht außer acht lassen, dass die Grundlage für die Identifikation der Parameter stets die Messstellen sind, die am nächsten an der zu identifizierenden Zone sind - wie bei der manuellen Kalibrierung auch. Die Sensitivität von Messstellen hinsichtlich der Interaktion mit Fließgewässern nimmt mit der Entfernung vom jeweiligen Gewässer rasch ab, was aus der Analyse der Kovarianzmatrix deutlich erkennbar ist (Holfelder und Montenegro, 1999). Eine hinreichende Darstellung der Kovarianzanalyse und der daraus folgenden Zuverlässigkeitsuntersuchungen sind für die Bewertung inverser Verfahren grundsätzlich erforderlich. Diese wurden von Holfelder und Montenegro 1999 der Fachöffentlichkeit vorgestellt. Die Identifizierung der Parameter des Grabensystems war aufgrund nicht bekannter Wasserstände und Durchflussmengen schwierig, und die ermittelten Parameter sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Die hieraus resultierenden Fehler werden zusammen mit der Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Grundwasserstände im folgenden Kapitel diskutiert.

	Breite [m]	$\lambda_{\text{invers}}$ [1/s]		Breite [m]	$\lambda_{\text{invers}}$ [1/s]
<b>Elbe 1</b>	300	$1,87 \cdot 10^{-6}$	<b>Graben 1</b>	1,5	$6,72 \cdot 10^{-5}$
<b>Elbe 2</b>	300	$4,78 \cdot 10^{-7}$	<b>Graben 2</b>	1,5	$1,96 \cdot 10^{-5}$
<b>Elbe 3</b>	300	$4,60 \cdot 10^{-7}$	<b>Graben 3</b>	1,5	$5,19 \cdot 10^{-6}$
<b>Elbe 4</b>	300	$1,16 \cdot 10^{-6}$	<b>Graben 4</b>	1,5	$1,01 \cdot 10^{-8}$
<b>Elbe 5</b>	300	$9,55 \cdot 10^{-7}$	<b>Graben 5</b>	1,5	$2,79 \cdot 10^{-5}$
<b>Elbe 6</b>	300	$5,07 \cdot 10^{-6}$	<b>Graben 6</b>	1,5	$4,62 \cdot 10^{-7}$
<b>Löcknitz 1</b>	20	$6,26 \cdot 10^{-6}$	<b>Deckschicht 1</b>		$1,10 \cdot 10^{-5}$
<b>Löcknitz 2</b>	20	$8,32 \cdot 10^{-6}$	<b>Deckschicht 2</b>		$2,00 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 6.2: Bei der Kalibrierung ermittelte Leakage Parameter  $\lambda$  für das Grabensystem und die Qualmwasserbereiche

## 6.4 Bewertung der Validierungsrechnung vom 22.07.97 - 01.05.98

Die Validierung des numerischen Modells wird im Anschluss an die Modelleichung durch Simulation des gesamten zur Verfügung stehenden Zeitraumes durchgeführt. Um konsistente Anfangsbedingungen zu erhalten, wurde die Simulation am 01.06.97 begonnen. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Simulation anhand der Ganglinien der Grundwassermessstelle GW02 – GW13 erläutert. Der farblich hinterlegte Bereich kennzeichnet die Deckschicht an der jeweiligen Messstelle, und gibt somit einen Hinweis darauf, ob und wann gespannte oder ungespannte Verhältnisse vorliegen.

Die Messstellen GW02, GW10 und GW11 sind vorrangig von der oberen Löcknitz beeinflusst. Ihre Ganglinien sind in Abbildung 25 bis Abbildung 27 dargestellt. Vom 04.11.97 bis zum 09.04.98 liegen keine Messwerte für den Pegel Wustrow vor, dementsprechend sind die Abweichungen in diesem Bereich unvermeidbar. Die Tatsache, dass die Differenzen bei allen drei Messstellen gleichermaßen auftreten, lässt jedoch den Schluss zu, dass die Ursache im nicht erfassten Wasserstand der Löcknitz zu suchen ist. Die Generierung der Messwerte aus den Messungen am Pegel Lenzen ist fehlerbehaftet, da Änderungen am Wehr Gandow einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen beiden Pegeln bewirken. Für den restlichen Zeitraum liegen Messwerte am Pegel Wustrow vor, dementsprechend ist

die Anpassung der simulierten Grundwasserstände an die gemessenen gut. Zwar wird das Elbehochwasser vom Anfang August 97 zumindest in den Messstellen GW02 und GW10 um etwa 25 cm überschätzt, die extremen Ereignisse im Winter 98-99 konnten jedoch sehr genau abgebildet werden.

Auffallend ist der kleine Zacken in der gemessenen Ganglinie am 22.04.98. Dieser Peak findet sich in keiner Ganglinie der Oberflächengewässer. Die Ursache hierfür wird in einer erhöhten Infiltration infolge eines voran gegangenen großen Niederschlagsereignisses vermutet. Ein ähnlicher Effekt tritt am 27.10.98 auf. Das Niederschlagsereignis mit über 40 mm/d wird im Grundwasser bereits am 28.10. registriert, während es sich in der Löcknitz erst am 29.10. bemerkbar macht. Diese schnelle Reaktion lässt auf Makroporeneffekte schließen.

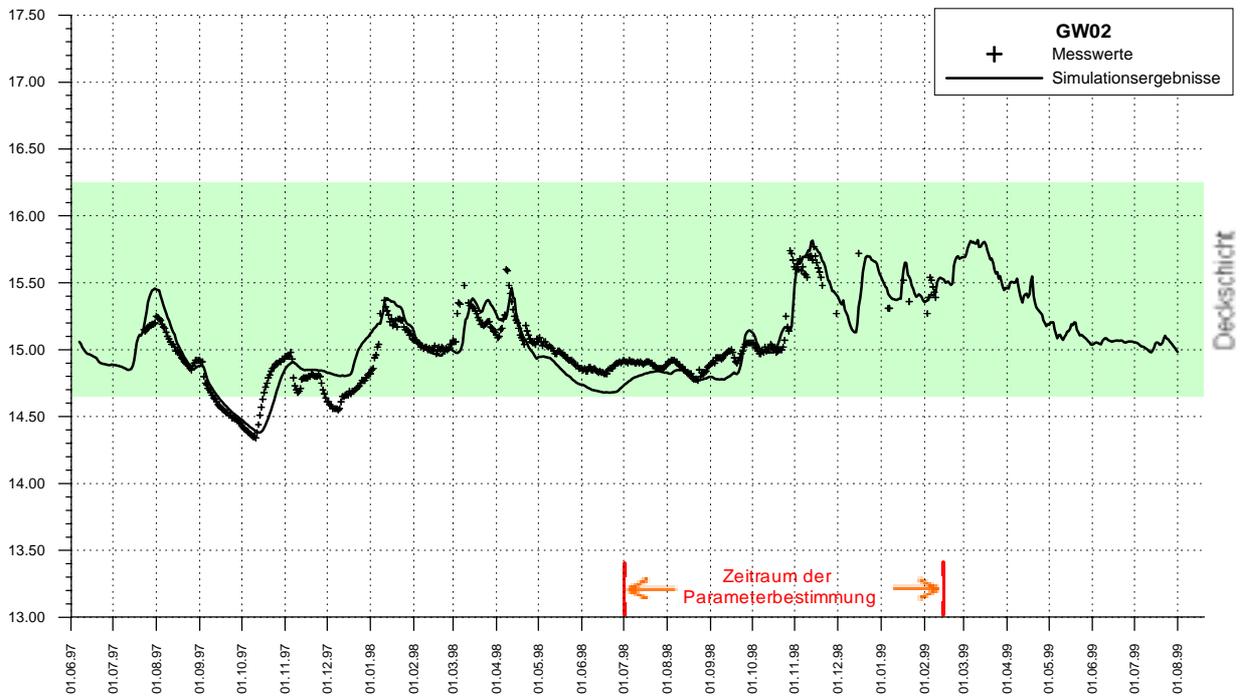


Abbildung 25: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW02

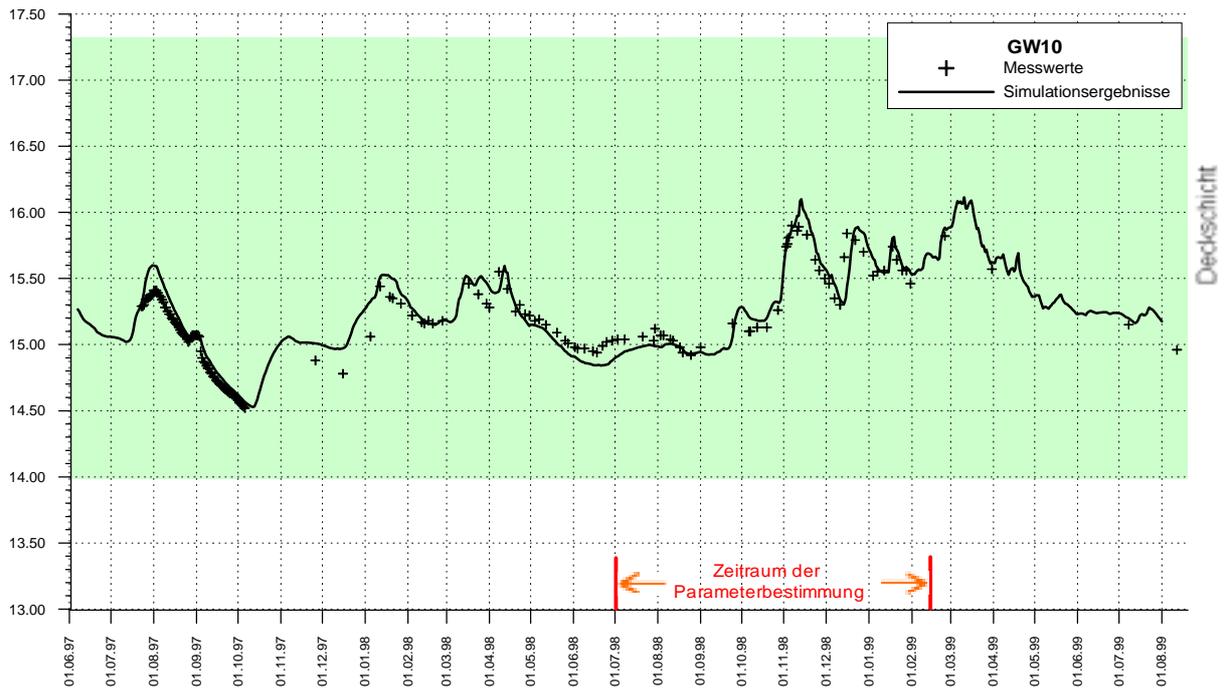


Abbildung 26: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW10

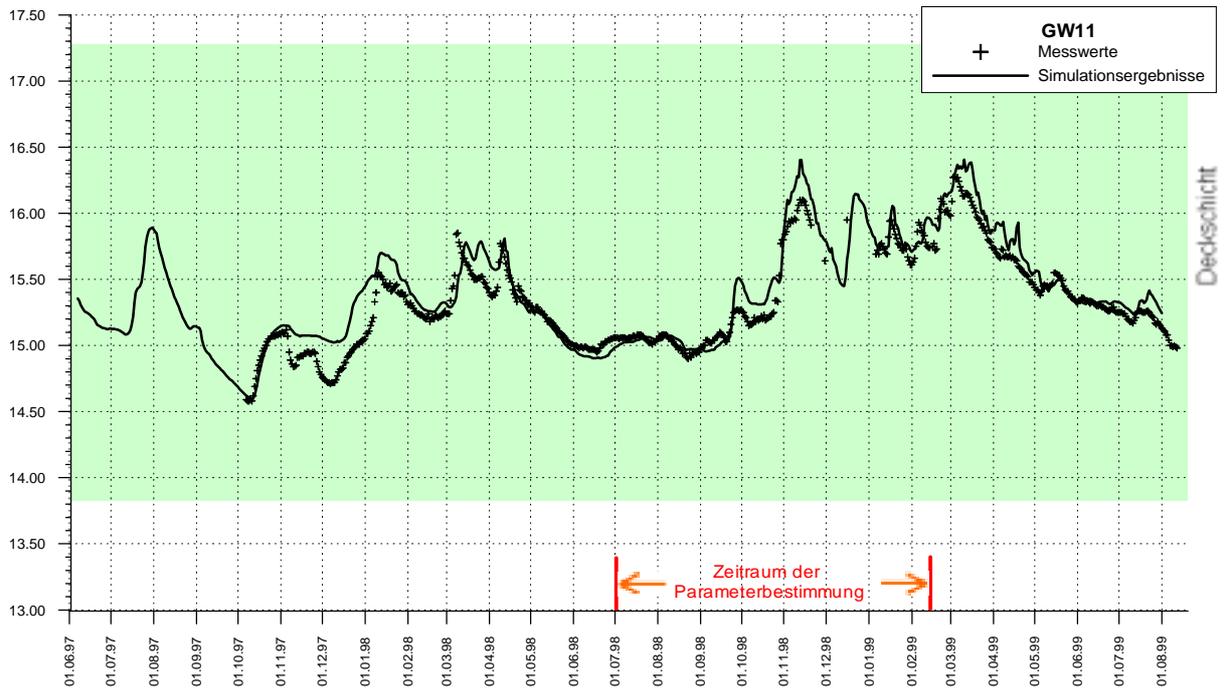


Abbildung 27: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW11

In Abbildung 28 und Abbildung 29 sind die Ganglinien der Messstellen GW03 und GW09 dargestellt. Die Gemeinsamkeit dieser beiden Messstellen liegt in der unmittelbaren Nähe zu einem Graben des Grabensystems. Die sehr guten Ergebnisse rechtfertigen die Annahmen zur Bestimmung der Grabenwasserstände in Abhängigkeit der gewichteten Wasserstände an Elbe und Löcknitz.

Für den Zeitraum vom 04.11.97 bis 09.04.98 gilt für die Messstellen GW03 und GW09 das gleiche, wie für die vorher beschriebenen Messstellen. Die Abweichungen liegen fast durchgehend im Bereich von etwa 10 cm, im Hochwasserfall Anfang August 97 wird der Wasserstand bei der GW09 indessen um etwa 30 cm überschätzt.

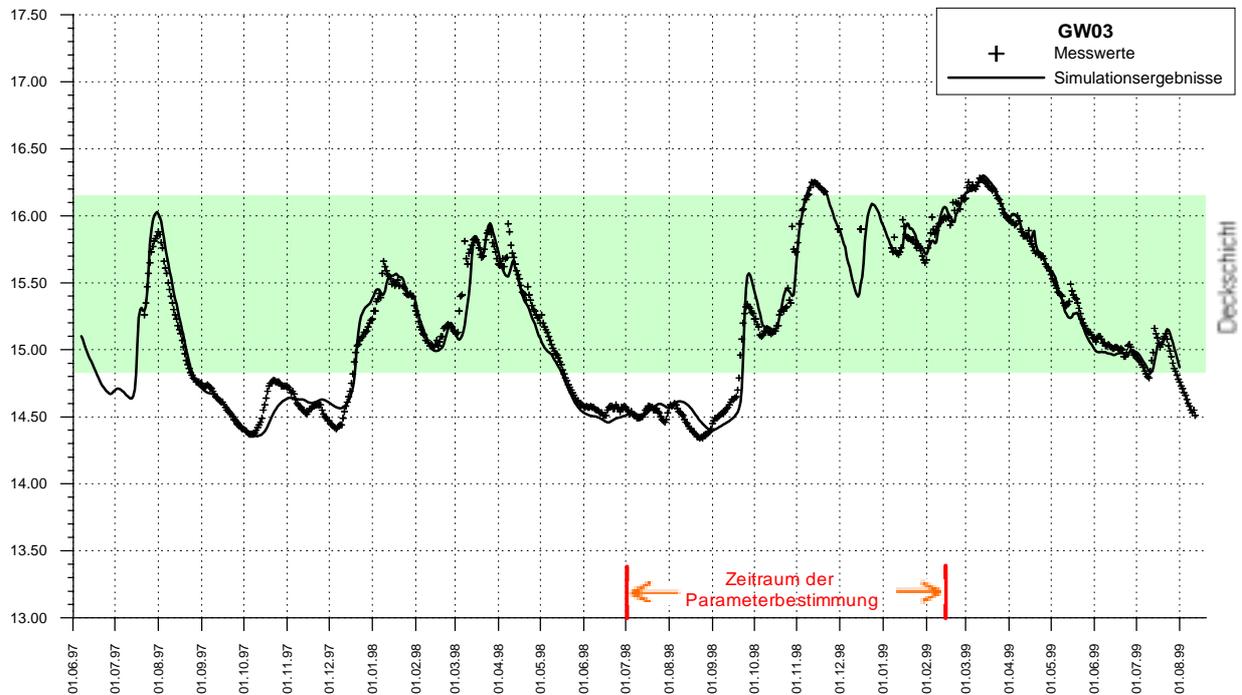


Abbildung 28: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW03

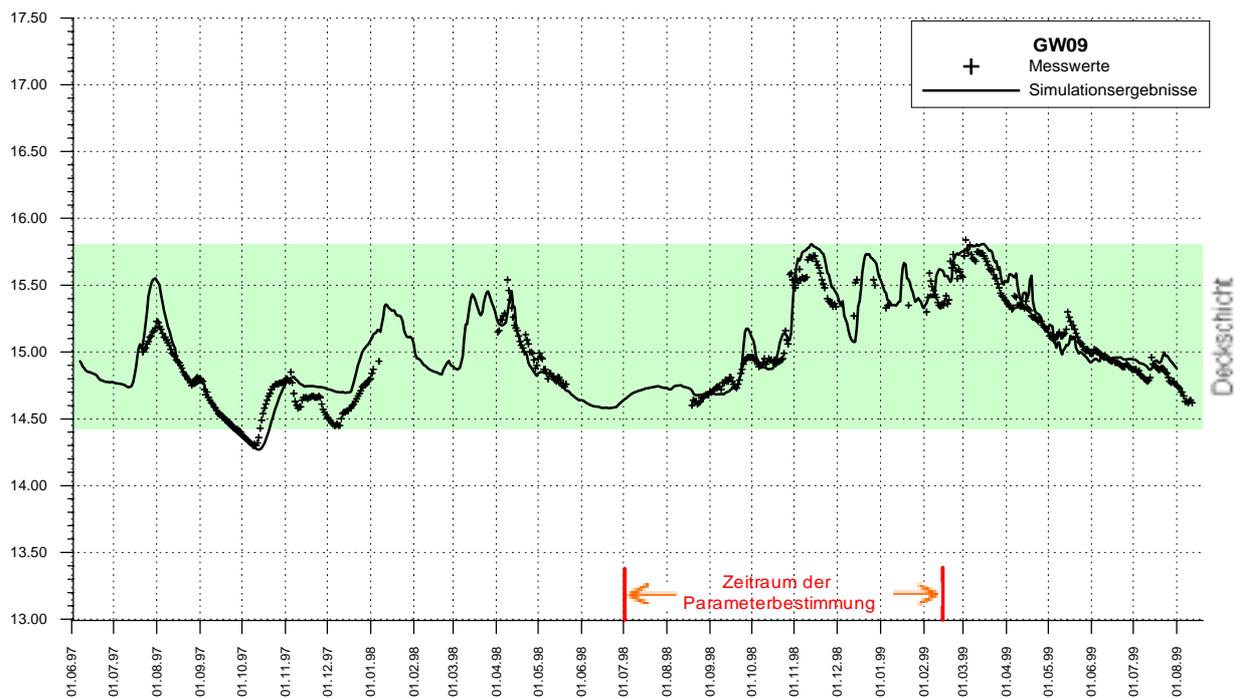


Abbildung 29: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW09

Die Messstellen GW07, GW08 und GW13 liegen im nordwestlichen Bereich des Untersuchungsgebietes. Die gemessenen Standrohrspiegelhöhen in den drei Pegeln liegen häufig über den Wasserständen beider Flüsse Elbe und Löcknitz in dem entsprechenden Abschnitt. Diese Tatsache sowie der beobachtete weiträumige Abfall der Grundwasserstände während der Reparaturarbeiten am Gandower Wehr im Oktober 97 (vgl. Abschnitt 4.1.3) stellen Indizien dafür dar, dass die Gräben I und V einen nachhaltigen Einfluss auf das Grundwasserregime im Untersuchungsgebiet haben. Der Graben V funktioniert als Vorfluter für das gesamte Grabensystem und fällt auch während Niedrigwasserperioden nicht trocken. Die Wasserstände in den Gräben werden im Modell - wie bereits dargelegt - anhand der Wasserstände in der oberen Löcknitz und der Elbe abgeschätzt. Die durch diesen einfachen Ansatz bedingten Unsicherheiten lassen sich durch die gelungene Reproduktion der Grundwasserdynamik in diesem Bereich des Projektgebietes als gering einstufen. Das ist in so fern bemerkenswert als die Grundwasserdynamik sehr empfindlich auf die Randbedingung in den Gräben reagiert. Eine Vernachlässigung der Wasserstände oder eine Festlegung auf irgend einen mittleren Wert hat - physikalisch durchaus begründet - enorme Auswirkungen auf die Austauschmengen und letztlich auf die Grundwasserstände. Da der hydraulische Anschluss sehr gut und die Durchlässigkeit des Untergrunds vergleichsweise hoch sind, ergeben sich relativ weiträumige Auswirkungen auf das Grundwasserregime.

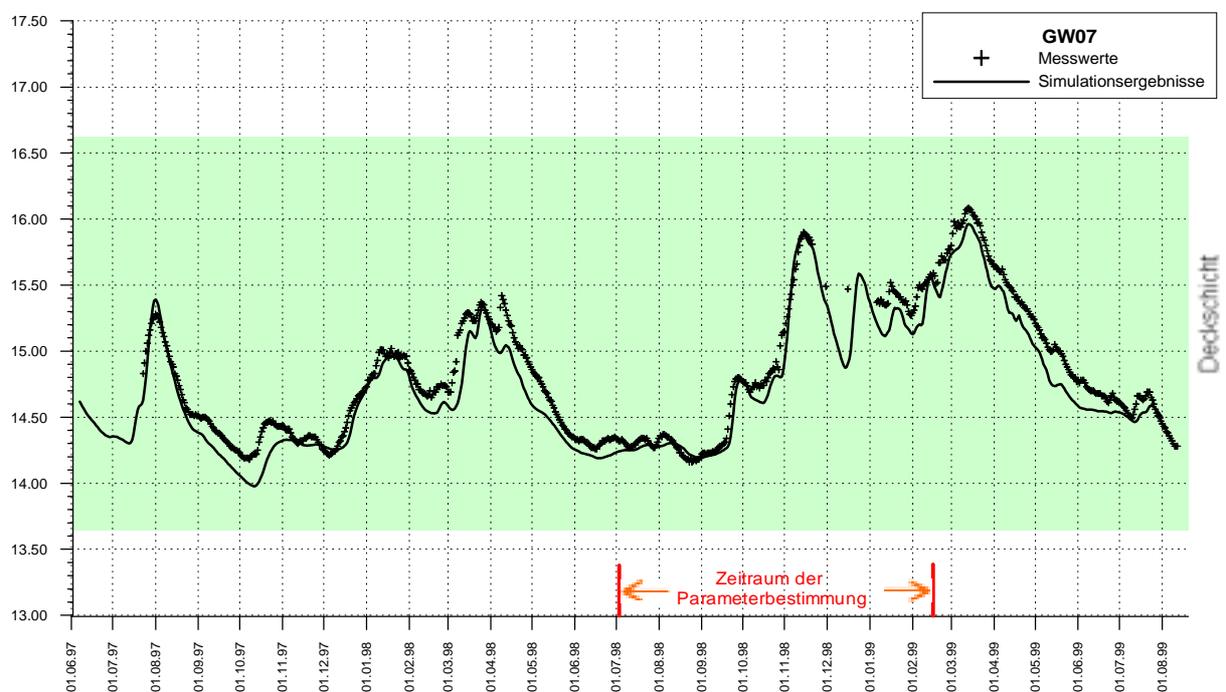


Abbildung 30: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW07

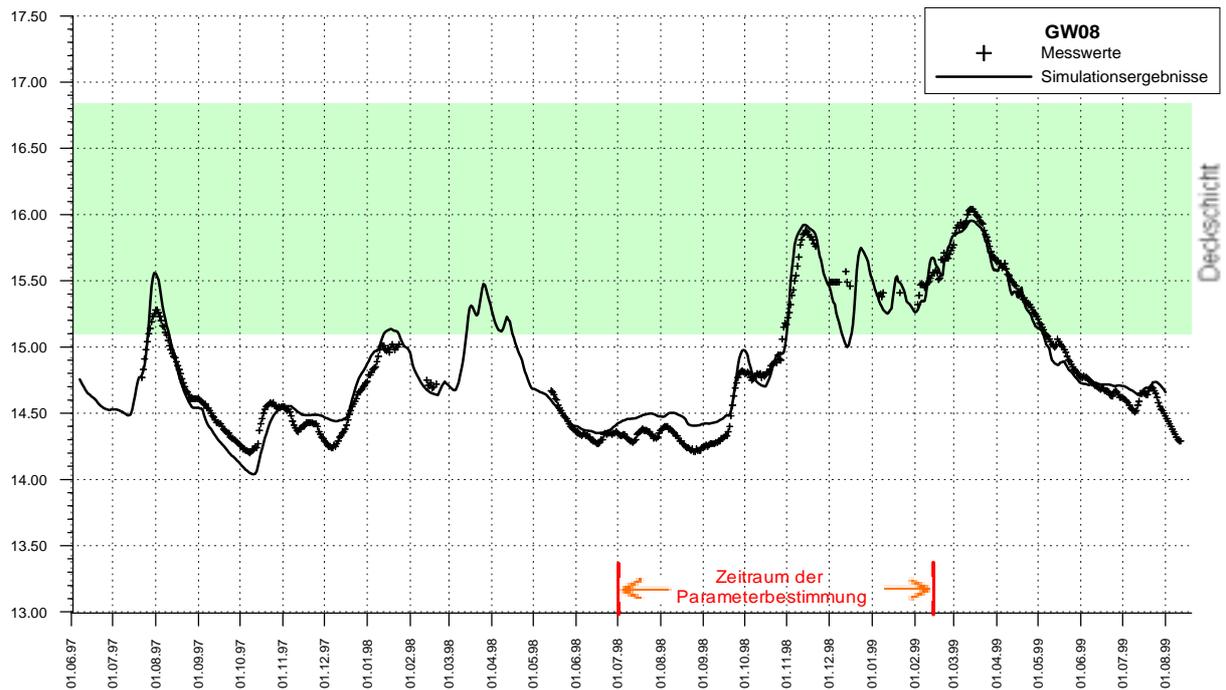


Abbildung 31: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW08

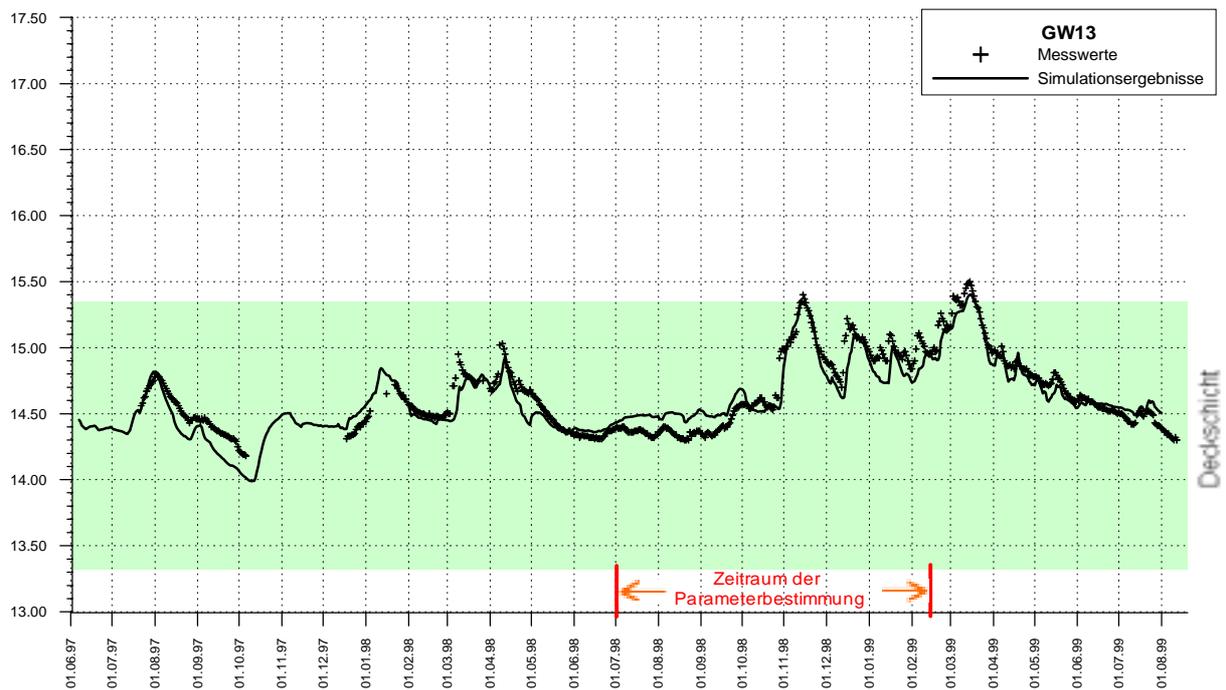


Abbildung 32: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW13

Als letzte Gruppe sollen die an der Elbe gelegenen Messstellen GW04 bis GW06 und GW12 (vgl. Abbildung 33 bis Abbildung 36) diskutiert werden. Die Abbildung der Dynamik an diesen Messstellen war sehr gut, was letztlich damit zusammenhängt, dass der dominierende Einflussfaktor, die Wasserstände der Elbe, sehr gut erfasst wurden. Die Abweichungen liegen selbst bei Hochwässern im

Bereich von wenigen cm. Bemerkenswert ist der Peak am 09.04.98, welcher sich wiederum in keiner Ganglinie der Oberflächengewässer so widerspiegelt. Die Ursache liegt auch hier in einer unmittelbaren Reaktion auf ein Niederschlagsereignis, welches bei den im Hochwasserfall gesättigten Verhältnissen im Oberboden relativ unmittelbar als Drucksprung im Grundwasser registriert werden kann. Solche singulären Ereignisse infolge Makroporeneffekte können im Grundwassermodell nicht direkt abgebildet werden. Diese Kurzschlusseffekte sind grundsätzlich wichtig bei der Beurteilung der Verlagerungsdynamik von Agrochemikalien durch den Boden in das Grundwasser. Ob diese Effekte in auenökologischer Hinsicht relevant sind, ist mit anderen Fachdisziplinen zu klären.

