FACHBEITRAG

Ermittlung des Grundwasserdargebotes der Berliner Wasserwerke mittels regionaler numerischer Grundwasserströmungsmodelle

Matthias Zippel · Stephan Hannappel

Eingang des Beitrages: 12.7.2007/Eingang des überarbeiteten Beitrages: 13.6.2008/Online veröffentlicht: 14.8.2008 © Springer-Verlag 2008

Kurzfassung Unter Nutzung aktueller und digital verfügbarer Daten zu den hydrogeologischen Verhältnissen im Berliner Raum wurden mit einer einheitlichen Methode zwei regionale numerische Grundwasserströmungsmodelle erstellt. Diese beschreiben mit einer Gesamtfläche von ca. 1.300 km² erstmalig die Grundwasserströmungsverhältnisse im gemeinsamen unterirdischen Einzugsgebiet aller Berliner Wasserwerke. Zur Ableitung des hydrogeologischen Modells und der Modellgrundwasserleiter aus den vorliegenden hydrogeologischen Karten und Profilschnitten der staatlichen geologischen Dienste wurde eine eigene Methode entwickelt und angewendet. Zur Modellkalibrierung wurden Isohypsen des wasserwirtschaftlich genutzten Grundwasserleiters für repräsentative Entnahmezustände sowie vorhandene hydraulische Kenntnisse genutzt. Mithilfe dieser Modelle wurde im Auftrag der Wasserbehörde des Berliner Senats das Grundwasserdargebot (Q365) für elf Wasserwerksstandorte ermittelt.

Evaluation of the groundwater yield of Berlin water works using regional numerical groundwater flow models

Abstract Using available observed and digital data from the hydrogeological systems within the Berlin region, two regional numerical groundwater flow models were developed using a common methodology. These models encompass for the first time an entire area of about 1,300 km² of the groundwater flow system within the common sub-surface catchment area of the Berlin water works. The hydrogeo-

Dr. M. Zippel, Dr. S. Hannappel (☒)
HYDOR Consult GmbH,
Am Borsigturm 40, 13507 Berlin
E-Mail: zippel@hydor.de, hannappel@hydor.de

logical model and the model aquifers were developed using a unique approach from the available hydrogeological maps and sections of the Geological surveys from Berlin and Brandenburg. The numerical models were calibrated using equipotentials of the pumped aquifer for representative conditions of groundwater extraction as well as using hydraulic information. The models were applied to predict the groundwater yield of eleven water works for the Berlin government water agency.

Keywords groundwater yield · numerical groundwater models · hydrogeological structural model · bank filtration

Einleitung

Die Trinkwassergewinnung im Großraum Berlin erfolgt zu 100% durch Nutzung der süßwasserführenden Grundwasserleiter im Stadtgebiet und dem angrenzenden Brandenburger Umland. Die Entnahme erfolgt über Brunnen der Berliner Wasserbetriebe (BWB) sowie weiterer Versorger im Umland, die primär entlang der Oberflächengewässer im Berliner Urstromtal (Spree, Dahme) und der Havelrinne angeordnet sind. Sie fördern aber nur zu einem kleineren Teil (ca. 40%, Zippel 2006) Grundwasser, das durch Neubildung in den unterirdischen Einzugsgebieten entstanden ist, welche wiederum weit über die Stadtgrenzen hinausreichen. An wenigen Standorten erfolgt zusätzlich eine Grundwasseranreicherung über Versickerungsbecken. Der überwiegende Anteil (ca. 60%) des geförderten Rohwassers wird durch Uferfiltration aus Oberflächengewässern gewonnen.

Für die zukünftige Nutzung der Grundwasservorkommen zum Zweck der Trinkwassergewinnung haben die Berliner Wasserbetriebe bei der Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz die wasserbehördliche Be-



willigung für die Entnahme an elf Wasserwerksstandorten beantragt. Aufgrund dieses Antrages gab die Wasserbehörde des Senats hydrologische Berechnungen zum Nachweis des Grundwasserdargebotes in Auftrag. Für die Berechnungen wurde als fachliche Grundlage ein numerisches Grundwassermodell auf der Basis des Programms "Visual Modflow" (McDonald & Harbaugh 1988) entwickelt. Die Modellrechnungen zur Ermittlung des Dargebotes Q₃₆₅ erfolgten stationär, die Betrachtungen zu Q₃₀ bzw. Q₇ mit einem instationären Modellansatz.

Die Arbeiten wurden in zwei Teilschritten durchgeführt. Zuerst erfolgte die Berechnung für die zusammenhängenden unterirdischen Einzugsgebiete (Abb. 1) der Wasserwerke Tegel, Spandau, Beelitzhof, Tiefwerder und Kladow entlang der Havelrinne (Teilmodell "Havelwerke") im Westen Berlins (Hydor 2004). Die Modellkalibrierung erfolgte anhand der konkreten Grundwasserfließverhältnisse des Jahres 2002. Im Anschluss konnte die gleiche Methode zur Ermittlung der Dargebotsmengen für das gemeinsame Einzugsgebiet der Wasserwerke Friedrichshagen, Wuhlheide, Johannisthal, Kaulsdorf, Altglienicke und Buch im Einzugsgebiet der Spree und der Dahme (Teilmodell "Spreewerke") im östlichen Teil Berlins genutzt werden (Hydor 2007). Standortspezifisch bedingt mussten hier für die Modellkali-

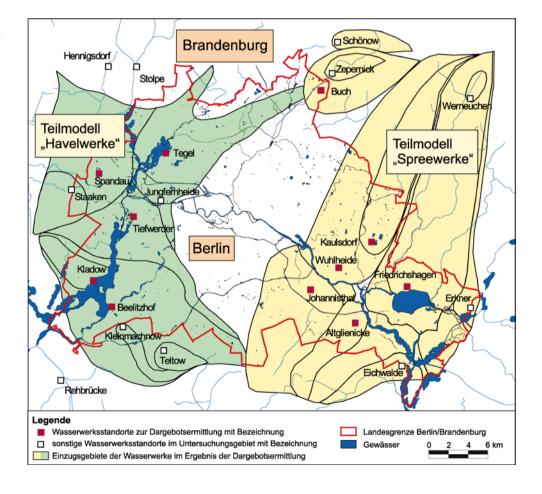
brierung die Grundwasserfließverhältnisse des Jahres 1991 verwendet werden. Schwerpunktmäßig wird im Folgenden die Methodik zur

Schwerpunktmäßig wird im Folgenden die Methodik zur Erstellung des hydrogeologischen Strukturmodells auf Basis vorhandener Daten und zum Aufbau des regionalen Grundwasserströmungsmodells anhand des Teilmodells "Spreewerke" sowie ein Vergleich der Ergebnisse vorgestellt.

