

Brandenburgische Geowiss. Beitr.	Kleinmachnow	7(2000), 1/2	S. 41–52	9 Abb., 2 Tab., 8 Lit.
----------------------------------	--------------	--------------	----------	------------------------

# Prognose des Salzwasseraufstiegs im pleistozänen Grundwasserleiterkomplex eines geplanten Wasserwerkes im Land Brandenburg – Grundwassermodelle und hydrogeochemische Untersuchungen

A. GRUBE, A. HERMSDORF, M. LANG, B. RECHLIN, W. SCHNEIDER & K. WICHMANN

## 1. Einleitung

Die geogene Versalzung der Grundwasservorräte spielt in weiten Teilen Norddeutschlands eine zunehmend größere Rolle und stellt eine Gefahr für die dauerhafte Nutzung von Grundwasser (Gw) dar. Durch die Nutzung versalzungsgefährdeter tertiärer oder pleistozäner GwLeiter können Wasserwerksbetreiber zur Aufgabe von Brunnen oder ganzer Brunnenfassungen gezwungen sein, da sich Salzwasser mit konventionellen Aufbereitungsverfahren nicht entfernen lässt. Geogene Quellen der Versalzung sind die Ablaugung der in Norddeutschland bis in die Nähe der Erdoberfläche aufdringenden Salzstöcke, der Tiefenwasseraufstieg und die Intrusion von Meerwasser an den Küsten. Diese natürlichen Prozesse werden durch die GwGewinnung und durch künstliche Entwässerungsmaßnahmen verstärkt.

In der Praxis fehlt es häufig an Möglichkeiten zur Prognose der Entwicklung von Salzwasserbewegungen. Die hier vorgestellte Studie (ARBEITSGRUPPE GRUNDWASSERVERSALZUNG GROSSBEUTHEN 1999) wurde vom Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB) angeregt und vom Landesumweltamt Brandenburg (LUAB) finanziert. Sie hatte zum Ziel, die komplexen hydrogeologischen Gegebenheiten Brandenburgs prototypisch am Standort des geplanten Wasserwerkes Großbeuthen in Bezug auf eine mögliche Salzwassergefährdung mit hydrogeochemischen Methoden und GwModellen zu simulieren. Im Vordergrund der Untersuchungen standen dabei der Test und die Bewertung der Einsetzbarkeit wichtiger Methoden sowie die Abschätzung von Jahreshöchstfördermengen.

## 2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Das GwSystem im Untersuchungsgebiet kann aufgrund des komplexen Aufbaus des Untergrundes nicht durch analytische Modelle realitätsnah beschrieben werden. Deshalb wurden in der vorliegenden Studie numerische Modelle eingesetzt. GwStrömungen sind prinzipiell ein dreidimensionales Phänomen. Dies gilt insbesondere für die Strömung im Nahfeld von Förderbrunnen. Für die grundsätzliche Nachbildung des natürlichen GwSystems wurde deshalb zunächst ein dreidimensionales (3D) Strömungsmodell aufgebaut. Aufgrund der Datenlage wurde dieses Modell auf den pleistozänen Hauptgrundwasserleiter beschränkt. Das auf dieser Grundlage entwickelte und kalibrierte Strömungsmodell diente dann

als Basis für ein 3D-Stofftransportmodell. Mit diesem wurden Szenarien angenommener Salzwasserquellen gerechnet und die maximal möglichen Fördermengen abgeschätzt.

Sofern eine instabile Schichtung von Süß- und Salzwasser vorliegt, wird die GwStrömung bereits bei Dichteunterschieden von wenigen Promille durch dichteinduzierte Bewegungen beeinflusst. Die nichtlinearen Terme in den Transportgleichungen bedingen einen extrem hohen Rechenaufwand, der bis heute für praktische Aufgabenstellungen im Geländemaßstab in der Regel nur 2D-Modelle ermöglicht. Der in der vorliegenden Studie verwendete Ansatz besteht darin, aufbauend auf dem entwickelten 3D-Strömungsmodell an geeigneten Positionen vertikale Schnittebenen festzulegen. Das Strömungsfeld in diesen Vertikalschnitten wird dann mit einem dichteabhängigen 2D-Modell simuliert. Für folgende Einflussgrößen wurden Sensitivitätsstudien zur Bestimmung des Einflusses des Dichteeffektes auf den Salzwasseraufstieg unter Berücksichtigung der Druckentlastung eines Vorfluters untersucht: Konzentration und Zufluss der Salzquelle sowie Dispersivität. Auf diese Weise werden Bedingungen ermittelt, unter denen der Dichteeffekt vernachlässigbar ist und somit die Programme MODFLOW / MT3D eingesetzt werden können.

## 3. Gebietsbeschreibung

### 3.1 Geologische und hydrogeologische Verhältnisse

Das Untersuchungsgebiet liegt im Landkreis Teltow-Fläming des Landes Brandenburg, südlich von Berlin und umfasst ca. 100 km<sup>2</sup>. Der Bereich gehört zum hydraulischen Einzugsgebiet der Nuthe. Morphologisch ist der Betrachtungsraum durch die Teltow-Hochfläche (zwischen 40-45 m NN) sowie Hochflächenreste (Löwendorfer und Glauer Berge mit > 70 m NN) und durch die Nutheniederung (Ø 35 m NN) geprägt. Geologisch ist dieses Gebiet als Teil des Jungmoränengebietes (HERMSDORF, N 1995) das Ergebnis von Gletscherdynamik und glaziärer Erosions- und Akkumulationsprozesse der letzten Vereisung mit nachfolgender periglaziärer Überprägung und spätglazialer bis holozäner Talentwicklung. Der tiefere Untergrund ist durch Bohrungen weiträumig erkundet. Geophysikalisch lässt sich der Rupelton an der Basis (ca. -100 mNN) einer mächtigen känozoischen Schichtenfolge erkennen. Fehlstellen im Rupelton sind östlich von Thyrow und im Bereich des Salzstockes Blankensee nachgewiesen.



In der Regel besteht im Tal ein aufwärts gerichteter Druckgradient vom GWLK 2 zum GWLK 1. Im Hochflächenbereich ist ein abwärts gerichteter Druckgradient ausgebildet.

Im Gebiet fördern zwei kleine Wasserwerke (Abb. 1), die jedoch auf Grund ihrer geringen Förderleistung (< 60.000 m<sup>3</sup>/a) keinen signifikanten Einfluss auf die GwHydraulik des Gebietes besitzen. Für die geplante Wasserfassung Großbeuthen ist eine Fördermenge von zunächst ca. 2,2 Mio. m<sup>3</sup>/a (ca. 6.000 m<sup>3</sup>/d) vorgesehen.

### 3.2 Hydrogeochemische Situation

Aus älteren Ergebnisberichten sind bereits geogen-salinare Beeinflussungen der GwBeschaffenheit im Untersuchungsgebiet bzw. dessen direkter Umgebung (Bereich Märkisch-Wilmersdorf) bekannt. Dabei handelt es sich um Versalzungen, die zum einen mit dem Diapir Blankensee im Zusammenhang stehen und bis in oberflächennahe GwLeiter reichen (Nuthetal-Grössinsee-Gröbener See) und die zum anderen durch Rupeltonfehlstellen und begünstigende hydraulische Bedingungen das Eindringen hoch mineralisierter Tiefenwässer in pleistozäne GwLeiter ermöglichen.

Räumlich wurden für die Salzwasserquellen drei verschiedene Bereiche festgelegt:

- (1) Eine flächenhafte Versalzung im Nordwesten mit Chlorid-Konzentrationen > 2.000 mg/l im GWLK 2;
- (2) Die GwVersalzung im Liegenden der geplanten GwFassung (Messstelle 102/86). Diese entspricht nach dem hydrogeochemisch-genetischen Bild den Prärupelgrundwässern. Die Wässer wurden nur in dem liegenden GwLeiter angetroffen und lassen sich bisher nicht im Beschaffenheitsbild des unteren Teils des nutzbaren Hauptgrundwasserleiters nachweisen.
- (3) Die Rupeltonfehlstelle im NE von Thyrow, die im hydrogeochemischen Bild des Bereichs noch nicht nachweisbar ist, wurde durch die Arbeitsgruppe Kassel bearbeitet (VOSS & KOCH 2000).

## 4. Methodik

### 4.1 Dichteunabhängige Modellrechnungen mit MODFLOW / MT3D

Das 3D-Stofftransportmodell basiert auf einem 3D-Strömungsmodell des Hauptgrundwasserleiters. Es wurde das Programm PROCESSING MODFLOW 5.0 (PM5; CHIANG & KINZELBACH 1998) verwendet, welches auf dem Programm MODFLOW (Mc DONALD & HARBAUGH 1988) basiert. Zur Stofftransport-Modellierung wurde das Modell MT3D<sup>2D</sup> (ZHENG 1998) eingesetzt.