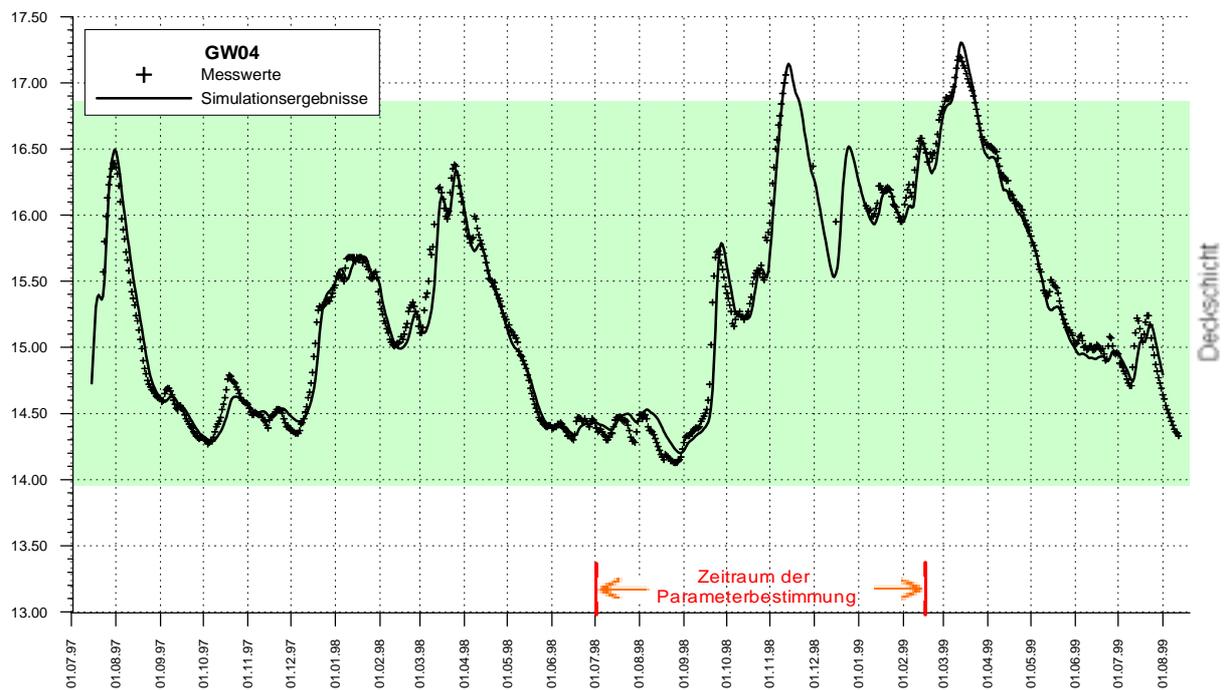


Abbildung 33: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW04

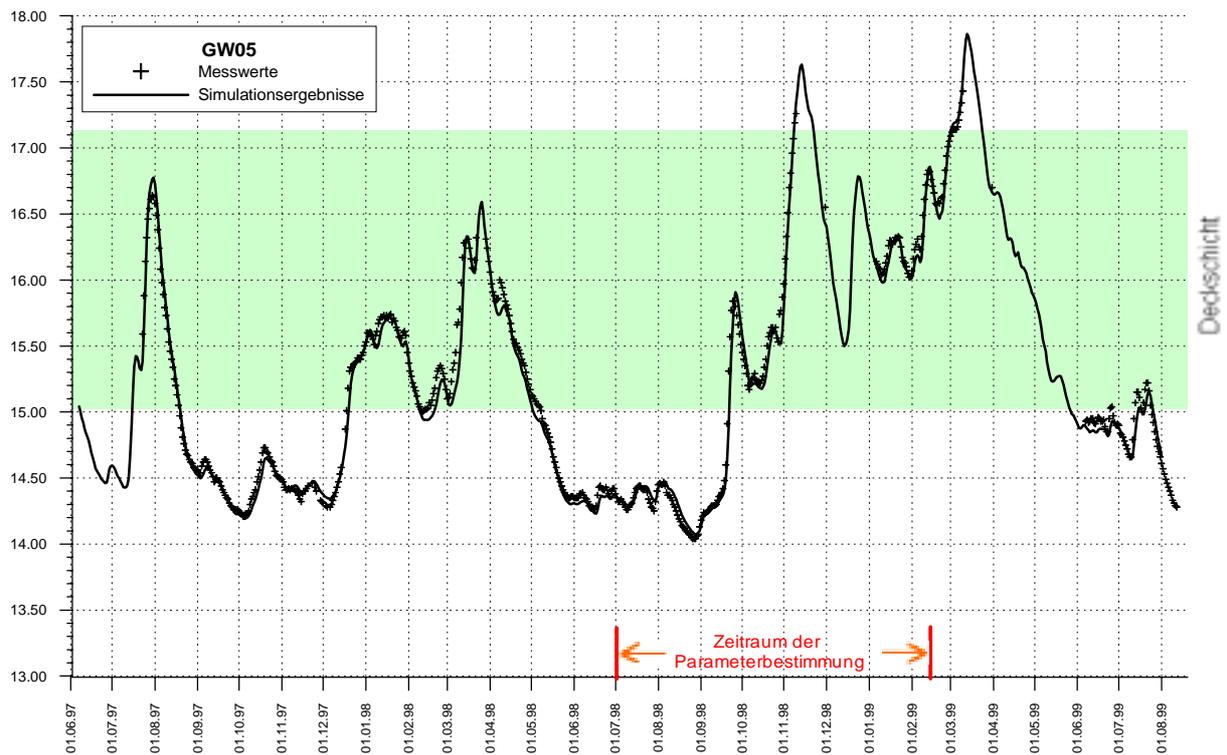


Abbildung 34: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW05

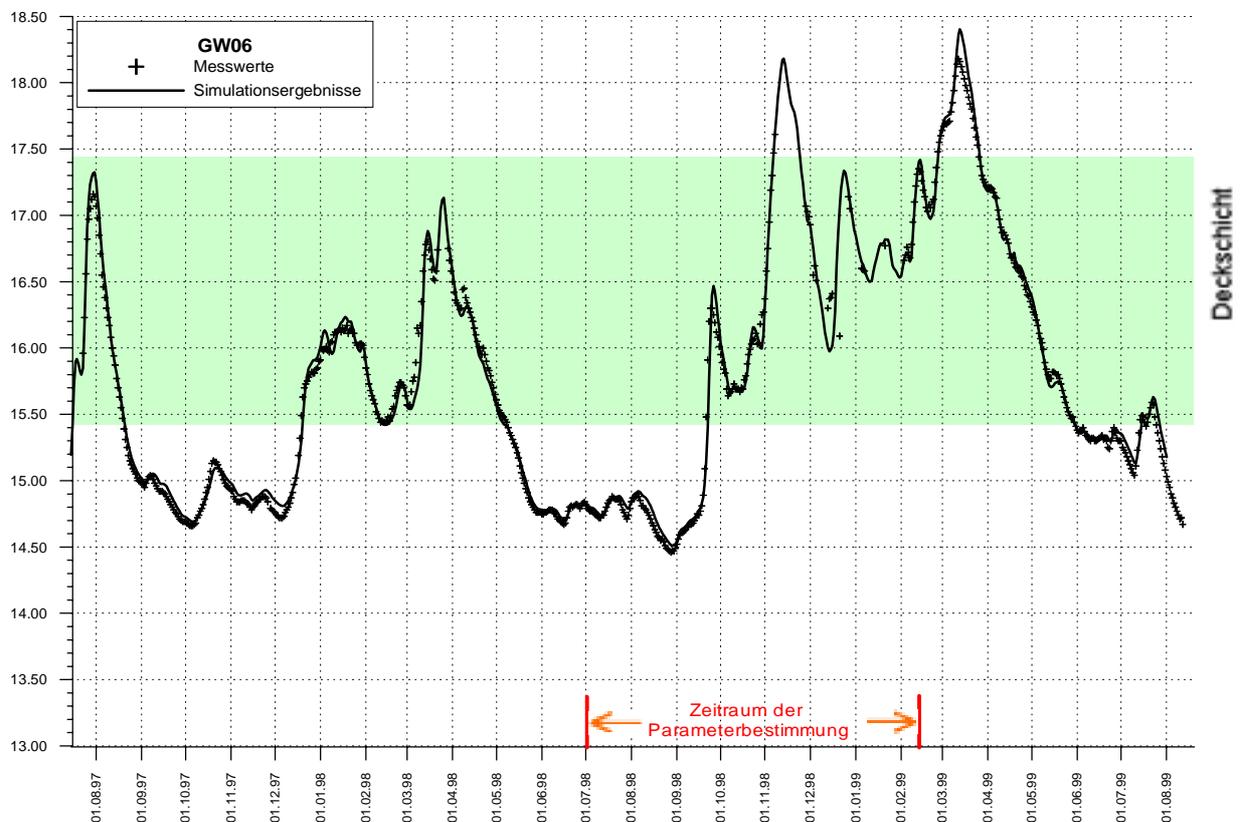


Abbildung 35: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW06

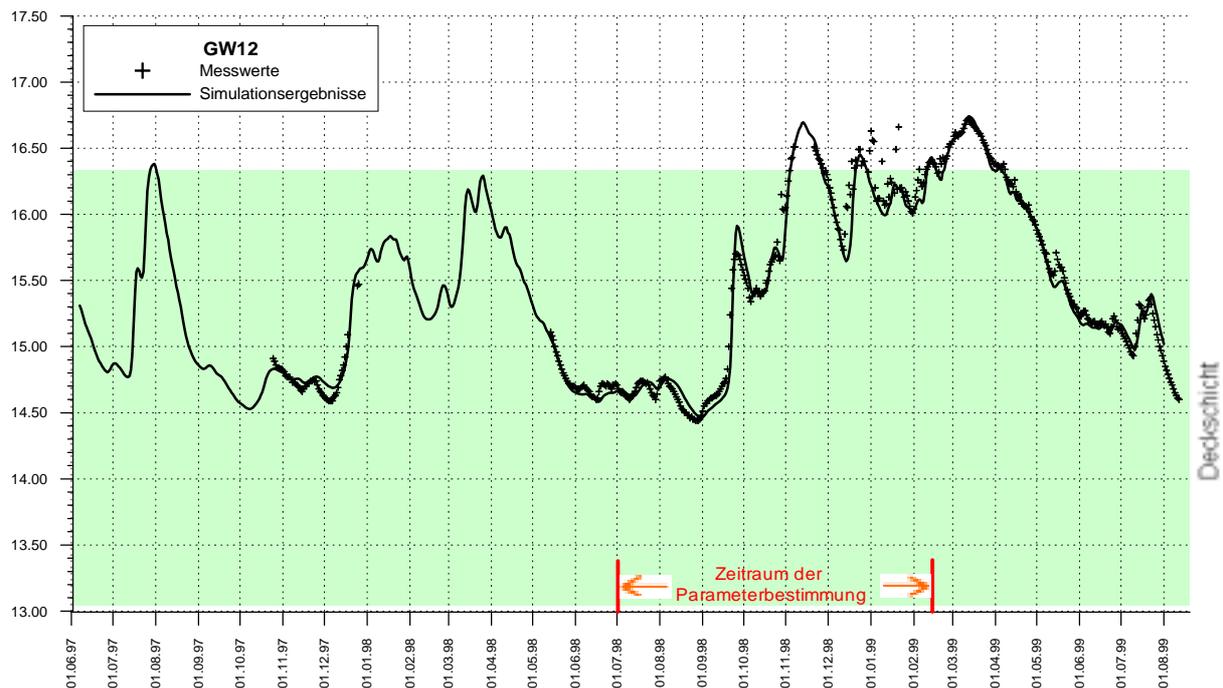


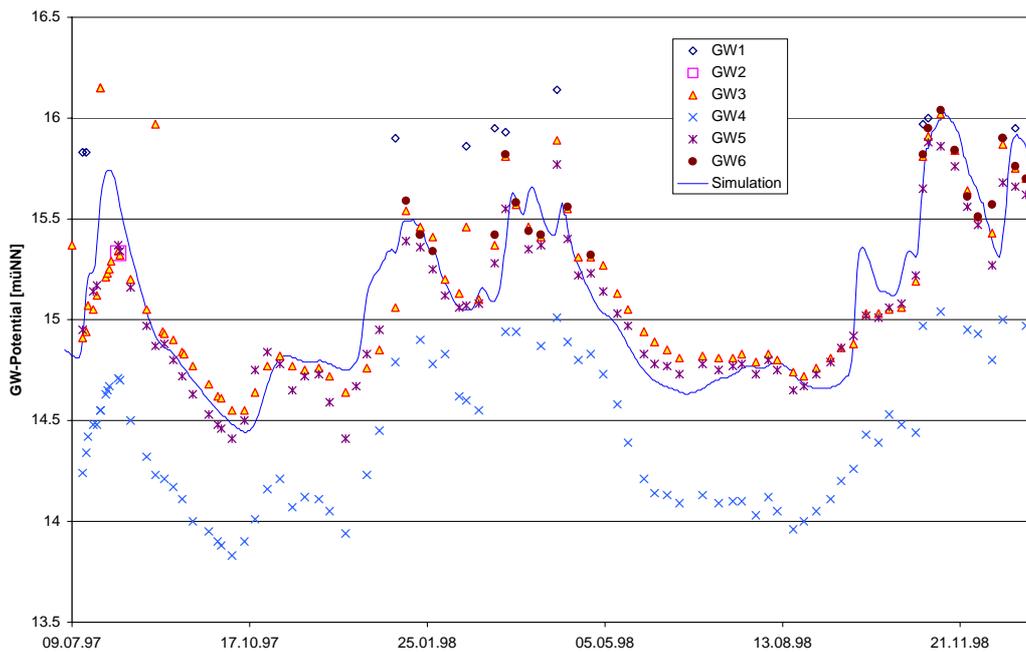
Abbildung 36: gemessene und simulierte Potentialhöhen der Messstelle GW12

## 6.5 Vergleich mit externen Grundwassermessungen

Das Teilprojekt Bodenkunde, Universität Hamburg, betreibt eine Reihe von Grundwasserpegel in den Testflächen. Diese sind in verschiedenen Tiefen abgeteuft, um den Bodenwasserhaushalt zu erfassen. Für einen Vergleich mit dem Grundwassermodell können allerdings nur diejenigen Pegel verwendet werden, die durch die Deckschicht hindurch im eigentlichen Aquifer verfiltert sind und damit das hydraulische Potential des Aquifers aufzeichnen. Die Modellergebnisse sind somit lediglich mit den Aufzeichnungen vergleichbar, die mit der Bezeichnung "Auensand" angesprochen werden.

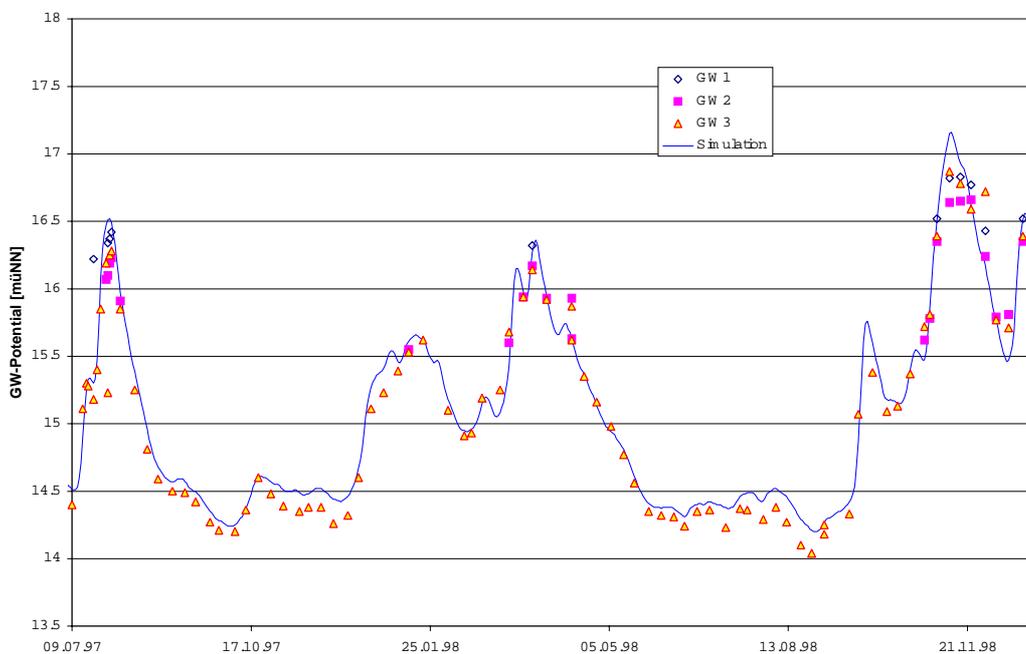
In den Abbildung 37 bis Abbildung 40 sind die beobachteten (Messung in verschiedenen Tiefen; nur die Messwerte im Aquifer werden simuliert) und die simulierten Grundwasserganglinien dargestellt. Dabei wurden für die Standorte dieser Grundwassermessstellen, die nicht exakt im Finite Elemente Netz aufgenommen sind, stellvertretend der nächstgelegene Diskretisierungsknoten herangezogen.

Abgesehen von den Pegeln bei Lütkenwisch bestätigen die Messungen des Teilprojekts Bodenkunde das Modellkonzept und die Simulationsergebnisse eindrucksvoll. Dieser Gegenüberstellung ist insofern bedeutsam da diese Messwerte personell und von der Instrumentierung her unabhängig erhoben wurden. Der Vergleich wurde am Ende der Modellerstellung durchgeführt.



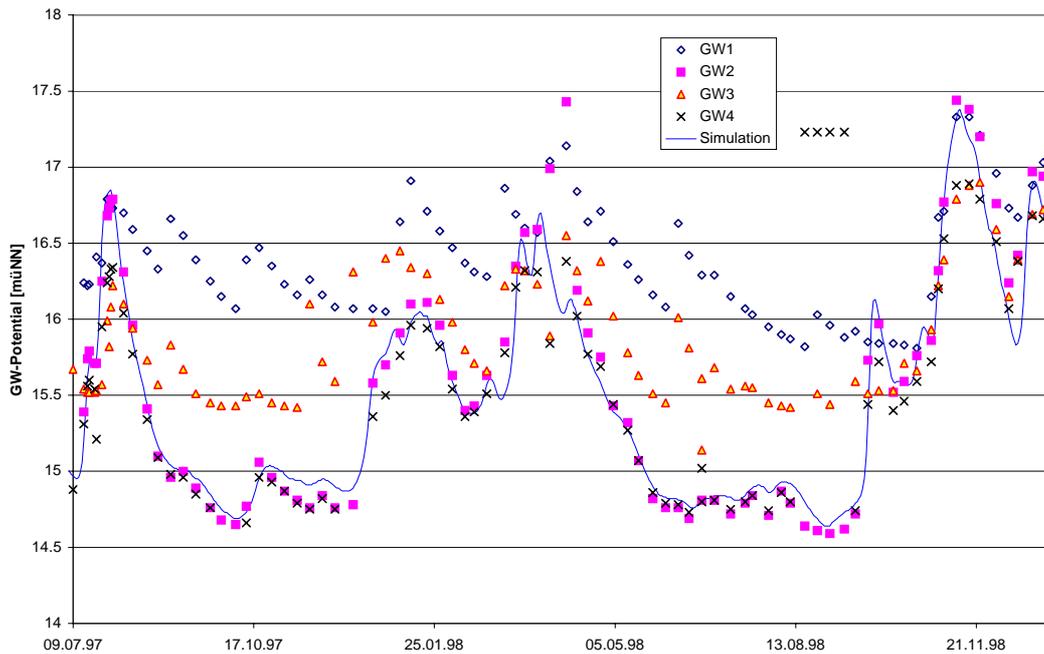
	GW1	GW2	GW3	GW4	GW5	GW6
GK-Rechts	4466956	4466956	4466956	n.n.b.	n.n.b.	5881688
GK-Hoch	5881688	5881688	5881688	n.n.b.	n.n.b.	5881688
Substrat	Auenlehm	Auenlehm	Auensand	Auensand	Auensand	Auensand
Treufe [m]	0.60	1.15	2.40	1.50	8.50	2.00

Abbildung 37: Vergleich mit dem Pegel Bodenkunde am Standort „Drei Felder“



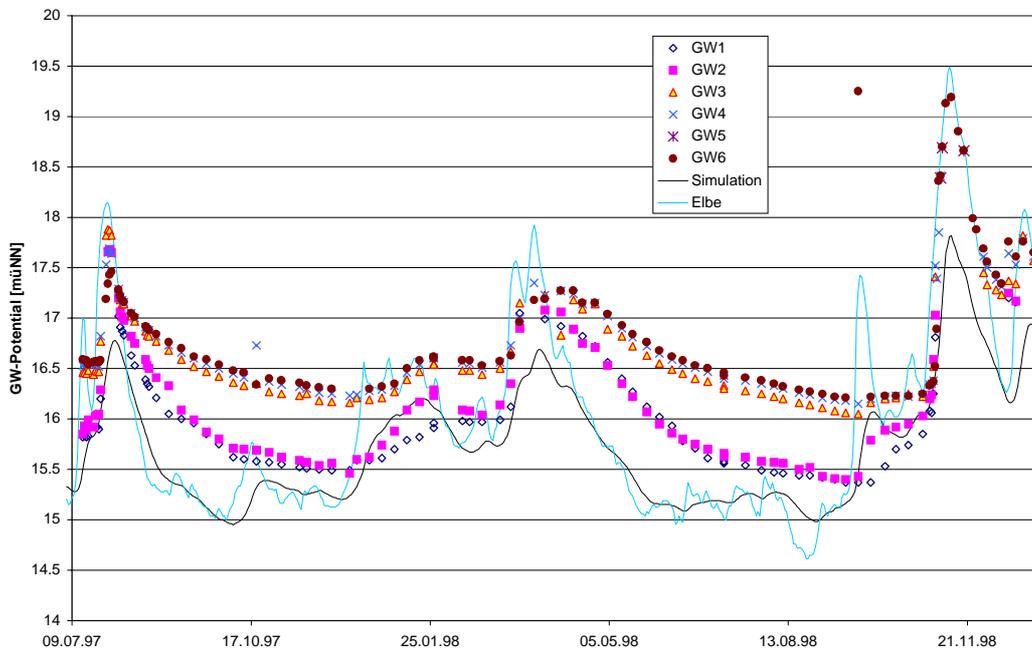
	GW1	GW2	GW3
GK-Rechts	4465775	4465775	4465775
GK-Hoch	5880533	5880533	5880533
Substrat	Auenlehm	Auenlehm	Auensand
Treufe [m]	0.50	1.00	3.00

Abbildung 38: Vergleich mit dem Pegel Bodenkunde am Standort „Eichwald“



	GW1	GW2	GW3	GW4
GK-Rechts	n.n.b.	n.n.b.	4468154	4468154
GK-Hoch	n.n.b.	n.n.b.	5880242	5880242
Substrat	Auenlehm	Auensand	Auenlehm	Auensand
Treufe [m]	2.00	2.80	1.25	2.00

Abbildung 39: Vergleich mit dem Pegel Bodenkunde am Standort „Oberholz“



	GW1	GW2	GW3	GW4	GW5	GW6
GK-Rechts	4470394	4470394	n.n.b.	n.n.b.	4470407	4470407
GK-Hoch	5880313	5880313	n.n.b.	n.n.b.	5880331	5880331
Substrat	Auenlehm	Auensand	Auensand	Auensand	Auenlehm	Auensand
Treufe [m]	1.50	2.50	2.40	2.40	0.50	2.25

Abbildung 40: Vergleich mit dem Pegel Bodenkunde am Standort „Lütkenwisch“

Der Bereich von Lütkenwisch lässt sich kaum mit dem Grundwassermodell beschreiben. Hierfür sind vor allem die nicht mehr hydraulisch angebundene Altarme der Elbe verantwortlich. Diese werden bei Hochwasser gefüllt und speisen nach Abflauen der Hochwasserwelle das Grundwasser. Eine Folge ist, dass in diesem Bereich die Grundwasserdynamik durch diese Oberflächenspeicherung weitgehend gedämpft wird und letztlich die Grundwasserstände zu niedrig modelliert werden. Eine Anwendung des Modells in diesem Bereich war jedoch nicht vorgesehen.

## **7 Prognoserechnungen zur Deichrückverlegung**

Die oben dargelegten Ausführungen zur Erfassung und Modellierung des Grundwasserregimes bestätigen eine ausgeprägte Grundwasserdynamik, die maßgeblich von der hydraulischen Interaktion zwischen Elbe, Löcknitz sowie dem Grabensystem gesteuert wird. Eine Deichrückverlegung stellt einen erheblichen Eingriff in das hydraulische System dar und wird sich - je nach Ausführungsvariante - nachhaltig auf das bestehende Grundwasserregime und den Gebietswasserhaushalt auswirken. Die quantitative Erfassung der Wechselwirkungen zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser und insbesondere die räumliche und zeitliche Verteilung der Überstauung nach Deichrückverlegung sind erforderlich für Prognosen im Hinblick auf Änderungen des Grundwasserregimes. Erst eine räumlich und zeitlich differenzierte Prognose des veränderten Wasserhaushaltsregimes erlaubt die Behandlung folgender Fragestellungen:

1. Abschätzung der Veränderungen der derzeitigen standörtlichen Bedingungen der Grünlandvegetation im gesamten Untersuchungsgebiet
2. Entwicklung der Auenbiozönose (potentielle Wuchsorte von Hartholz- und Weichholzauenwäldern sowie Offenlandvegetation) im Rückdeichungsgebiet.

Um die Folgen dieses Eingriffes auf die Entwicklung von Biozönose und Landwirtschaft quantitativ bewerten zu können, sind nicht nur Prognosen zum mittleren Verhalten der Grundwasserdynamik sondern auch während Extremereignissen (Hoch- und Niedrigwasserperioden) erforderlich. Die komplizierte hydraulische Interaktion zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser kann in diesem Detaillierungsgrad nur auf Grundlage eines physikalisch basierten Modells untersucht werden. Obwohl ein Modell aufgrund der inhärenten Unsicherheiten nicht den Anspruch erfüllen kann, die Wirklichkeit exakt abzubilden, bestehen unterschiedliche Strategien, um mit Hilfe von Prognoserechnungen Folgen und etwaige Handlungsalternativen einer Deichrückverlegung zu untersuchen und zu bewerten. Hierbei wurde ein von den zu erwartenden Randbedingungen und Parameterwerten in sich konsistentes Szenario entworfen, um die zu erwartenden hydraulischen Auswirkungen der geplanten Maßnahme abzuschätzen. Konkret wurde mit dem geeichten Grundwassermodell charakteristische

Abflusssituationen (Niedrigwasser, Mittelwasser und Hochwasser) sowie deren Übergänge über einen als repräsentativ angesehenen Zeitrahmen simuliert. In Bezug auf die Repräsentanz des untersuchten Zeitfensters wurde ein Zeitraum von 35 Jahren, für den zuverlässige Daten der Wasserstandsdynamik an der Elbe vorliegen, als hinreichend für die vorliegenden Fragestellungen angesehen. Für ein Variantenvergleich war somit eine Langzeitsimulation über 35 Jahre sowohl für den jetzigen Zustand (Referenz) als auch für eine Rückdeichungsvariante erforderlich.

## 7.1 Varianten der Deichrückverlegung

In Abstimmung mit den am Forschungsvorhaben beteiligten Institutionen wurden hinsichtlich der Deichrückverlegung grundsätzlich drei Varianten ausgearbeitet:

Variante 1: keine Rückdeichung; Extensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung

Variante 2: Mittlere Rückdeichung von ca. 350 ha Überschwemmungsgebiet

Variante 3: Maximale Rückdeichung von ca. 670 ha Überschwemmungsgebiet

### Variante 1: Keine Rückdeichung

Bei Ausführung der Variante 1 ist keine wesentliche Veränderung gegenüber dem jetzigen Zustand zu erwarten. Infolge der Extensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung wird eventuell auch die Bewirtschaftung des Grabensystems eingeschränkt werden. Die sich hieraus ergebenden Veränderungen auf die Grundwasserstände sind weitgehend lokal auf die Bereiche um die stillgelegten Gräben begrenzt. Wesentliche Auswirkungen auf die derzeitige Qualmwasserentwicklung sind jedoch nicht zu erwarten.

### Variante 2 und 3: Rückdeichung

Ein neuer Deich wird weiter landeinwärts erbaut. Je nach Ausführungsvariante sollen hierbei 350 oder 670 ha neues Überschwemmungsgebiet geschaffen werden. Damit sollen Möglichkeiten einer Auenwaldsukzession entstehen. In dem neuen Vordeichsland soll weiterhin eine extensivierte Landwirtschaft betrieben werden.

Der alte Deich bleibt teilweise bestehen, der hydraulische Anschluss zur Überflutung bei Hochwasser des neu entstandenen Vorlandes erfolgt durch Schlitze im alten Deich. Eine Nutzung als geregelter Polder ist von vorne herein nicht vorgesehen. Die Schlitze sind so angelegt, dass eine Überflutung von unterstrom ausgeht und damit das neue Vordeichsland entgegen der Fließrichtung der Elbe gefüllt wird. Steigt der Wasserstand in der Elbe weiter an, werden die weiter oberstrom gelegenen Schlitze

aktiviert. Erst ab einem höheren Abfluss wird eine Durchströmung des Vorlandes in Fließrichtung der Elbe bewirkt. Damit wird gewährleistet, dass die Fließgeschwindigkeiten und damit die Erosionskräfte vergleichsweise gering bleiben. Um eine bessere Durchströmung sicherzustellen, muss der Fährdamm im Osten des Gebietes an einzelnen Stellen abgetragen werden.

Im neuen Vordeichsland soll ein hydraulisch wirksames Flutrinnensystem angelegt werden. Der Aushub liefert zum Teil Material für den neuen Deich. Darüber hinaus soll das Rinnensystem dazu beitragen, atypische Prozesse im neuen Deichvorland in Form von Sedimentumlagerungen, Sandtransport, spontanen Reliefveränderungen und den Eintrag von allochthonen Organismen zu reaktivieren. Eine wesentliche hydraulische Funktion einzelner Rinnen besteht in der Entwässerung des Gebietes, da sie ein schnelleres Abfließen des Wassers in die Elbe ermöglichen. Eine durchgängige Verbindung der Flutrinnen ist jedoch nicht vorgesehen, da größere Fließgeschwindigkeiten im Überflutungsfall zur Ausbildung eines neuen Flussbetts führen könnten. In Abbildung 41 und Abbildung 42 sind die Flutrinnen und die Lage der projektierten Deichtrasse dargestellt.

Bei der vorgesehenen Deichrückverlegung wird das Grabensystem durch die Errichtung des neuen Deiches getrennt. Damit wird insgesamt das Rückdeichungsgebiet aus dem Be- und Entwässerungssystem entfernt und somit weitgehend der Wasserstandsdynamik der Elbe ausgesetzt. Das Fehlen dieser kulturtechnischen Steuerung wird im Vergleich zum jetzigen Zustand zu insgesamt extremeren hydraulischen Verhältnissen führen, trockener in Niedrigwasserzeiten und feuchter bei Hochwasser.

Die Rückdeichung wird den Wasserhaushalt des Gebietes nachhaltig beeinflussen, wobei auch das Land hinter dem neuen Deich betroffen sein dürfte. Die Veränderung des Grundwasserregimes, als wichtiger Standortfaktor für das ökologische System, zieht Entwicklungen des Gebietes nach sich, die im Vorfeld eines wasserbaulichen Eingriffes in ihren vielfältigen Wechselwirkungen abgeschätzt werden müssen:

- Entwicklungspotential der Flora und Fauna
- Möglichkeiten einer landwirtschaftlichen Nutzung im Rückdeichungsgebiet
- Auswirkungen auf die Landwirtschaft hinter dem neuen Deich (Qualmwasser, Bodenfeuchte, Bodenvernässung, Befahrbarkeit, Bearbeitbarkeit)
- Hydraulische Leistungsfähigkeit der Löcknitz und des Schöpfwerks Gaarz
- Beeinflussung der Grundwassersituation nördlich der Löcknitz
- Konstruktiver Maßnahmen, wie z.B. Entwässerungsgräben hinter der neuen Deichlinie für die Deichsicherheit oder gegen Qualmwasser usw.

Die Szenarien 2 und 3 werfen prinzipiell ähnliche Fragestellungen auf. Es zeichnete sich während der Bearbeitung ab, dass das Szenario 3 als Maximalvariante kaum realisierbar sein dürfte. Die Modellergebnisse der Überflutung, als eine entscheidende Randbedingung für das Grundwassermodell, lagen bis zur Beendigung des vorliegenden Teilprojektes nur für die Variante 2, mit dem aktuellen Geländemodell vor. Im folgenden wird auf die Auswirkungen der Deichvariante 2 eingegangen. Aus dieser Darstellung lassen sich zumindest qualitativ Tendenzen für die größere Rückdeichung ableiten.