Zur Modellierung wurden neben den Entnahmen der Wasserwerke alle hydraulisch wirksamen Eigenwasserversorgungsanlagen sowie Berliner und Brandenburger Fassungen berücksichtigt, die an die Einzugsgebiete der zu betrachtenden Werke grenzen bzw. in diesen Teileinzugsgebiete ausbilden. Lediglich der hydraulisch unbeeinflusste Bereich im Berliner Stadtzentrum bleibt bei dieser Betrachtung unberücksichtigt (Abb. 1). Das Untersuchungsgebiet liegt damit überwiegend innerhalb des Landes Berlin, reicht jedoch in seinen nördlichen und südlichen Ausläufern weit nach Brandenburg hinein. Die Gesamtfläche der beiden Teilmodelle umfasst ca. 1.300 km². Es wurden die süßwasserführenden Grundwasserleiter bis zur Rupeltonoberkante bzw. einer maximalen Tiefe von 200 m –NHN in die Betrachtung einbezogen.

Grundlage der Berechnungen sind konkrete Entnahmemengen für die einzelnen Werke, die von den Berliner Wasserbetrieben genannt wurden. Diese Daten wurden für

Abb. 1 Untersuchungsgebiet mit den gemeinsamen Einzugsgebieten der Teilmodelle "Havelwerke" und "Spreewerke" als Ergebnis der Dargebotsermittlung (Q365)





alle einzelnen Brunnengalerien der Wasserwerke übergeben und zur weiteren Bearbeitung pro Werk aggregiert. Jeweils für das gesamte unterirdische Einzugsgebiet eines Werkes wurde dann das Grundwasserdargebot ermittelt. Dieses berücksichtigt alle bestehenden Fassungsgalerien mit den dazugehörigen Betriebsbrunnen.

Datengrundlagen

Die hydrologischen Berechnungen zur Ermittlung des Grundwasserdargebotes basieren ausschließlich auf vorhandenen Daten verschiedener Institutionen im Untersuchungsgebiet in Berlin und Brandenburg. Die Datengrundlage umfasst die notwendigen geologisch-hydrogeologischen Daten für die Erstellung des hydrogeologischen Strukturmodells sowie die wasserhaushaltlichen Daten. Sie wurden von den Behörden in Berlin und Brandenburg sowie den betroffenen Wasserversorgungsunternehmen zur Verfügung gestellt. Für die Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet kamen flächengenaue Informationen der Berliner Senatsverwaltung und des Landesumweltamtes Brandenburg zum Einsatz. Die verwendeten Stamm- und Bewegungsdaten der Grundwassermessstellen und der Entnahmebrunnen liegen bei der Berliner Senatsverwaltung, dem Landesumweltamt Brandenburg (LUA), dem Landesamt für Bergbau, Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LBGR), den Berliner Wasserbetrieben (BWB) und den jeweiligen Wasserverbänden bzw. Stadtwerken in Brandenburg vor.

Hydrogeologisches Modell

Das Modellgebiet umfasst denjenigen Teil des Untersuchungsgebietes, der durch die Grundwasserentnahme hydraulisch beansprucht wird (DGG 1999). Die detaillierte Abgrenzung dieses gemeinsamen Einzugsgebietes aller Werke wurde anhand der Grundwasserfließverhältnisse im genutzten Hauptgrundwasserleiter vorgenommen. Für die Modellkalibrierung wurden Entnahmebedingungen mit vergleichbaren hydraulischen und klimatischen Verhältnissen verwendet. Diese lagen für die beiden Teilräume in jüngerer Vergangenheit zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten vor. Für die Havelwerke war das im Mai 2002 und für die Spreewerke im Mai 1991 der Fall. Anhand der vorliegenden Stichtagsmessungen und Grundwassergleichenkarten konnte die Geometrie des jeweiligen gemeinsamen Einzugsgebietes ausgegrenzt werden. Diese bildet die Basis für die Erstellung des hydrogeologischen und numerischen Modells.

In seiner Gesamtheit liegt der zentrale Bereich des Einzugsgebietes innerhalb des hydrogeologischen Teilraumes des Warschau-Berliner-Urstromtales, in dem das oberflächennahe Grundwasser überwiegend in ungespanntem

Zustand vorliegt. Das Urstromtal wird hier annähernd in Ost-West-Richtung von der Spree durchflossen. Die Spree mündet innerhalb dieses Urstromtales in die Havel. Der nordöstliche Teil des Untersuchungsgebietes liegt im Teilraum "Grundmoräne der Barnim-Hochfläche" mit überwiegend bedeckten und gespannten Grundwässern. Die Werke in Buch, Zepernick, Schönow und Werneuchen liegen innerhalb dieses Teilraumes. Die Einzugsgebiete der Werke Tegel, Friedrichshagen-Nord, Wuhlheide, Kaulsdorf und Erkner reichen dort hinein. Untergeordnet kommen hier im Bereich des Panketales und anderer kleinerer Taleinschnitte auch ungespannte Grundwässer vor. Der südliche Teil des Untersuchungsgebietes liegt im Teilraum "Mittelbrandenburgische Platten" (Teltow-Hochfläche) mit überwiegend bedeckten Grundwasserleitern und z. T. Hochflächensanden. Hier reichen die Einzugsgebiete der Werke Tiefwerder, Beelitzhof, Kleinmachnow, Teltow, Johannisthal, Altglienicke, Friedrichshagen-Süd und des Werkes in Eichwalde hinein.

Um im Sinne eines umfassenden Dargebotsnachweises alle korrespondierenden Grundwasservorräte für die hydrologischen Berechnungen zu berücksichtigen wurden alle süßwasserführenden Bildungen – auch diejenigen im Liegenden des Holstein-Interglazials – von der Geländeoberkante bis hin zur Rupeltonoberfläche in das Modell integriert.