Das Modellnetz des erstellten Strömungsmodells umfasst 112.320 Zellen (100 x 100 m). Das GwLeitersystem wurde in 9 Modellschichten unterteilt (Abb. 2). Diese Differenzierung wurde vorgenommen, um die vertikale Ausdehnung der Brunnenfilter abzubilden sowie die numerische Dispersion bei der Stofftransport-Modellierung zu verringern. Modellschicht 9 wurde ausschließlich zur Abbildung eines Salzwasserzustroms mittels Cauchy-Randbedingung (General Head Boundary - Zustromrandbedingungen) vorgesehen.

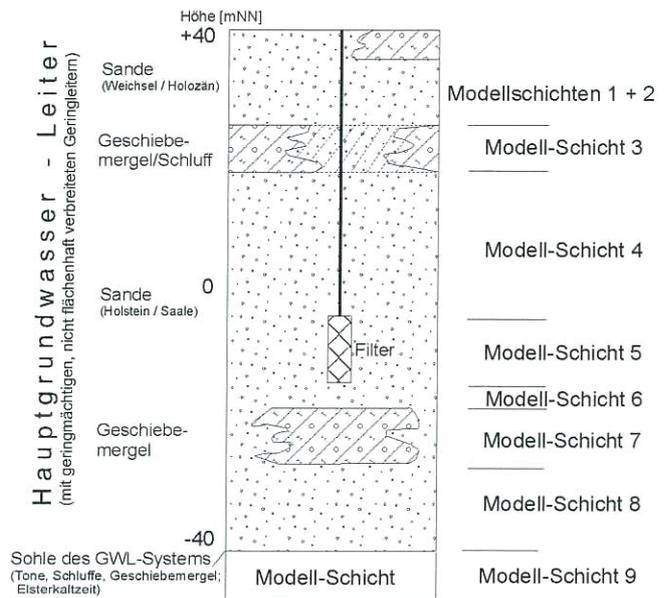


Abb. 2 Vereinfachter Aufbau des GwLeitersystems und Aufteilung in Modellschichten

Zunächst konnte ein GwGleichenplan auf der Datenbasis des LGRB vom Juli 1998, ergänzt durch weitere Daten des LUAB, erstellt werden. Bei Grundwassermessstellen (GWM), die sich im Salzwasser befinden, ist für das Potential nicht nur die Standrohrspiegelhöhe, sondern auch die mittlere Dichte der Wassersäule in der GWM maßgebend. Für das Untersuchungsgebiet Großbeuthen wurde für die im Versalzungsgebiet liegenden GWM der äquivalente Süßwasserspiegel bestimmt. Hierbei ergab sich ein mittlerer Korrekturwert von 0,03 m. Die in MehrfachGWM nachgewiesenen vertikalen Potentialdifferenzen sind relativ gering. Zudem bewirkt die Fehlstelle im Geringleiter einen flächenhaften hydraulischen Kontakt, so dass der Vorfluter Nuthe auch auf den unteren GwLeiter einen wesentlichen hydraulischen Einfluss hat. Deshalb wurde ein einheitlich für alle Modellschichten angenommener GwGleichenplan (Abb. 4) verwendet. Die Hauptvorfluter im Untersuchungsgebiet, d.h. Nuthe, Nuthegraben und Neuer Graben, wurden mittels des River Package (Erweiterung im PM5 zur Modellierung von Vorflutern) nachgebildet.

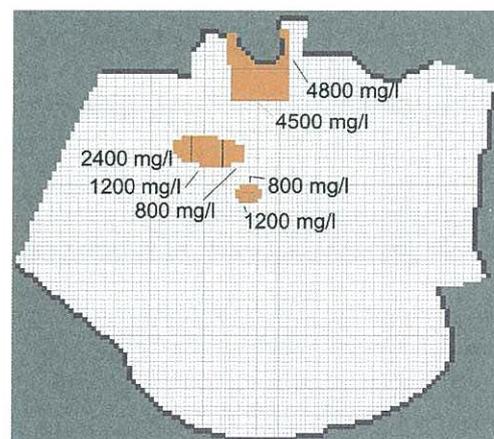


Abb. 3 Eingangskonzentrationen in den Modellschichten 8 und 9

Um die Salzwasserquellen im Liegenden und westlich der geplanten Wasserfassung abbilden zu können, wurden Cauchy-Randbedingungen definiert. Die hierfür zugrunde liegenden Daten sind den hydrogeologischen Profilen entnommen bzw. während der Modellkalibrierung ermittelt worden. Die Randpotentiale für die potentiellen Salzwasserquellen ("Quelle 2", Abschnitt 3.2) unter der geplanten Wasserfassung wurden so gewählt, dass im Systemzustand ohne GwFörderung nur ein geringer Zustrom (513 m<sup>3</sup>/d) erfolgt. Die verwendete Querkonzentration wurde bei der Modellkalibrierung (Abb. 3) festgelegt. Die im Norden des Untersuchungsgebietes nachgewiesene Versalzung wurde aus modelltechnischen Gründen über eine Festkonzentrations-Randbedingung in der 8. Modellschicht abgebildet.

de  $k_{fH}/k_{fV} = 10$  und für die effektive Porosität ein Wert von 0,15 verwendet. Für die berechneten GwGleichen mussten durch Variation die  $k_f$ -Werte an den gemessenen GwGleichenplan angepasst werden. Die Güte der Kalibrierung scheint insgesamt befriedigend zu sein, die mittlere Abweichung der gemessenen von den berechneten Potentialen beträgt für den oberen Bereich des GwLeiters 0,10 m. Für die hydrodynamische Dispersion liegen keine Geländedaten vor, so dass auf Richtwerte aus der Literatur zurückgegriffen wurde. Während der Kalibrierung des Stofftransportmodells erfolgte eine Variation der Dispersionswerte, um die gemessenen Salzkonzentrationen nachbilden zu können. Für die Kalibrierung wurde schließlich ein Wert von 15 m für die longitudinale Dispersivität eingesetzt.