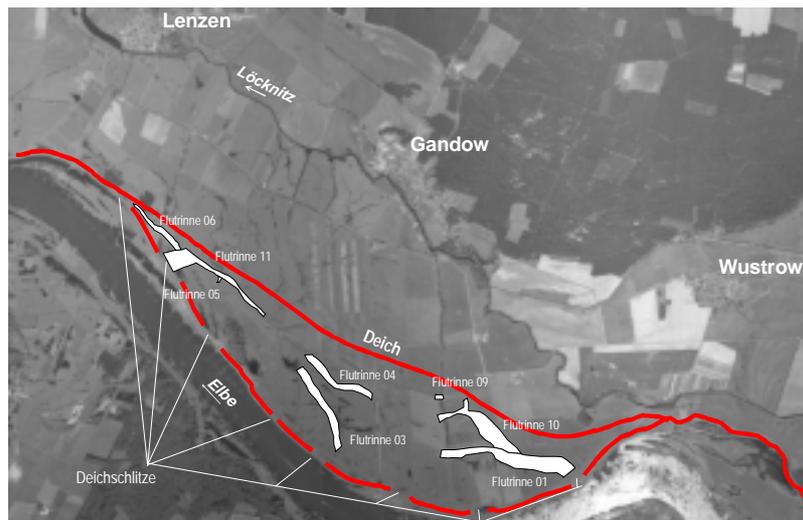


Abbildung 41: Lage der Deichtrasse, der Schlitze und der Flutrinnen bei der mittleren Rückdeichungsvariante

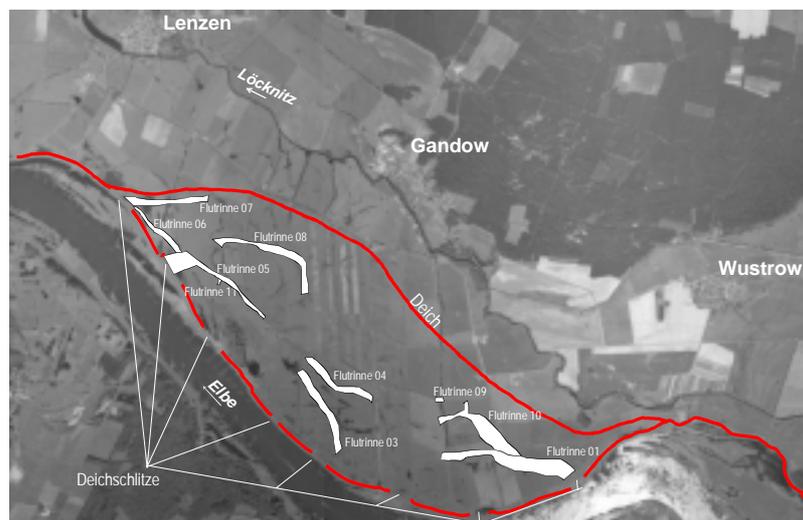


Abbildung 42: Lage der Deichtrasse, der Schlitze und der Flutrinnen bei der großen Rückdeichungsvariante

## 7.2 Betrachtungszeitraum der Prognose

Der ökosystemare Ansatz der vorliegenden Untersuchung bedingt einen besonderen Prognoserahmen, der über die derzeitige Ingenieurpraxis hinausragt. In der wasserbaulichen Ingenieurpraxis reicht häufig die Berechnung eines einzigen Extremereignisses, z.B. ein hundertjähriges Hochwasser aus, um Sicherheiten der Dimensionierung nachzuweisen. Dem entgegen sind bei ökologischen Fragestellungen die Dynamik und gegebenenfalls langjährige Trends zu untersuchen, da bei der Beurteilung nicht nur Extremereignisse, z.B. das Verschwinden einer Spezies nach einer langandauernden Überschwemmung und deren Wiederkehrintervall (z.B. Wiederbesiedelung) wichtig sind, sondern die gesamte Grundwasserdynamik über mehrere Jahre hinweg. Dies ist ausschlaggebend, ob ein Standort für eine bestimmte Art langfristig geeignet ist oder nicht.

Insbesondere in Auen ist die Erfassung der Dynamik von eminenter Bedeutung. Im Untersuchungsgebiet finden Grundwasserschwankungen im Bereich von bis zu einigen Metern statt. Für das Pflanzenwachstum ist es wichtig, dass sie stets genügend Bodenwasser zur Verfügung steht. Auf der anderen Seite reagieren manche Pflanzen empfindlich auf wassergesättigte Verhältnisse im Boden (Sauerstoffversorgung, Fäulnis im Wurzelraum). Je nach Art gibt es unterschiedliche Toleranzen gegen zeitweiliges Austrocknen und Vernässen des Wurzelraumes. Einfache Standortfaktoren wie der mittlere Flurabstand haben damit in Auen nur eine eingeschränkte Aussagekraft.

In Abstimmungstreffen mit den Projektbeteiligten wurde eine Palette von Faktoren zur Charakterisierung des Grundwasserregimes in Hinblick auf ökosystemare Fragestellungen identifiziert. Da die Grundwasserpotentiale im Untersuchungsgebiet, ähnlich wie der Elbewasserstand, sich durch ständige Wasserstandschwankungen, ohne allzu ausgeprägte jahreszeitliche Muster oder Perioden sowie durch eine große Diskrepanz zwischen feuchten und trockenen Jahren auszeichnen, muss für eine repräsentative Prognose zur Änderung dieser Faktoren ein längerer Zeitraum berücksichtigt werden.

Um diese Aspekte zu verdeutlichen, soll zunächst die Abflussdynamik der Elbe, als grundlegendste Randbedingung des Grundwasserregimes, in einem statistischen Kontext dargestellt werden. In Abbildung 43 und Abbildung 44 ist deutlich zu erkennen, wie stark die Abflussdynamik der Elbe in den einzelnen Jahren variiert. Beide Auswertungen wurden für den Zeitraum von 1964 bis 1998 durchgeführt. In Abbildung 43 wird eine Hochwasserstatistik der Elbe dargestellt. Aufgetragen wurden die höchsten Abflüsse, die innerhalb des Untersuchungszeitraums bezogen auf ein Kalenderjahr bzw. auf die Vegetationszeit mit einer festgelegten Dauer aufgetreten sind. In Abbildung 44 wird für jeden Monat der höchste, niedrigste und der mittlere Abfluss dargestellt. Die grau hinterlegte Fläche ist jeweils die Hüllkurve zwischen größtem und kleinstem Wert im Beobachtungszeitraum. Diese Art der Darstellung erlaubt eine Einordnung der Abflüsse während des Beobachtungszeitraums in den

Bereich möglicher Abflüsse. Es lässt sich ablesen, dass im Beobachtungszeitraum, vor allem im Jahr 1998, einerseits relativ geringe Niedrigwasserabflüsse als auch ein außerordentliches Hochwasser erfasst wurden. Damit ist zufälligerweise ein breites Band möglicher Zustände abgedeckt, was in Hinblick auf die Modellzuverlässigkeit positiv zu bewerten ist.

Erst eine Zeitreihenanalyse erschließt typische Muster. Um diesen Umstand gerecht zu werden, bestehen grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten einer Herangehensweise. Entweder werden repräsentative Zeitreihen der Elbwasserstände als Randbedingung für das Grundwassermodell generiert, oder es wird ein Teil des Beobachtungszeitraums als repräsentativ betrachtet. Letzteres wird bei den laufenden Untersuchungen angenommen.

Das Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe hat ausführlich das Abflussverhalten der Elbe analysiert. Nach diesen Untersuchungen dürfen für statistische Analysen der Elbdynamik Datensätze ab 1964 verwendet werden. Bis zu diesem Jahr wurde ein großer Teil der abflussrelevanten antropogenen Eingriffe in Form von Wasserspeichern im Einzugsgebiet fertiggestellt. Dieser Zeitraum „stellt einen geeigneten Kompromiss zwischen zu gewährleistender Stationarität und anzustrebender Beobachtungslänge für statistisch fundierte Aussagen dar“ (Büchele, Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, persönliche Mitteilung, Dez. 1998). Damit ist eine statistisch repräsentative Prognose auf Grundlage eines 35-jährigen Zeitraumes (01.01.1964 bis 31.12.1998) möglich.

Die Simulation wurde insgesamt bis zum 31.07.99 durchgeführt. Obwohl das extreme Hochwasser im Frühjahr 1999 einen spürbaren Einfluss auf die Statistik gehabt hätte, wurde es nicht mehr in die Auswertung des 35-jährigen Zeitraums mit einbezogen, da in die statistischen Auswertung nur ganze Jahresperioden herangezogen werden dürfen.

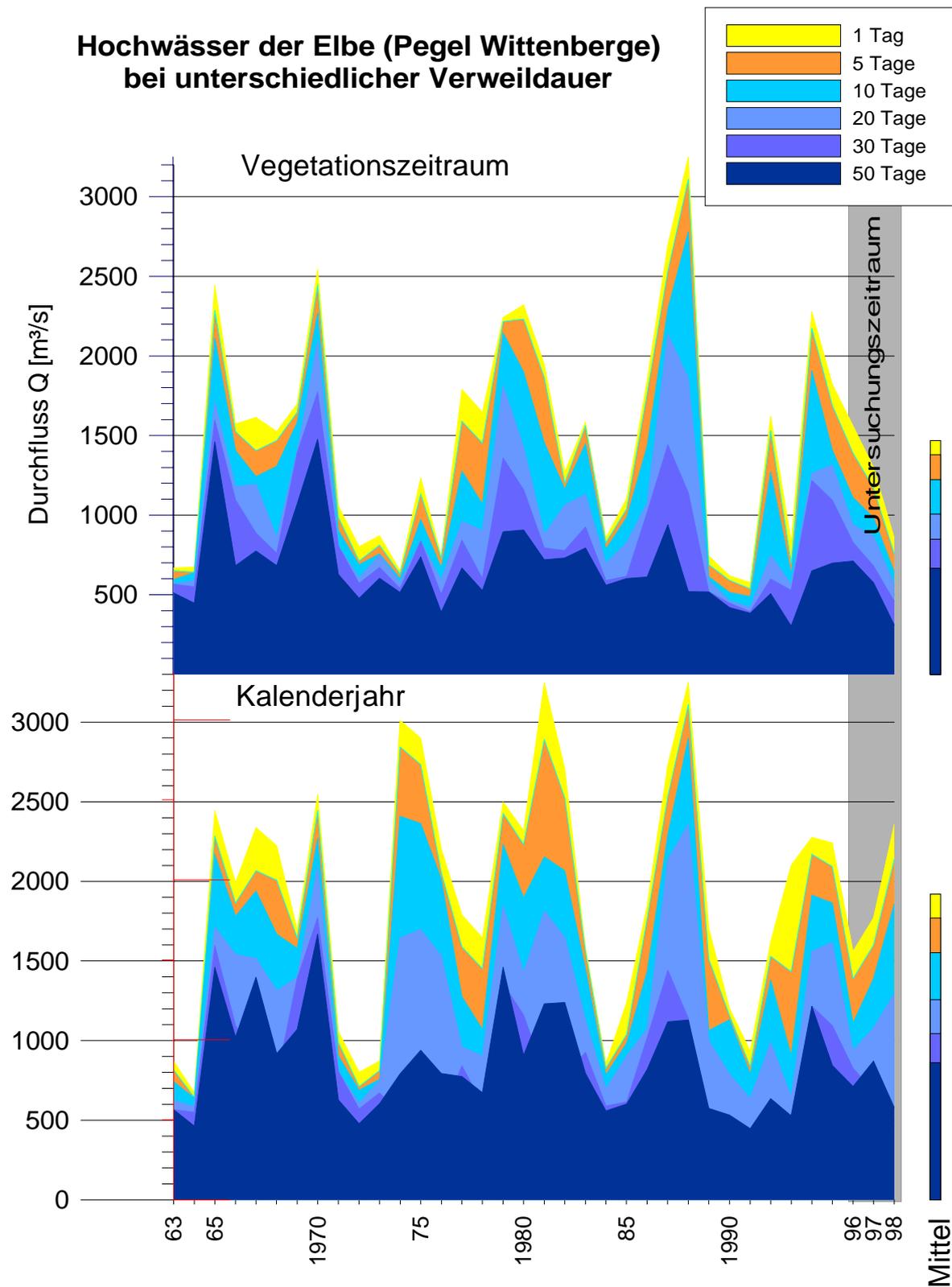


Abbildung 43: Überschreitungsstatistik der Elbe (Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde; Überarbeitung (Stand März 1999): Universität Karlsruhe (TH); Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Abt. Hydrologie)

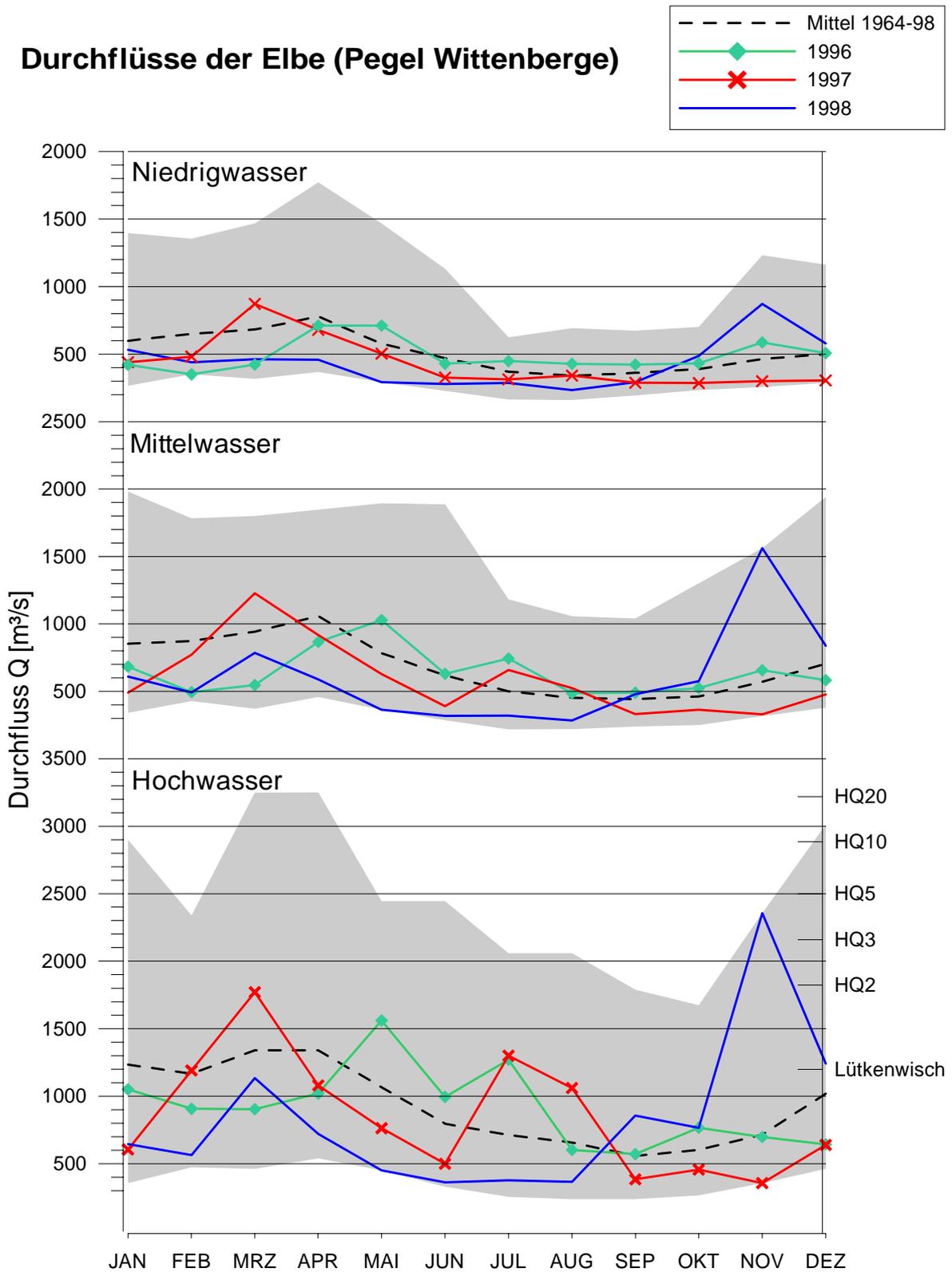


Abbildung 44: Monatsstatistik der Elbe (Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde; Überarbeitung (Stand März 1999): Universität Karlsruhe (TH), Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Abt. Hydrologie)

## 7.3 Implementierung in das Modell

Nach der vorangegangenen Modellerstellung, Kalibrierung und Validierung steht nun ein Grundwassermodell zur Verfügung, mit dem sich unterschiedliche wasserbauliche Eingriffe im Untersuchungsgebiet in Form von Szenarien nachbilden lassen. Für derartige Prognoserechnungen werden die neue Deichlinie, die Flutrinnen usw. eingebaut und die Auswirkung von Überflutungsereignissen auf das Grundwasserregime untersucht. Allerdings erfordern die veränderten hydraulischen Verhältnisse eine Anpassung der Randbedingungen (z. B. gedämpften Hochwasserspitzen als Folge der zusätzlichen Überflutungsfläche usw.)

In diesem Kapitel werden die Anpassungen in der Modellstruktur sowie die Verlängerung der Zeitreihen für einen 35-jährigen Simulationszeitraum beschrieben.

### 7.3.1 Modellstruktur

#### **Diskretisierung**

Für die Modellierung der Deichrückverlegung wird ein neues Finite-Elemente-Netz erforderlich, welches die Strukturen von Deich und Flutrinnen berücksichtigt. Bei Überflutungen ermöglichen die Flutrinnen aufgrund ihres hydraulischen Anschlusses einen erheblichen Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser. In der Nähe der Rinnen ist hierdurch eine beträchtliche Grundwasserdynamik zu erwarten. In diesen Bereichen hoher Grundwasserdynamik wurde eine weitere Verdichtung des Netzes vorgenommen (Abbildung 45), so dass die neue Diskretisierung 3348 Knoten beinhaltet.

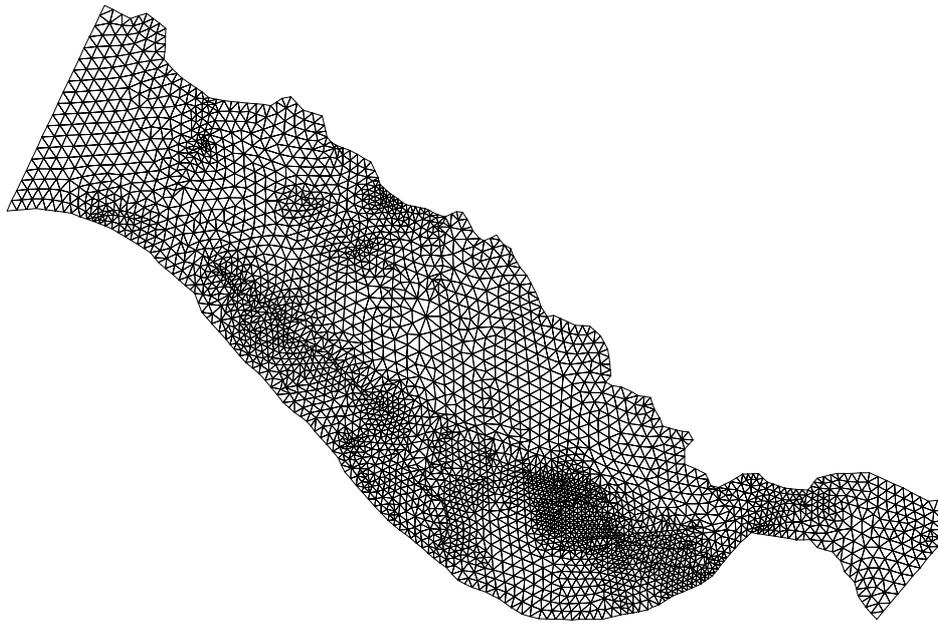


Abbildung 45: Modellnetz für das Szenario der mittleren Deichvariante

### **Flutrinnen**

Das Baumaterial für den neue Deich soll teilweise aus dem Rückdeichungsgebiet entnommen werden, wobei Flutrinnen entstehen sollen. Diese durchbrechen die lehmige Deckschicht und ermöglichen es damit, dass bei einer Überflutung Wasser in den Aquifer infiltriert. Der hydraulische Anschluss, der im Modell mit dem Leakage-Faktor beschrieben wird, wird sich vermutlich mit der Zeit ändern, da sich feine Sedimente in den Flutrinnen ablagern. Erstmalige Flutrinnen weisen dementsprechend einen größeren Leakagekoeffizienten auf. Wie weit diese abnehmen werden ist unklar, dieser Parameter ist daher mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Im Rahmen einer Vorstudie wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Leakage Parameter in den Flutrinnen auf das Grundwasserregime der Aue untersucht und letztendlich ein Bereich zwischen  $10E-5$  und  $10E-6$  [1/s] für diesen Koeffizienten als sinnvoll abgeleitet (Rieth 1999). Ein kleinerer Wert würde den hydraulischen Anschluss erheblich unterschätzen. Ein größerer Leakagebeiwert hingegen bewirkt infolge des schnellen Ausgleichs kaum noch Veränderungen auf das Grundwasserregime. Für die Flutrinnen wurde ein Leakagebeiwert von  $10E-5$  [1/s] gewählt, sie haben damit den gleichen Leakagebeiwert wie das Pfahlbrack.

### **Grabensystem**

In den Szenarien der Deichrückverlegung werden durch die Lage der neuen Deichtrassen die Grabensysteme 2, 3 und 4 (vgl. Abbildung 13) fast komplett, der Graben 1 teilweise vom Vorfluter Löcknitz abgeschnitten. Diese stillgelegten Gräben werden nach der Deichrückverlegung bei Überflutung ebenfalls zur Interaktion zwischen den Wasserkörpern (In- und Exfiltration) beitragen. Ähnlich wie bei den Flutrinnen wird sich der hydraulische Anschluss infolge des Sedimenteintrages (Kolmation) ver-

ändern. Für die Prognose werden die Gräben mit den ursprünglichen identifizierten Leakagefaktoren modelliert. Die Vernachlässigung der Abnahme des hydraulischen Austausches stellt ein Szenario dar, das auf der sicheren Seite liegt.

Es wird davon ausgegangen, dass der binnendeichs gelegenen Teil des Grabensystems weiter zur Be- und Entwässerung verwendet wird. Eine Erweiterung des Grabensystems, die nach der Rückdeichung nötig werden könnte (Entlastungsgraben für den neuen Deich), wird vorerst nicht in die Prognose einbezogen.

### **Das neue Vordeichland**

Durch die Deichrückverlegung wird das Gebiet bis zum neuen Deich überflutet. Wenn dieses Gebiet überschwemmt wird, infiltriert Wasser nicht nur über die Flutrinnen und die Reste der Gräben sondern auch durch die Deckschicht. In dieser erlauben beispielsweise Störungen, aus denen vor der Rückdeichung Qualmwasser austreten konnte, beim Vorliegen entsprechender hydraulischer Gradienten eine Infiltration. In Kapitel 5.5.2 wurde dazu ein Ansatz zur räumlichen Verteilung entwickelt, in dem der Leakagekoeffizient in Abhängigkeit der vorhandenen Deckschichtmächtigkeit gewählt wird. Dieser Ansatz wird mit den gleichen Koeffizienten für das Überflutungsszenario beibehalten.

### **7.3.2 Randbedingungen**

Die Randbedingungen des Grundwassermodells wurden in Abschnitt 5.5 dargestellt. In diesem Abschnitt wird auf Festlegungen und Modifikationen der Randbedingungen sowie auf erforderlich gewordene Verlängerung von Zeitreihen ausführlich eingegangen.

### **Überflutung des neuen Vordeichslandes**

Die Auswirkungen einer Rückdeichung auf den Wasserstand der Elbe und die Überflutungsdynamik des neuen Vordeichslandes wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe untersucht. Dafür wurden zeitlich veränderliche (instationäre) und zeitlich konstante (stationäre) numerische Modelle eingesetzt. Stationär wurden Hochwasser einer Jährlichkeit von 1-2, 3-5 und 20-25 Jahren berechnet. Um ein besseres Bild der Dynamik zu erzielen, wurde zusätzlich ein Überflutungsereignis (maximaler Abfluss 1980 m<sup>3</sup>/s) instationär berechnet. Nach diesen Berechnungen erfolgt die Überflutung im Vordeichsland folgendermaßen:

Bei einem Durchfluss von 640 m<sup>3</sup>/s kommt es zum Einströmen in das Vorland durch Schlitz 8. Die Füllung des Vorlands erfolgt zunächst nur innerhalb der angrenzenden künstlich angelegten Flutmulden. Bei Abflüssen ab 820 m<sup>3</sup>/s beginnt sich die Überflutung auch außerhalb der Flutmulden auszu-

breiten. Bis zu einem Abfluss von  $1130 \text{ m}^3/\text{s}$  erfolgt die Füllung des Rückdeichungsbereichs ausschließlich durch die Schlitze 8 und 9. Die am höchsten gelegenen Lagen des Rückdeichungsbereichs (mit Ausnahme des nördlichen Teils des Fährdamms) werden ab  $1680 \text{ m}^3/\text{s}$  überströmt (persönliche Mitteilung Bleyel, BAW Karlsruhe, 1998). Die hydraulische Trennung durch Reste des alten Deiches bewirken einen Sprung im Wasserspiegel zwischen dem Elbeschlauch und dem Vordeichsland. Der Wasserstand im Fluss ist hierbei merklich höher als im Vordeichsland. Erst wenn der zum Teil abgetragene Altdeich überströmt wird, gleichen sich die Wasserstände weitgehend an.

Die instationären Berechnungen der Flutung und Entleerung des Vordeichslandes ergaben nach Angaben der BAW, Karlsruhe lediglich geringfügige Abweichungen in der Wasserstands-Abfluss-Beziehung zwischen Füllung und Entleerung des neuen Deichvorlandes. In Abbildung 46 wird dies für eine Stelle im neuen Deichvorland exemplarisch dargestellt. Links ist der simulierte Wasserstandsverlauf während einer Überflutung über der Zeit aufgetragen. Wird daraus eine Schlüsselkurve errechnet, bei dem der Wasserstand im Vordeichland über den zeitgleichen Abfluss in der Elbe aufgetragen wird (Abbildung 46 rechts), wird ersichtlich, daß auf eine Berücksichtigung einer Füllungs-Entleerungshysterese verzichtet werden kann. Durch die Erstellung solcher Schlüsselkurven im neuen Deichvorland ist es möglich, aus den langjährigen Abflüssen der Elbe Ganglinien einer Überflutung für beliebige Stellen des Vordeichland zu berechnen.

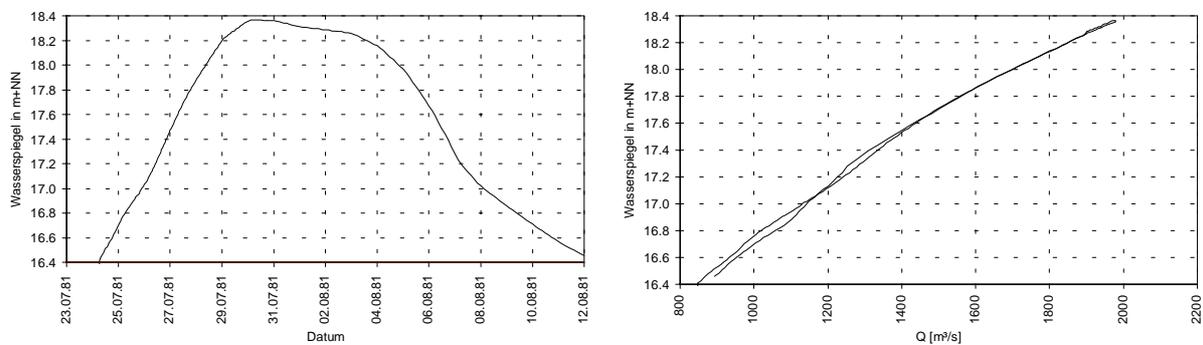


Abbildung 46: Ergebnisse der instationären Berechnung der BAW, Karlsruhe am Beispiel der Überflutung am Teststandort „Drei Felder“ (links: Überflutungshöhe aufgetragen über die Zeit; rechts: Überflutungshöhe aufgetragen über den Durchfluss der Elbe)

In Absprache zwischen der Arbeitsgruppe Grundwasser der TU Darmstadt und Frau Bleyel, BAW, Karlsruhe wurden auf diese Weise Ganglinien für drei Transekte im Vordeichsland (rechtwinklig zur Fließrichtung der Elbe bei km: 477,6; 481,1; 482,9) berechnet und zwischen diesen der Wasserspiegel der Überflutung im neuen Vordeichsland linear interpoliert.

Die Überflutungsdynamik im neuen Vordeichslandes ist von großer Relevanz für das Grundwasserregime der Aue. Durch die Untersuchungen der BAW, Karlsruhe, konnte eine dominierende Randbe-

dingung der Überflutung des Deichvorlandes für das numerische Grundwassermodell, hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Auflösung, bereitgestellt werden. Die Annahmen und Unsicherheiten dieser Überflutungsprognosen werden im Abschlussbericht der BAW, Karlsruhe ausführlich beschrieben und liegen im Dezimeterbereich. Diese pflanzen sich in der Grundwasserprognose grundsätzlich fort. Bei dieser Übertragung der Überflutungsergebnisse aus den hydrodynamischen Berechnungen in das Grundwassermodell wird somit eine weitere Fehlerquelle in Kauf genommen, diese ist jedoch im Verhältnis zu den Unsicherheiten bei der Festlegung der Parameter des hydraulischen Anschlusses sehr gering.

## **Elbe**

Der Pegel Lenzen existiert erst seit 1987. Aufgrund der geringen Distanz zwischen den beiden Pegeln Wittenberge und Lenzen, und unter Berücksichtigung der geringen Zuflüsse in diesem Bereich, kann die Abflussstatistik des Pegels Wittenberge als repräsentativ für den Pegel Lenzen angesehen werden (persönliche Mitteilung: Büchele, Institut für Wasserbau Universität Karlsruhe, 1999). Diese Abflussganglinie ist für den gesamten Zeitraum vorhanden und wurde vom Institut für Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, überarbeitet (Bearbeitungsstand März 1999).

Die Wasserstände in der Elbe werden weiterhin an sechs Stützstellen interpoliert (vgl. Kapitel 5.5.2). Die Auswirkungen auf den Wasserstand in der Elbe infolge Rückdeichung (Füllung und Fließquerschnittsänderung) werden durch einen entsprechenden zweiten Satz von Wasserstands-Abflussbeziehungen, der aus den Berechnungen der BAW, Karlsruhe erstellt wurde berücksichtigt.

Weitere Ungenauigkeiten entstehen grundsätzlich auch bei der Extrapolation der Zeitreihen am Pegel Lenzen auf Grundlage der gemessenen Abflüsse bei Wittenberge. Um diese abzuschätzen, wurde in Abbildung 47 der gesamte Zeitraum, für den am Pegel Lenzen Messungen vorliegen, ausgewertet und die extrapolierten Wasserstände den gemessenen gegenübergestellt. Auf einer zweiten y-Achse sind die Differenzen der beiden Ganglinien aufgetragen. In dem Vergleich wurde die aktuelle Schlüsselkurve verwendet, die auf den Modellergebnissen der BAW, Karlsruhe beruhen. Abweichungen zwischen gemessenen und generierten Wasserständen gibt es in den Wintern 87, 90, 96 und 97. Infolge von Eisgang kann der Wasserstand der Elbe nicht mehr korrekt gemessen werden. Der Fehler wurde durch den Abgleich mit weiteren Pegelstationen vom Institut für Wasserbau Universität Karlsruhe korrigiert, was die Diskrepanz zwischen den gemessenen und berechneten Werten erklärte. Somit beträgt das Mittel der absoluten Abweichungen lediglich 7 cm. In dieser Differenz kommen Fehler durch die Verwendung der Abflussganglinie von Wittenberge und der generierten Schlüsselkurve von Lenzen sowie Messfehler bei Pegel Lenzen und etwaige Profiländerungen bei Lenzen zum Ausdruck. Dieser Fehler ist im Vergleich zu anderen Unsicherheiten vernachlässigbar.