Zur Erstellung des hydrogeologischen Modells wurden die für das Berliner Stadtgebiet flächendeckend und digital vorliegenden hydrogeologischen Schnitte der Senatsverwaltung genutzt und durch die analog vorliegenden Schnittspuren des Landesamtes für Bergbau, Geowissenschaften und Rohstoffe des Landes Brandenburg (LBGR) ergänzt. Dadurch war die Nutzung einer einheitlichen Methodik zur Darstellung der Hydrogeologie gewährleistet.

Zum geologischen Untergrund von Berlin gibt es 37 geologische Übersichtsprofile (Schnitte) im Maßstab 1:25.000 im 1 Kilometer-Abstand in West-Ost-Richtung. Diese Profile umfassen die komplette Landesfläche. Durch die Erfassung in einem GIS wurden sie zusätzlich in georeferenzierte hydrogeologische Schnitte umgewandelt. Die Transformation der geologischen in hydrogeologische Übersichtsprofile erfolgte durch GIS-Erfassung und Attributierung der geologischen Schnitte bzw. der darin enthaltenen Flächen. Darüber hinaus werden die hydrogeologischen Daten punktbezogen in einer MS-Access-Datenbank verwaltet. Mit diesen digital zur Verfügung stehenden Informationen ist es möglich, in der punktbezogenen Datenbank sowohl auf stratigrafische als auch auf lithologische Informationen zurückzugreifen. Diese punktbezogene Datenbasis von mehreren hunderttausend Einzelpunkten zur jeweils darüber und darunter liegenden Schicht ist für die Erarbeitung numerischer Grundwasserströmungsmodelle sehr gut geeignet und wurde für das hier dokumentierte Modell verwendet.

In Brandenburg liegen vergleichbare Informationen mit den "Hydrogeologischen Schnitttafeln" als Teil der hydro-



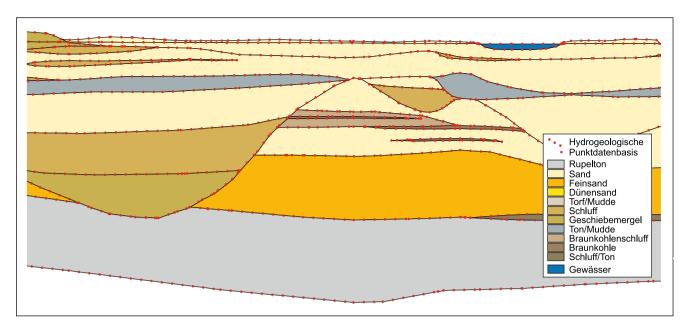


Abb. 2 Schematische Darstellung der geologischen Ausgangsinformationen und der hieraus erarbeiteten hydrogeologischen Punktdatenbasis als Eingangsdaten für das numerische Modell

geologischen Übersichtskarte im Maßstab 1:50.000 des LBGR vor (z.B. LBGR 2004). Auch hier sind – im Abstand von 5 Kilometern – die Tiefenlagen der Grundwasserleiter und -hemmer eingetragen. Diese Informationen liegen jedoch nicht digital vor. Daher wurden die geologischen Informationen von der Geländeoberfläche bis zur Rupeltonoberkante in einem horizontalen Abstand von 500 Metern recherchiert und entsprechend der Berliner Datenbank digitalisiert.

Ein wesentlicher Vorteil bei der Verwendung dieser Daten im Vergleich zur Verwendung von bohrungsbezogenen Originaldaten besteht darin, dass bei der Anfertigung der Schnitte bereits geologischer Sachverstand seitens der Landesgeologen in die Daten eingeflossen ist. Dieser kann somit ohne Einschränkung genutzt werden.

Abbildung 2 zeigt für einen Ausschnitt im südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes (Schnitt 32 der Landesgeologie Berlin) mit einer Tertiärhochlage bei etwa 20 m –NHN den hydrogeologischen Schnitt zusammen mit der im Datenbankformat erstellten und verwendeten Punktdatenbasis entlang der Schichtgrenzen. Die Oberkante des in dem Schnitt an der Basis dargestellten Rupeltones liegt bei etwa 130 m –NHN.

Bildung von Modellgrundwasserleitern

Basierend auf der aggregierten Punktdatenbasis, in der sämtliche Grenzen und lithologische Informationen zu den Grundwasserleitern raumbezogen verwaltet werden, wurde durch Datenbankabfragen sowie durch eine geostatistisch gestützte Interpolation zwischen den einzelnen Punkten das flächen-

deckende hydrogeologische Modell erstellt. Damit kann die Verbreitung der jeweils benötigten Einheiten (z.B. Unterkanten der Grundwasserleiter) dokumentiert und hieraus abgeleitete Informationen (z.B. zur Mächtigkeit) produziert werden.

Die für die numerische Simulation genutzten Modellgrundwasserleiter wurden abweichend davon in definierten vertikalen Abständen innerhalb des Modellgebietes gebildet. Hier wird eine Programmanforderung von Visual Modflow erfüllt, über das gesamte Modellgebiet aushaltende und möglichst gleichmächtige sog. "Modellgrundwasserleiter" festzulegen. Mit der Anzahl der Modellgrundwasserleiter steigt ebenso die vertikale Auflösung des Modells, insbesondere in Hinsicht auf die lagegetreue Zuordnung der Filterstrecken von Brunnen und Messstellen. Die horizontale Modellgrenze ist das umgrenzende Rechteck des Modellgebietes, da der verwendete Simulator des Finite-Differenzen-Modells Rechteckstrukturen für das Modellgebiet erfordert. Bereiche außerhalb des Modellgebietes wurden für die Simulation deaktiviert. Zwischen Gelände- und Rupeltonoberkante liegen vier süßwasserführende Grundwasserleiter. Nur die oberen zwei werden für die Förderung genutzt und stellen daher den Betrachtungsschwerpunkt dar. Die Basis des wasserwirtschaftlich genutzten Hauptgrundwasserleiters liegt bei durchschnittlich 0 bis 10 Meter -NHN. Daher erfolgte die vertikale Untergliederung in die Modellgrundwasserleiter oberhalb dieser Grenze mit einer höheren Genauigkeit (5 Meter-Abstände), als darunter (10 Meter-Abstände). Über die jeweiligen Mächtigkeiten wurden die an den Datenpunkten vorliegenden hydraulischen Kennwerte (s. u.) regionalisiert. Schematisch ist das Vorgehen in der Abbildung 3 dargestellt.