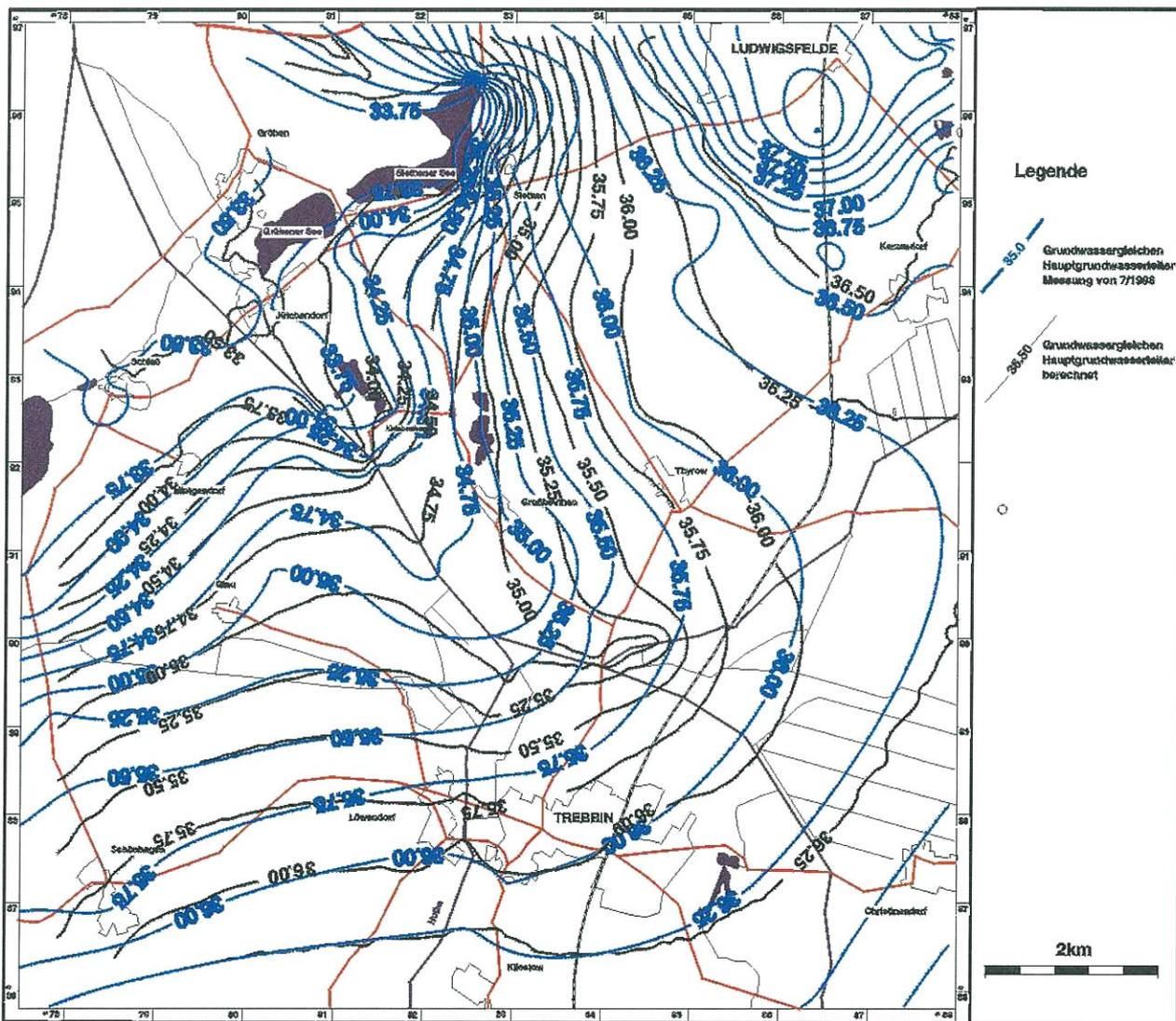


Abb. 4 Aus Messdaten interpolierte und berechnete Grundwassergleichen ohne Förderung

Als Orientierungshilfen bei der Kalibrierung dienen Wasserbilanzen des Gesamtsystems, von Teilgebieten und des Vorfluters. Die angesetzten GwNeubildungswerte sind als relativ niedrig einzustufen und führen zu einer konservativen Abschätzung des Salzwasseraufstiegs. Durchlässigkeitsbeiwerte (Berechnung nach BEYER) lagen aus den geologischen Erkundungen des Bereiches vor. Als Anisotropiefaktor wur-

#### 4.2 Interpretation und vergleichende Bewertung der hydrogeochemischen Befunde mit den Grundwassermodellrechnungen

Basierend auf entsprechend hydrogeologisch angelegten Schnitten konnte für den Betrachtungsraum ein Überblick der hydrogeochemischen Entwicklung bzw. genetischen

Herkunft der Grundwässer erarbeitet werden. Zur Charakterisierung der Grundwässer und zur Gefährdungsabschätzung des Salzwasseraufstiegs wurden vergleichsweise das Genesemodell des LGRB (RECHLIN 1997) mit weiteren hydrogeochemischen Bewertungsmethoden (WANDTScher Härtequotient, PIPER-Diagramm) eingesetzt. Die Probenahme erfolgte an 27 GW, in 4 Wasserwerken und an 5 Punkten der Vorfluter in mehreren Beprobungskampagnen, wobei über 150 Wasserproben gewonnen wurden. Aufgrund der Position der vorhandenen GW bestand nur bedingt die Möglichkeit, die hydrogeochemischen Schnitte des LGRB parallel der Stromlinien zu legen, so dass ein Vergleich dieser Ergebnisse mit denen aus der modelltechnischen Auswertung nur partiell gelang, da im Strömungsmodell Schnitte nur entlang von Modellspalten oder Modellreihen gelegt werden können.

### 4.3 Dichteabhängige Modellrechnungen mit SUTRA

Für die Süß-/Salzwassermodellierung liegen verschiedene dichteabhängige Programme vor (FEIN 1991). Die im Folgenden beschriebenen Modellrechnungen wurde mit dem Finite-Elemente (FE)-Programm SUTRA (VOSS 1984) durchgeführt.

Anhand der folgenden Sensitivitätsstudie wurden Bedingungen ermittelt, unter denen der Dichteeinfluss auf den Salztransport vernachlässigbar ist. Weiterhin wurde der Einfluss der hydrodynamischen Dispersion auf den Salztransport untersucht. Hierfür war ein schematisches Vertikalschnitt-Modell erforderlich, welches die im Bereich der geplanten Wasserfassung Großbeuthen bestehende Druckentlastung durch den Vorfluter Nuthe abbildet.

Da die Vorfluteranströmung symmetrisch erfolgt, reicht es aus, eine Schnitthälfte bis zur Symmetrieachse zu betrachten. Die Symmetriestromfläche sowie die Sohle des GwLeiters sind als undurchlässiger Rand (NEUMANN-Randbedingung) definiert. Der im mittleren Bereich der GwLeitersohle angeordnete Zustromrand stellt die Salzwasserquelle dar. Am rechten Modellrand ist ein hydrostatisches Festpotential (DIRICHLET-Randbedingung) angesetzt. Der Vorfluter wird durch eine einzelne Festpotential-Modellzelle abgebildet, deren Wert 0,3 m unterhalb des hydrostatischen Festpotentials liegt. Der Salzwasserzustrom am unteren Modellrand wurde über einen Bereich von 20 m Länge fest vorgegeben und mit einer Zustromrate von  $2,7 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{s} \times \text{m}^2)$  belegt. Es erfolgten Vergleichsrechnungen mit um den Faktor 2, 4 und 10 erhöhten Zustromraten. Als weitere Variante der Salzquelle ist der diffusive Salzeintrag aus einem Salzwasserreservoir im Liegenden möglich. Diese Situation wurde in einer Vergleichsrechnung mittels einer Festkonzentrations-Randbedingung am unteren Modellrand über einen Bereich von 20 m abgebildet. Die GwNeubildung beträgt auf einer Länge von 105 m am oberen Modellrand  $3,17 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{s} \times \text{m}^2) = 100 \text{ mm/a}$ .

Bei der numerischen Lösung mit FE-Verfahren können numerische Dispersion sowie Oszillationen auftreten. Numerische Dispersion ist eine durch zu grobe räumliche Diskretisierung verursachte scheinbare Durchmischung. Sofern die Gitterabstände deutlich größer als die Dispersivitätswerte sind, gewinnt die numerische Dispersion an Einfluss. Hieraus ergibt

sich als Anforderung an die Diskretisierung des Modellgebietes, dass das PECLLET-Kriterium sowie für die zeitliche Diskretisierung das COURANT-Kriterium erfüllt sind. Die Diskretisierung des FE-Gitters erfolgte in viereckigen Flächenelementen mit einer Länge von 5 m in  $x$ -Richtung und 0,5 m in  $y$ -Richtung bei einer Gitterausdehnung von 120 m in  $x$ -Richtung und 60 m in  $y$ -Richtung.

Die folgenden Modellrechnungen zum Salztransport beruhen auf der Simulation eines nicht stationären Modells über einen hinreichend langen Zeitraum (ca. 27 Jahre) bis zu einem quasistationären Zustand. Die Annäherung an einen Gleichgewichtszustand ist daran erkennbar, dass sich die Salzkonzentrationen in den einzelnen Zeitschritten nur noch minimal verändern.

Die Konzentrationsabhängigkeit der Dichte wurde mit  $\text{kg}/\text{m}^3$  angenommen (VOSS & SOUZA 1987).

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Abschätzung der zulässigen Jahreshöchstfördermengen

Generell ist die Angabe von maximalen Jahreshöchstfördermengen einer geplanten Wasserfassung mit Unsicherheiten behaftet, da eine Kalibrierung für den Zustand mit Förderung praktisch nicht möglich ist. Es sind jedoch tendenzielle Aussagen möglich, wenn die natürlichen Verhältnisse ohne GwEntnahme im Modell nachgebildet werden können. Deshalb wurde in einem ersten Schritt eine Kalibrierung auf die hydrogeochemischen Verhältnisse hin durchgeführt. Hierzu wurden die Eingangswerte im Modell so lange variiert, bis nach Beendigung eines Rechenlaufes die berechneten Werte in den verschiedenen Modellschichten den gemessenen Konzentrationen entsprachen. Die Modell-Laufzeiten betragen jeweils 500 Jahre. Aus den hydrogeochemischen Ergebnissen und den Modellrechnungen kann geschlossen werden, dass ein Zutritt von Salzwasser aus einer Fehlstelle im Liegenden der zukünftigen Fassung unter natürlichen Strömungsbedingungen heute im hydrogeochemischen Bild deutlich sichtbar sein müsste. Der Zutritt von Gw aus dem im Bereich der GW Ty 102/86 in einem tieferen GwLeiter angeordneten Salzwasser wurde deshalb im Modell für den nicht durch GwFörderung beeinflussten Zustand gering gehalten.