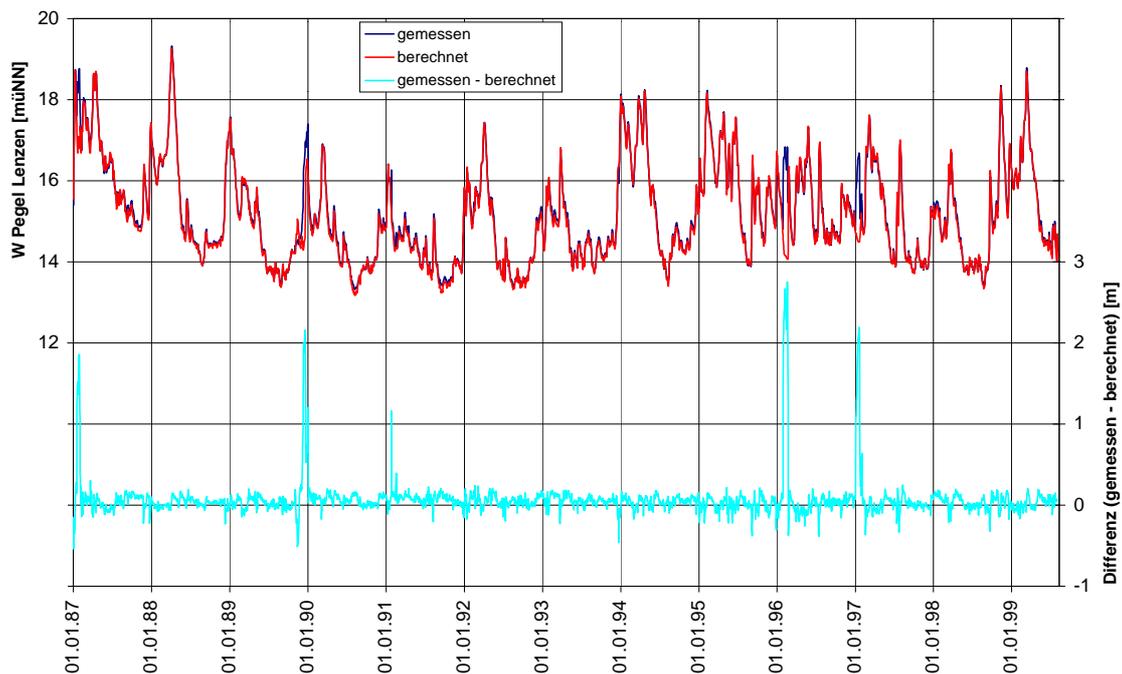


Abbildung 47: Fehler bei der Bestimmung der Elbeganglinie am Pegel Lenzen

### Löcknitz

Die Löcknitz als nördliche Randbedingung wirft aufgrund ihrer hydraulischen Funktion als Vorfluter gegenüber der Elbe andere Fragen auf. Hier ist insbesondere der Mangel an Daten für einen längeren Zeitraum kritisch. Der nächste Pegel der Löcknitz, der über den gesamten Untersuchungszeitraum betrieben wird ist der Pegel Gadow. Dieser liegt weit oberhalb des Untersuchungsgebietes und hat dementsprechend ein kleineres Einzugsgebiet. Untersuchungen über Veränderungen in den Einzugsgebieten gibt es nicht. Die Wasserstände für Pegel Wustrow und Pegel Lenzen wurden ausgehend vom Pegel Gadow korreliert und ergänzt. Die Korrelation zwischen den Abflüssen am Pegeln Gadow und Wustrow ist allerdings relativ gering ( $r^2=0.903$ ), was jedoch in Hinblick auf die hydraulische Dominanz der Elbe und den geringen Wasserstandsschwankungen der Löcknitz vertretbar erscheint. Bei der Szenarienberechnung wird von einer ähnlichen Steuerung der Wehre ausgegangen.

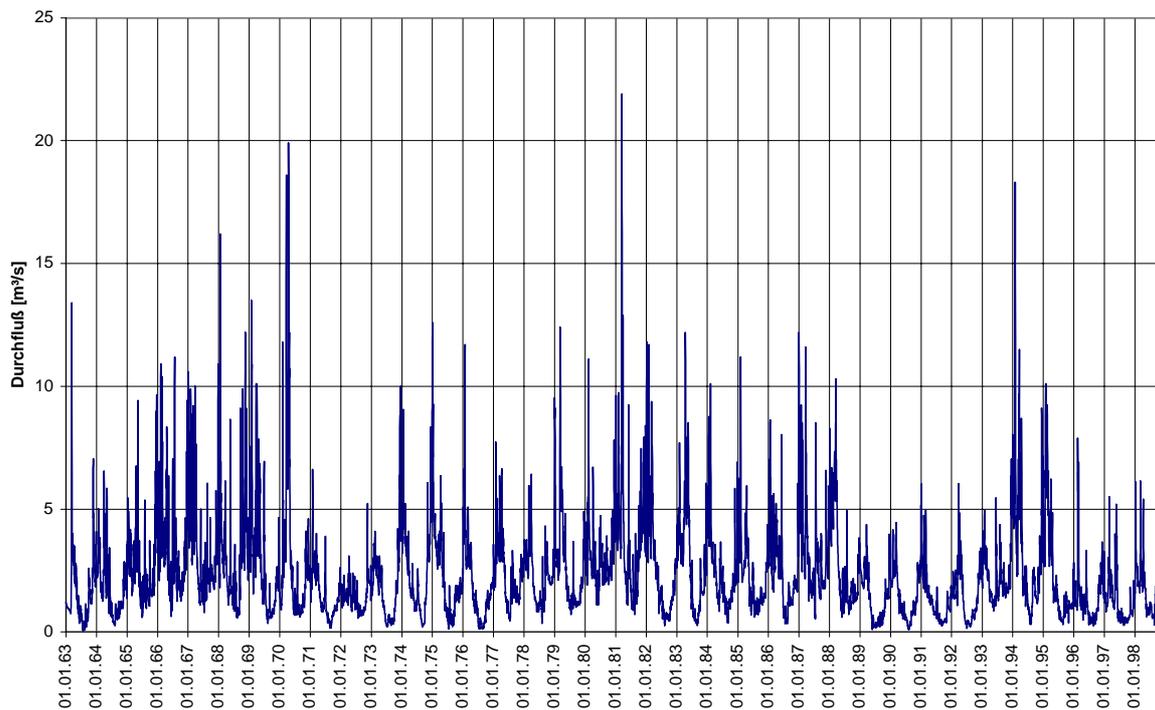


Abbildung 48: Langjährige Abflüsse am Pegel Gadow

### Grabensystem

Die Reste des Grabensystems im rückgedeichten Gebiet werden ihre kulturtechnische Funktion verlieren. Bei einer Überflutung liefern sie einen Beitrag zur Infiltration und sie werden mit den gleichen Randbedingungen belastet wie das übrige Vordeichsland. Das noch intakte Grabensystem binnendeichs wird auch nach einer Rückdeichung seine kulturtechnische Bedeutung beibehalten. Die Annahmen zur Abschätzung der Wasserstände werden beibehalten. Eine eventuelle erforderliche Erweiterung des Grabensystems im Deichhinterland wird nicht berücksichtigt.

### Grundwasserneubildung durch Niederschlag

Bei der Abbildung der Grundwasserneubildung nach Rückdeichung sind zwei gegenläufige Effekte zu beachten. Zum einen wird die Grundwasserneubildung im neuen Vordeichsland erhöht, da Oberflächenabfluss infolge Starkniederschläge nicht mehr über das Grabensystem abgeführt wird und somit ein größerer Anteil versickert. Auf der anderen Seite wird ein Niederschlag während eines Überflutungsereignisses nicht wirksam, da die Veränderung des Wasserstandes im überfluteten Vorland kaum merklich ist. Da beide Effekte kaum quantifizierbar sind und die Grundwasserneubildung ohnehin eine untergeordnete Rolle im Untersuchungsgebiet darstellt, wird angenommen, dass die Deichrückverlegung keinen spürbaren Effekt auf die Grundwasserneubildung hat. Als Randbedingungen werden dementsprechend in beiden Varianten die gleichen räumliche Muster der Grundwasserneubildung

---

nach Ansatz 1 Kapitel 5.5.3.3 herangezogen (s. Abbildung 22). Dieser Ansatz ist für die Langzeitsimulation besser geeignet, da Niederschlagsmessungen vom DWD erst ab den 1.12.94 aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 4.3) wurden.

## 7.4 Ergebnisse der Szenarien

Untersuchungen der BAW, Karlsruhe haben gezeigt, dass es bei einer Rückdeichung zu häufigen Überflutungen in der auszudeichenden Fläche kommen wird. Bereits bei einem Abfluss in der Elbe von 640 m<sup>3</sup>/s strömt Wasser in die westlichen Flutrinnen. In den letzten 35 Jahren wurde dieser Abfluss während der Vegetationszeit (April - September) durchschnittlich an 63 von den insgesamt 183 Tagen (39%) überschritten, so dass die westlichen Flutrinnen häufig gefüllt werden, was den mittleren Grundwasserstand in der Umgebung dieser Rinnen anhebt. Das neu geschaffene Überschwemmungsgebiet wird mit Sicherheit auch die Grundwasserdynamik hinter der neuen Deichlinie nachhaltig beeinflussen.

Für die Abschätzung der Auswirkungen einer Deichrückverlegung auf das Grundwasserregime wird für einen ca. 35-jährigen Zeitraum die Grundwasserdynamik einmal im aktuellen Zustand (Variante 1) und einmal im Zustand einer Deichrückverlegung (Variante 2) numerisch modelliert. Die Simulationsergebnisse werden einer statistischen Auswertung unterzogen, um die zum Teil komplexen räumlichen und zeitlichen Muster in einem Wahrscheinlichkeits-Kontext interpretieren zu können. Hierbei wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern alternativen Parametern nachgegangen, die eine höhere Aussagekraft in Hinblick auf biotische Untersuchungen erbringen. Der Zielgedanke hierbei war es, die umfangreiche Datenbasis, die innerhalb der biotischen und abiotischen Erhebungen geschaffen worden ist, durch eben diese Parameter zu verknüpfen, um die ökosystemare Zusammenhänge quantitativ bewerten zu können.

Die Ergebnisse dieser umfangreichen Berechnungen (35-jährige Zeitreihen der Grundwasserstände für jeden Netzknoten) sowie die statistische Auswertung befinden sich auf beiliegendem Datenträger. Die Auswirkungen einer Deichrückverlegung auf die Grundwasserdynamik werden anhand einiger ausgewählter Orte mit Ganglinien und Dauerlinien ausführlich dargelegt. Um den Flächenbezug darzustellen, werden relevante Zustandsgrößen, die auf Ergebnissen der statistischen Auswertung basieren, in ihrer räumlichen Verteilung in Form von Karten generiert. Bei diesen Ausführungen werden die jeweils angewendeten statistischen Ansätze erläutert.

---

### 7.4.1 Lokale Betrachtung der Grundwasserdynamik

Die Grundwasserdynamik, die zeitliche Änderung der Grundwasserpotentiale, wurde während der Messphase an verschiedenen Beobachtungsstellen aufgezeichnet. Diese Messstellen sind über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt. Ihre räumliche Verteilung kann deshalb genutzt werden, um die Auswirkungen der Deichrückverlegung auf die Grundwasserdynamik räumlich differenziert aufzuzeigen. Die Dynamik lässt sich durch Gang- und Dauerlinien charakterisieren, die für eine punktuelle Betrachtung besonders geeignet sind. Die hohe Auflösung des Modellnetzes (50-100 m) ermöglicht es, diese Betrachtung auf jede beliebige Stelle im Projektgebiet auszudehnen<sup>2</sup>.

Ganglinien, die Darstellung der Grundwasserpotentiale an einzelnen Punkten über der Zeit, sind besonders anschaulich, Änderungen in der Grundwasserdynamik infolge einer Deichrückverlegung zu illustrieren. In Ganglinien sind ohne Abstraktion alle Informationen der Grundwasserpotentialschwankungen vorhanden. Da Ganglinien eines derart langen Zeitraums (hier 35 Jahre bei Ausgabe des Tagesmittelwertes) unübersichtlich sind, wird hier lediglich der Ausschnitt dargestellt, in welchem die Feldmessungen stattgefunden haben. In dieser Zeit stand das Grundwasser unter Einfluss sowohl extremer Niedrigwasser- als auch ausgeprägter Hochwasserereignisse der Elbe, was eine anschauliche Interpretation zulässt. Eine andere Charakterisierung erlauben die Dauerlinien (ranggeordnete Häufigkeitsverteilung), bei denen die täglichen Grundwasserpotentiale der Größe nach zusammengestellt in einem Diagramm aufgetragen werden. An der Abszisse einer Dauerlinie lässt sich die Anzahl der Tage innerhalb des Betrachtungszeitraumes ablesen, an denen - statistisch gesehen - ein bestimmtes Grundwasserpotential erreicht, unterschritten (Unterschreitungsdauer) oder überschritten (Überschreitungsdauer) wurde (Abbildung 65). So kann an dieser Kennkurve zum Beispiel direkt abgelesen werden, an wie vielen Tagen im Jahr im statistischen Mittel das Grundwasserpotential über der Geländeoberkante eines bestimmten Ortes liegt, um ein Qualmwasserrisiko abzuschätzen.

Aus biotischer Sicht ist ein Auswertungsbezug zur Vegetationszeit (April-September) von großer Relevanz für die Bewertung der Zustandsänderungen. Sie wurden für die biologisch arbeitenden Teilprojekte des Forschungsverbandes erarbeitet und sind im Anhang in digitaler Form gegeben. Die dar-

---

<sup>2</sup> Aus der beigelegten CD lassen sich die Ganglinien seit 1964 für jeden Netzknoten für beide Varianten entnehmen.

---

gestellten Dauerlinien<sup>3</sup> haben als Betrachtungsdauer die Vegetationsperioden von 1964 bis 1998. Auf der Abszisse sind dementsprechend 35\*184 Tageswerte aufgetragen.

In dieser Stelle werden die gemittelten Dauerlinien nicht dargestellt, obwohl sie ebenfalls für viele ökologische Fragestellungen eine hohe Aussagekraft besitzen. Die gemittelten Dauerlinien stellen ein durchschnittliches Jahr dar. Anhand der Hüllkurve kann die Schwankungsbreite über die 35 Jahre abgelesen werden. Zur Erstellung einer gemittelten Dauerlinie der Vegetationsperioden von 1964 bis 1998 und den dazugehörigen Hüllkurven wird folgendes Verfahren angewendet: Für die Vegetationsperiode eines jeden Jahres wird eine Dauerlinie erstellt. Für die 35 Jahre erhält man so 35 Dauerlinien, die anschließend gemittelt werden. Die gemittelte Dauerlinie beginnt mit dem arithmetische Mittel des kleinsten Grundwasserpotentials der 35 Vegetationsperioden und endet mit dem Mittelwert des größten. Bei der Hüllkurve werden dazu nach den oberen und unteren Extremwert gesucht. Der erste Wert der untere Hüllkurve ist dementsprechend das kleinste Grundwasserpotential des jeweils ersten Wertes der 35 Dauerlinien. Mit dem gleichen Verfahren wurden gemittelte Dauerlinien für das Kalenderjahr erzeugt<sup>4</sup>.

Bei den folgenden Ausführungen wird das Projektgebiet in drei Teile gegliedert: Das neue Deichvorland, das Gebiet hinter dem neuen Deich und das Gebiet um Lenzen, welches das westliche Projektgebiet umschreibt.

### **Das neue Deichvorland**

Im neuen Deichvorland befinden sich 5 Grundwassermessstellen in unterschiedlicher Entfernung zur Elbe (Abbildung 6). Am nächsten liegen die Messstellen GW05 und GW06 mit einer Entfernung von etwa 90 bzw. 165 m zur Elbe. Hier wird die Dynamik der Elbe bedingt durch die kurzen Fließwege im Boden nur wenig gedämpft. In Abbildung 49 und Abbildung 50 sind für diese Messstellen die simulierten Potentiale des aktuellen Zustandes (Variante 1) denen des Rückdeichungsszenarios (Variante 2) gegenübergestellt. Die Kreuze markieren die gemessenen Werte im aktuellen Zustand.

---

<sup>3</sup> Neben den dargestellten Dauerlinien sind für weitere Punkte im Untersuchungsgebiet Dauerlinien über alle Vegetationsperioden im Anhang in digitaler Form enthalten. Für die restlichen Stellen im Untersuchungsraum sind die Dauerlinien nach Dauerzahlen ausgewertet worden (siehe folgendes Kapitel).

<sup>4</sup> Es sind gemittelte Dauerlinien (Vegetationsperiode und Kalenderjahr) für beide Varianten und für alle Netzknoten auf dem Datenträger enthalten.

Durch die Rückdeichung werden nur die Maxima (Spitzen) der Grundwasserpotentiale erhöht, ansonsten verlaufen die Ganglinien annähernd deckungsgleich. Im aktuellen Zustand (Variante 1) dient das Grabensystem maßgeblich zur Entspannung des Grundwassers. Bei Hochwasser findet eine Exfiltration über die Gräben und durch die Deckschicht (Qualmwasser) statt. Die hierdurch eintretende Entlastung macht sich in einer Stauchung der Potentialspitzen bemerkbar. Nach einer Deichrückverlegung werden die Gräben vom Entwässerungssystem abgeschnitten und genau wie der Rest des neuen Vordeichslandes überflutet. Eine Exfiltration findet an diesen Stellen nun nicht mehr statt, vielmehr paust sich der Wasserstand im überfluteten Vorland direkt auf das Grundwasserpotential durch.

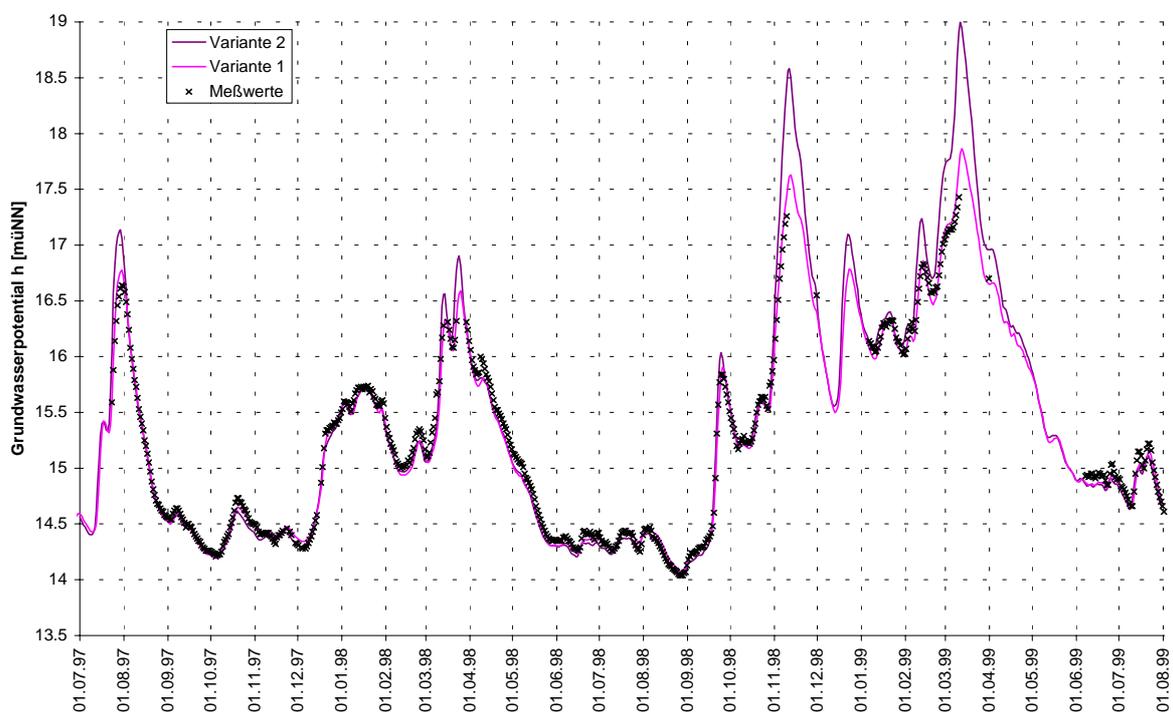


Abbildung 49: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW05

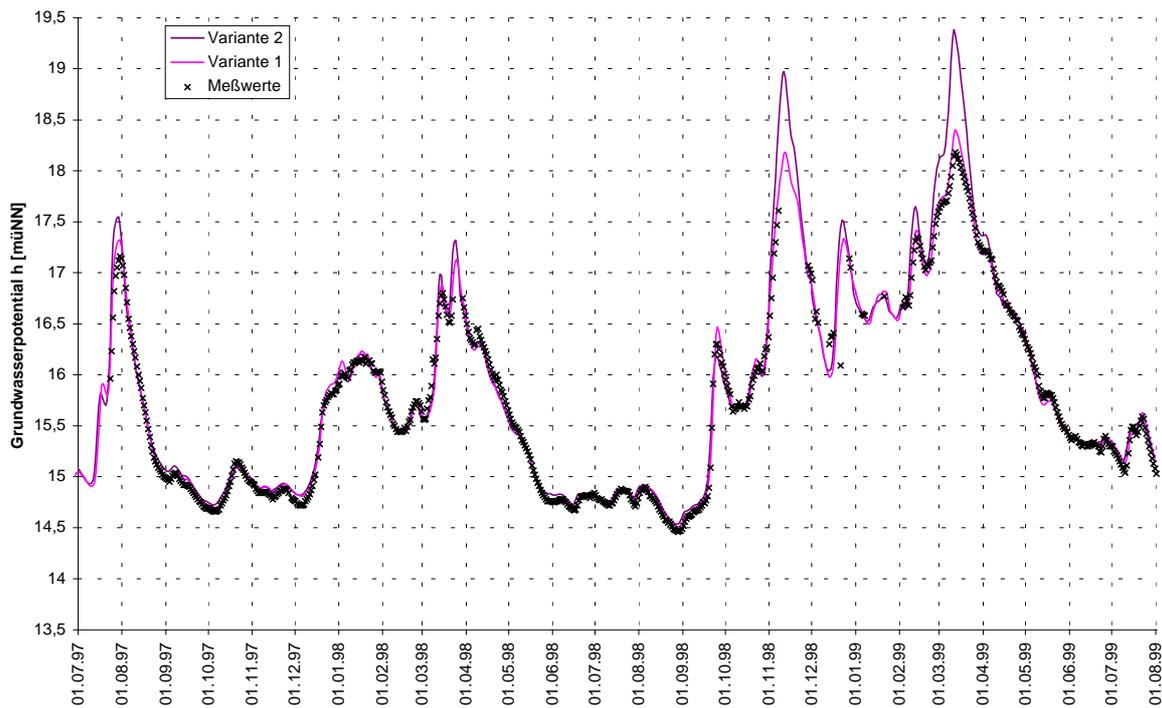


Abbildung 50: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW06

Mit zunehmender Entfernung zur Elbe lässt sich eine Dämpfung der Grundwasserdynamik feststellen. Bezogen auf den Abstand zur Elbe ergibt sich in dem Rückdeichungsgebiet folgende Reihenfolge der Grundwassermessstellen: GW04 (~230 m), GW12 (~540 m) und GW03 (~580 m) (siehe Abbildung 51 bis Abbildung 53). Auch bei diesen Beobachtungsstellen wirkt sich die Deichrückverlegung nur geringfügig auf das Grundwasserregime aus, solange es zu keiner Überflutung des Vordeichsgebietes kommt. Geringfügig kleinere Grundwasserpotentiale während Niedrigwasserphasen können sich als Folge der ausbleibenden Bewässerung einstellen. Eine solche lässt sich z.B. bei der GW03 zwischen Juni und September 1998 beobachten.

Große Änderungen im Grundwasser treten während Hochwassersituationen auf. Insbesondere durch die Flutrinnen entstehen Unterbrechungen in der Auelehmdecke, durch die ein guter hydraulischer Anschluss zum Grundwasser geschaffen wird. Sobald die Rinnen geflutet werden, kann Wasser unmittelbar in den Aquifer infiltrieren und einen steilen Anstieg der Grundwasserpotentiale bewirken. Die Änderungen durch die Rückdeichung sind im hinteren Teil des Rückdeichungsgebietes wesentlich stärker, da im aktuellen Zustand die Grundwasserdynamik durch die Entfernung zur Elbe stark gedämpft ist.

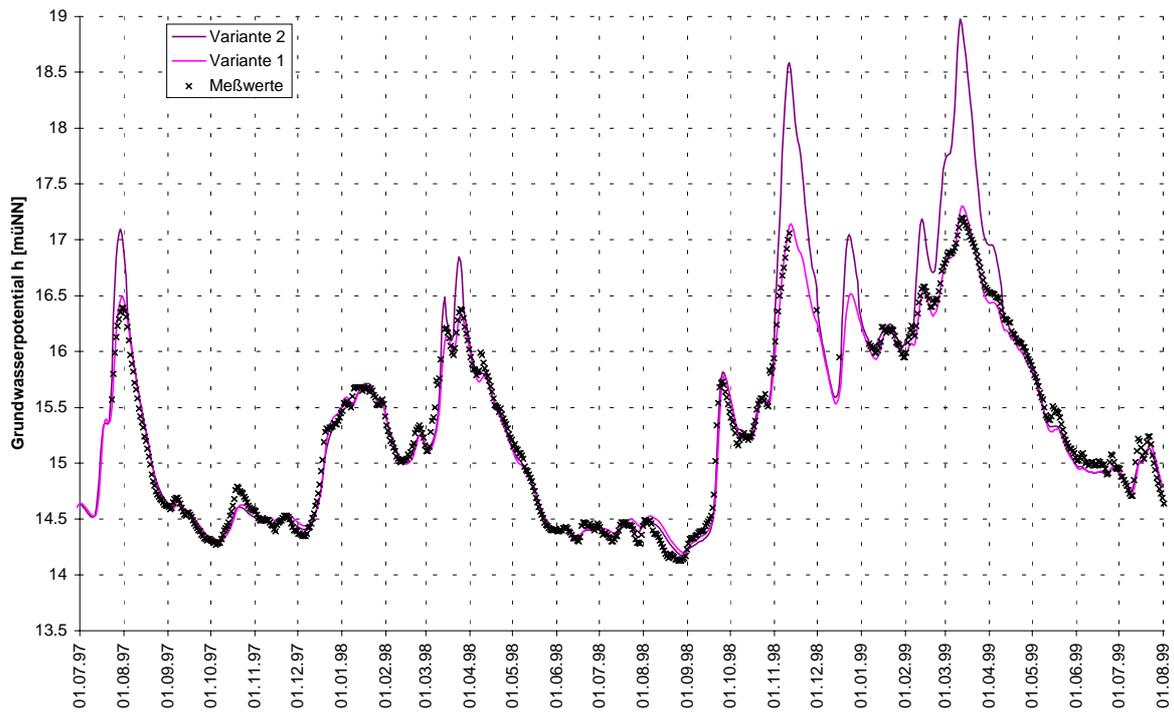


Abbildung 51: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW04

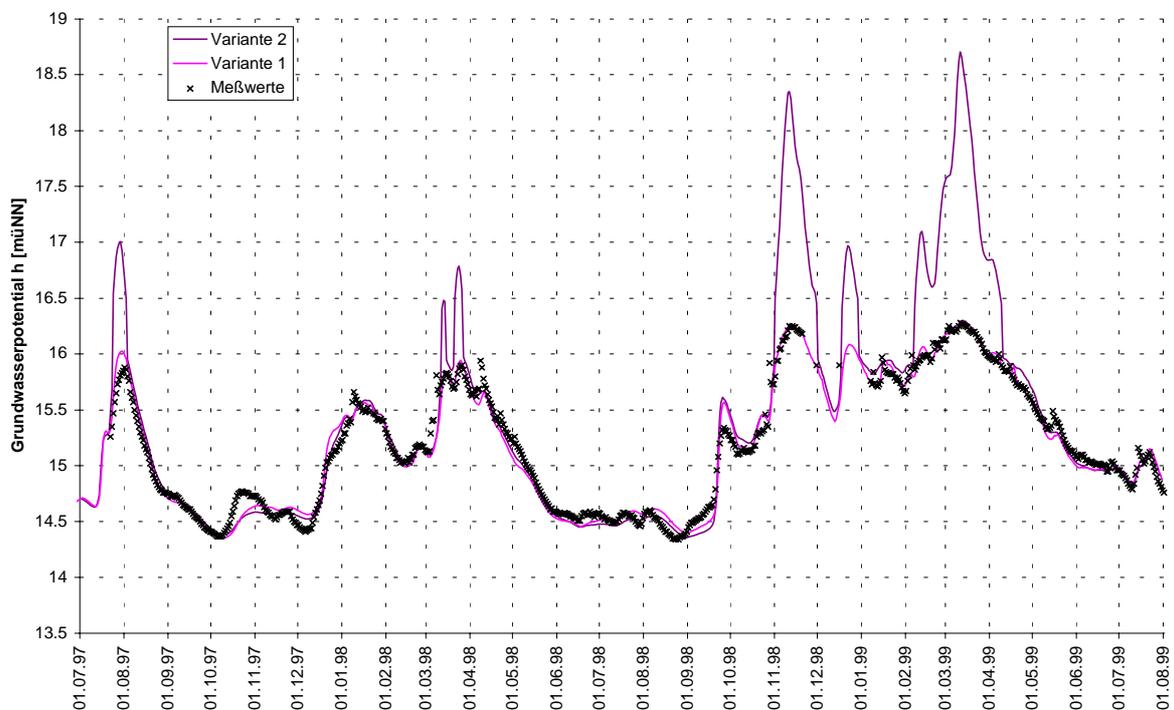


Abbildung 52: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW03

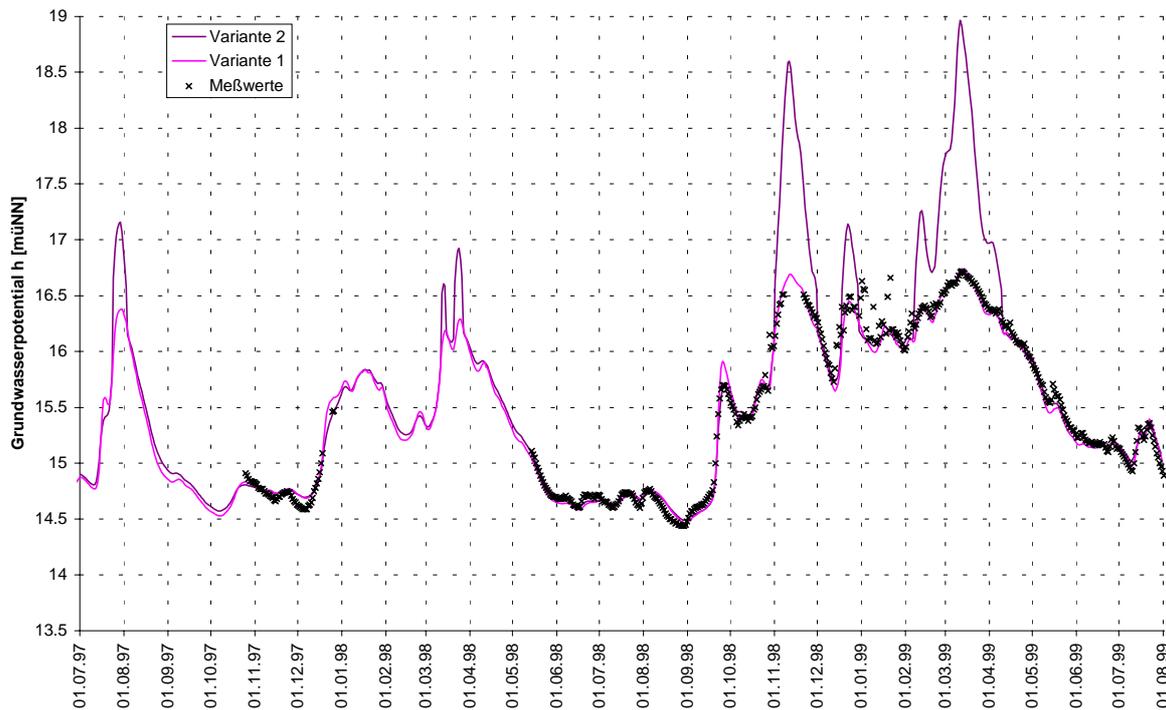


Abbildung 53: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW12

In den Dauerlinien des Vordeichslandes wird durch die Überflutung ein sprunghafter Anstieg der Grundwasserpotentiale bewirkt, der um so ausgeprägter ist, je schneller die Überflutung durch nahe Flutrinnen oder andere Durchlässigkeiten in der Deckschicht auf diesen Punkt einwirken kann. Bei der Messstelle GW03 (Abbildung 54) sieht man diesen deutlich bei 81 % Unterschreitungshäufigkeit, d.h. in 19 % der Zeit während der Vegetationsperiode hatte die Elbe einen Abfluss von mehr als 870 m<sup>3</sup>/s, bei welchem die GW03 überflutet wird.