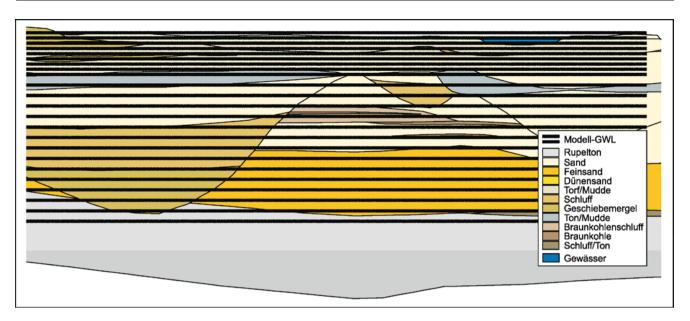


Abb. 3 Schematische Darstellung der gebildeten Modellgrundwasserleiter (waagerechte Linien) in vertikalen Abständen von 5 bzw. 10 Metern (gleicher Ausschnitt wie Abb. 2)

Da bei diesem Verfahren entlang der Schnittspuren zwar eine hohe Datendichte vorliegt, zwischen den Schnittspuren aber ein Abstand von einem Kilometer besteht, wurde im Vorfeld das optimale Regionalisierungsverfahren ermittelt. Die k_f-Wert-Verteilung in mehreren Modellgrundwasserleitern wurde mit unterschiedlichen geostatistischen Verfahren analysiert (*Kriging, Inverse distance to a power, Nearest neighbor* und *Natural neighbor*). Zudem wurden unterschiedliche Rasterweiten und Suchradien (ratio) verwendet. Das für diese Anwendung beste Ergebnis wurde mit *Natural neighbor* erzielt und für die Regionalisierung der Modellgrundwasserleiter genutzt.

Vollständig ausgebildet erreichen diese Schichten vertikal maximal 300 Meter Mächtigkeit. In Bereichen, in denen ein Modellgrundwasserleiter in seiner vorgesehenen Mächtigkeit nicht weitergeführt werden kann, da er durch die Modellbasis begrenzt wird, erfolgt eine Reduzierung auf minimal 10 Zentimeter.

Hydraulische Kennwerte

Ebenso wie der lateralen und vertikalen Verbreitung der Modellgrundwasserleiter kommt den hydrogeologischen Parametern entscheidende Bedeutung für das hydrogeologische Strukturmodell zu. Da die verwendete Punktdatenbasis sowohl Informationen zur Ausbildung der lithologischen Schichten als auch zur in Berlin verwendeten Grundwasserleiterzuordnung (Limberg & Thierbach 2002) enthält, konnte auf dieser Basis eine Zuordnung zu Durchlässigkeitsbeiwerten erfolgen (ad-hoc-AG Hydrogeologie 1997).

Tab. 1 Zuordnung von k_f -Werten zur punktbezogenen Datenbasis der Modellgrundwasserleiter (GWL: Grundwasserleiter, GWH: Grundwasserhemmer)

Lithologie	GWL/GWH	K _f -Wert [m/s]	
Sand	GWL 1, 2 und 3	5·10E ⁻⁴	
Grobsand	Holstein	$1\cdot10\mathrm{E}^{-3}$	
Feinsand	GWL 4 (Tertiär)	$1 \cdot 10 E^{-4}$	
Feinsand	GWL 1 (Dünensand)	5 · 10E ⁻⁵	
Mudde	alle GWL	$1 \cdot 10 E^{-6}$	
Schluff	alle GWL	$1 \cdot 10 \mathrm{E}^{-7}$	
Geschiebemergel	Weichsel	$1 \cdot 10 E^{-6}$	
Geschiebemergel	Saale/Elster	$1 \cdot 10 \mathrm{E}^{-7}$	
Schluff/Ton	Holstein	5·10E ⁻⁷	
Braunkohle (-schluff)	Miozän	5·10E-8	
Rupelton	Oligozän	$1\cdot 10\mathrm{E}^{-8}$	
Gewässer		1	

Die lithologischen Klassen wurden unter Berücksichtigung der grundwasserleiter- und schichtbezogenen Informationen der geologischen Schnitte der Landesgeologie in Bezug auf den $k_{\rm f}$ -Wert nach den in Tabelle 1 dargestellten Klassen attributiert.

Die mit dieser Methodik erzielte Zuordnung wurde zunächst in das numerische Grundwassermodell implementiert. Im weiteren Verlauf der Modellrechnungen bzw. -kalibrierungsvorgänge wurde dieses Modell unter Nutzung von Daten werksbezogener hydrogeologischer Strukturmodelle der Berliner Wasserbetriebe (Hannappel et al. 2000) lokal modifiziert.



Numerisches Modell: Modellbegrenzung und Diskretisierung

Als äußere Begrenzung dient jeweils eine Rechteckfläche. Bei den "Spreewerken" betrug die Fläche etwa 1.190 km² und ist durch die Festlegung von 396 Reihen und 385 Spalten in 152.460 Rechteckzellen untergliedert. Für die "Havelwerke" wurden 1.250 km² durch die Festlegung von 362 Reihen und 242 Spalten in 87.604 Rechteckzellen untergliedert. Die Größe der Zellen variiert von maximal 250 × 250 Metern in den Randbereichen bis zu minimal 50 × 50 Metern (*Spreewerke*) bzw. 62,50 × 31,25 Metern (*Havelwerke*) in den brunnennahen Bereichen. Außerhalb der Grenzen des Modellgebietes bleiben die Zellen bei der Simulation inaktiv.

In der Vertikalen wurde als obere Begrenzung die maximale Geländehöhe von 100 m +NHN, als untere Begrenzung die Rupeloberkante definiert. Das Gesamtschichtpaket wird durch die beschriebenen Modellschichten in 34 bzw. 35 Modellgrundwasserleiter untergliedert, wobei der Bereich unterhalb von 200 m –NHN unberücksichtigt bleibt.