Praktische Erfahrungen an anderen Wasserwerksstandorten Brandenburgs zeigen, dass bei Aufnahme der Förderung durch die Absenkung der GwPotentiale eine Mobilisierung von Salzwässern aus tieferen GwLeitern erfolgen kann. Die im Modell gewählte Art der Quelle lässt einen Zutritt von Salzwasser in Abhängigkeit von den Förderbedingungen zu. Mittels der verschiedenen Förderszenarien sollte geprüft werden, ob eine vorgesehene Entnahmemenge von ca. 6 000 - 8 000  $\text{m}^3/\text{d}$  ohne Aufsalzung der Wasserfassung möglich ist. Es wurden verschiedene Entnahmemengen für die bestehende Wasserfassungsanlage (Anordnung 1a bis 1c in Abb. 5) sowie für alternative Brunnenstandorte berechnet. Die alternativen Standorte umfassten drei zusätzliche Brunnen im unteren GwLeiterabschnitt der Glauer Berge (Anordnung 2a)

bzw. fünf zusätzliche Flachbrunnen (zusätzlich zu drei eingeschalteten Tiefbrunnen in der vorhandenen Wasserfassung) westlich der Nuthe (Anordnung 2b). Bei der Auswahl alternativer Standorte stand eine bessere flächenhafte Verteilung der Potentialabsenkung bzw. eine erhöhte Entnahme von Uferfiltrat im Vordergrund.

Eine Darstellung der Wasserbilanzen für verschiedene Förderbedingungen ist in Abb. 5 enthalten. Prinzipiell steigt mit der Entnahmemenge der Anteil des Uferfiltrats aus der Nuthe. Demzufolge sinkt die Menge des in die Nuthe exfiltrierenden Wassers. Das bei Förderung zusätzlich in das Modell hinzutretende Nuthe-Wasser kann als minimaler Uferfiltratanteil an der Förderung angesehen werden. Bei höheren Fördermengen steigt der Anteil des aus der Salzwasserquelle im Liegenden der Wasserfassung stammenden Grundwassers. Dieser liegt jedoch weit unter dem des Nuthe-Anteils. Demgegenüber bleiben die Wasserbilanzen für Modellränder und Gw-Neubildung relativ konstant. Aufgrund des fehlenden Gefährdungspotentials wurden bevorzugt die potentiellen Salzwasserzutritte um die Brunnenfassung (Abb. 6) betrachtet.

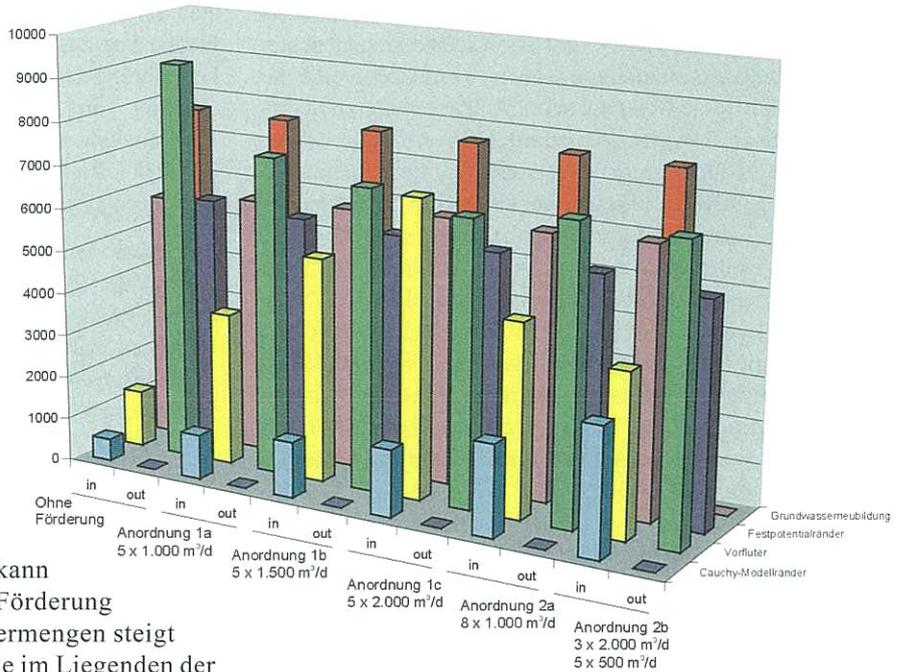


Abb. 5 Zusammenstellung der Wasserbilanzen für einige Förderzustände [m³/d]

Die starke Absenkung der GwPotentiale bei Förderung von 10.000 m³/d führt beispielsweise im Modell zu einem erheblich verstärkten Salzwasserzutritt. Insgesamt stellt die GwVersal-

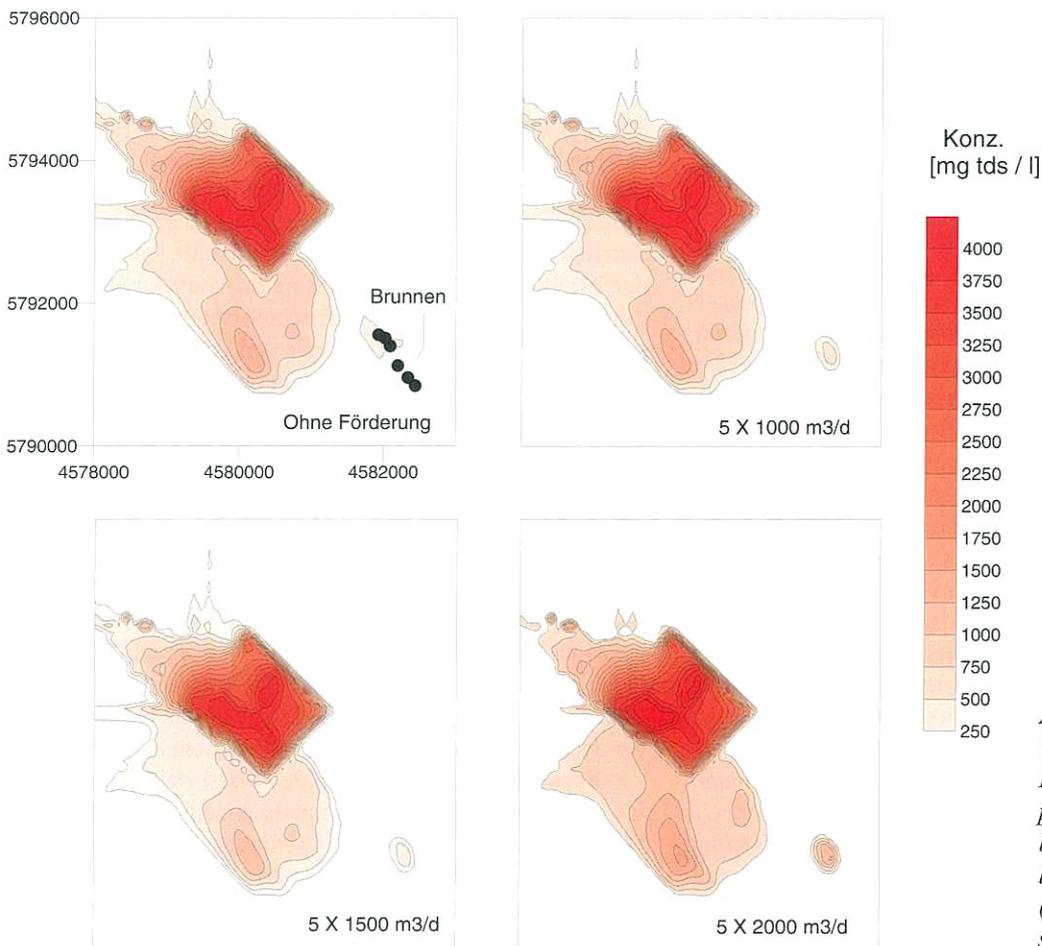


Abb. 6 Veränderung der TDS-Konzentrationen im geplanten Förderhorizont bei verschiedenen simulierten Entnahmemengen (TDS: Eindampfdruckstand)

zung im Nordwesten selbst bei hohen Förderraten von ca. 10 000 m<sup>3</sup>/d keine Gefährdung für die geplante GwFassung in Großbeuthen dar. Es kann eine Förderrate von 5 x 1 500 m<sup>3</sup>/d in der bestehenden Wasserfassung als günstige Variante angesehen werden. Die im Bereich der Brunnenfilter berechneten Konzentrationen sind dann als unkritisch zu betrachten, der Anteil von Gw aus Uferfiltrat beträgt mehr als 1/3 der Gesamtfördermenge und stellt damit eine wichtige Förderreserve dar. Die Berechnung der alternativen Brunnenstandorte erbrachte gegenüber der bestehenden Wasserfassung aufgrund verringerter Anteile an Uferfiltrat am geförderten Gw bzw. dem verstärkten Zutritt von Salzwasser aus der in diesem Bereich angenommenen Quelle keine wesentlichen Vorteile.