Bei Niedrigwasser bis zur ersten Quartile (25 % Unterschreitungshäufigkeit) sind die Grundwasserpotentiale im aktuellen Zustand durch die Bewässerung etwas höher. Mit steigendem Wasserstand der Elbe kehrt sich das Verhältnis um. Nach einem Hochwasser sind die Flutrinnen und Bracks gefüllt und der Boden gesättigt, durch die Rückdeichung entfällt die entwässernde und entspannende Wirkung des Grabensystems. Dadurch werden die Grundwasserpotentiale bei Mittelwasser nach einer Deichrückverlegung erhöht. Die Differenzen liegen jedoch unter 20 cm.

Auch die GW05 (Abbildung 55) liegt im Gebiet der Rückdeichung, wird aber weniger von dieser betroffen. Ein Sprung in der Dauerlinie, wie er bei der GW03 vorhanden ist, lässt sich nur schwer erkennen. Durch die unmittelbare Nähe der GW05 zur Elbe wird sie bereits im aktuellen Zustand stark von der Elbe geprägt. Die Rückdeichung verändert an diesem Zustand wenig.

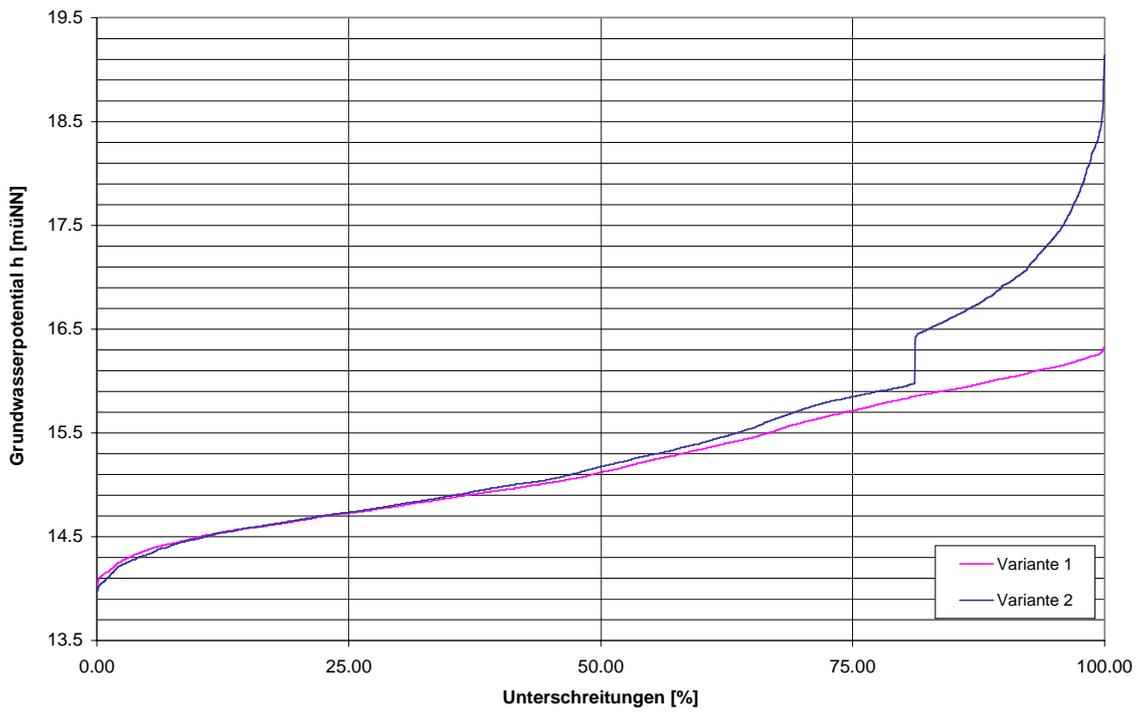


Abbildung 54: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Dauerlinie im Bereich des Pegels GW03 (Vegetationszeit 35 Jahre)

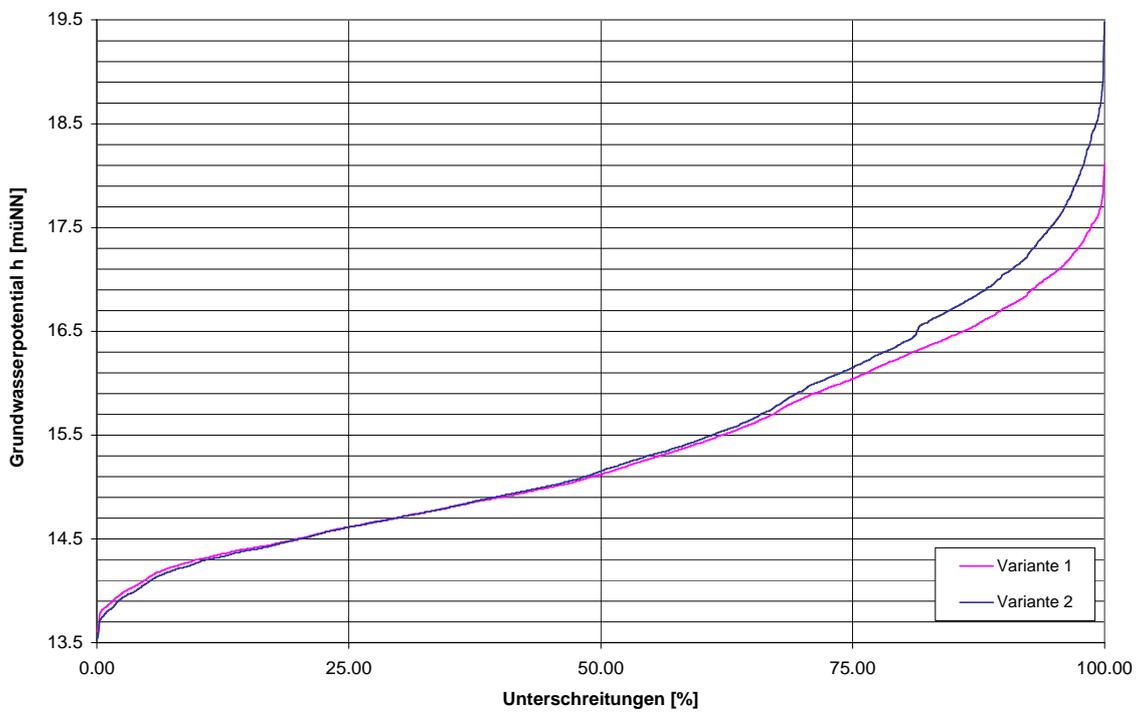


Abbildung 55: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Dauerlinie im Bereich des Pegels GW05 (Vegetationszeit 35 Jahre)

### **Das Gebiet hinter dem neuen Deich**

Die Veränderung des Grundwasserregimes im Gebiet hinter dem neuen Deich, das weiterhin landwirtschaftlich bewirtschaftet werden soll, ist von besonderen Interesse. Eine Änderung des Wasserhaushaltes in diesem Gebiet könnte sich auf die Erträge auswirken (Bodenvernässung, Befahrbarkeit, Qualmwasserandrang usw.).

Die Erhöhung der Grundwassermaxima im Vordeichsland pflanzen sich aufgrund der guten Durchlässigkeit des Untergrundes in das Gebiet hinter dem neuen Deich fort. Dabei wird diese erhöhte Dynamik erst mit zunehmender Entfernung zum Deich gedämpft, wobei hierzu besonders die entspannende Wirkung des Entwässerungssystems beiträgt. Der Effekt der Entwässerungsgräben lässt sich gut an den verschiedenen Grundwassermessstellen feststellen. Bei den Grundwassermessstellen GW10 und GW11 schlagen die Wasserstandsänderungen infolge Überflutungen deutlicher durch als bei GW09 und GW02, die weiter entfernt von der neuen Deichlinie liegen und deren Potentiale durch die Entlastungswirkung der Gräben 3 und 5 verringert werden: Die Messstellen GW10 und GW11 liegen etwa 490 m und 360 m von der neuen Deichlinie entfernt. Für das Hochwasserereignisse im Winterhalbjahr 1998/99, das über einen außergewöhnlich langen Zeitraum andauerte und im März ein Maximum von 2700 m<sup>3</sup>/s (dies entspricht in etwa einem 7-jährigen Hochwasser) erreichte, werden an diesen Messstellen für den Rückdeichungsfall etwa 1 m höhere Grundwasserpotentiale prognostiziert. Bei GW09 und GW02, die 640 m und 830 m von der neuen Deichlinie entfernt sind, werden die Grundwasserpotentiale im gleichen Zeitraum nach der Deichrückverlegung lediglich etwa 20 cm höher ausfallen.

In Abbildung 60 ist eine Dauerlinie der Messstelle GW02 stellvertretend für den zu erwartenden Zustand hinter dem neuen Deich dargestellt. Die ausgeprägte Stufe, die sich in einer Dauerlinie des neuen Vordeichslandes durch die Überflutungen ergibt, wird durch die Entfernung zum neuen Deich und die damit verbundene Verzögerung verwischt.

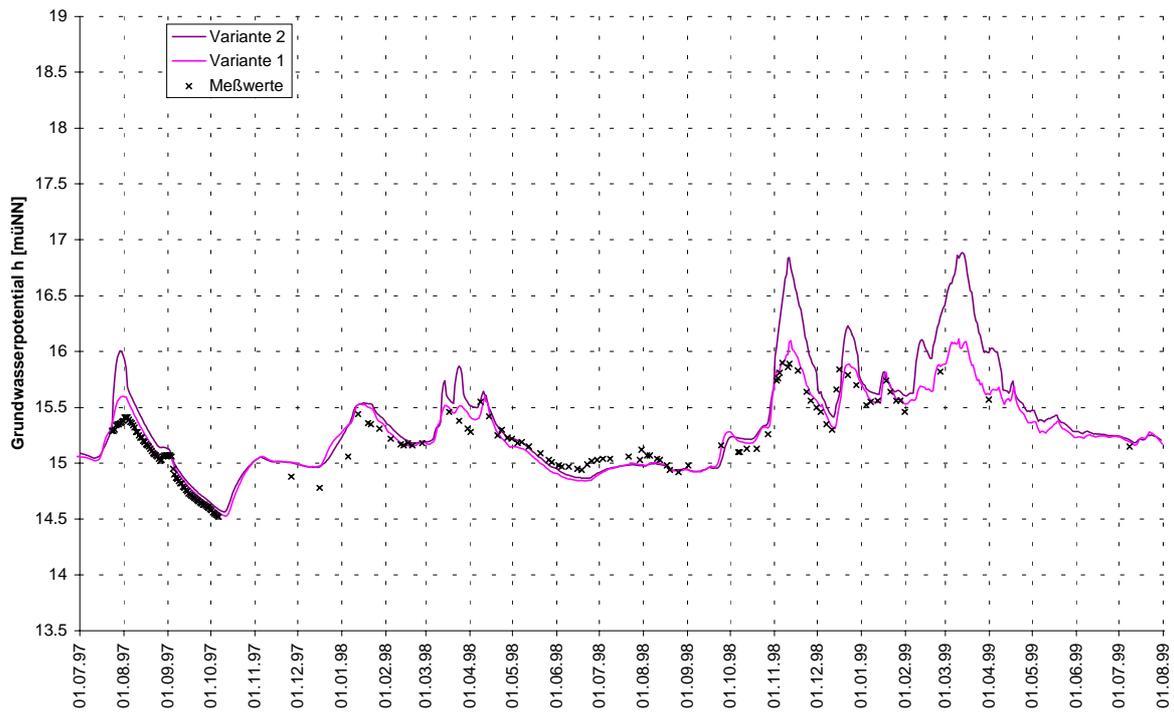


Abbildung 56: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW10

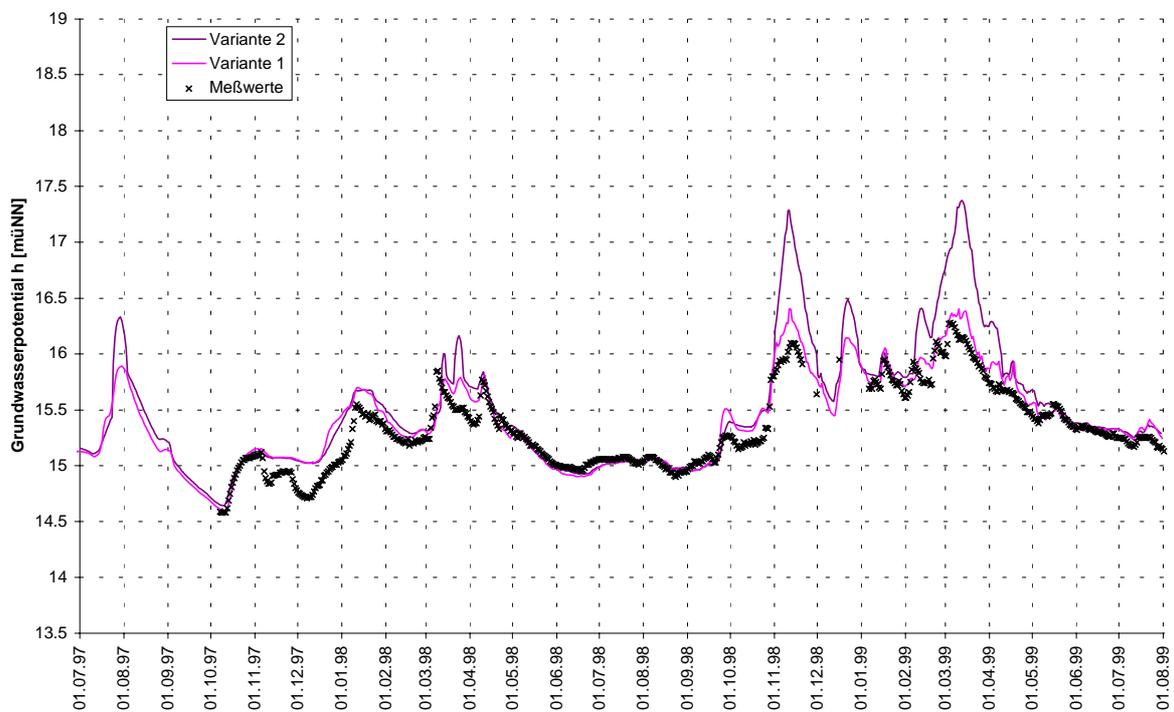


Abbildung 57: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW11

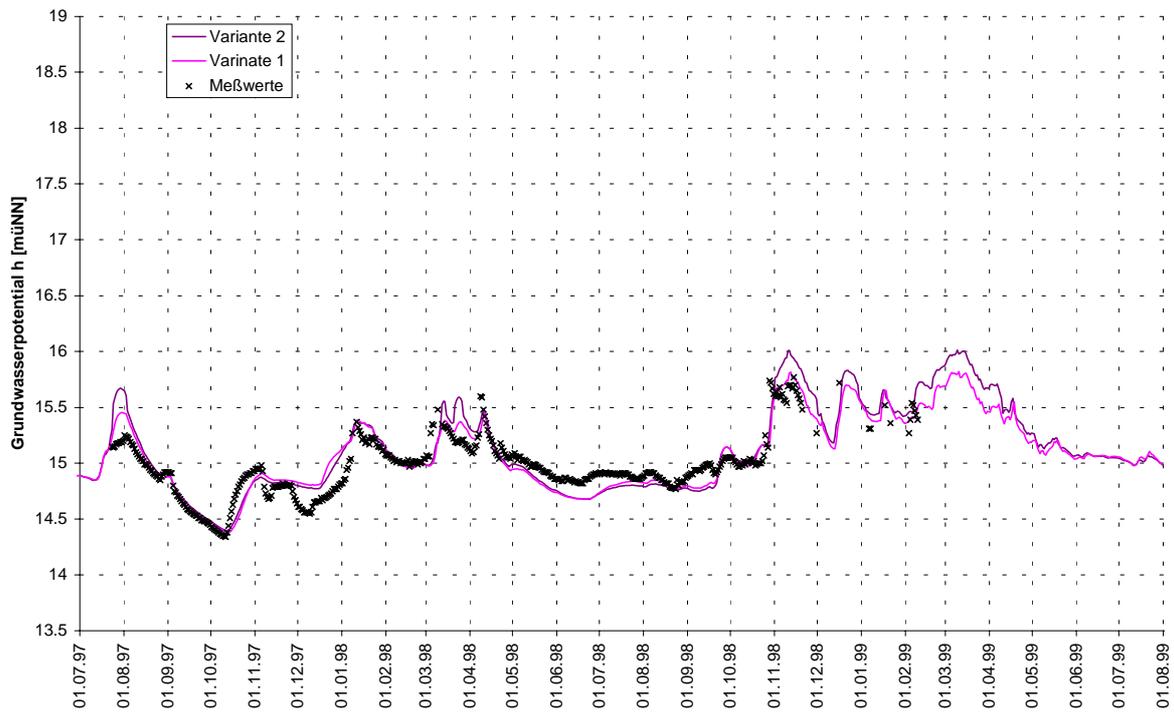


Abbildung 58: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW02

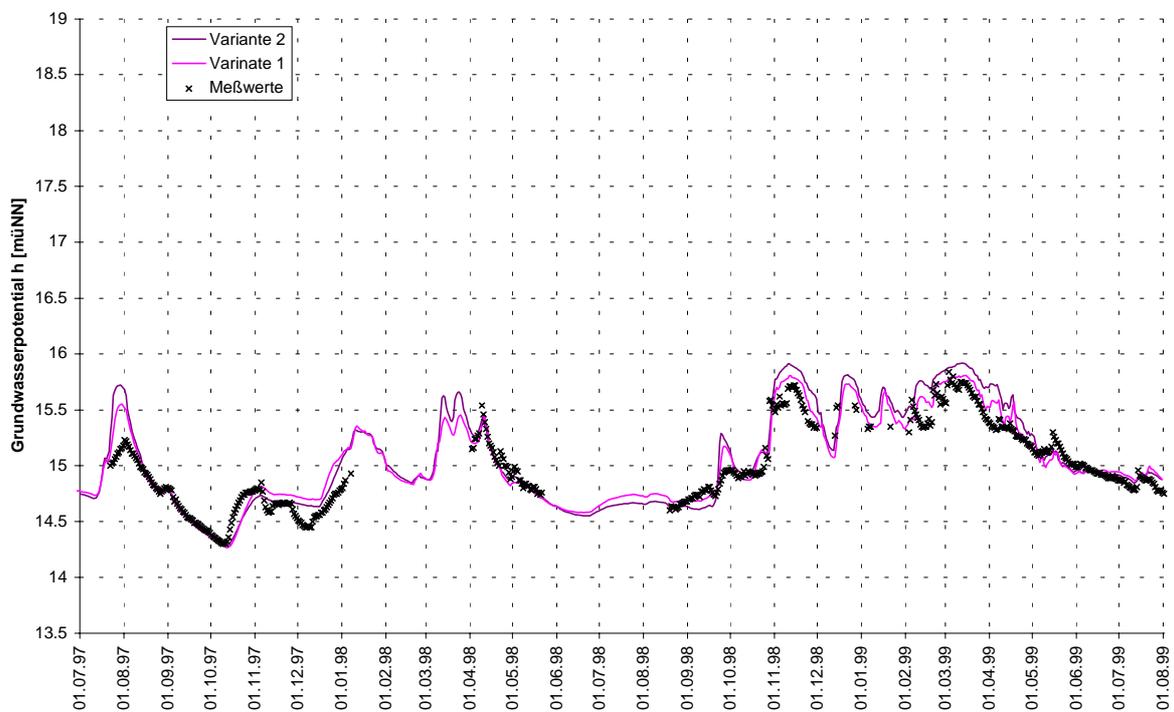


Abbildung 59: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW09

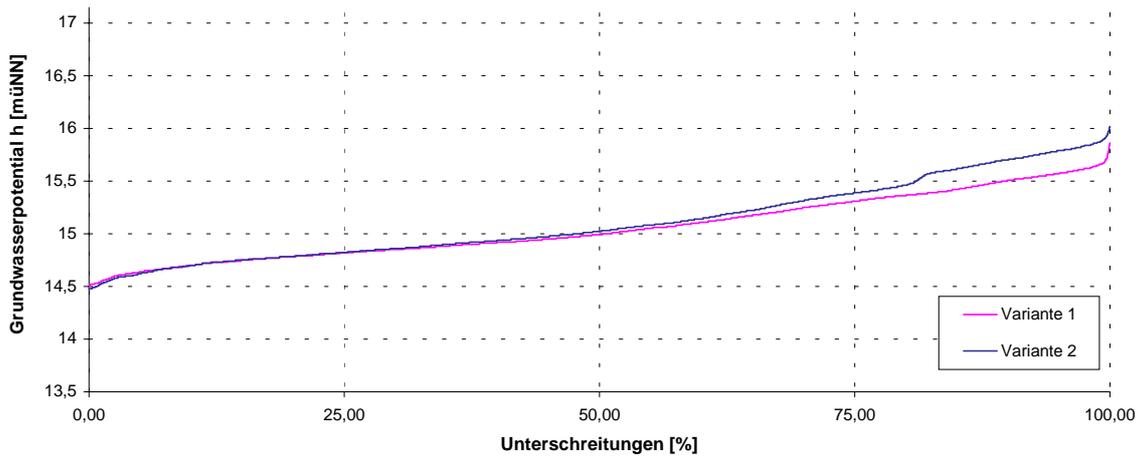


Abbildung 60: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Dauerlinie im Bereich des Pegels GW02 (Vegetationszeit 35 Jahre)

### Das Gebiet um Lenzen

Die drei Grundwassermessstellen GW07, GW08 und GW13 liegen im westlichen Untersuchungsgebiet und spiegeln damit auch das Grundwassergeschehen in der Umgebung der Stadt Lenzen wieder. Die Ganglinien der beiden Varianten sind nahezu identisch. Die Entfernung zur neuen Deichlinie sowie die Vorfluterfunktion von Grabensystem und Löcknitz sind dafür verantwortlich, dass sich in diesem Bereich eine Rückdeichung nur geringfügig auf das Grundwasser auswirkt.

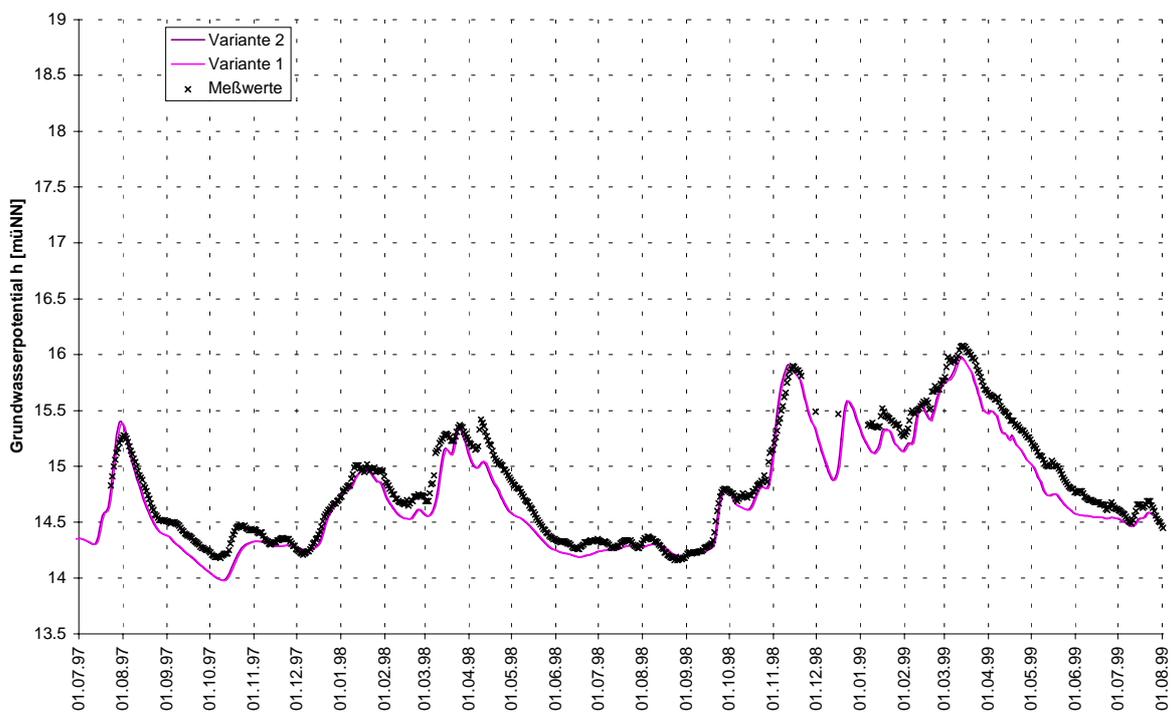


Abbildung 61: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW07

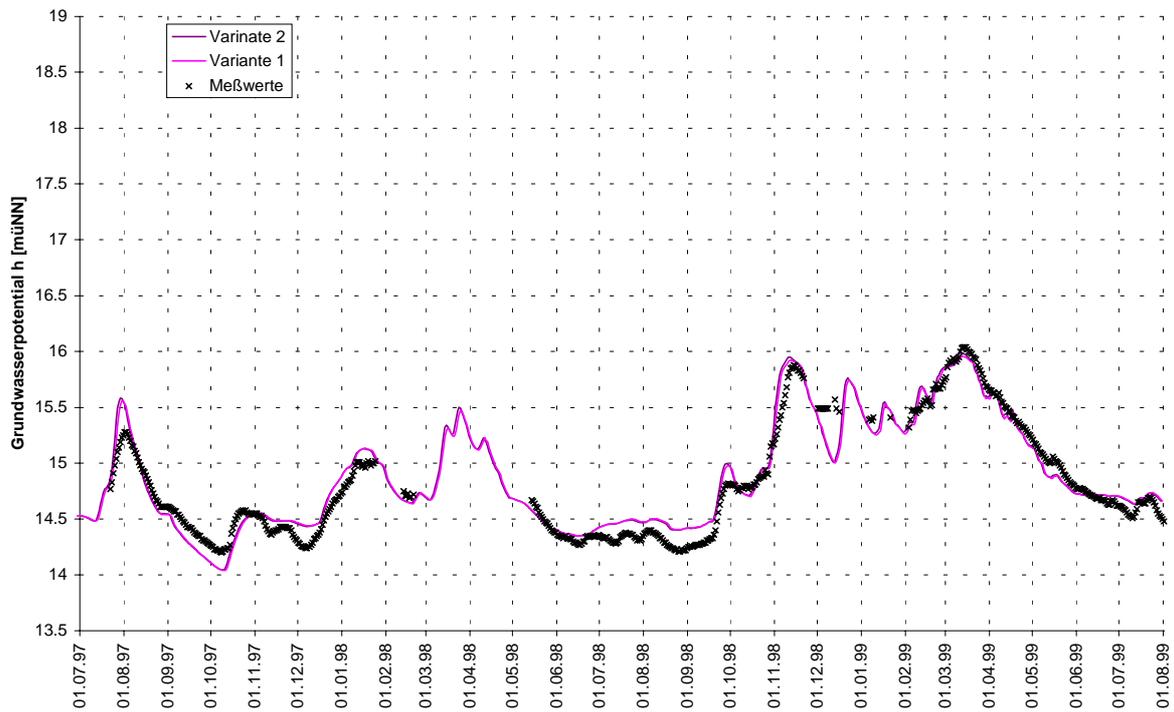


Abbildung 62: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW08

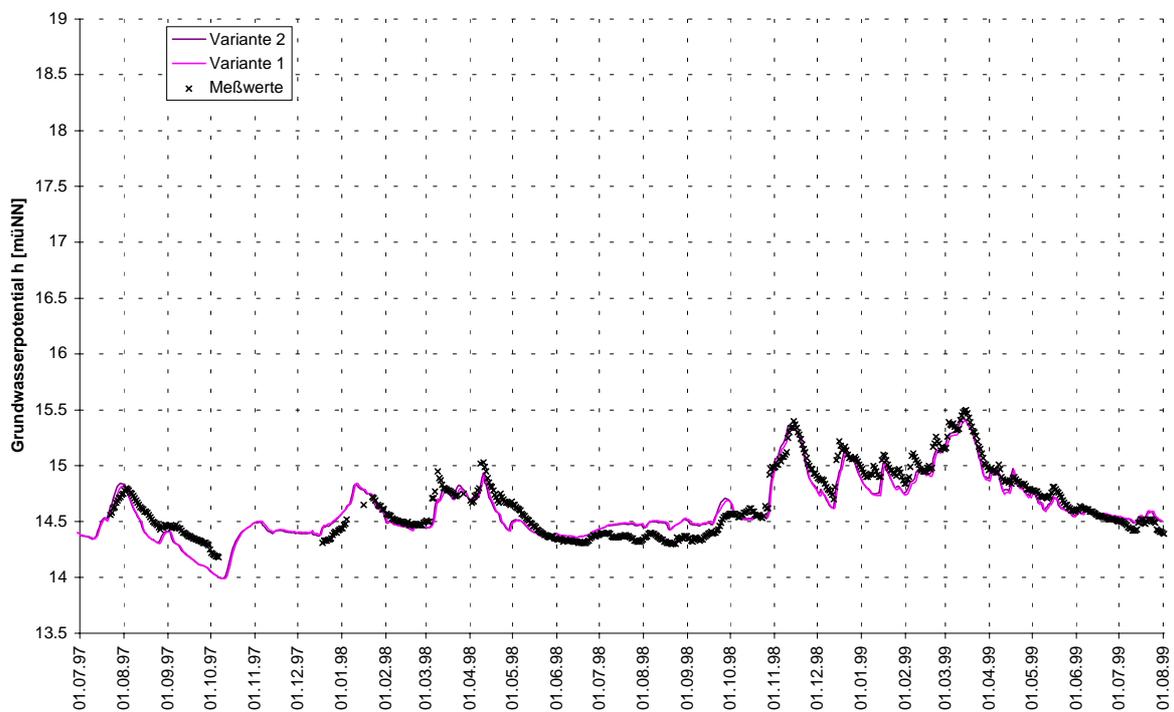


Abbildung 63: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Ganglinie im Bereich des Pegels GW13

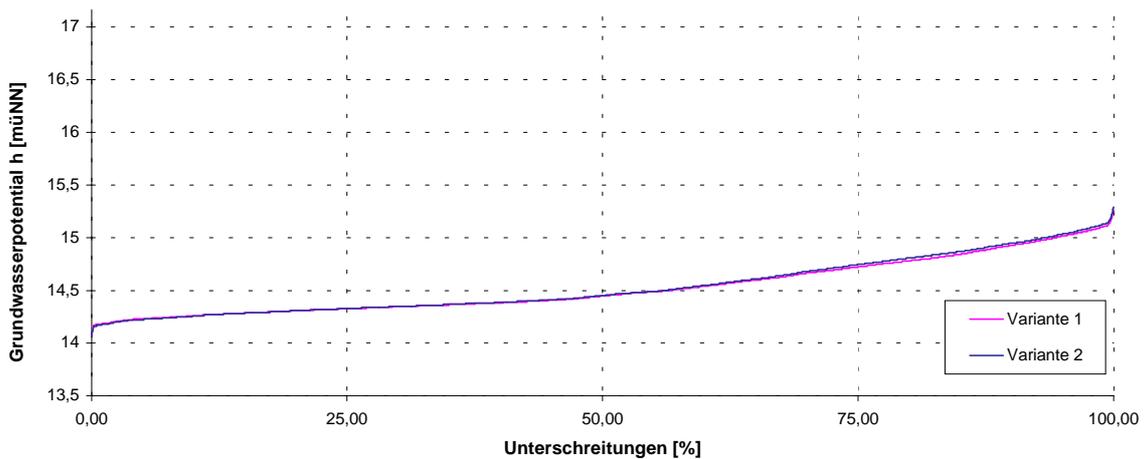


Abbildung 64: Auswirkung einer Deichrückverlegung auf die Dauerlinie im Bereich des Pegels GW13 (Vegetationszeit 35 Jahre)

## 7.4.2 Raumorientierte Betrachtung der Grundwasserdynamik

Sowohl Ganglinien als auch Dauerlinien beschreiben Zustände an nur einem Ort. Um einen Übergang von einer punkt- zu einer flächenorientierten Betrachtung zu ermöglichen, wurde diese Information in ihrem Raumbezug ausgewertet und dargestellt. Nach einer statistischen Auswertung der Zeitreihen an jedem Diskretisierungsknoten können einzelne Parameter zur Beschreibung der räumlichen Verteilung der Grundwasserdynamik (zweidimensionalen Karten) dargestellt werden. Einige dieser Parameter, die in Abstimmung mit den Projektpartnern festgelegt wurden, werden im folgenden verwendet, das Grundwasserregime vor und nach der Deichrückverlegung zu charakterisieren. In den Karten werden zur besseren Orientierung einige markante morphologische Strukturen dargestellt. Das in diesen Darstellungen verwendete lokale Koordinatensystem lässt sich in das Bessel- Koordinatensystem überführen<sup>5</sup> und ist somit auf die verschiedenen Untersuchungen direkt übertragbar.