Integration der Modellgrundwasserleiter

In Vorbereitung auf die Simulation wurden die Parameter eines jeden Modellgrundwasserleiters direkt in Visual Modflow importiert. Die Daten wurden mittels Regionalisierung schichtweise in eine dreidimensionale Verteilungsform überführt und nachträglich manuell ergänzt bzw. korrigiert. Zur Visualisierung und vor allem für die Bearbeitung während der Kalibrierung können in Visual Modflow für jeden Modellgrundwasserleiter k_f-Wert-Klassen definiert werden, die dann farblich identifizierbar sind. Für einen Modellgrundwasserleiter im Bereich der Spreewerke ist das Ergebnis der Vorgehensweise in Abbildung 4 dargestellt. Einen beispielhaften Vertikalschnitt zeigt Abbildung 5. Die Plausibilitätsprüfung der automatisch erzeugten k_f-Wert-Belegung erfolgte durch den Vergleich der Profile von Visual Modflow und den entsprechenden hydrogeologischen Schnitten der Datengrundlage des hydrogeologischen Strukturmodells. Das Ergebnis liegt im Rahmen der hinreichenden Genauigkeit eines großräumigen Grundwasserströmungsmodells (Zippel 2006).

Fehlerbetrachtungen zur Anwendung des hydrogeologischen Modells

Die zur Regionalisierung angewandte Methodik mit der vorliegenden punktbezogenen Datengrundlage der hydrogeologischen Schnitte ist für die einzugsgebietsübergrei-

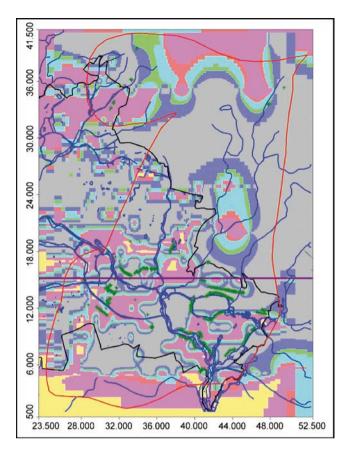


Abb. 4 Beispielhafte Verteilung der k_f -Wert-Klassen im Modellgrundwasserleiter (Schicht 18, 15 bis 20 Meter –NHN). Zur Orientierung sind die Landesgrenze (schwarz), die Grenze des Modellgebietes (rot), das Gewässernetz (blau), die Brunnengalerien (grün) sowie die Schnittspur des Profils in Abbildung 5 (lila) hervorgehoben.

fende Ermittlung des Grundwasserdargebotes geeignet. Für darüber hinaus gehende Fragestellungen mit einem höheren Auflösungsgrad sollten hingegen – in Ergänzung zu den Schnitten mit der darin enthaltenen geologischen Interpretation – weitere Datengrundlagen in die Berechnungen einbezogen werden (vor allem bohrungsbezogene Daten), um damit ein Optimum an Informationsgehalt in horizontaler und vertikaler Hinsicht mittels eines 3D-Modells (z. B. Gocad oder GMS) zu generieren.

Folgende Abweichungen der interpolierten Strukturen sind festzustellen:

In Brandenburg sind Ungenauigkeiten durch die geringere Datendichte (Abstand der Schnitte in Nord-Süd-Richtung 5 Kilometer, Abstand der Datenpunkte in Ost-West-Richtung 0,5 Kilometer) bemerkbar. Besonders stark geneigte Schichten (z.B. in sehr tiefen Grundwasserleitern) werden verzerrt und geringmächtige Schichten nur ungenügend abgebildet. Die im Zuge der Bearbeitung vorgenommene manuelle Korrektur der übernommenen Daten führte zu einer Verbesserung der modellierten Strukturen.



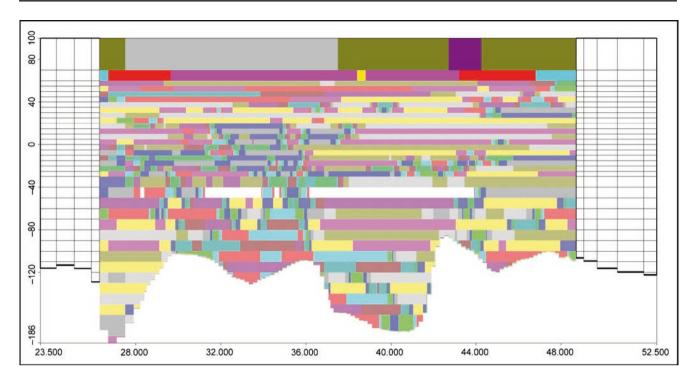


Abb. 5 Beispielhafte Verteilung der k_f-Wert-Klassen im Modell anhand eines Vertikalschnittes (Schnittspur s. Abb. 4) entlang des Hochwertes 15.200. (Die Farbbelegung erfolgt seitens des Programms für jeden Modellgrundwasserleiter willkürlich. Gleiche Farben in unterschiedlichen Modellgrundwasserleitern bedeuten daher nicht gleiche k_f-Wert-Klassen.)

In Berlin entstehen Ungenauigkeiten, die auf der Verteilung der Datenpunkte je Modellgrundwasserleiter beruhen. Die horizontalen Modellgrundwasserleiter zerlegen die durch Punktwolken definierten hydrogeologischen Strukturen in 10 Meter bzw. 5 Meter mächtige Schichten. Nur die innerhalb dieser Höhe auftretenden Informationen entlang der Strukturunterkanten wurden zur Regionalisierung eingesetzt. Ist die Struktur kleinräumig oder stark untergliedert, werden mehr Datenpunkte je Flächeneinheit zur Interpolation genutzt als bei großen weitestgehend horizontalen Strukturen. Daraus würde eine räumliche Verschiebung der Schwerpunkte der auftretenden Strukturen in Richtung der Unterkanten und Randbereiche resultieren. Um dem entgegenzuwirken wurden solche "Fehlstellen" in der digitalen Datenbasis manuell korrigiert.

Randbedingungen

Zur Lösung der Strömungsgleichungen mit einem numerischen Grundwasserströmungsmodell müssen Rand- und Anfangsbedingungen für das Modellgebiet festgelegt werden. Im verwendeten Simulator wurden die Quell/Senkenterme ebenfalls mit in der Kategorie *Randbedingungen* (RB) zusammengefasst. Die Ableitung der Lage und der Volumenanteile der beteiligten Randbedingungen erfolgte

nach hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten. Jedes Modell kann nur eine vereinfachte Abbildung der realen Verhältnisse sein. Dies trifft auch für die Randbedingungen zu, deren Verwendung unter bestimmten Modellannahmen erfolgt. Wie diese im Modell umgesetzt wurden, wird im Folgenden erläutert.