**5.2 Interpretation und vergleichende Bewertung der hydrogeochemischen Befunde mit den Modellrechnungen**

Im Ergebnis der vorliegenden Auswertung sind gebietsspezifische genetische GwTypen erkennbar, die sich grundsätzlich auf die im Genesemodell des LGRB (RECHLIN 1997) dar-

gestellten Grundtypen zurückführen lassen. Diese genetischen Ergebnisse wurden den Methoden nach PIPER und WANDT gegenübergestellt, in deren Vergleich zueinander eine bessere Differenzierung der Grundwässer durch die Anwendung des Genesemodells des LGRB festgestellt werden konnte, erkennbar vor allem in der Zuordnung Neubildungs- und geogen-salinar beeinflusster Grundwässer. Im Bereich unterschiedlich Neubildungsgeprägter Grundwässer (Typ 2, 4, 5) lassen sich vorwiegend begründet im Kationenaustausch verschieden lange Aufenthaltszeiten postulieren, die im Genesemodell gut nachvollzogen werden können. Weiterhin bieten entsprechende Ionenverhältnisse bei den hydrogeochemischen Grundtypen (Tab. 2) zusätzliche Hinweise.

Bei der Auswertung der GwAnalytik konnten im Betrachtungsraum folgende genetische Typen (Abb. 7) zugeordnet werden, wobei der Typ 4 einen Mischtyp darstellt:

Tab. 2 Ionenverhältnisse der hydrogeochemischen Grundtypen

LGRB-Genesetyp	GWM	Na/Cl	HCO <sub>3</sub> /SO <sub>4</sub> +Cl	Ca/Na	HCO <sub>3</sub> /Cl	SO <sub>4</sub> /Cl
2	Ty 107/86 OP	1,3	0,98	4,1	3,4	2,4
	Ty 57/74 OP	1,4	1,2	3,8	4,3	2,6
5	Ty 107/87 UP	0,8	1,1	7,4	4,0	2,5
	Ty 110/86 OP	0,4	1,9	10,1	5,3	1,7
6	Ty 108/86 MP2	2,0	6,9	2,9	8,1	0,2
	Lw 28/71 OP	2,8	9,5	2,0	9,6	0,008
7	Ty 108/86 UP	1,1	0,5	0,3	0,5	0,10
	Ty 102/86 UP	1,3	0,7	0,3	0,8	0,14
8	Ty 56/74 UP	1,0	0,05	0,05	0,05	0,09
	Lw 28/71 UP	1,0	0,03	0,01	0,03	0,06

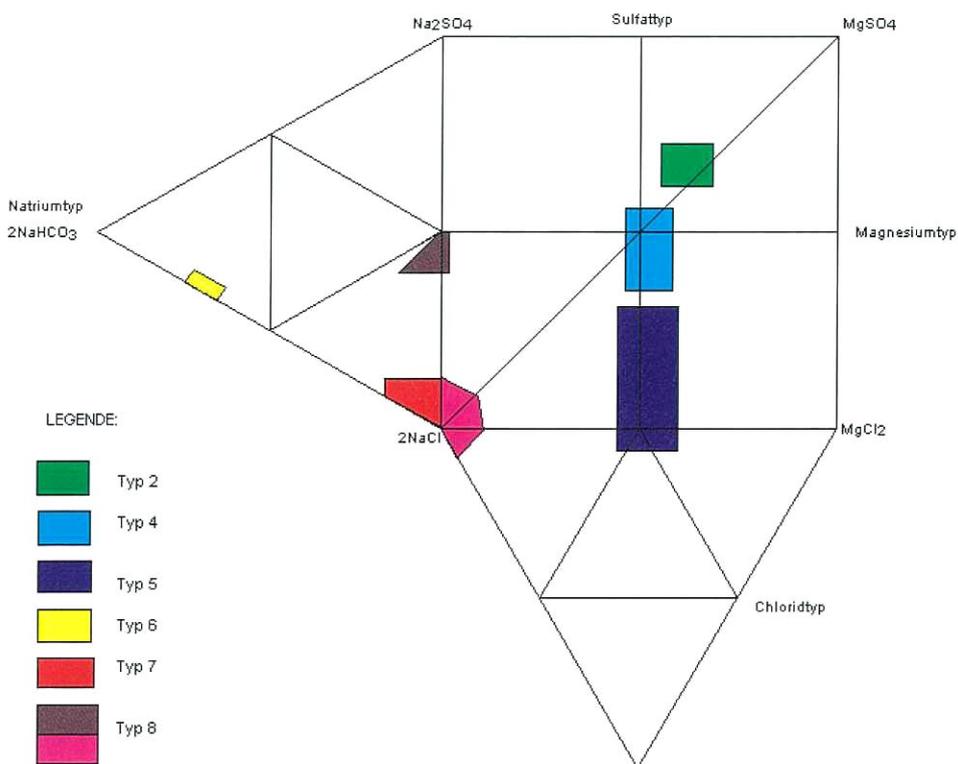


Abb. 7 Gebietsspezifische genetische Typen im Betrachtungsraum (n. Rechlin 1997)

**Typ 2 Sulfattyp:** Wässer der GwNeubildung des ungeschützten GWLK 1 (Ty 107/86 OP). Grundwässer diesen Typs sind erwartungsgemäß im Nuthetal verbreitet.

**Typ 4 Sulfat/Magnesiumtyp:** Wässer im liegenden Bereich des GWLK 1 bzw. im Bereich hydrogeologischer Fenster (Ty 17/74). Es handelt sich hierbei um einen Übergangstyp zwischen Typ 2 und 5, anhand dessen geologische Fenster identifiziert werden können. Im Untersuchungsgebiet sind diese Wässer oft anthropogen überprägt.

**Typ 5 Magnesiumtyp:** Wässer mit längeren Aufenthaltszeiten des meist bedeckten Hauptgrundwasserleiters GWLK 2 (Ty 111 MP). Er tritt hauptsächlich in den GWM des GWLK 2 im Bereich des Teltow-Plateaus, der Glauer Berge sowie des Nuthetals auf. Weiterhin konnte er an den Talrändern im Übergang zur Hochfläche nachgewiesen werden.

**Typ 6 Natriumtyp:** gut geschützte Wässer durch hydraulisch abgeschirmte Verhältnisse und einer eher geringen Grundwasserzirkulation (Lw 28/71 OP). Diese Grundwässer treten im Allgemeinen in den größeren Teufenbereichen (z. B. in Rinnen) mit bereits reduzierendem Milieu auf. Weiterhin ist dieser Typ für Grundwässer im GWLK 1 in Vorflutnähe prägend, die im Zusammenhang mit einer hydraulischen Entlastung eng begrenzte lokale Aufstiegsbahnen unterhalb des Vorfluters markieren. Andererseits kann auch eine holozäne Überdeckung (Moorerden, Torfe) zu einem austauscharmen, sauerstoffreduzierten Milieu führen.

**Typ 7 u. 8 Chloridtyp:** sehr gut geschützte, hoch mineralisierte Tiefenwässer (Ty 108/86 UP, Lw 28 UP, Ty 111/87 UP). Die Wässer des Typs 7 sind häufig an pleistozäne Rinnen mit fehlendem oder mächtigkeitsreduziertem Rupelton gebunden. Durch diese Inhomogenitäten besteht die Möglichkeit des Eindringens salinärer Tiefenwässer in die süßwasserführenden Horizonte des Pleistozäns. Treffen pleistozäne Rinnen und hydraulische Entlastungszonen wie im Untersuchungsgebiet zusammen, können die salzbefrachteten Grundwässer des GWLK 3 (stammend aus dem Prärupel) durch ihren aufwärts gerichteten Druckgradienten bis in Bereiche des Hauptgrundwasserleiters und weiter bis in den GWLK 1 gelangen. Ablaugungswässer des Salzstockes Blankensee können dem **Typ 8** zugeordnet werden. Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung werden diese in chloridisch und sulfatisch geprägte Mischwässer unterschieden. Das sulfatbefrachtete Wasser mit  $\text{SO}_4$ -Konzentrationen  $>200$  mg/l bei einer Überdeckung von ca. 80 m ist in dieser Region bisher nicht als salin角度 Tiefenwasser beschrieben worden. Es kann auf die Ablaugungsprozesse des Gipses des Salzstockes Blankensee zurückgeführt werden, wird aber als relativ immobil oder auch inaktiv für den untersuchten Fassungsstandort beurteilt.