### 7.4.2.1 Dauerzahlen und Mittelwert

Die Dauerzahlen werden als Abszissenwerte (Wert der Rechtsachse) der Dauerlinie verwendet. Diese geben an, an wie vielen Tagen ein bestimmtes Grundwasserpotential erreicht, über- oder unterschritten wird. In Absprache mit den Projektpartnern wurden Minima, 1.Quartile, 2.Quartile (Median), 3.Quartile und Maxima als charakteristische statistische Größen gewählt, die man direkt aus den Dau-

<sup>5</sup> Rechtswert lokale Koordinate + 4462000 = Rechtswert Bessel-Koordinate

Hochwert lokale Koordinate + 5879000 = Hochwert Bessel-Koordinate

erlinien auswerten kann. Das generelle Vorgehen wird in Abbildung 65 am Beispiel einer Grundwassermessstelle dargestellt. Hier wurde eine Ganglinie für die Vegetationszeit von 01.04.98 bis 30.09.98 ausgewertet. Die 3.Quartile gibt z.B. an, welches Grundwasserpotential an  $\frac{3}{4}$  des Beobachtungszeitraumes erreicht beziehungsweise unterschritten wurde (im Beispiel ca. 15,3 müNN). Jedem Diskretisierungsknoten lässt sich somit ein Wert (im Beispiel oben: die 3.Quartile) zuordnen, so dass eine räumliche Verteilung dargestellt werden kann.

Im Gegensatz zum Median (2.Quartile) kann der Mittelwert (Durchschnitt) als arithmetische Mittel direkt aus der Ganglinie bestimmt werden, indem die Summe der einzelnen Potentiale durch die Anzahl der Beobachtungstage dividiert wird. Da bei Hochwasser zum Teil extrem hohe Grundwasserpotentiale erreicht werden, wirken sich diese Ereignisse stark auf den Mittelwert aus, wodurch dieser meist deutlich über dem Median liegt (Abbildung 65).

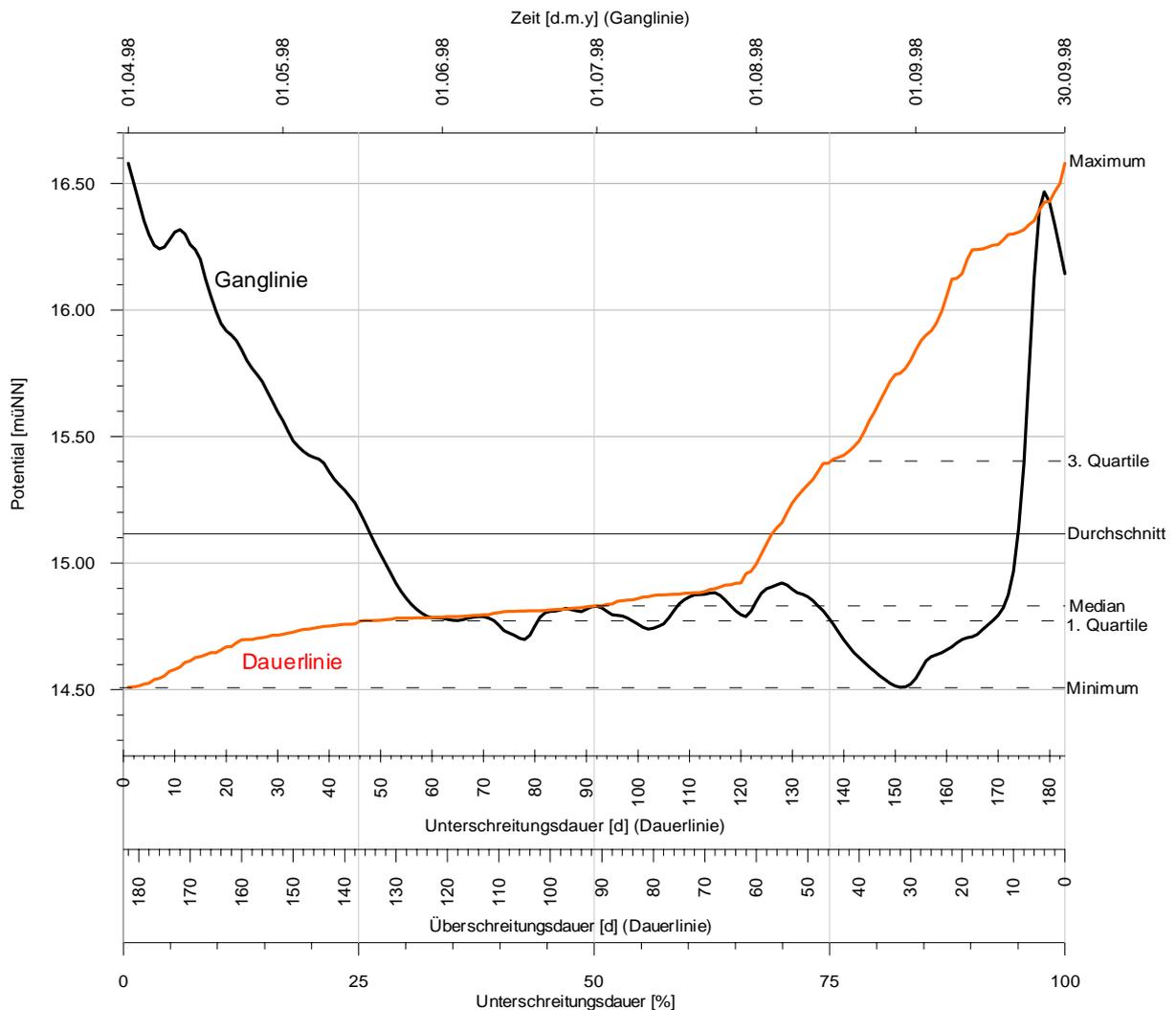


Abbildung 65: Beispiel einer statistischen Auswertung eines Punktes im Untersuchungsgebiet.

Bei den Gang- und Dauerlinien, die im vorhergehenden Abschnitt dargestellt sind, lässt sich erkennen, dass Änderungen vor allem bei Hochwasser in der Elbe zu erwarten sind. Eine Überschwemmung führt dann zu einer raschen Reaktion im Grundwasser, die sich als Sprung in den Dauerlinien zeigt. Von diesen Dauerlinien werden nun zwei charakteristische Stellen herausgegriffen, um diese in ihrer räumlichen Verteilung für das gesamte Projektgebiet darzustellen: Die 3.Quartile und das Maximum. Die Grundwasserpotentiale der 3.Quartile werden bereits an einem Viertel des Betrachtungszeitraumes überschritten und stellen somit ein häufig eintretendes Ereignis dar. An der 3.Quartile lässt sich der Effekt der beginnenden Überflutung auf das Grundwassersystem in einem statistischen Konzept sichtbar machen. Die Maxima umreißen als Extremwerte die Grenzen der Auswirkung der Deichrückverlegung. Bei dieser Auswertung wird eine statistische Kennzahl zur Charakterisierung des Grundwasserregimes in ihrer räumlichen Verteilung dargestellt. Aufgrund der statistischen Betrachtung geht hierbei der zeitliche Bezug verloren, was bei der Interpretation von Grundwassergleichungen stets der Fall ist.

Wesentlich bei der Interpretation dieser räumlichen Darstellungen ist, dass die auf die Quartilen und Maxima bezogenen Potentiale nicht zu einem Zeitpunkt auftreten, sondern aus einer statistischen Auswertung der letzten 35 Jahre hervorgehen. Diese Abbildungen charakterisieren das Grundwasserregime in seiner räumlichen Verteilung, eine Interpretation hinsichtlich Gradienten und Strömungsmuster - eine Standardaufgabe bei Grundwassergleichungen - ist nicht zulässig und würde zu absolut falschen Ergebnissen führen.

### **3. Quartile der Dauerlinie**

In der Abbildung 66 ist die 3.Quartile (Auswertung innerhalb der Vegetationszeit) im aktuellen Zustand (Variante 1), nach der Rückdeichung (Variante 2) und im Vergleich (Differenz von Variante 2 und Variante 1) dargestellt. Auffallend ist insbesondere, dass im Bereich der westlichen Flutrinnen der auf die 3. Quartile bezogene Grundwasserstand 46 cm ausfällt, während im übrigen Gebiet die Differenzen deutlich geringer sind. Dies liegt an der gewählten Deichschlitzung und der durch sie bedingten Überflutungsdynamik, bei der das Vordeichsland entgegen der Fließrichtung der Elbe von Westen überstaut wird. Der westliche Teil des neuen Vordeichsland wird deutlich früher und häufiger überstaut als der Rest. Hier kommt es nach den Berechnungen der BAW, Karlsruhe bereits bei einem Durchfluss von  $640 \text{ m}^3/\text{s}$  zum Einströmen in die angrenzenden, künstlich angelegten Flutmulden, die dann die Grundwasserpotentiale in ihrer Umgebung erhöhen. Dieser Abfluss von  $640 \text{ m}^3/\text{s}$  wurde in den 35 Jahren mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 35 % in der Vegetationszeit erreicht. Dementsprechend häufig werden die westlichen Flutrinnen gefüllt und heben den Grundwasserstand in ihrer Umgebung. Bezogen auf den gesamten Betrachtungszeitraum liegt die Überschreitungswahr-

scheinlichkeit bei 40 %, da die Elbe während der Vegetationsperioden im Vergleich zum gesamten Jahr weniger Wasser führt.

In der dargestellten 3.Quartile der Vegetationszeit (Unterschreitungswahrscheinlichkeit = 75 %) hat die Elbe eine Abfluss von 760 m<sup>3</sup>/s, bei dem es noch nicht zu einer weiträumigen Überflutung des Vordeichslandes kommt. Im restlichen Deichvorland wirkt sich daher die Rückdeichung auf die 3.Quartile der Überschreitungshäufigkeit gemäßigter aus. Trotzdem nehmen vor allem in der Nähe des neuen Deiches die Grundwasserpotentiale der 3. Quartile um über 20 cm zu. Dieser Effekt ist die Folge einer intensivierten Grundwasseranreicherung nach einer Überschwemmung sowie der hydraulischen Vernetzung des vorgesehenen Flutrinnensystems. Insbesondere die längeren Flutrinnen, die sich von der Elbe aus bis in das Rückdeichungsgebiet erschließen, bewirken einen Ausgleich der sonst steil zu erwartenden Grundwassergradienten. Auf der elbnahen Seite exfiltriert Grundwasser in die Flutrinnen, was zunächst den Wasserkörper in der Rinne speist. Auf der elbfernen Seite kann dieses Wasser in den Aquifer wieder infiltrieren. Die Grundwasserpotentiale entlang der Flutrinnen werden - quasi durch einen hydraulischen Kurzschluss entlang der Rinnen - ausgeglichen, was sich in den Differenzen der beiden Varianten (Abbildung 66 unten) als relative Absenkung in der Nähe der Elbe und Erhöhung in den entfernteren Bereichen darstellt. Diese Prozesse sind physikalisch begründet und wurden im Rahmen einer kleinräumigen Vorstudie mit einem 3D-Modell bestätigt.

Die erhöhten Grundwasserpotentiale im Vordeichgebiet wirken sich auch noch weit hinter dem Neu-deich aus. Dieses war bereits bei den Ganglinien der GW02, GW09, GW10 und GW11 (siehe vorhergehenden Abschnitt) erkennbar. Bei der flächigen Darstellung der 3.Quartile werden Potentialhebungen von über 20 cm noch weit hinter der neuen Deichlinie erfasst.

### **Maximale Grundwasserpotentiale**

In Abbildung 65 werden die maximalen Grundwasserpotentiale der Variante 1 und Variante 2, die in den 35 Simulationsjahren während der Vegetationszeit vorgekommen sind, verglichen. Im aktuellen Zustand (Variante 1; Bild oben) beschränkt sich die Auswirkung eines Hochwassers auf ein schmales Band entlang der Elbe. Diese hohen Grundwasserpotentiale werden landeinwärts nach vergleichsweise kurzer Entfernung gedämpft. In der darunterliegenden Abbildung ist die Variante 2 dargestellt. Der Überflutungswasserstand überträgt sich auf die Grundwasserpotentiale des Vordeichslandes, so dass diese auf fast 20 m steigen. Diese hohen Wasserstände wirken sich noch weit hinter dem neuen Deich aus. Im Vergleich der beiden Varianten ergeben sich bei der Prognose Potentialdifferenzen, die über 1,7 m liegen. Die Reichweite wird vor allem durch das Grabensystem reduziert, kann aber in einigen Bereichen mehrere hundert Meter betragen. Bei der Maximalwertbetrachtung muss allerdings beachtet werden, dass Modell- und Prognoseunsicherheit in diesem extremen Bereich am größten sind.

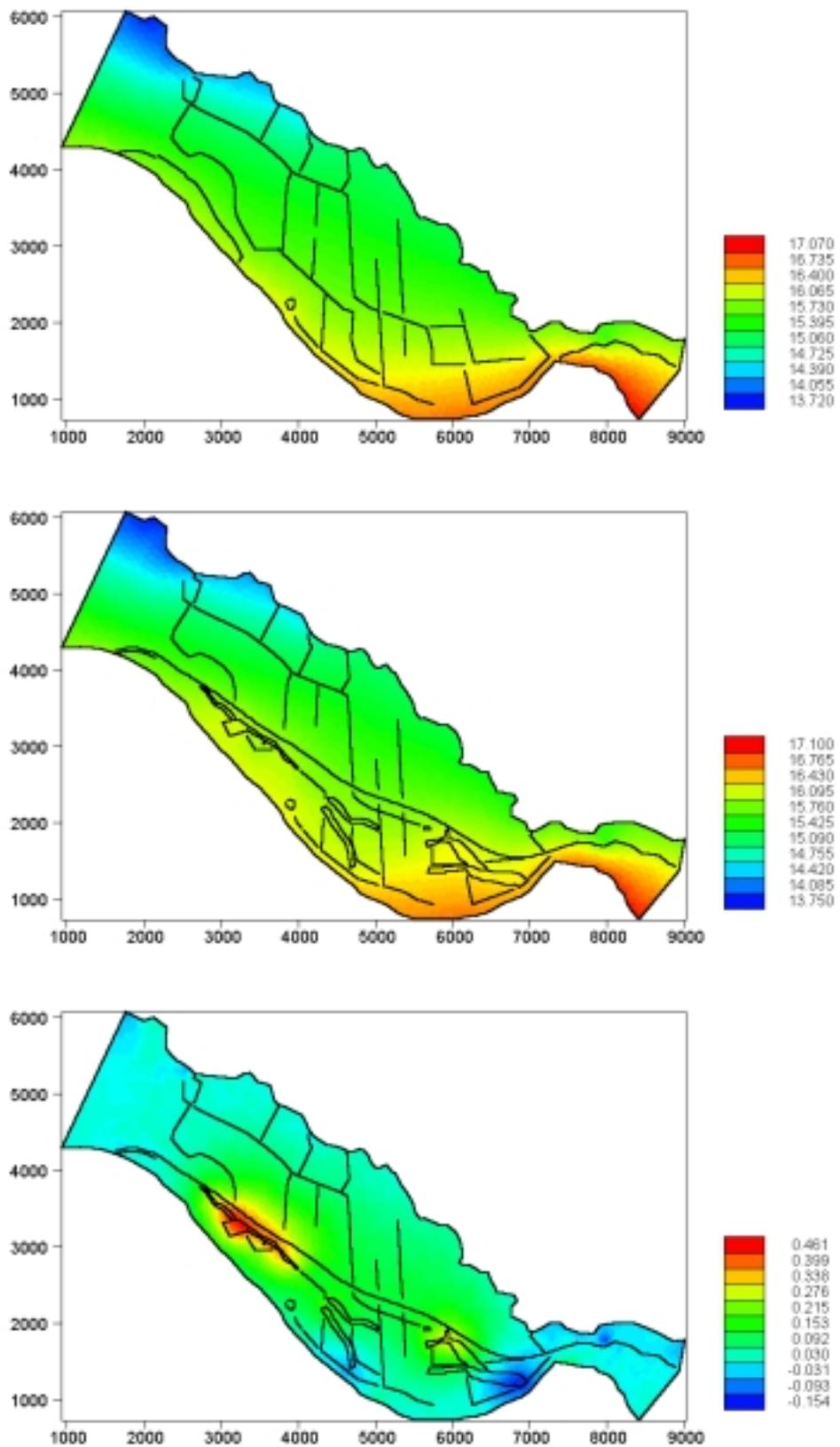


Abbildung 66: Grundwasserpotentiale 3. Quartile (Vegetationszeit 35 Jahre; oben: Variante 1; Mitte: Variante 2; unten: Variante 2 – Variante 1)

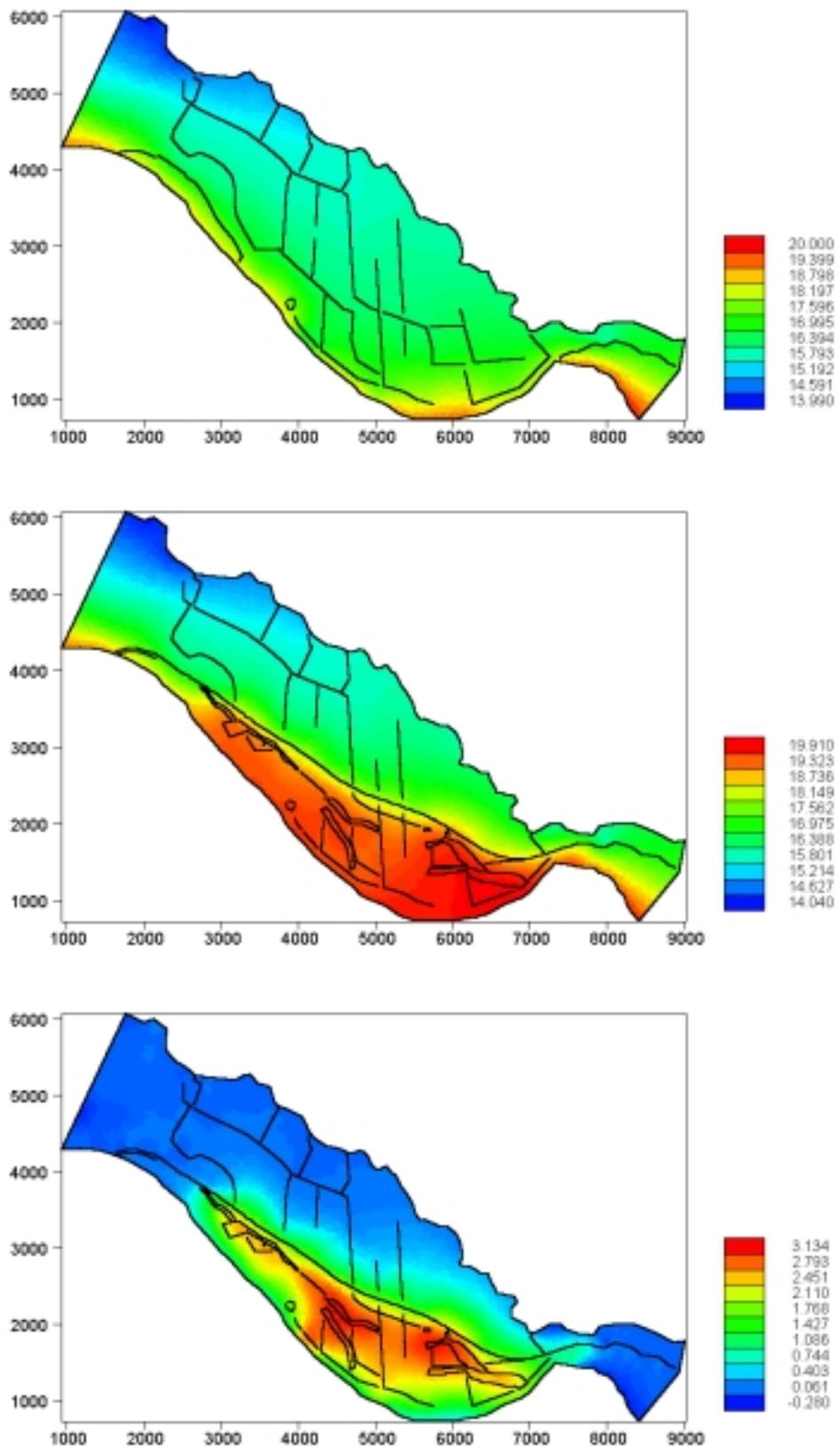


Abbildung 67: Grundwasserpotentiale Maxima (Vegetationszeit 35 Jahre; oben: Variante 1; Mitte: Variante 2; unten: Variante 2 – Variante 1)

## Spannbreite der Grundwasserschwankungen

Im ökosystemaren Kontext spielt die Bandbreite der Grundwasserschwankungen in Flussauen eine enorm wichtige Rolle. In Abbildung 68 ist die Differenz zwischen der 1. und 3.Quartile der Überschreitungsdauerlinie während der Vegetationszeit als charakteristische Kenngröße der Grundwasserschwankungen dargestellt. Diese Darstellung lässt sich als Schwankungsbereich der Grundwasserstände bei Mittelwasserverhältnissen beschreiben. Man erkennt in beiden Varianten eine Schwankungsamplitude von etwa 1,7 m im Bereich der Elbe.

Im aktuellen Zustand (Variante 1: Abbildung 68 oben) beschränkt sich diese auf ein schmales Band entlang der Elbe, das mit zunehmender Entfernung zum Flussufer gedämpft wird. In 500 m Entfernung beträgt die Amplitude unter 1 m. In der Nähe der Lößnitz stellt sich das Grundwasserregime wesentlich ruhiger dar. Hier liegen die Schwankungsbreiten bei etwa 10 cm. Eine Ausnahme ist der östliche Teil der Lößnitz, bedingt durch die Nähe zur Elbe tritt in diesem Bereich eine stärkere Dynamik auf.

In der Rückdeichungsvariante (Abbildung 68 Mitte) werden die westlichen Flutrinnen häufig durch die Elbe gefüllt und heben damit bereits bei leichtem Hochwasser den Grundwasserstand an. Der Schwankungsbereich zwischen der 1. und 3.Quartile wird im Zentrum des Gebiets um über 40 cm durch die Rückdeichung gesteigert. Diese Zunahme an Dynamik ist noch in einer Entfernung von 1 m auch hinter der neuen Deichlinie bemerkbar.

Die maximalen Schwankungsamplituden, die über die 35 Jahre während der Vegetationszeit auftraten, betragen über 6 m (Abbildung 69). Im aktuellen Zustand sind davon allerdings nur die Gebiete im direkten Einfluss der Elbe betroffen. Nach der Rückdeichung wird die Wasserstandsdynamik der Elbe infolge der Überflutung über das gesamte Vordeichsland ausgedehnt und ins Landesinnere übertragen.

Bemerkenswerterweise nimmt im östlichen Teil der Elbe die Grundwasserdynamik bis zu 28 cm nach der Rückdeichung ab. Dies ist eine Folge der Fließprofilerweiterung nach der Rückdeichung, die zu verminderten Flusswasserständen führt.

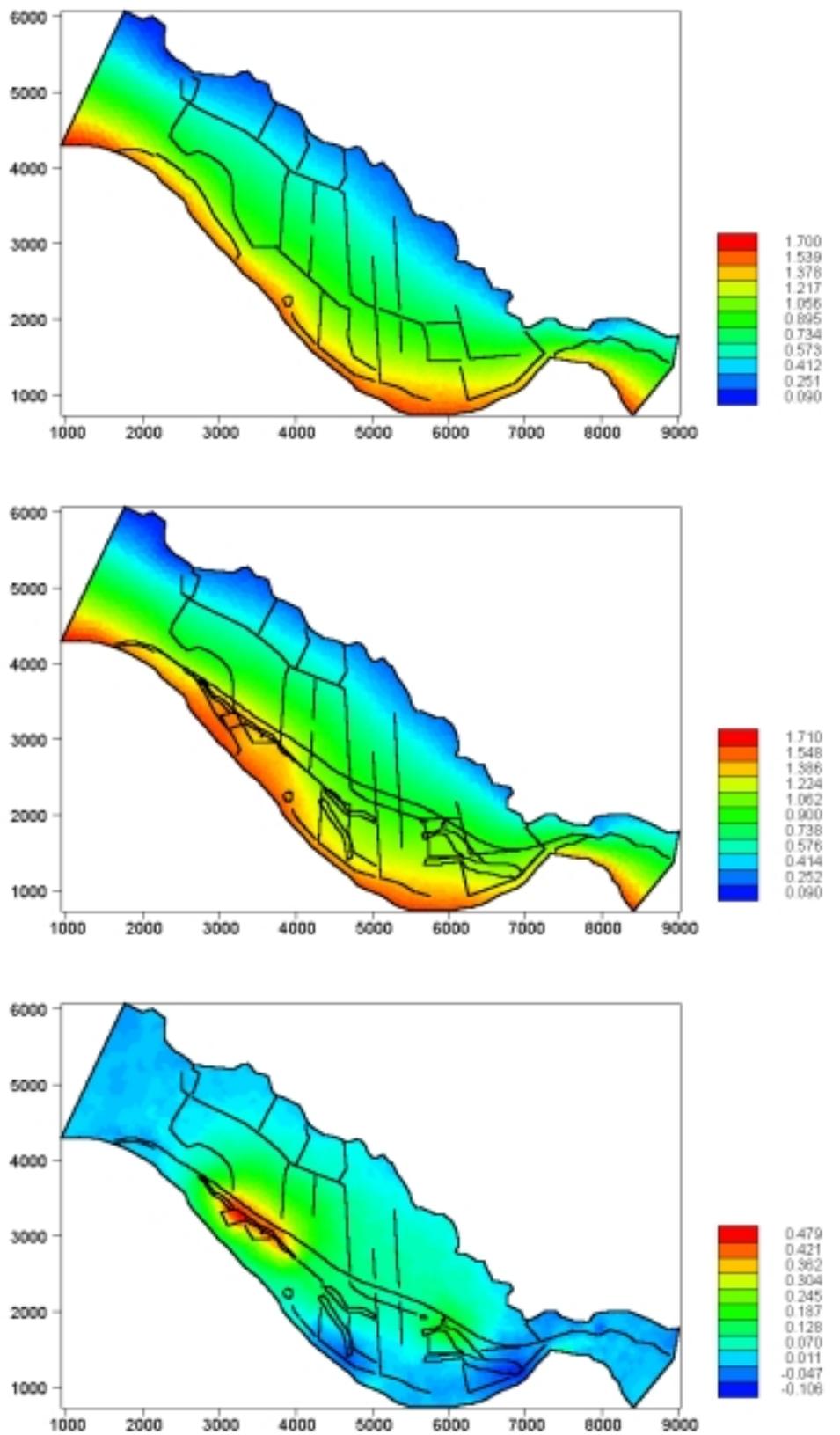


Abbildung 68: Spannweite der Grundwasserpotentiale zwischen der 3. und 1. Quartile (Vegetationszeit 35 Jahre; oben Variante 1; Mitte Variante 2; unten Variante 2 – Variante 1)

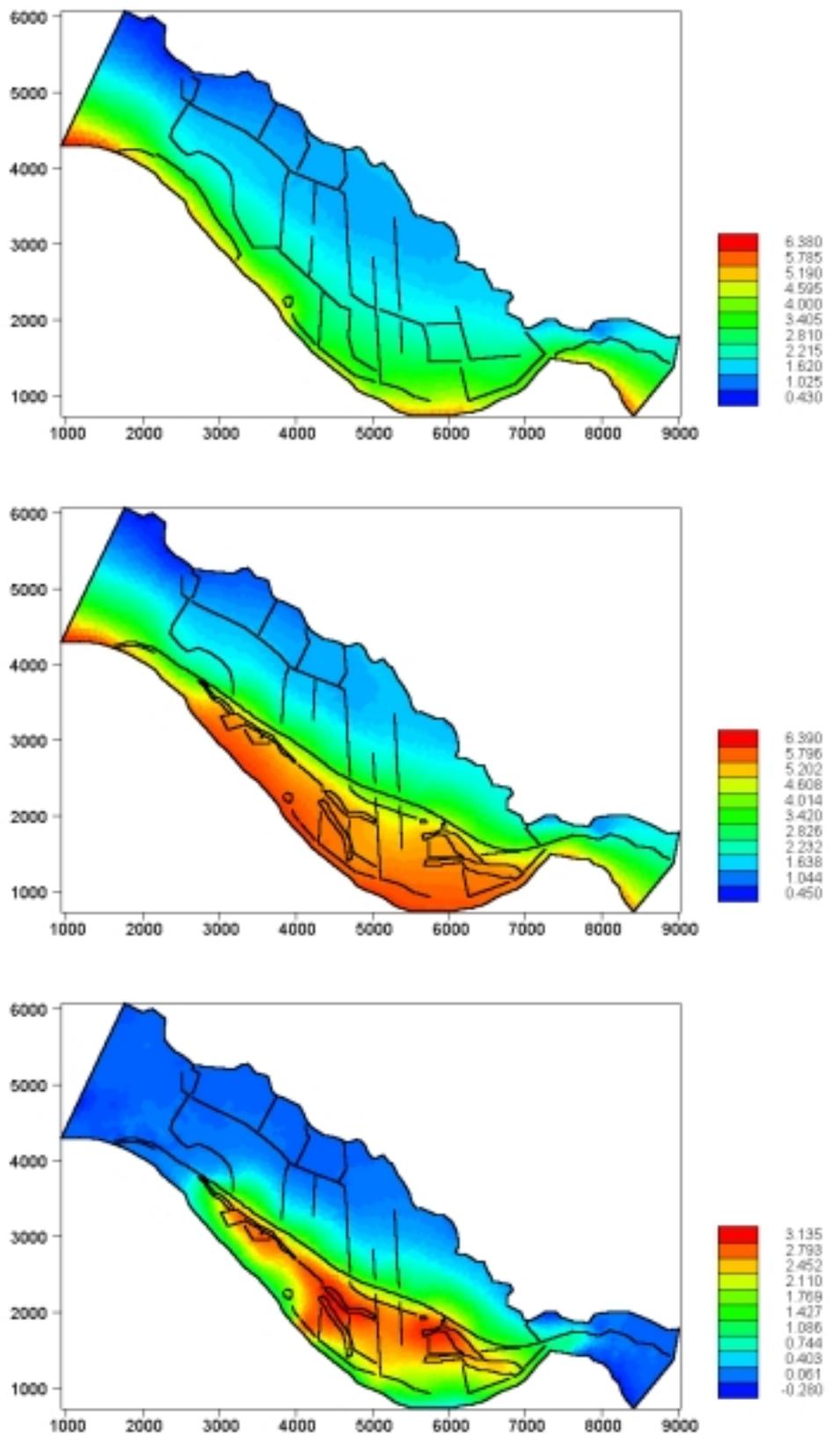


Abbildung 69: Spannweite der Grundwasserpotentiale zwischen Maximum und Minimum (Vegetationszeit 35 Jahre; oben Variante 1; Mitte Variante 2; unten Variante 2 – Variante 1)

### 7.4.2.2 Zeitlicher Bezug des Grundwasserregimes

Anhand von Dauerlinien kann festgestellt werden, an wie vielen Tagen ein kritisches Potential erreicht, über- oder unterschritten wird. Bei der statistischen Auswertung mittels einer Dauerlinie geht - wie bereits erwähnt - der zeitliche Bezug verloren, der für den Bodenwasserhaushalt und damit für eine Vielzahl biotischer Fragestellungen von großer Relevanz ist. So wird die Bodenfeuchte und damit die Wasserversorgung der Vegetation erst einen kritischen Wert erreichen, wenn der Grundwasserspiegel über einen längeren Zeitraum durchgehend ein niedriges Niveau aufweist. Die Bodenmatrix hat die Fähigkeit, Wasser zu speichern und - je nach Durchlässigkeitseigenschaften - kann eine Grundwasserwelle kurzer Dauer ausreichend sein, um diesen Bodenspeicher wieder zu füllen. Auch bei hohen Grundwasserständen wirkt sich die Verweildauer auf die Vegetation aus. Je nach Art vertragen Pflanzen hohe Wassersättigung in der Wurzelzone (geringe Flurabstände) nur eine begrenzte Zeitdauer, bis die Wurzeln zu wenig Sauerstoff bekommen und absterben. Bereits kurze Unterbrechungen der Hochwasserperiode können - entsprechende Durchlässigkeits- und Speichereigenschaften des Bodens vorausgesetzt - eine hinreichende Sauerstoffversorgung bewirken. Ebenso verhält es sich bei zu niedrigen Grundwasserständen, wenn die Pflanzenwurzeln Trockenstress unterliegen. Die Art der periodischen Grundwasserschwankungen, d.h. häufige kurze Grundwasserpotentialspitzen oder wenige ausgedehnte, haben einen enormen Einfluss auf das Ökosystem. Dieser zeitliche Bezug blieb bei der bisherigen Auswertung von Grundwasserpotentialen nach Häufigkeiten mittels einer Dauerlinie unberücksichtigt.