- 1. Die Grundwasserneubildungsrate wurde auf Basis der Berliner und Brandenburger Daten importiert, die seitens der Landesbehörden im Shape-Format zur Verfügung gestellt wurden. Die Daten stellen Mittelwerte aus 30-jährigen Messreihen für die Region dar. Dieser Quellterm wirkt auf den obersten grundwasserführenden Modellgrundwasserleiter. In Berlin wurde auf Daten aus den Arbeiten zur "Erstellung von Karten zur Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung" im Auftrag der Senatsverwaltung zurückgegriffen. Die Ermittlung der Grundwasserneubildung erfolgte hierbei auf Basis von Angaben zu den flächendifferenzierten Sickerwasserraten aus dem Umweltatlas Berlin (Karte 02.13.2 und 02.13.4, Senstadt 2007), die mithilfe des Programms Abimo auf der flächenhaften Grundlage der "Blockstruktur" des Umweltatlas erstellt wurden. In Brandenburg wurde ebenfalls eine flächendeckende Übersicht zu den Abflusshöhen erstellt. Hierbei handelt es sich jedoch um den Parameter Gesamtabfluss.
- 2. Die Abbildung der Uferfiltratanteile im Modell erfolgte über die *River* (Fluss-)Randbedingung. In den Teilmo-



dellen wurden jeweils ca. 100 Gewässerabschnitte nach hydraulischen Gesichtspunkten definiert, für die im Laufe der Kalibrierung genaue Uferfiltratsraten ermittelt wurden. Die Plausibilität konnte zusätzlich durch den Vergleich mit vorliegenden Zahlen (Modelle, Analytik, etc.) gewährleistet werden. Entlang dieser Bereiche wurde das Netz verfeinert.

- 3. Die Brunnen wurden lagegetreu über die Randbedingung "Wells" im Modell eingebunden und das Netz entlang der Galerien verfeinert. Damit liegen maximal 2 Brunnen in einer Zelle.
- 4. Die Entnahmen der Wasserwerke liegen für jede Galerie als Monatswerte vor. Im Modell kommt die aus den Monatswerten gemittelte Tagesförderung der jeweiligen Galerie in gleichen Anteilen je Brunnen zum Einsatz. Die Filterstrecken wurden tiefengenau eingesetzt, sodass die vertikale Strömungskomponente realitätsnah abgebildet werden konnte.
- 5. Eigenwasserversorgungsanlagen wurden ebenfalls als Einzelbrunnen berücksichtigt, wobei die Lage der Filterstrecken geschätzt wurde. Ihr Anteil an der Gesamtförderung ist aber sehr gering, sodass dadurch entstehende Fehler ausgeschlossen werden können.
- 6. Äußere Modellränder werden durch die Grenzen der Einzugsgebiete gebildet. Diese Grenzen stellen Grundwasserscheiden dar. Sie wurden im Modell als No-flow-Randbedingung (RB 2. Art) umgesetzt. Ausnahmen bilden im Teilgebiet der Spreewerke die Bereiche nordöstlich von Werneuchen und südwestlich von Buch sowie im Teilgebiet der Havelwerke die Nordostgrenze des Modellgebietes. Die vorliegenden hydrogeologischen Verhältnisse erfordern die Festlegung eines lateraleren Zu- bzw. Abstromes im Bereich der Hochflächen. Dies wurde im Modell mit einem Festpotenzial (RB 1. Art) des mittleren Grundwasserstandes realisiert.

Kalibrierung des numerischen Modells

Aufgabe der Kalibrierung ist es, die Größe unbekannter Modellparameter und Randbedingungen innerhalb plausibler Grenzen so zu bestimmen, dass sich die berechneten den beobachteten Verhältnissen weitestgehend angleichen. Als Vergleichswerte dienten die im Modellgebiet gemessenen und simulierten Grundwasserstände und die Massenbilanzen der Systeme von Oberflächenwasser und Grundwasser.

Im vorliegenden Modell soll die Gesamtdynamik im zusammenhängenden Einzugsgebiet der Wasserwerke als Grundlage für die Berechnung des Dargebotes nachvollzogen werden. Die Wasserwerksentnahmen stellen dabei den Haupteinflussfaktor auf die Grundwasserleiter dar. Deshalb erhält auch die Anpassung dieser aktiven Modellbereiche entlang der Brunnengalerien und Gewässer im Modellzentrum

eine höhere Wichtung als die Bereiche entlang der Modellgrenzen. Außerdem ist von Bedeutung, dass die Modellgebiete mit jeweils ca. 700 km² für eine numerische Grundwassermodellierung eine beachtliche Größe aufweisen.

Zur modellhaften Umsetzung waren daher Verallgemeinerungen beim Aufbau des hydrogeologischen und des numerischen Modells notwendig. Da besonders die Hochflächenbereiche eine sehr geringe Messstellendichte aufweisen, mussten hier Unsicherheiten im Vergleich der gemessenen mit den simulierten Grundwasserständen in Kauf genommen werden. Zur Kontrolle des Fortschritts der Modellanpassung im Verlauf der Kalibrierung wurden drei Verfahren angewandt, deren Auswertung in direkter Abhängigkeit voneinander erfolgte:

- Kontrollmessstellen: Aus den hoheitlich betriebenen Messnetzen und denjenigen der Wasserversorger wurden repräsentative Messstellen im genutzten Hauptgrundwasserleiter ("GWL 2" nach Limberg & Thierbach 2002) ausgewählt und im Modell als Kontrollmessstellen definiert.
- Isolinienplan: Als ein Ergebnis der Simulation liegen Grundwassergleichenkarten vor. Diese wurden mit digital verfügbaren Karten aus Berlin und Brandenburg verglichen. Die Berliner Daten dienen gleichzeitig als Grundlage für die Berechnung von Differenzen zu den modellierten Grundwasserständen.
- 3. Wasserbilanz: Die vorliegende Strömungssimulation des Grundwassers wurde für den stationären Zustand gerechnet. Dabei versucht das Modell ein Gleichgewicht der Wasserbilanz für das gesamte Modellgebiet zu erreichen. Ist die Differenz zwischen positiven und negativen Bilanzanteilen kleiner als 2%, kann bei Visual Modflow von einem richtigen Ergebnis ausgegangen werden (WHI 2005). Ob die Bilanzanteile stimmen, muss durch Abschätzungen im Vorfeld der Modellierung und mittels der anderen o. g. Kriterien ermittelt werden. Nur eine ausgewogene Wasserbilanz und gut angepasste Piezometerhöhen sind Ausdruck für eine erfolgreiche Kalibrierung.