Weitere Ergebnisse im Hinblick auf die Verifizierung des Genesemodells des LGRB konnten anhand der 1999 durchgeführten Tritiumuntersuchungen gewonnen werden (BEDNORZ 1999). Die sich u. a. auf den dargestellten Schnitt (Abb. 8) konzentrierenden Untersuchungen bestätigen Jungwasseranteile im Gw des Typs 2 (Ty 6,11,15/74 sowie 107/86 OP). Weiterhin konnte belegt werden, dass in unmittelbarer Nähe der Nuthe (Ty 104/86 Br, Ty 54/74 OP) durch fehlendes Tritium das Vorhandensein älterer Grundwässer gegeben ist.

## Vergleichende Bewertung

Im Hinblick auf eine geplante GwFörderung sind hauptsächlich der Typ 2 (Gw aus Neubildung), der Typ 5 („ältere“ Grundwässer aus Neubildung) sowie die Typen 7 und 8 (geogen-salinare Beeinflussung) bezüglich Menge und Beschaffenheit von wasserwirtschaftlicher Bedeutung (Abb. 8).

**These 1:** Die Grundwässer des im Modell berücksichtigten Hauptgrundwasserleiters sind im Bereich der Glauer Berge anhand der Lagepunkte im Genesemodell als relativ alte Grundwässer mit längeren Verweilzeiten im Untergrund charakterisiert. Diese These kann anhand des Strömungsmodells gestützt werden. Es sind die seitlich ins Nuthe-Tal zuströmenden Grundwässer sowie die tiefreichende Zirkulation der im Gebiet neu gebildeten Grundwässer erkennbar.

**These 2:** Das in der tieferen Verfilterung der GWM Ty 111/87 auftretende, sulfatisch geprägte Ablaugungswasser steht nach den regionalen geologischen Kenntnissen vermutlich mit dem Salzstock Blankensee in Verbindung und wird als relativ immobil eingestuft. Diese Wässer stellen demzufolge nur dann eine geogene Gefährdung für die Wasserfassung dar, wenn sie durch ungünstige Standortwahl der Brunnen und punktuell hohe Förderleistungen, verbunden mit entsprechenden Absenkungsbeträgen, aktiviert werden. Über die Herkunft der Wässer und deren Entstehung können aufgrund der Konfiguration des Strömungsmodells keine direkten Aussagen gemacht werden. Ein Zutritt der Ablaugungswässer vom Salzstock Blankensee in der tiefen GWM Ty 111/87 erscheint aufgrund der GwGleichen zunächst als unwahrscheinlich. Allerdings können die komplizierten hydrogeologischen Verhältnisse anhand des vorhandenen GWM-Netztes - speziell im Südwesten des Untersuchungsgebietes - nicht gut nachvollzogen werden. Prinzipiell ist eine solche Ausbreitungsvariante für die Salzwässer der Struktur Blankensee jedoch denkbar. In Bezug auf die GwEntnahme in der Brunnenfassung Großbeuthen spielt das allerdings keine Rolle, da die Fließverhältnisse auch bei größeren Fördermengen keine wesentliche Salzwasserausbreitung in Richtung Fassungsgebiet bewirken, wenn eine weitgehend gleichmäßige Entnahme der geplanten Wassermengen realisiert wird.

**These 3:** Das chloridisch geprägte Tiefenwasser der GWM Ty 108/86 UP wird über den Rand der tief angelegten Rinne über eine Rupeltonföhlstelle in das System eingebracht. Es kann genetisch deutlich von den Ablaugungswässern des Salzstockes Blankensee unterschieden werden. Analog zur These 2 kann diese Aussage nicht anhand des Strömungsmodells geklärt werden.

**These 4:** Im Bereich der Nuthe (Ty 107/86 OP) wird das Gw deutlich durch die GwNeubildung beeinflusst. Die GWM Ty 107/86 OP wird aus Nord und Süd von oberflächennahem Gw mit einem hohen Neubildungsanteil angeströmt. Die These kann somit gestützt werden.

**These 5:** Die ebenfalls im ungespannten Gw ausgebauten GWM (Ty 14/74; Ty 17/74; Ty 107/86 UP) deuten auf längere Verweilzeiten im Untergrund hin, wobei die GWM Ty 14/74 (hydrogeologisches Fenster) und die GWM Ty 17/74 zusätzlich aus hangender Zusp eisung beeinflusst werden. Diese Wässer sind deutlich anthropogen belastet. Nach dem

GwStrömungsmodell tritt in den entsprechenden Teufen Gw lateral, von unten (Liegendspeisung) und von oben (Neubildung) zu, so dass die im Genesemodell abgebildete hydrogeochemische Schichtung im GwLeiter - ohne eine genauere Differenzierung der Anteile- prinzipiell gestützt werden kann.

**Vernachlässigbarkeit des Dichteeffektes**

Die Konzentrationsverteilung zeigt nur bei einer Quellkonzentration von  $c_0 = 20.000 \text{ mg/l}$  und relativ kleinen Dispersivitätswerten signifikante Unterschiede in der Salzausbreitung. Das schwerere Salzwasser im unteren Bereich