Um die dynamischen Aspekte des Grundwasserregimes einbeziehen zu können, wird der Aspekt der Verweildauer in die statistischen Auswertungen eingeführt. Hierbei werden die Zeitreihen der Grundwasserstände für verschieden lange Zeitspannen (hier 1, 3, 6, 10, 20, 30 und 50 Tage) nach dem höchsten und niedrigsten Wasserstand ausgewertet, das über diese gesamte Zeitspanne ununterbrochen vorlag. Eine ähnliche statistische Auswertung wurde bereits für die Zeitreihe der Durchflüsse der Elbe (Pegel Wittenberge) in

Abbildung 43 auf Seite 60 dargestellt. Solche statistische Analysen wurden an jedem Diskretisierungsknoten durchgeführt, wobei folgende Aspekte abgedeckt wurden:

- Extreme Ereignisse:           Höchste und niedrigste Wasserstände
- Verweildauer:                 1, 3, 6, 10, 20, 30 und 50 Tage
- Untersuchte Varianten:       Variante 1 und 2
- Zeitspanne:                    Der 35-jährige statistische Untersuchungszeitraum (1.1.64- 31.12.98) und der 2,5-jährige Messzeitraum (1.1.1997- 31.7.99)

- Zeitperiode: Komplette Jahre und Vegetationszeitraum<sup>6</sup> (1.4-30.9)

Die umfangreichen Datensätze dieser Untersuchungen befinden sich auf Datenträger in der Anlage. Es werden im Folgenden die Auswirkungen einer Deichrückverlegung auf lokale Veränderungen hoher und niedriger Grundwasserpotentiale unterschiedlicher Verweildauer anhand von drei Beispielen erläutert. Auf Grundlage der ausgewerteten Datensätze lassen sich je nach Fragestellung hiervon abweichende Zustände definieren und auswerten. Von der oben aufgezählten Palette wird bei den hohen Potentialen ein kurzer (6 Tage) und ein langer Zeitraum (30 Tage), bei den niedrigen Wasserständen ein langer Zeitraum (30 Tage) für beide Varianten vorgestellt. Die Datenbasis stellen die Vegetationsperioden des 35-jährige Untersuchungszeitraums dar.

### **Maximale Grundwasserpotentiale bei unterschiedlicher Verweildauer**

In Abbildung 67 wurde die räumliche Verteilung der maximalen Grundwasserpotentiale, die in der Vegetationszeit aufgetreten sind, für beide Varianten dargestellt und diskutiert. Diese extremen Werte hatten eine Verweildauer von einem Tag. Hieran anschließend werden in Abbildung 71 die maximalen Grundwasserpotentiale, die über eine Dauer von 6 Tagen in der Vegetationszeit zu beobachten waren, und in Abbildung 72 die maximalen Grundwasserpotentiale mit einer Verweildauer von 30 Tagen in der Vegetationszeit dargestellt.

Die höchsten Grundwasserpotentiale im Projektgebiet befinden sich im aktuellen Zustand erwartungsgemäß am Ufer der Elbe. Nach einer Rückdeichung werden diese auf das gesamte Vordeichsland ausgedehnt, da hier eine direkte Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser stattfinden wird. In diesem Bereich ist der Zusammenhang zwischen Potentialhöhe und Verweildauer auch am stärksten ausgeprägt. Das maximale Grundwasserpotential mit eintägiger Verweildauer ist in beiden Varianten 18 cm über dem mit sechs Tagen Verweildauer, was auf die relativ lang gezogenen Hochwasserwellen der Elbe<sup>7</sup> zurückzuführen ist. Bei kontinuierlicher, 30-tägiger Verweildauer sinkt der maximale Grundwasserstand um etwa 1,2 m weiter ab.

---

<sup>6</sup> Es handelt sich um ein neues Verfahren, das noch nicht standardisiert ist. In der Untersuchung nach Grundwasserextrema während der Vegetationsperiode wurden nur die Tage in die Auswertung mit einbezogen, welche in der Vegetationsperiode lagen. Beispielsweise werden bei einer Hochwasserspitze, die am Anfang der Vegetationsperiode liegt, nur die Tage ab den 1. April gewertet.

<sup>7</sup> Der maximale Abfluss der Elbe mit einer Verweildauer von 5 Tagen liegt nur geringfügig unter dem mit einer Verweildauer von einem Tag (Abbildung 41 auf Seite 63).

Mit zunehmender Entfernung zum Oberflächengewässer werden die vom Oberflächenwasser induzierten Grundwasserwellen flacher, was bei ungespannten Verhältnissen auf den dämpfenden Einfluss der Kornmatrix im Boden zurückzuführen ist. Dabei nimmt nicht nur die Amplitude der Grundwasserschwankungen ab (siehe auch Kapitel 7.4.2.1), sondern es nähern sich auch die Extremwerte mit verschiedener Verweildauer aneinander an. Trotzdem sind die Einflüsse der Rückdeichung auch bei langen Verweildauern noch weit hinter den Deichlinien bemerkbar, so dass es in weiten Bereichen selbst in 500 m Entfernung zu einer Erhöhung von über 70 cm bezogen auf den Ist-Zustand kommt, die 30 Tage durchgängig während der Vegetationszeit überschritten wurden.

Betrachtet man einzelne Standorte im Untersuchungsgebiet, so lässt sich die Abhängigkeit der maximalen Grundwasserpotentiale von der Verweildauer als Diagramm darstellen, wie es in Abbildung 70 für fünf verschiedene Stellen für die Variante 1 (Vegetationszeit) beispielhaft durchgeführt wurde. Die Messstellen GW05, GW03 und GW02 liegen auf einer Achse normal zur Elbe. GW07 liegt im westlichen und GW11 im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes. Die maximalen Grundwasserpotentiale bei der GW05, die im direkten Einfluss der Elbe stehen, unterscheiden sich zwischen 1- und 50-tägiger Verweildauer um bis zu 1,2 m. Bei den übrigen Messstellen wird die Dynamik durch die weitere Entfernung zur Elbe gedämpft, so dass die Maxima zwar geringer sind, aber dafür auch mit zunehmender Verweildauer nur langsam absinken. Dies führt dazu, dass bei längeren Verweildauern die Grundwasserpotentiale im direkten Einfluss der Elbe (in der Aue, in Deichnähe) deutlich sinken, während sie bei größerer Entfernung weitestgehend ihr Niveau beibehalten.

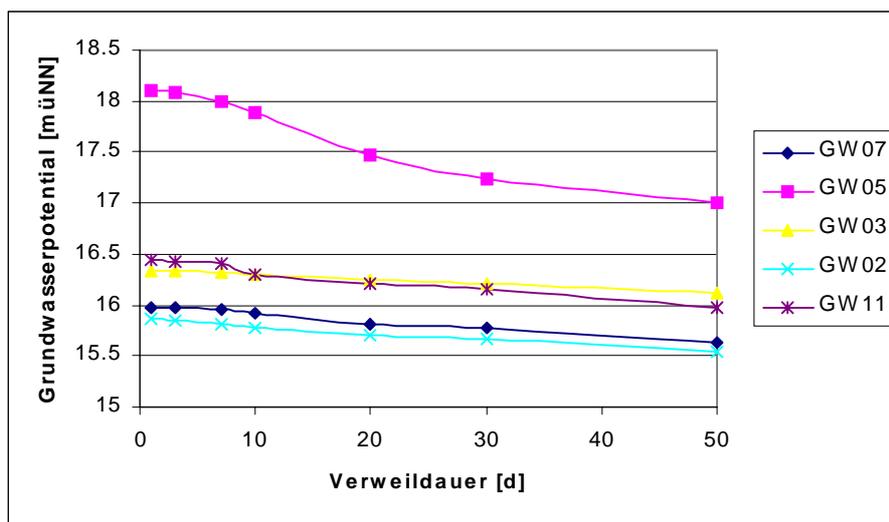


Abbildung 70: Maximale Grundwasserpotentiale mit unterschiedlicher Verweildauer (Variante 1; Vegetationszeit 35 Jahre)

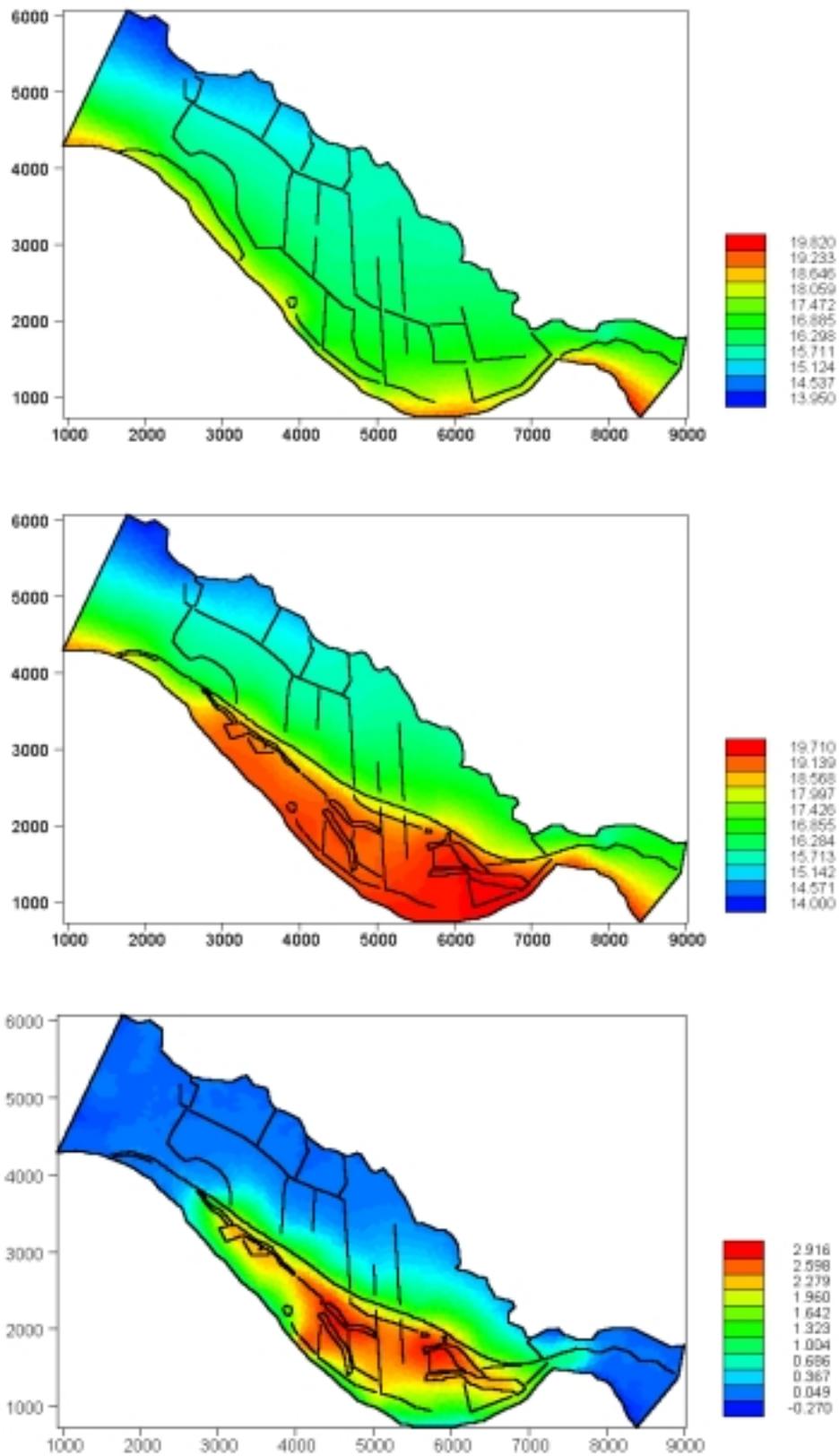


Abbildung 71: Veränderungen durch Deichrückverlegung in den Maximalen Grundwasserpotentialen mit einer Verweildauer von 6 Tagen (Vegetationszeit 35 Jahre)

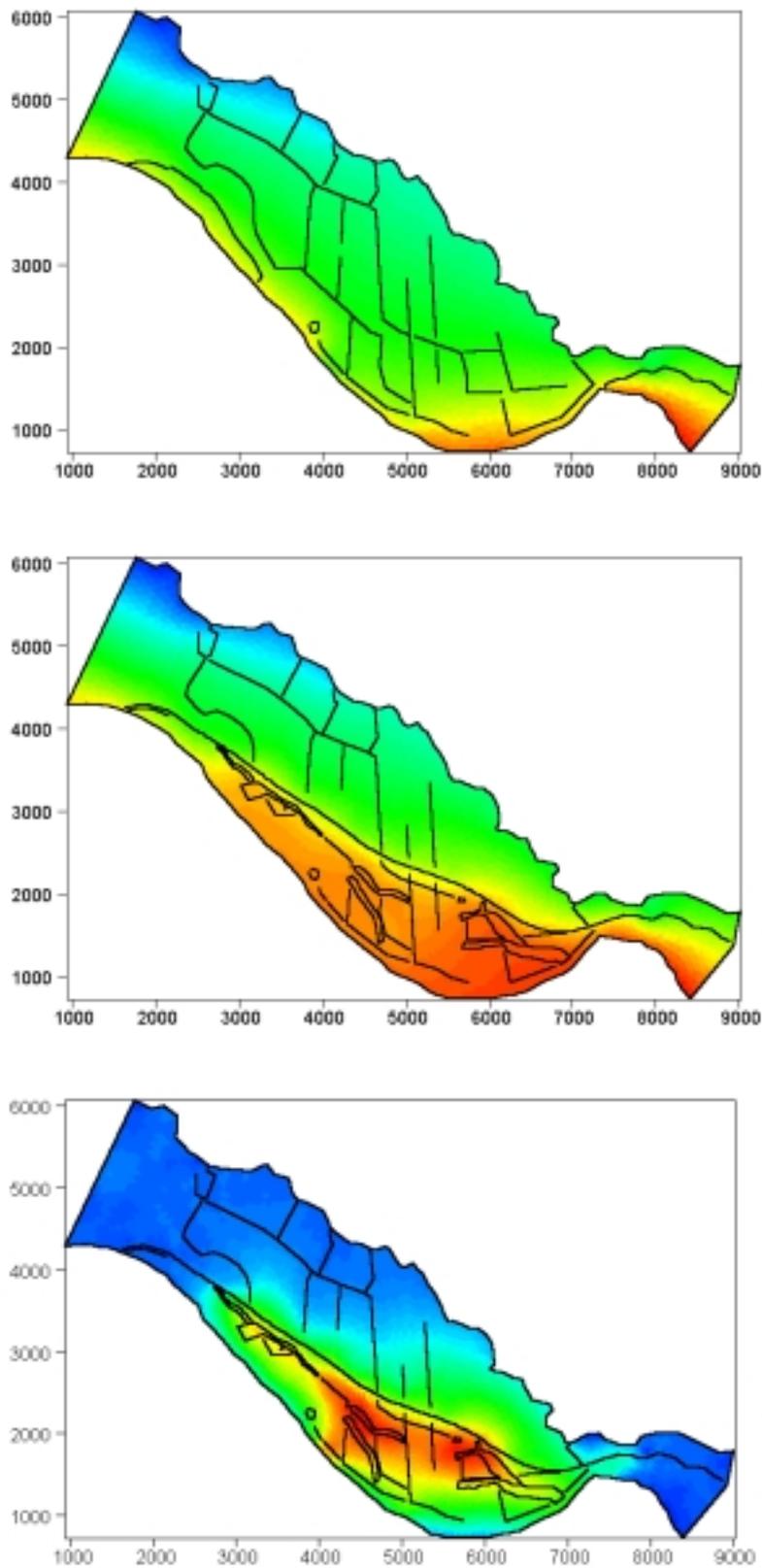


Abbildung 72: Veränderungen durch Deichrückverlegung in den Maximalen Grundwasserpotentialen mit einer Verweildauer von 30 Tagen (Vegetationszeit 35 Jahre)

**Minimale Grundwasserpotentiale bei unterschiedlicher Verweildauer**

Die größten Auswirkungen einer Deichrückverlegung auf die Grundwasserverhältnisse werden bei Hochwasser eintreten, wenn das rückgedeichte Gebiet von der Elbe her überflutet wird. Bei Niedrigwasser werden die hydraulischen Verhältnisse vergleichsweise wenig beeinflusst (Abbildung 73). Die Interaktion Elbe- Grundwasser erfolgt bei Niedrigwasser nach wie vor ausschließlich durch das Flussbett. Allerdings werden durch die Rückdeichung Teile des Grabensystems abgetrennt, die nicht mehr zur Bewässerung genutzt werden können. Die fehlende Bewässerung wird sich im rückgedeichten Gebiet in Form tieferer Grundwasserstände bei Niedrigwasser auswirken.

Besonders stark wird dieser Effekt am südöstlichen Ende des Grabens I in Erscheinung treten. Bei dem Vergleich der Grundwasseränderungen nach der Rückdeichung beträgt die Differenz bis zu 30 cm in der Nähe des Grabens. Die vergleichsweise hohen Leakagekoeffizienten des gesamten Grabens I wurden anhand der Grundwassermessstellen GW 07 und GW 08 ermittelt, die beide am anderen Ende des Grabens liegen. Der tatsächliche hydraulische Anschluss eines Grabenabschnittes, der im Modell durch den Leakagekoeffizienten ausgedrückt wird, ist jedoch variabel, so dass in diesem Bereich die tatsächlich auftretende Bewässerung durch den Graben wahrscheinlich überschätzt wird. Entsprechend hoch fällt die Differenz zwischen den Zuständen mit und ohne Bewässerung.

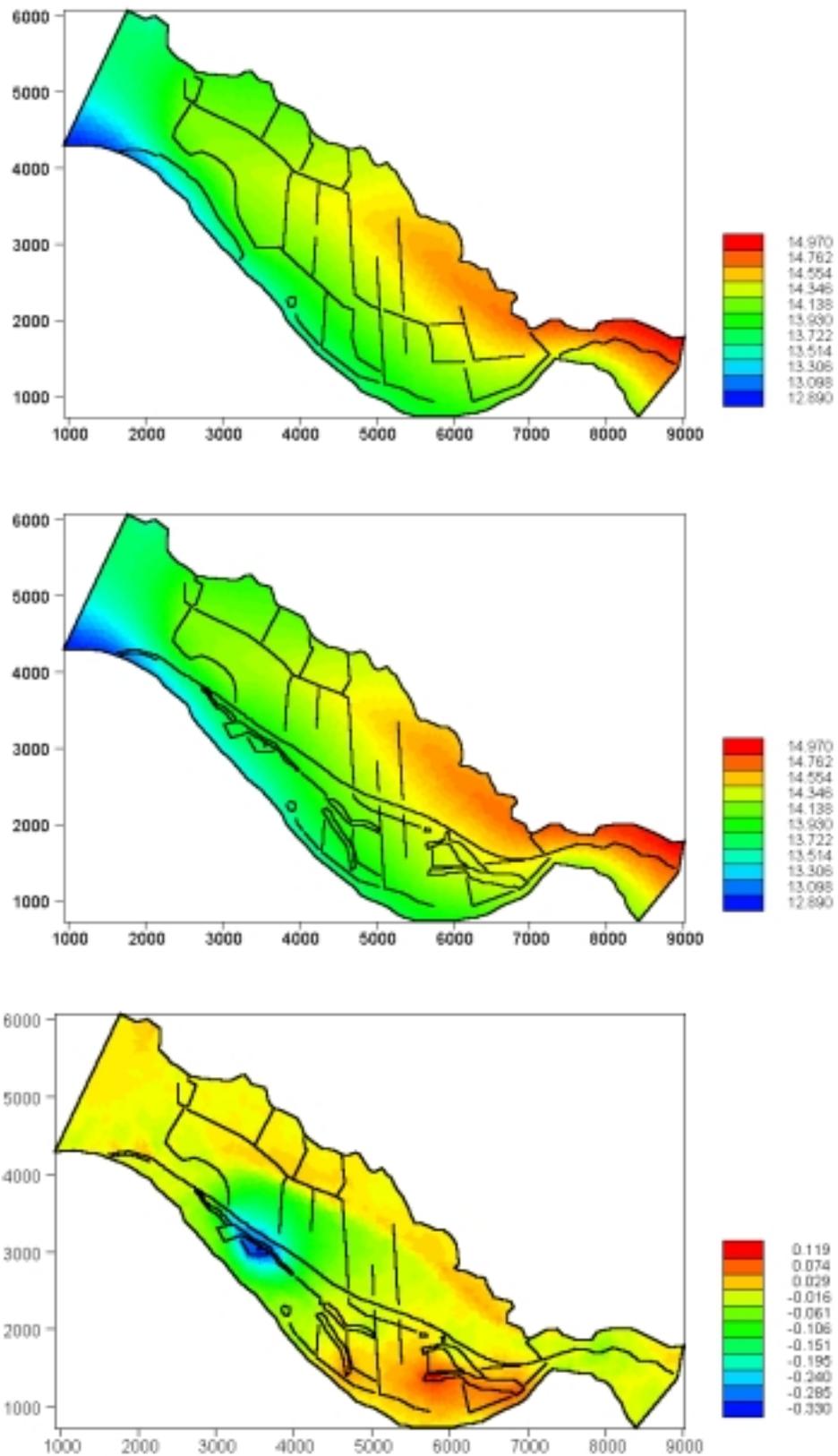


Abbildung 73: Veränderungen durch Deichrückverlegung in den minimalen Grundwasserpotentialen mit einer Verweildauer von 6 Tagen (Vegetationszeit 35 Jahre)

### 7.4.3 Jahreszeitliche Schwankungen des Grundwasserregimes

Der Grundwasserstand unterliegt einem Jahreszyklus, der in Auen vorwiegend von dem Wasserstand der Flüsse geprägt ist. Bei den bisher genannten Auswertungen wird zwischen den Grundwasserpotentialen in der Vegetationsperiode und dem kompletten Jahr unterschieden. Im liegen in der Vegetationsperiode (April bis September) liegen die Grundwasserpotentiale unter dem Jahresdurchschnitt. Für eine genauere Aufschlüsselung des Jahreszyklus wurden Maximum, Minimum und Mittelwert der einzelnen Monate bestimmt. In Abbildung 74 sind die mittleren Grundwasserpotentiale jeden Monats der Grundwassermessstellen GW01, GW02, GW03 und GW04, die entlang eines Transekts rechtwinklig zur Elbe angeordnet sind dargestellt (Variante 1: Ist-Zustand; Variante 2: Rückdeichung). Im April sind die Grundwasserpotentiale am höchsten, fallen aber im Sommer stark ab und erreichen das Minimum im September. Damit sind die jahreszeitlichen Grundwasserschwankungen mit der Elbe konform (Abbildung 44). Durch die Rückdeichung werden die Grundwasserpotentiale vor allem in der Nähe der Elbe erwartungsgemäß steigen, der Zyklus bleibt allerdings erhalten.

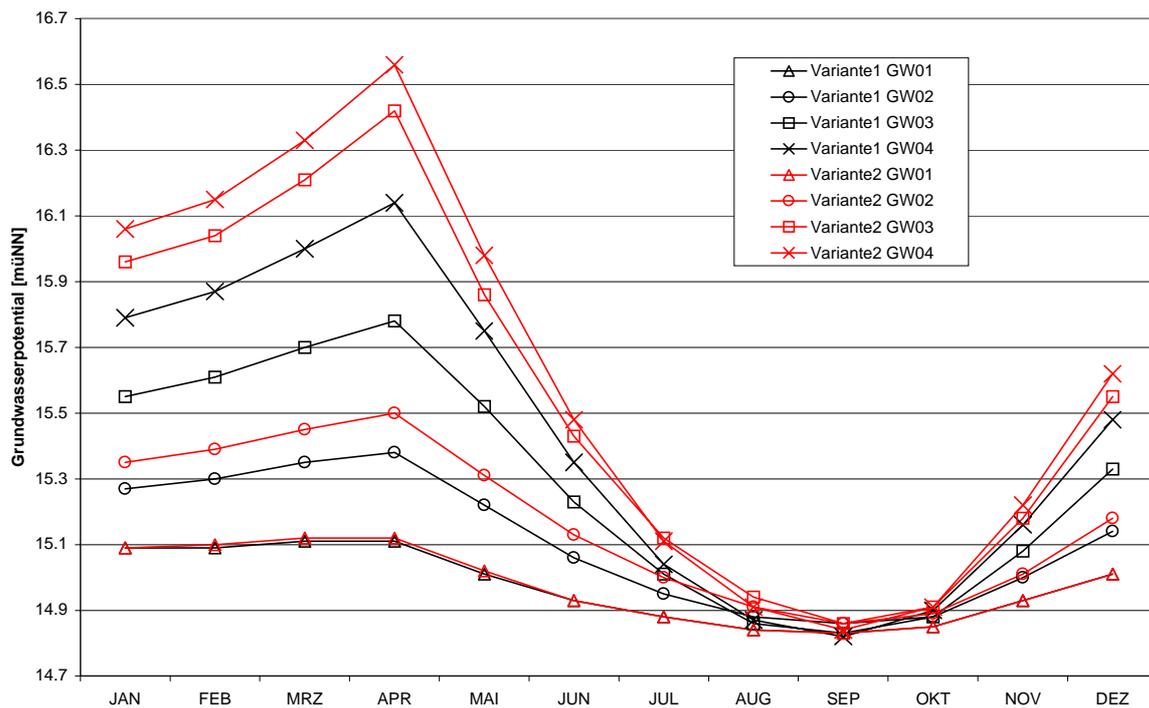


Abbildung 74: Monatsmittel der Grundwasserpotentiale

### 7.4.4 Artesisch gespannte Zustände (Qualmwasser)

Hochwässer der Elbe führen immer wieder dazu, dass Grundwasser durch Fehlstellen in der Deckschicht an die Oberfläche gelangt. Dieses sogenannte Qualmwasser wird in einigen Bereichen von

den Gräben abgeführt, in anderen Bereichen sammelt es sich in Mulden des Geländes. Aufgrund der wenig ausgeprägten Topografie können bei langandauernden, extremen Hochwässern diese Qualmgewässer einen großen Teil der Fläche bedecken. Der Einfluss einer Deichrückverlegung auf Auftreten und Intensität von Qualmwasser ist von großer Relevanz für landwirtschaftliche und ökosystemare Fragestellungen. In der rückgedeichten Fläche selbst stellt sich die Qualmwasserproblematik infolge Überflutung nicht, während auf der anderen Seite der neuen Deichlinie die Grundwassermaxima stärker als im jetzigen Zustand ansteigen. Durch die Deichbaumaßnahme ist grundsätzlich eine Verschiebung der Qualmwasseraustrittsflächen zu erwarten.

Eine direkte Simulation der Qualmwassermengen und Austrittsstellen kann nicht erfolgen, weil die Deckschicht nicht derart fein aufgenommen werden kann. Im Modell wird dieser hydraulischer Austausch über flächenbezogene Leakagekoeffizienten bewerkstelligt. Diese sind auch mit Unsicherheiten behaftet, da das Modell in Ermangelung von beobachteten Flüssen (Exfiltrationsmengen) lediglich anhand von Grundwasserpotentialen kalibriert werden konnte. Anhand der berechneten hydraulischen Potentiale und der Topografie lassen sich allerdings Bereiche identifizieren, die eine hohe Wahrscheinlichkeit für Qualmwasseraustritt aufweisen. Allgemein kann bei entsprechender hydrogeologischer Beschaffenheit Qualmwasser exfiltrieren, sobald das Grundwasserpotential über die Geländeoberkante steigt. Ob dies nun tatsächlich der Fall ist, hängt von der Beschaffenheit und Ausbildung der Deckschicht ab. Bereits kleine Fehlstellen reichen aus, um einen beträchtlichen Qualmwasseraustritt zu ermöglichen.