Die einzigen bekannten festen Modellgrößen sind die über den Monat gemittelten Entnahmen der Wasserwerke. Für die Kalibrierung wurden bei den Spreewerken die Entnahmen des Monats Mai 1991 (bzw. Mai 2002 bei den Havelwerken) eingesetzt, die auch schon die Grundlage für die Erstellung der Grundwasserdynamik darstellten. Zu diesem Zeitpunkt waren jeweils alle betrachteten Brunnengalerien in Betrieb. Alle anderen Größen stellen Modellannahmen dar, denen Verallgemeinerungen zugrunde liegen oder die unbekannte Modellgrößen sind. Diese beiden Gruppen wurden im Laufe der Kalibrierung angepasst. Dazu gehören die Grundwasserneubildung, die k_f-Werte und der Austausch zwischen Oberflächen- und Grundwasser (beinhaltet Uferfiltration).

Für die genauen Austauschraten zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser lagen Abschätzungen vor. Da dies



eine wichtige Bilanzgröße für die Ermittlung des Dargebotes war, lag auf der Modifizierung dieser Randbedingung der Schwerpunkt der Kalibrierung. Die aus dem hydrogeologischen Modell nach Visual Modflow zunächst übertragenen k_f -Werte sind charakteristisch für den Raum Berlin (Hannappel & Asbrand 2002). Sie wurden bei Bedarf im Rahmen der natürlichen Schwankungsbreite modifiziert. Ebenso entspricht die Verteilung der Grundwasserneubildung mittleren Werten aus der dreißigjährigen Messreihe von 1961 bis 1990. Dies muss nicht mit den Werten der jeweiligen Kalibrierungszeiträume übereinstimmen und wurde daher bei Bedarf angepasst. Die Genauigkeit der Simulation ist von der verwendeten Netzdichte abhängig. So erfolgte eine Verfeinerung entlang der Brunnengalerien und Uferbereiche.

Modellanpassung im Ergebnis der Kalibrierung

Das Ergebnis der Kalibrierung lag jeweils nach insgesamt mehr als 100 Rechenläufen vor. Dabei wurde von der Anfangsverteilung der k_f -Werte und der Grundwasserneubildung aus dem hydrogeologischem Modell sowie einer Belegung der Gewässerabschnitte mit einer hohen Austauschrate ausgegangen. Diese Konstellation ergab zunächst eine Überschätzung der Uferfiltratanteile und eine Unterschätzung der landseitigen Grundwasserneubildung aus den Einzugsgebieten der Wasserwerke. Daher wurden folgende Anpassungen vorgenommen:

- 1. Im brunnennahen Bereich der Werke erfolgte vorwiegend eine Modifizierung der $k_{\rm f}$ -Werte.
- 2. Die Anpassung der Grundwasserneubildungsraten war erforderlich, um die Datenbasis in Anpassung an den Zeitpunkt der jeweiligen Kalibrierung zu modifizieren und methodische Unterschiede der Datensätze aus den beiden Ländern Berlin und Brandenburg in Bezug auf unplausible Übergänge zwischen den Datensätzen entlang der Landesgrenze auszugleichen. Korrekturen wurden besonders in den Bereichen der Hochflächen und entlang der Hochflächenränder vorgenommen. Ein weiteres methodisches Problem wird im Bereich des (lokalen) Panketalgrundwasserleiters erkennbar. Im verwendeten Datensatz wird eine hohe Neubildung auf dem (obersten) GWL 1 wirksam. Da aber auch dort alle Werke den GWL 2 nutzen, wird die Neubildung aufgrund der mächtigen bindigen Schichten im Liegenden des GWL 1 genauso behandelt, wie entlang der angrenzenden Hochflächenbereiche. Die Gesamtbilanz für das Modellgebiet wurde durch die Modifizierung der Teilflächen nur geringfügig verringert.
- 3. Die Uferfiltratanteile wurden in der Anfangsverteilung als hoch angenommen. Mit diesen Werten erfolgte in einem ersten Schritt die Simulation der "natürlichen" Verhältnisse, wobei ohne Grundwasserentnahmen ein

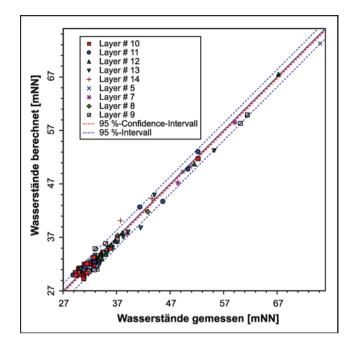


Abb. 6 Scattergramm mit dem Vergleich der berechneten zu den gemessenen Wasserständen anhand der 140 Kontrollmessstellen. Die Zuordnung der Filtertiefen der Messstellen zu den jeweiligen Modellgrundwasserleitern ("Layer") wird durch unterschiedliche Signaturen verdeutlicht.

Gleichgewicht zwischen Neubildung und Vorflutfunktion angestrebt wurde. Erst dann erfolgte in einem zweiten Schritt die vollständige Simulation mit den Grundwasserentnahmen. Hier erhielt u.a. die Übereinstimmung der Mengenbilanzen mit den getroffenen Abschätzungen eine hohe Wichtung. Danach erfolgte abschnittsweise eine weitere Feinabstimmung anhand der Modifizierung der modellierten Grundwasserstände.

Die Kalibrierung des Modells wurde beendet, nachdem durch die o.g. Vorgehensweise keine wesentlichen Verbesserungen der Modellanpassung mehr erzielt werden konnte. Die auf Basis der Kontrollmessstellen errechnete Anpassung wird anhand der folgenden Abbildungen erläutert. Abbildung 6 zeigt beispielhaft ein Scattergramm für das Modell der Spreewerke. Die statistische Verteilung der Differenzen an allen Kontrollmessstellen wird im Histogramm in Abbildung 7 verdeutlicht. Daraus ist ersichtlich, dass ein größerer Anteil erhöhter Wasserstände simuliert wurde. Die anhand dieser Messstellen von Visual Modflow errechneten Anpassungskriterien betragen: Quadratischer Mittelwert (RMS): 0,668 und Korrelationskoeffizient: 0,996.