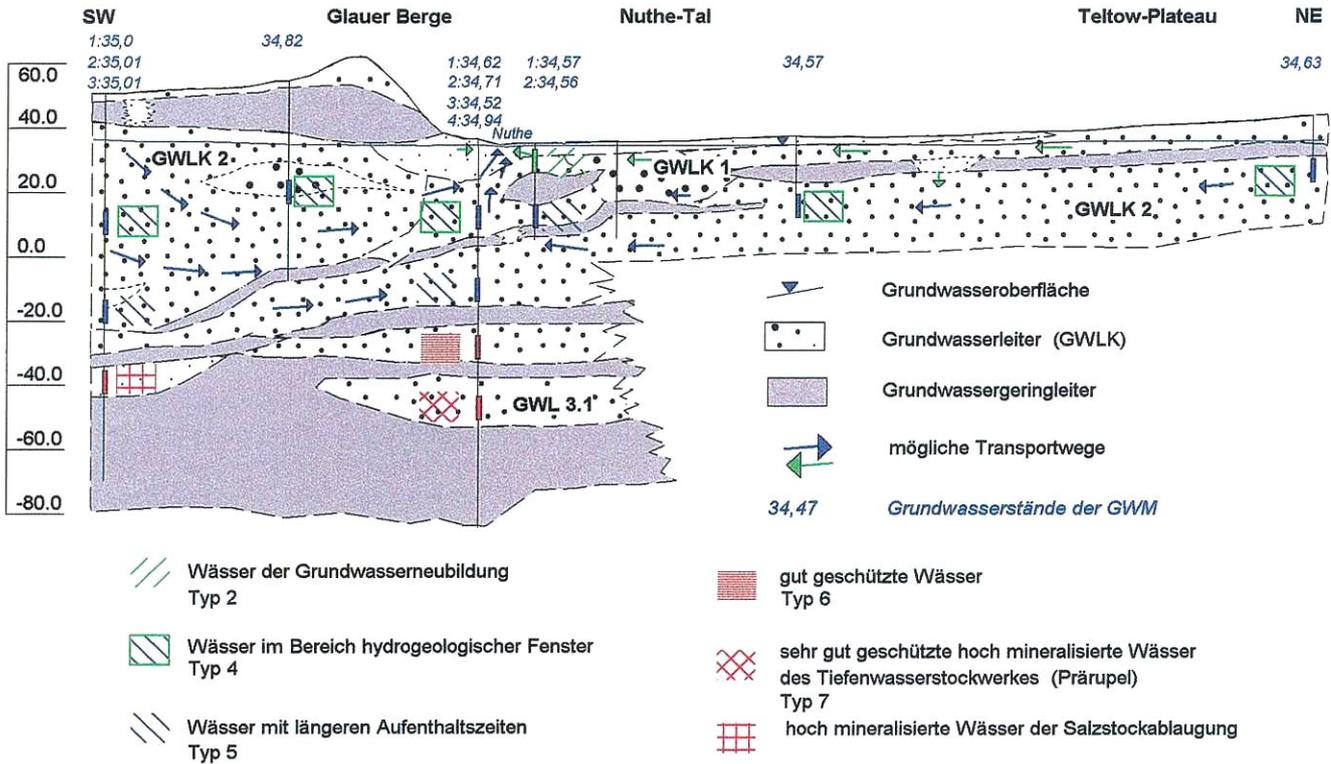


Abb. 8 Hydrogeologisch-hydrogeochemischer Modellschnitt

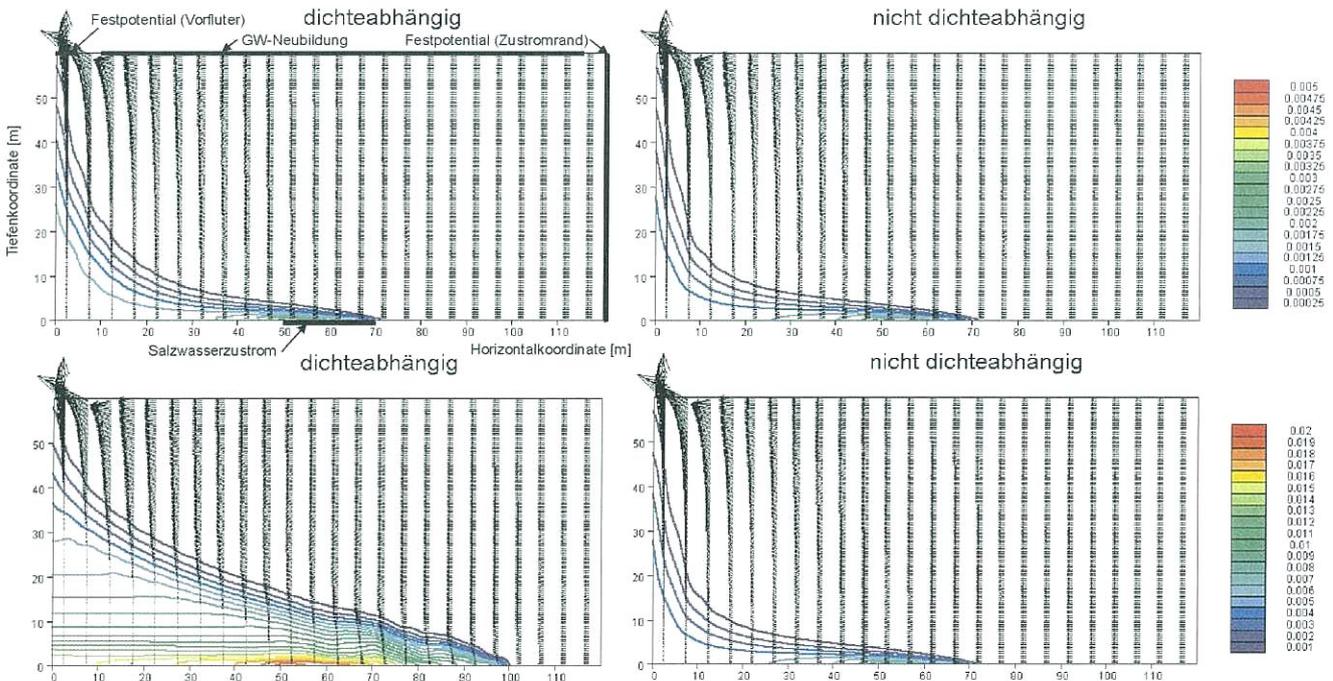


Abb. 9

Ergebnisse der Modellrechnungen mit SUTRA. Dargestellt ist der Vertikalschnitt Isokonzen und Vektordarstellung des Geschwindigkeitsfeldes. Quellkonzentration  $c_0 = 5 \text{ g/l}$  (oben) und  $c_0 = 20 \text{ g/l}$  (unten), Salzwasser-Zustromrate  $q = 2,7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/(s \times \text{m}^2)$ , Dispersivitätswerte  $\alpha_L = 1 \text{ m}$ ;  $\alpha_T = 0,1 \text{ m}$ .

wird vom Süßwasser umströmt, da aufgrund der kleinen Dispersivitätswerte nur eine geringe Durchmischung stattfindet.

Der Dichteeffekt bewirkt grundsätzlich eine Trennung der Salzwasserströmung von der Süßwasserströmung, was sich in einer schärferen Übergangszone zeigt. Dagegen bewirken hohe Dispersivitätswerte eine Mischung von Salzwasser und Süßwasser. In Abhängigkeit von den Konzentrations- und Dispersivitätswerten (Abb. 9) überlagert sich die Wirkung dieser beiden gegensätzlichen Einflüsse. Erst bei Salzkonzentrationen  $\geq 5.000$  mg/l kann der Dichteeffekt der durch Dispersion hervorgerufenen Durchmischung entgegenwirken, so dass sich schärfere Konzentrationsfronten ausbilden. Variationen der Werte für die longitudinale Dispersivität  $a_L$  haben einen geringeren Einfluss auf die Konzentrationsverteilung. Dagegen beeinflussen bereits kleine Änderungen der transversalen Dispersivität  $a_T$  die Konzentrationsverteilung erheblich.

Bei Dispersivitätswerten  $a_L \leq 1$  m stellt sich eine Art 2-Phasen-Strömung ein, bei der im unteren Modellbereich eine Salzwasserströmung und im oberen Bereich eine Süßwasserströmung vorherrscht. Bei einer Dispersivität von  $a_L = 15$  m sowie  $a_T = 1,5$  m und Salzkonzentrationen  $\leq 20.000$  mg/l ist der Dichteeffekt vernachlässigbar. Bei höheren Dispersivitätswerten wird der Dichteinfluss durch die zunehmende Durchmischung überlagert. Bei den dichteabhängigen Modellrechnungen zeigt sich eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit im Salzwasser. Für die in Großbeuthen nachgewiesenen Salzkonzentrationen  $\leq 5.000$  mg/l sind bei  $a_L \geq 5$  m und  $a_T \geq 0,5$  m Modellrechnungen unter Vernachlässigung des Dichteeffektes ohne wesentlichen Genauigkeitsverlust möglich. Messwerte für die Dispersivität liegen für das Untersuchungsgebiet nicht vor. Man kann jedoch davon ausgehen, dass bei dem Betrachtungsmaßstab wesentlich höhere Dispersivitätswerte auftreten.

### **Empfehlungen zur Bewirtschaftung des vorgesehenen Wasserwerksstandortes Großbeuthen**

Nach den bisher vorliegenden Untersuchungsergebnissen kann die geplante Wasserfassung Großbeuthen mit der vorgesehenen Förderleistung von ca. 2,2 Mio. m<sup>3</sup>/a ohne eine Gefährdung durch geogen-salinare Grundwässer betrieben werden. Voraussetzung hierfür ist die Einhaltung stabiler Förderbedingungen; ein entsprechendes Förderkonzept ist für den praktischen Wasserwerksbetrieb zu entwickeln. Die hydraulischen und hydrogeochemischen Bedingungen müssen mit einem angepassten Monitoringkonzept kontinuierlich überwacht werden. Das bestehende GW-Netz ist hierfür grundsätzlich geeignet. Als Indikator für einen fortschreitenden Salzwasseraufstieg sind beispielsweise räumliche Verlagerungen (Abbau) von Natrium-Austauschwässern besonders zu berücksichtigen.

### **Zusammenfassung**

Die potentiellen Salzwasserquellen des Untersuchungsgebietes gehen auf Ablaugung am Salzstock Blankensee und den Aufstieg geogener Salzwässer aus dem Prärupel zurück. Ein

Zutritt dieser Wässer in das betrachtete GwSystem ist durch Fehlstellen im Rupelton in den Bereichen Blankensee und nordöstlich von Thyrow möglich. Als wesentlicher Aufstiegsmechanismus wirkt die Druckentlastung des Vorfluters Nuthen. Daneben können sich die Ablaugungswässer gravitativ ausbreiten, für die Prärupelwässer ist der Einfluss des aufwärts gerichteten Druckgradienten in den Quellhorizonten maßgebend.

Nach den Modellrechnungen ist bei den vorgesehenen Fördermengen langfristig keine Aufsalzung der geplanten Wasserfassung zu erwarten. Eine Förderrate von bis zu  $5 \times 1.500$  m<sup>3</sup>/Tag in der bestehenden Wasserfassung ist als günstige Variante anzusehen. Alternative Brunnenstandorte erbrachten gegenüber der bestehenden Wasserfassung aufgrund sich verringernder Anteile an Uferfiltrat am geförderten Gw bzw. einem verstärkten Zutritt von Salzwasser keine wesentlichen Vorteile.