Mit der Modellvalidierung konnte nachgewiesen werden, dass selbst bei Extremereignissen (Hochwasser der Elbe) die Grundwasserpotentiale gut abgebildet werden. Durch das Verschneiden dieser Grundwasserstände mit der Topografie können Flächen erkannt werden, in denen die Potentialhöhen über der Geländeoberkante liegen und damit die Möglichkeit besteht, dass Qualmwasser austritt. Entsprechende Untersuchungen sind von der Projektkoordination für das Hochwasser vom 15. März 1999, bei dem beträchtliche Flächen durch Qualmwasser und auch Niederschlag überdeckt worden sind, durchgeführt worden (Rauhaut et al. 1999). Die so entstandene Karte potentieller Qualmwassergebiete ist in Abbildung 75 oben dargestellt. Rote Umrandungen kennzeichnen die überfluteten Flächen, die im gleichen Zeitraum kartiert wurden (Rauhaut et al. 1999). Diese Wasserflächen haben sich in den Senken, zu denen Wasser teilweise oberflächlich zufließt, gebildet und kommen vor allem in Bereichen mit potentiellen Qualmwasseraustritt vor. Es konnte somit eine weitgehende Übereinstimmung der kartierten überfluteten Flächen mit den ermittelten potentiellen Qualmwasseraustrittsbereichen festgestellt werden.

In Abbildung 75 unten sind für den gleichen Tag die modellierten potentiellen Qualmwasseraustrittsflächen für die Situation nach der Rückdeichung dargestellt. Die Überflutung des rückgedeichten Ge-

bietet erhöht die Grundwasserpotentiale hinter dem neuen Deich soweit, dass in unmittelbarer Nähe des neuen Deiches die hydraulischen Bedingungen für einen Qualmwasseraustritt fast durchgehend erreicht werden. Damit stellen sich ähnliche Verhältnisse ein, wie sie zur Zeit des Hochwassers hinter dem vorhandenen Deich vorlagen, bei dem ebenfalls die Grundwasserpotentiale durchgehend über der Geländeoberkante lagen. Allerdings ist der Landstreifen mit potentiell Qualmwasseraustritt hinter dem jetzt vorhandenen Deich deutlich breiter: bei Elbe km 480 beträgt die Breite der Qualmwasseraustrittszone im aktuellen Zustand etwa 1 km, hinter dem neuen Deich nur ungefähr 300 m. Die Breite dieses Landstreifens ist Variable und hängt von den hydrogeologischen Rahmenbedingungen und vor allem von der Topografie ab. Das Untersuchungsgebiet lässt sich dabei grob in drei Abschnitte einteilen:

### **Der östliche Abschnitt**

Am 15.3.99 wurde in diesem Abschnitt hinter der geplanten Deichlinie kleinere temporäre Gewässer kartiert. Interessant ist, dass einige wie zum Beispiel die kleinen Gewässer entlang des Feldweges nach Wustrow, in topografisch höheren Lagen vorkommen. Eine direkte Speisung mit Grundwasser ist unter den vorhandenen Potentialen nicht möglich, da die Grundwasserstände nicht bis an die Geländeoberkante gelangen<sup>8</sup>. Zudem weist die Deckschicht in diesem Bereich eine große Mächtigkeit auf, was die Wahrscheinlichkeit eines Qualmwasseraustritts einschränkt. Diese Mulden wurden offensichtlich über Oberflächenabfluss gefüllt. Hierfür gibt es grundsätzlich zwei mögliche Quellen:

- Regenwasser: Niederschlag, der oberflächlich abgefließen ist und sich in Mulden gesammelt hat.
- Qualmwasser: Auch Qualmwasser fließt je nach Geländestrukturen oberflächlich ab. Dieses Wasser kann sich bei entsprechenden topografischen Verhältnissen auch in entfernten Mulden sammeln.

Für die Entstehung der kleinen Gewässer in den Senken entlang des Feldweges nach Wustrow scheint die Möglichkeit eines oberflächlichen Zuflusses von Qualmwasser, das an einer anderen Stelle entsprungen ist, wegen deren erhöhter Lage als unwahrscheinlich, so dass es sich hier vermutlich um Ansammlung von Regenwasser handelt.

---

<sup>8</sup> Ein Fehler im Grundwassermodell als mögliche Ursache kann insbesondere in diesem Bereich mit der Messstelle GW11 ausgeschlossen werden. Hier konnten Grundwasserpotentiale über den Verlauf des Hochwassers gemessen werden. Messwerte und Modellergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung (Vergleiche Kapitel: Validierung). Am 15.3.99 lagen die simulierten Grundwasserpotentiale geringfügig über den Messwerten. Damit werden die potentiellen Qualmwasserflächen eher überschätzt.

Nach einer Deichrückverlegung werden sich bei Hochwasser die Grundwasserpotentiale hinter dem neuen Deich erhöhen. Die Untersuchung der Grundwassermaxima zeigt, dass sich vor allem im östlichen Untersuchungsgebiet die Deichrückverlegung weit in Richtung der Löcknitz hydraulisch auswirkt (Kapitel 7.4.2). Der Bereich potentieller Qualmwassergebiete wird sich für ein Hochwasser wie im März 1999 auf ein Band von 50 bis 500 m Breite entlang des neuen Deichs einstellen, bei dem im aktuellen Zustand so gut wie keine potentiellen Qualmwasserflächen vorkommen. Die Erkundungsbohrungen in diesem Bereich weisen auf stark schwankende Deckschichtmächtigkeit hin. In den Bereichen großer Deckschichtmächtigkeiten ist kein Qualmwasseraustritt zu erwarten. In einigen Bereichen ist die Mächtigkeit der Deckschicht jedoch geringer als einen halben Meter. Hier sind Störungen und Fehlstellen, aus denen das artesisch gespannte Grundwasser austreten kann, wahrscheinlicher.

Entlang des Deichfußes wird aus konstruktiven Erwägungen ein Drängraben notwendig sein, der dieses Wasser abführt. Je nach Ausführung der Grabensohle, lässt sich mit diesem das Grundwassersystem beeinflussen. Bei einer dichten Sohle wird das Grundwassersystem nicht verändert. Mit dem Graben wird nur das anfallende Oberflächenwasser (Qualmwasser, Regenwasser) abgeführt. Bei einer durchlässigen Ausführung wird bei Hochwasser Grundwasser durch die Grabensohle exfiltrieren, der dahinter liegende Grundwasserleiter wird entspannt, wodurch die Grundwassermaxima und der Qualmwasseraustritt reduziert werden. Ein durchlässiger Graben wird dabei prinzipiell durch eine größere Niederschlags- und Qualmwassermenge belastet und muss dementsprechend größere Abflüsse abführen können.

### **Der mittlere Abschnitt**

Der mittlere Abschnitt zeichnet sich innerhalb des Projektgebietes durch seine vergleichsweise tiefe Lage aus. Im März 1999 wurden in diesem Abschnitt mehrere Oberflächengewässer kartiert, die durch hohe Grundwasserpotentiale und lang anhaltende Niederschläge entstanden sind. Durch die topografisch tiefe Lage des Gebietes besteht ein besonders großes Potential für Qualmwasser, wie sich in Abbildung 75 zeigt.

Im Vergleich der beiden Varianten Rückdeichung und keine Rückdeichung zeigt sich, dass neue Flächen, aus denen Qualmwasser bei entsprechender Deckschicht austritt, nur direkt hinter der neuen Deichlinie entstehen. Die vorhandenen Gräben können das Grundwasser soweit entlasten, dass in einer Entfernung von 500 m zu der neuen Deichlinie die Flächen potentieller Qualmwasseraustritte in beiden Varianten weitgehend identisch sind. In den dazukommenden Bereichen hinter dem neuen Deich ist allerdings durch den erhöhten Grundwasserdruck auf die Deckschicht, die hier teilweise nur geringmächtig ist, das Austreten von Qualmwasser eher wahrscheinlich. Dies muss allerdings nicht zwangsläufig zu einer Vergrößerung der bisher in diesem Bereich überfluteten Flächen führen. Am

15. März haben sich bereits große Wasserflächen in den Niederungen gebildet, die bis an das Grabensystem reichen. Dieses Grabensystem fungiert bei entsprechender hydraulischer Leistungsfähigkeit wie ein Überlauf, der ein weiteres Anwachsen dieser Qualmwasserzonen verhindert.

### **Der westliche Abschnitt**

Zwischen dem Graben 1 und dem Deich wurde im März 1999 ein großer Anteil der Fläche überstaut. In diesem Bereich sind große Lücken in der Deckschicht, durch die Grundwasser bei entsprechenden Potentialen ungehindert austreten kann. Der Graben 1 und das erhöhte Relief dahinter verhindern eine weitere Ausbreitung der Überflutung durch Qualmwasser.

Das Variantenstudium zeigte, dass die Deichrückverlegung nur geringfügig Auswirkungen auf dieses Gebiet hat. Die potentiellen Qualmwasserzonen sind dementsprechend ähnlich. Eine zusätzliche Belastung dieses Gebietes ist nicht zu erwarten.

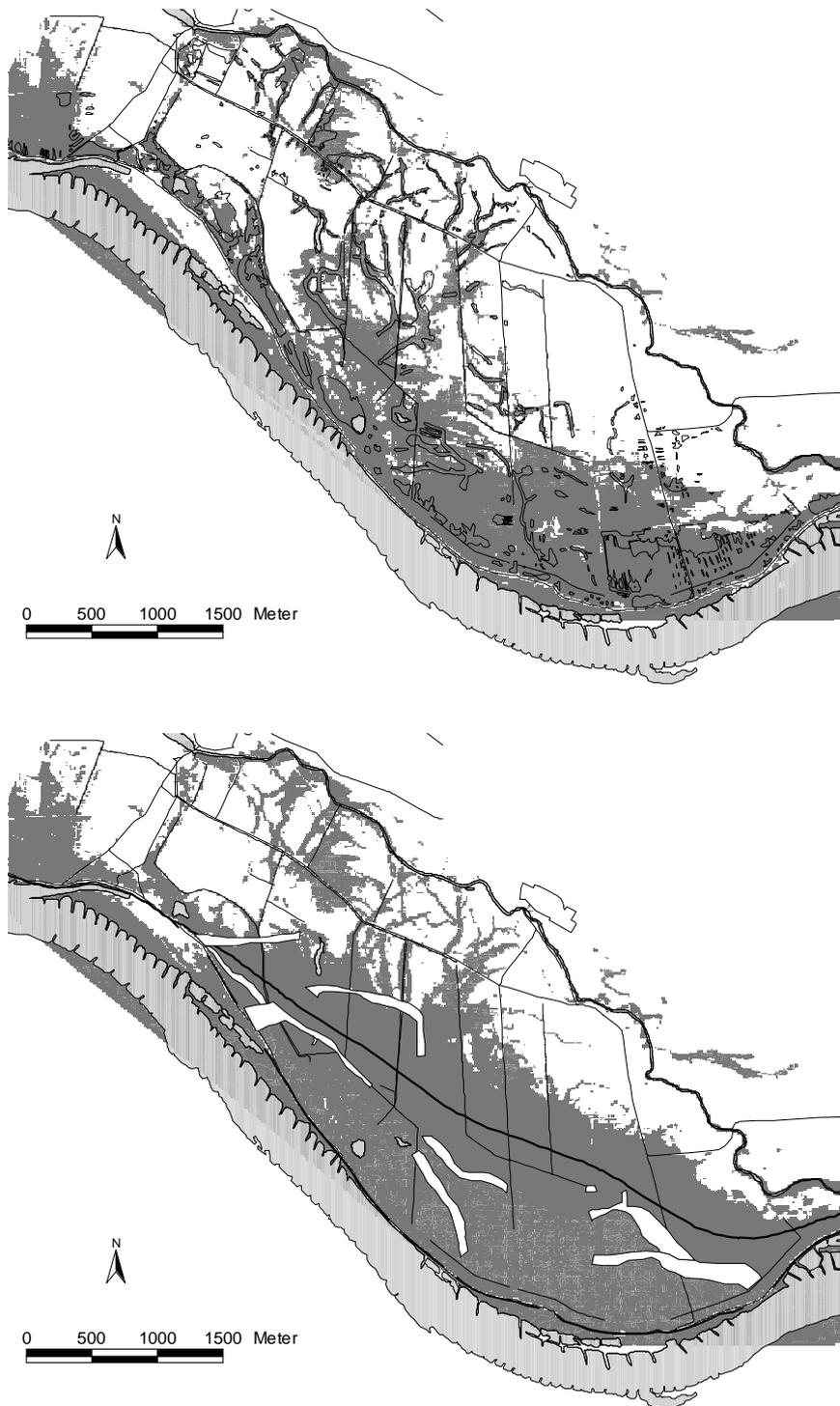


Abbildung 75: Potentielle Qualmwasserbereiche (graue Bereiche) nach einer Simulation des Hochwasserereignisses am 15.3.99 (oben: Variante 1 (kartierte Qualmwasserzonen sind umrandet), (nach M. Hape, LAGS, pers.Mitteilung 1999);unten Variante 2)

### 7.4.5 Abflussleistung der Lößnitz und anfallende Wassermengen am Schöpfwerk Gaarz

Das Grabensystem hinter dem derzeitigen Deich dient während der starken Sommerniederschläge und bei Hochwasser (Qualmwasser, Grundwasserandrang) zur Entwässerung der Niederung der Lenzer Kuhblank. Wenn aufgrund der Wasserspiegellagen die Lößnitz nicht mehr ungehindert in die Elbe fließen kann, wird die Entwässerung des Gebietes östlich von Gaarz zwischen der Elbe (Ortschaft Wootz) und der Lößnitz (Ortschaft Breetz) durch das Schöpfwerk Gaarz ( $Q_{\max} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) unterstützt, das über den Rhinowkanal direkt in die Elbe entwässert (persönliche Mitteilung: Schulz, Wasser- und Bodenverband Lenzen, 1997).

Da die Deichrückverlegung in einzelnen Bereichen nachhaltige Auswirkungen auf das Grundwasserregime mit sich bringt, stellt sich grundsätzlich die Frage, wie sich die hydraulische Beaufschlagung dieser die Vorflut sichernder Bauwerke durch die geplante Deichrückverlegung ändern wird. So würde ein Mehranfall an abzuleitendem Wasser am Schöpfwerk Gaarz sich in den laufenden Kosten niederschlagen oder im extremsten Fall einen Ausbau erforderlich machen. Eine erhebliche Mehrbelastung der Lößnitz könnte sich auf den Hochwasserschutz auswirken. Da die Grundwasserverhältnisse auch im Bereich nördlich der Lößnitz vorwiegend durch deren Wasserstand geprägt werden (Vorfluterwirkung), wären in diesem Bereich auch veränderte Grundwasserstände eine mögliche Auswirkung.

Das komplexe System bestehend aus Elbe, Lößnitz, Grabensystem und Schöpfwerk lässt eine Reihe an Steuerungsmöglichkeiten zu. Mit diesen lässt sich regulieren, wie viel Entwässerungswasser aus dem Grabensystem zum Schöpfwerk geleitet wird und wie viel direkt in die Lößnitz entlastet werden kann. Bei ungünstigen hydrologischen Verhältnissen muss mit dem Schöpfwerk auch die Lößnitz entlastet werden. Ab bestimmten Wasserspiegelhöhen kann die Lößnitz nicht mehr in die Elbe frei fließen. In diesem Fall wird die Mündung der Lößnitz mit einer Schleuse verschlossen, um einen Rückstau der Elbe in die Lößnitz zu unterbinden.

Seit einiger Zeit werden vom Landesumweltamt Messungen im Bereich der Lenzer Wische durchgeführt, mit dem Ziel, die anfallende Qualmwassermengen zu quantifizieren (persönliche Mitteilungen, Becker Landesumweltamt Brandenburg 2000). In diesem Zusammenhang werden während Hochwasserereignissen Abflüsse in einigen Gräben gemessen. Durch die Komplexität des hydraulischen Systems mit z.T. parallel betriebenen Gräben und der großen Anzahl von Regulierungsmöglichkeiten ist eine Beschreibung des instationären Qualmwasseraufkommens anhand der Messungen zur Zeit nicht möglich.

---

Im verwendeten numerischen Grundwassermodell lässt sich über einen Leakageansatz der Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser berechnen. Obwohl durch die instationäre Parameterbestimmung sich die maßgebenden Modellparameter zur Berechnung von Grundwasserströmungen vergleichsweise eindeutig abschätzen lassen, wären zusätzliche Information über die tatsächlich auftretenden Flüsse (z. B. Wasseranfall in den Gräben, Qualmwasser usw.) bei der Bewertung der Modellzuverlässigkeit von großem Nutzen. Um diese Information zu beschaffen wäre ein umfangreiches Untersuchungsprogramm (z.B. simultane Durchflussmessungen in den Gräben, Tracerversuche, Isotopenanalysen zur Separation von Grund- und Niederschlagwasser usw.) erforderlich, das für ein so großes und komplexes Untersuchungsgebiet, vor allem unter den interessierenden Hochwasserbedingungen, den finanziellen Rahmen sprengen würde. Selbst bei diesem ehrgeizigem Untersuchungsprogramm bliebe es fraglich, ob damit die Abschätzung der aktuellen und zukünftigen Leakagefaktoren insbesondere der Qualmwassergebiete erheblich fundierter vorgenommen werden könnte. Der Hintergrund für diese Probleme liegt auch in der räumlichen Skala der statt findenden Prozesse und Auflösung im Modell. Man beachte, dass die Topografie letztlich nicht in ihren Einzelheiten aufgelöst werden kann. Im Modell wird im Schwerpunkt der Diskretisierungselemente die mittlere Lage der Geländeoberkante und den mittleren Grundwasserstand bestimmt, um etwaige Qualmwasseraustritte zu berechnen. Das topografische Geländemodell ist zwar mit vergleichsweise geringen Fehlern behaftet, diese können sich aber in Anbetracht der sehr großen Fläche zu erheblichen Fehlschätzungen der in- oder exfiltrierenden Wassermengen führen. Des weiteren müsste die Überstauung der Mulden in ihrer zeitlichen Dynamik berücksichtigt werden, da der Qualmwasseraustritt durch Überstauung erheblich beeinflusst wird.

In der Praxis werden aufgrund dieser Schwierigkeiten bei der Datenerhebung in komplexen Gebieten meistens wasserstandskalibrierte<sup>9</sup> Grundwassermodellen zur Abschätzung von Leakegewassermengen angewendet. Hierdurch müssen allerdings die Unsicherheiten bei der Anwendung und Interpretation der Modellergebnisse berücksichtigt werden (z.B. mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagt werden). Bei der vorliegenden Aufgabenstellung, eventuellen Mehranfall an Leakegewasser durch die Baumaßnahme zu prognostizieren, werden die Leakegewassermengen in zwei Szenarien miteinander verglichen. Durch den Vergleich relativieren sich systematische Modellfehler, womit die Aussagekraft der Prognose erhöht wird.

Bei einer Bilanzierung des Wasseranfalls an die Löcknitz und dem Schöpfwerk Gaarz müssen folgende Komponenten berücksichtigt werden:

---

<sup>9</sup>  $K_f$ -Werte und Leakagekoeffizienten sollten allerdings durch Kalibrierung anhand mehrerer, unterschiedlicher Abflusssituationen abgeschätzt werden.

## **Qualmwasser**

Während extremer Hochwasserereignisse steigen die Grundwasserstände in weiten Bereichen des Untersuchungsgebiets über die Geländeoberkante, so dass Grundwasser über Fehlstellen in der Deckschicht an die Oberfläche dringt. Dieses Qualmwasser kann oberflächlich abfließen und wird zum Teil über das Grabensystem abgeführt, zum Teil in Mulden gespeichert. Diese Mulden können allerdings nur eine bestimmte Wassermenge aufnehmen bevor sie überlaufen. In der Abfolge eines Hochwasserereignisses steigt daher der Anteil des Qualmwassers, das dem Grabensystem zufließt. Die Mulden wirken dabei wie ein Speicher, der einen Anteil des austretenden Qualmwassers zurückhält und damit die hydraulische Belastung des Grabensystems, des Schöpfwerks und der Löcknitz abdämpft und vermindert.

Für die Untersuchung des Wasseranfalls wird von dem extremen Fall ausgegangen, dass zur Zeit des Hochwasserscheitels, der für die Bemessung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Vorflut maßgeblich ist, der Mulden-Speicher gefüllt ist und das komplette Qualmwasser den Gräben zufließt. Ein Wasserrückhalt wird damit nicht berücksichtigt, womit die abzuführenden Wassermengen zur Zeit eines Hochwasserscheitels - auf der sicheren Seite liegend - überschätzt werden.

## **Niederschlag**

Auch Regenwasser kann oberflächlich dem Grabensystem zufließen. Dieser Anteil hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Bei Hochwasser dürfte dieser Anteil hoch sein, da die erhöhten Grundwasserstände eine hohe Bodensättigung bedingen, wodurch die Infiltrationsneigung erheblich herabgesetzt wird. Darüber hinaus sind erhebliche Flächenanteile bereits mit Qualmwasser gefüllt, so dass der hier auffallende Niederschlag oberflächenwirksam ist.

Mit der Rückdeichung wird die zu entwässernde Fläche und damit die anfallende Niederschlagsmenge reduziert. Als Folge sinkt die hydraulische Belastung des Grabensystems hinter dem neuen Deich durch Niederschläge. Die Fragestellung nach einer möglichen Überlastung bei extremen Bedingungen wird als „worst case“ durchgeführt und daher wird der geringere Anteil aus Niederschlag nicht berücksichtigt.

## **Exfiltration des Grundwassers in das Grabensystem und in die Löcknitz**

Das Grundwasser, das in das Grabensystem exfiltriert, führt zu einer direkten Zunahme der Wassermengen, die später die Löcknitz und das Schöpfwerk Gaarz hydraulisch belasten.

Um die Veränderung der hydraulischen Belastung der Löcknitz und anfallende Wassermengen am Schöpfwerk Gaarz infolge einer Deichrückverlegung abzuschätzen, werden die Leakagewassermengen des flächigen Qualmwasseraustritts, des Grabensystems und der Löcknitz bilanziert. Der Niederschlag wird nicht berücksichtigt, da es sich beim Vergleich zweier Varianten quasi heraus kürzt und zudem die Rückdeichungsvariante eine geringere beitragende Fläche aufweist, die das Saldo begünstigt. Es werden auf Grundlage des numerischen Grundwassermodells zwei verschiedene Hochwasserereignisse untersucht: das Hochwasser im März 1999, welches im Messzeitraum stattgefunden hat, und das im April 1988, bei dem die maximalen Abflüsse in der Elbe im Beobachtungszeitraum zwischen den Jahren 1964-1999 erreicht wurden. Im März 1999 hatte die Elbe einen Abfluss von etwa 2700 m<sup>3</sup>/s, das etwa einem Hochwasserjährlichkeit von 7 Jahren entspricht. Das Hochwasser im April 1988 erreichte den Abfluss von 3250 m<sup>3</sup>/s, dies entspricht einer Jährlichkeit von über 50 Jahren.

Bei dem Vergleich der anfallenden Wassermengen zeigt sich, dass der Wasseranfall nach Rückdeichung wenig ansteigt. Für das Hochwasser am 15. März 1999 beträgt die Differenz 7 % (Variante 1: 2,46 m<sup>3</sup>/s) am 4. April 1988 ergibt sich eine Differenz von 5% (Variante 1: 3,30 m<sup>3</sup>/s). Bei dem etwa 50igjährige Hochwasser vom April 1988 erhöht sich somit die hydraulische Belastung um lediglich 0,17 m<sup>3</sup>/s infolge Rückdeichung. Während der Hochwasserperiode würde sich der Wasserspiegel der Löcknitz (bei Annahme eines Fließquerschnitt wie bei Wustrow) um weniger als 2 cm erhöhen. Eine Auswirkung auf das Abflussverhalten der Löcknitz oder auf die von der Löcknitz kontrollierten Grundwasserspiegellagen ist nicht zu erwarten.

Dass sich die Leakagewassermengen infolge Deichrückverlegung kaum ändern, ist durchaus konsistent mit den in Kapitel 7.4.2 und 7.4.4 dargestellten Ergebnissen. Bei den räumlichen Darstellungen hoher Grundwasserpotentiale zeigt sich, dass sich die höchsten Potentiale direkt hinter dem jeweiligen Deich einstellen. In diesem Bereich kommt es zu den größten Exfiltrationsmengen über Qualmwasseraustritt und über die dort angelegten Gräben. Die Verkürzung des Abstandes zur Löcknitz ist hingegen von untergeordneter Bedeutung, die Breite dieser Einflusszone ist hiervon unabhängig.

Auch der Betrieb des Schöpfwerk Gaarz wird durch einen solchen Mehranfall nicht beeinflusst. Nach einer ersten Stellungnahme des Wasser und Bodenverbandes Lenzen ist eine Erhöhung des Wasseranfalls im Rahmen der oben prognostizierten Größenordnung unbedenklich, zumal das Untersuchungsgebiet nur ein Teil des Einzugsgebietes des Schöpfwerk Gaarz ausmacht. Bei dem Hochwasser im März 1999 war beispielsweise die vollständige Pumpenleistung nicht erforderlich (persönliche Mitteilung: Schulz; Wasser- und Bodenverband Lenzen; 2000).

Eine Möglichkeit zur Verifizierung dieser auf Modellberechnungen beruhenden Prognosen bietet das Hochwasser im März 2000. Durch die Einstellung der Regulierungsorgane wurde am 22.3.2000 aus-

---

schließlich der Winterpolder<sup>10</sup> abgepumpt. Die Pumpleistung betrug durchgehend 2,2 m<sup>3</sup>/s, wodurch sich das anfallende Qualm- und Niederschlagswasser aus diesem Gebiet quantifizieren lässt (persönliche Mitteilung: Schulz; Wasser- und Bodenverband Lenzen; 2000). Das Untersuchungsgebiet (Polder 2) wurde an diesem Zeitpunkt komplett in die Löcknitz entwässert. Nach überschlägiger Schätzung von Herrn Schultz vom Wasserbodenverband hat der Winterpolder etwa die doppelte Qualmwasserabflussmenge wie das Projektgebiet. Demnach dürfte die tatsächliche Abflussmenge aus dem Projektgebiet etwa 1,1 m<sup>3</sup>/s betragen. Diese Beobachtungen sind von großem Wert für eine Einschätzung der Modellzuverlässigkeit, so betreffen sie flächenbezogene Fließraten. Bei der Modelkalibrierung fanden dagegen lediglich Wasserstände Berücksichtigung.

Der Beobachtungszeitraum wurde bei der Modellierung nicht erfasst, allerdings herrschte am 10.3.1999 in der Elbe annähernd der gleiche Abfluss von etwa 2560 m<sup>3</sup>/s und ergab somit in etwa den gleichen Wasserstand wie am 22.3.2000. Nach den Modellberechnungen der Leakageraten am 10.3.99 liegt der Beitrag aus Qualmwasser und Grabensystem bei 2,3 m<sup>3</sup>/s. Wenn man die Differenz zu dem aus dem Pumpversuch geschätztem Wert von 1,1 m<sup>3</sup>/s heranzieht, verbleibenden 1,2 m<sup>3</sup>/s. Rechnet man diese Rate auf die kartierten Überflutungsflächen um, würde es zu einer Wasserspiegelhebung von 67 mm an diesem Tag kommen. Die Modellergebnisse sind plausibel und stimmen darüber hinaus sehr gut mit den beobachteten Abflussraten aus dem Gebiet überein.

#### 7.4.6 Interpretation der durchgeführten Szenarienberechnung auf andere mögliche Varianten einer Deichrückverlegung

Durch die Szenarienberechnung wurde für die mittlere Rückdeichungsvariante eine Grundwasserprognose durchgeführt. Der Vergleich der Variante mit dem aktuellen Zustand zeigt, dass die Auswirkungen einer Rückdeichung besonders bei Hochwasser signifikant sind.

Bei Niedrigwasser in der Elbe macht sich die Abtrennung der ausgedeichten Gebiete von dem Bewässerungssystem durch geringere Grundwasserpotentiale bemerkbar. Auch unter Mittelwasserbedingungen bewirkt eine Rückdeichung keine Änderungen des Grundwassers, lediglich die Flutrinnen beeinflussen die Grundwasserpotentiale in ihrer Umgebung. In ihnen stellt sich ein freier Wasserspiegel ein. Durch zeitgleiche In- und Exfiltration werden Grundwasserpotentialgradienten ausgeglichen. Sie wirken damit als bevorzugte Fließpfade. Durch die besondere Überflutungsdynamik des neuen

---

<sup>10</sup> Der Winterpolder (Polder 1) beginnt westlich von Lenzen. Das Untersuchungsgebiet wird als Polder 2 bezeichnet. Das Einzugsgebiet des Schöpfwerkes besteht aus diesen beiden Poldern.

Deichvorlandes werden besonders die westlichen Flutrinnen häufig geflutet und infiltrieren darauf noch lange nach der Flutung ins Grundwasser. Dies bedingt erhöhte mittlere Grundwasserpotentiale im Bereich der häufig gefüllten Flutrinnen im westlichen Vordeichland.

Große Veränderungen in den Grundwasserpotentialen treten auf, sobald das neue Deichvorland überflutet wird und damit Oberflächenwasser direkt an der neuen rückgelegten Deichlinie in den Aquifer eindringt. Es werden die Grundwasserpotentiale hinter dem Deich soweit angehoben, daß es in diesem Bereich zu Exfiltration in das Grabensystem und zu Qualmwasseraustritt kommt. Dabei entspannt sich der Aquifer soweit, dass die Grundwasserpotentiale im Bereich der Löcknitz nicht ansteigen und somit die Verkürzung der Strecke zwischen Elbe und Löcknitz nicht zu einer Erhöhung der Deichunterströmung beiträgt. Nach abschätzendem Vergleich der Wasserbilanzen lässt sich für die im Szenario getroffenen Annahmen keine wesentliche Veränderung feststellen.

Diese Ergebnisse lassen sich qualitativ auch auf die große Rückdeichungsvariante übertragen. Im Bereich dieser Deichtrasse ist die Deckschicht ähnlich stark ausgebildet, jedoch nimmt die Deichlänge zu, was zu einem proportionalen Anstieg der anfallenden Wassermengen bei gleichen hydrogeologischen Gegebenheiten führt. Mit der Rückverlegung des Deichs verschiebt sich auch die Fläche des potentiellen Qualmwasseraustritts. Mit einer Flächenzunahme dieses Bereiches ist bei einem ähnlich ausgebildeten Entwässerungsgraben hinter dem Deich nicht zu rechnen.

Generell lassen sich mit der Ausbildung der Gräben hinter dem Deich die Qualmwasserzonen verringern. Dabei können durch einen entsprechend ausgebildeten Graben die Grundwasserpotentiale soweit abgesenkt werden, dass sich der Qualmwasseraustritt hinter dem Graben weitestgehend unterbinden lässt. Dabei erhöhen sich allerdings überproportional die anfallenden Wassermengen und die Belastung der Löcknitz, des nachfolgenden Grabensystems und des Schöpfwerks Gaarz.

Im Gegenzug können die Wassermengen verringert werden, indem die Flutrinnen möglichst weit von dem Deich entfernt ausgehoben werden und Bereiche mit schwacher Deckschicht direkt vor dem Deich verstärkt werden, um damit die Fließzeiten des Grundwassers zu verlängern.

## **8 Bewertung der Modellergebnisse**

Jede Modellierung eines natürlichen Systems beinhaltet, wie bereits oben dargestellt, eine Reihe von Unsicherheiten. Zum einen sind die in die Berechnung eingehenden Naturmessungen fehlerhaft, zum anderen stellt das Modell aufgrund der beschriebenen vereinfachten Annahmen und Approximationen nur eine Näherung der Natur dar. Es ist durchaus möglich, mit gut geeichten Modellen sehr mangelhafte Prognosen zu berechnen (Kinzelbach, 1995). Dies tritt vor allem auf, wenn der Prognosefall im Vergleich zum Kalibrierungszustand sehr unterschiedliche hydraulische Bedingungen beinhaltet.