Die vergleichende Bewertung der hydrogeochemischen Befunde mit den GwModellrechnungen ergibt eine grundsätzliche Übereinstimmung betreffs der generellen Strömungsrichtungen, der Verweilzeit, des Mischungsverhaltens verschiedener Grundwässer sowie der vorhandenen hydrogeochemischen Schichtung im GwLeiter. Fragen des sich im hydrogeochemischen Bild andeutenden Zutritts von verschiedenen Salzwässern aus tieferen GwLeitern sowie deren Mobilisierbarkeit bei Aufnahme der Förderung können durch das Strömungsmodell nicht eindeutig beantwortet werden, da das vorhandene Datenmaterial unzureichend und eine verlässliche vertikale Erweiterung des Modells nicht möglich ist.

Prinzipiell hat sich der Einsatz des Strömungs- und Stofftransportmodells MODFLOW/MT3D für die bearbeitete hydrogeologische Situation als brauchbar erwiesen. Voraussetzung für die Einsetzbarkeit eines dichteunabhängigen Modells ist eine Überprüfung der im Modellgebiet vorherrschenden Salzkonzentrationen und Untergrundeigenschaften. Sofern die Konzentrationen 5.000 mg/l nicht überschreiten und eine stabile Salz-Süßwasserschichtung vorliegt, kann der Dichteeffekt in der Regel vernachlässigt werden. Die Modellergebnisse mit MT3D führen im Vergleich zu dichteabhängigen Modellen zu einer konservativen Abschätzung der Salzausbreitung, da die berechnete Ausbreitungsreichweite größer ist als die unter Dichteinfluss. Für Modellrechnungen in großräumigen Bereichen ist man heute noch auf eine Kombination von einem dichteunabhängigen Modell für die Kalibrierung und einer Kontrolle der Approximation mit einem Dichtemodell angewiesen. Eine Kalibrierung direkt mit einem dichteabhängigen 3D-Modell ist in der Regel aufgrund von zu großen Rechenzeiten nicht praktikabel. Sharp-interface-Modelle sind in vergleichbaren Situationen nicht angebracht, da die in heterogenen GwLeitern auftretende Vermischung beim Salzwasseraufstieg relevant ist.

### **Summary**

A projected water work in Brandenburg / Germany has been investigated in view of the endangerment through upconing of geogenic saltwater. The saltwaters originate both from di-

lution of salt domes that appear close to the surface and ascending deeper water from pre-Eocene aquifers. The main mechanism for the upconing is the pressure reduction caused by the Nuthe river. The investigation area shows an upper aquifer with a lower and an upper part. Salinization is mainly occurring in the lower part and partly in the upper unit.

Prerequisite for the usability of a model without density compensation is a verification of the tds concentrations and geohydraulic parameters by a program with density-compensation (in this case SUTRA). Density effects can be neglected when the concentrations do not exceed 5.000 mg tds/l. A calibration of the numerical model MODFLOW / MT3D was only possible by a calibration on the near natural situation without major withdrawals. The site was then investigated regarding future maximum pumping rates. Regarding the model results, a long term salinization of the water work could be avoided when  $5 \times 1\,500 \text{ m}^3/\text{d}$  are pumped in the existing well field. Alternative well sites are not necessary. A comparison between the hydrogeochemical finds – mainly derived from the “genesis model of the Geological Survey of Brandenburg” (Genesemodell des LGRB) – and the ground water models was performed. The comparison showed a principal conformity. The lack of data for deeper aquifers, which play a role in salt water transport limits the prognosis possibility of the numerical model. A realistic prediction at the studies sites was principally proved by the use of the non-density-dependent flow and transportmodel MODFLOW / MT3D without density. A realistic prediction at the studies sites was principally proved by the use of the non-density-dependent flow and transportmodel MODFLOW / MT3D without density.

## Literatur

- ARBEITSGRUPPE GRUNDWASSERVERSALZUNG GROSSBEUTHEN (1999): Die Dynamik der Salz-/Süßwassergrenze im Grundwasser als Kriterium der langfristigen Sicherheit der Trinkwasserressourcen im Land Brandenburg – Projekt Grossbeuthen. – Gutachten i. A. des LUA Brandenburg, TUHH, AB Wasserwirtschaft und Wasserversorgung, Mitarbeiter: GRUBE, A., HERMSDORF, A., KALATZ, R., KOCH, M., LANG, M., RECHLIN, B., SCHNEIDER, W., VOSS, A. und WICHMANN, K.; Beratend wirkte W. KINZELBACH im Projekt mit; Endbericht vom 20.10.1999, 122 S., Hamburg-Harburg (unveröff.)
- BEDNORZ, F. (1999): Bericht zur Verweilzeitbestimmung aus Tritiumproben ausgewählter Standorte des Landes Brandenburg. – Hydrogeologie Nord, Niederlassung Hennigsdorf, 12 S. (unveröff.)
- CHIANG, W. H. & W. KINZELBACH (1991): PROCESSING MODFLOW (PM), Pre- and postprocessors for the simulation of flow and contaminants transport in groundwater systems with MODFLOW, MODPATH and MT3D. – Handbuch zum Programm, – Version 5.0 Dez. 1998. Hamburg, Heidelberg (Selbstverlag)
- FEIN, E. (1991): Statusbericht: Grundwasserprogramme mit variabler Dichte. – GSF-Ber. 31-92, S. 1-54, Neuherberg
- HERMSDORF, N. (1995): Zur Schichtenfolge des Teltow Plateaus. – Brandenburg. geowiss. Beitr. 2, 1, S. 27-37, Kleinmachnow
- KALATZ, R. (1976): Hydrogeologischer Ergebnisbericht mit Vorratsnachweis Thyrow 1974/75. – VEB Hydrogeologie Nordhausen (unveröff.)
- MANHENKE, V., HANNEMANN, M. & B. RECHLIN (1995): Gliederung und Bezeichnung der Grundwasserleiterkomplexe im Lockergestein des Landes Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. 2, 1, S.12, Kleinmachnow
- MCDONALD, M. C. & A. W. HARBAUGH (1988): MODFLOW, a modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. – U.S. Geological Survey, Open-file-report, S. 83-875,
- MÜLLER, A. (1988): Hydrogeologischer Ergebnisbericht mit Grundwasser-Vorratsberechnung – Detailerkundung Thyrow. – VEB Hydrogeologie Nordhausen, BT Berlin, Juni 1998 (unveröff.)
- RECHLIN, B. (1997): Zur Anwendung des hydrogeologischen Genesemodells der Wässer in den Grundwasserleiterkomplexen des Landes Brandenburg (Mittelbrandenburgischer Raum, Stand April 1997. – Brandenburg. geowiss. Beitr. 4, 1, S. 67-71
- VOSS, A. & M. KOCH (2000): Numerical simulations of possible effects of groundwater pumping on saltwater upconing in the state of Brandenburg, Germany. – Physics and Chemistry of the Earth (im Druck)
- VOSS, C. I. (1984): A Finite-Element Simulation Model for saturated-unsaturated, fluid-density-dependent Groundwater Flow with Energy Transport or chemically-reactive single-species Solute Transport. – U. S. Geological Survey, Report 84/4369, 409 S.
- VOSS, C. I. & W.R. SOUZA (1987): Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone. – Water Resources Res. 23, 10, S. 1851-1866,
- ZHENG, C. (1998): MT3D<sup>99</sup> – a modular 3d multispecies transport simulator. – S. S. Papadopoulos & Assoc., Inc., Rockville, Maryland

Anschrift der Autoren:

Dr. A. Grube  
Technische Universität Hamburg-Harburg,  
DVGW-Forschungsstelle  
Arbeitsbereich Wasserwirtschaft und Wasserversorgung  
Schwarzenbergstr. 95  
21073 Hamburg

Dipl.-Geoln. A. Hermsdorf  
Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
Brandenburg  
Stahnsdorfer Damm 77  
14532 Kleinmachnow

Dipl.-Phys. M. Lang,  
Technische Universität Hamburg-Harburg,  
DVGW-Forschungsstelle  
Arbeitsbereich Wasserwirtschaft und Wasserversorgung  
Schwarzenbergstr. 95  
21073 Hamburg

Dipl.-Geol. B. Reclin  
Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
Brandenburg  
Stahnsdorfer Damm 77  
14532 Kleinmachnow

Prof. Dr. -Ing. W. Schneider  
Technische Universität Hamburg-Harburg,  
DVGW-Forschungsstelle  
Arbeitsbereich Wasserwirtschaft und Wasserversorgung  
Schwarzenbergstr. 95  
21073 Hamburg

Prof. Dr. -Ing. K. Wichmann  
Technische Universität Hamburg-Harburg,  
DVGW-Forschungsstelle  
Arbeitsbereich Wasserwirtschaft und Wasserversorgung  
Schwarzenbergstr. 95  
21073 Hamburg

Mitteilung aus dem Landesamt für Geowissenschaften und  
Rohstoffe Brandenburg No. 143