Ein RMS kleiner 1,5 unter Verwendung von mehr als 100 Kontrollmessstellen kennzeichnet eine gute Modellanpassung (WHI 2005). Somit bedeuten diese Kriterien bei vorliegender Modellgröße eine erfolgreiche Kalibrierung. Für das Teilmodell "Havelwerke" lag im Ergebnis der Kalibrierung ein ähnliches Ergebnis vor.



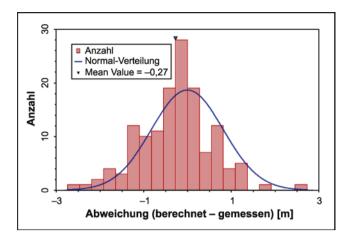


Abb. 7 Histogramm mit der statistischen Verteilung der Differenz der berechneten zu den gemessenen Wasserständen.

Eine Überprüfung der Plausibilität kleinräumiger geologischer Strukturen und die abschnittsweise Simulation unterschiedlicher Uferfiltratsanteile für die ausgedehnten Uferzonen der Gewässer im Modellgebiet war für die Aufgabenstellung nicht notwendig. Sie ist aber im Rahmen von Detailuntersuchungen möglich.

Die simulierten Grundwasserstände können nur dann als plausibel angenommen werden, wenn die Modellbilanz sinnvolle Werte beinhaltet. So müssen die vorab geschätzten Bilanzanteile sich auch in diesen Größenordnungen als Ergebnis der Simulation widerspiegeln. Die Bilanz für das Modellgebiet ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Differenz positiver und negativer Bilanzanteile fällt sehr gering aus, was für das stationär gerechnete Modell eine gute Anpassung bedeutet. Die korrekte Wasserbilanz – die Differenz positiver und negativer Bilanzanteile im Einzugsgebiet sollte so gering wie möglich sein – ist ein Indiz für die richtige Festlegung des Einzugsgebietes und der Randbedingungen sowie einer erfolgreichen Kalibrierung. Mit einem Ufer-

filtratanteil von ca. 50% liegt das Teilmodell *Spreewerke* unterhalb bisher bekannter Annahmen im Berliner Raum (Zippel 2006). Da aber auch Entnahmen von Wasserwerken mit geringem bzw. ohne Uferfiltratanteil (Werke Kaulsdorf, Buch, Altglienicke, Friedrichsfelde, Zepernick, Schönow, Werneuchen, Eigenwasserversorgungsanlagen) in die Berechnung eingehen, ist dieser Wert durchaus plausibel. Für die "Havelwerke" gilt dieses Verhältnis ebenfalls.

Fehlerbetrachtungen im Ergebnis der Kalibrierung

Zur Qualitätsprüfung der Modellanpassung wurden die mit Modflow simulierten Wasserstände mit den gemessenen und regionalisierten Wasserständen des genutzten Hauptgrundwasserleiters für Mai 1991 bei den Spreewerken bzw. für Mai 2002 bei den Havelwerken verglichen.

Entlang der Brunnengalerien wurde in beiden Teilmodellen eine gute Modellanpassung erreicht, die sich durch Differenzen von zumeist wenigen Dezimetern ausdrücken. Das sind gleichzeitig auch die für die Aufgabenstellung wichtigen Teilbereiche. Das Zusammenwirken der unterschiedlichen Ursachen für diese Differenzen ist im Wesentlichen in den Modellannahmen begründet und in Zippel (2006) diskutiert. So kann es aufgrund der Modellannahmen an längeren Galerien zu Verschiebungen der Förderschwerpunkte und damit der Absenkung kommen. Zudem entspricht die über den Monat gemittelte Fördermenge nur näherungsweise den Entnahmen zum jeweiligen Zeitpunkt der Stichtagsmessungen. Nachweislich sind Schwankungen der Entnahmen brunnenweise und innerhalb eines Tages möglich (Sommervon Jarmersted 1992).

Gebiete, in denen die Abweichungen höher ausfallen, sind vor allem die Hochflächenbereiche des Barnims nördlich vom Wasserwerk Wuhlheide und östlich von Buch. Zwischen diesen beiden Arealen und nördlich der Wasserwerke Friedrichshagen (Nordgalerien), Schönow und

Tab. 2 Bilanzanteile der Teilmodelle im Ergebnis der Kalibrierung im Vergleich

Bilanzanteile	Havelwerke [m³/d]	Spreewerke [m³/d]	Bemerkungen
Grundwasserentnahmen	-431.172	-305.689	Brunnen der Wasserwerke und Eigenwasserversorgungs- anlagen
Abfluss	-88.759	-86.850	Abfluss aus dem Grundwasser in das Oberflächenwasser oder aus dem Modellgebiet
Summe negativ	-519.931	-392.839	
Grundwasserneubildung	+222.735	+238.387	Summe der Einzelflächen (Polygone) von Modell berechnet und modifiziert
Grundwasseranreicherung	+69.308		ohne Grunewaldseenkette und Teufelsbruch
Zufluss	+225.728	+154.785	Zufluss aus dem Oberflächenwasser in das Grundwasser oder in das Modellgebiet
Summe positiv	+522.771	+393.172	
Bilanz	+2.840	+333	Summe positiv minus Summe negativ



Werneuchen werden die Wasserstände dagegen niedriger gerechnet. In den genannten Bereichen bewirken mehrere Ursachen diese Differenzen. Im Ergebnis der Modellrechnungen sind Abweichungen zu erwarten, die im Zusammenhang mit den Modellannahmen zu begründen sind. So liegen in den Hochflächenbereichen in Brandenburg die Schnitte nur in Abständen von jeweils 5 Kilometern vor. Dadurch sind Unsicherheiten bei der Regionalisierung der Parameter zur Erstellung der Modellgrundwasserleiter zu erwarten. Primär resultieren die Abweichungen aber aus der für die Regionalisierung der Grundwasserdynamik unzureichenden Datenbasis. Die modellierten Wasserstände werden generell für den genutzten Hauptgrundwasserleiter berechnet. Im Gebiet der Barnim-Hochfläche existieren in Berlin und in Brandenburg aber hier nur wenige repräsentative Messstellen. Den auf dieser Basis interpolierten Grundwasserständen muss daher eine relativ große Unsicherheit zugesprochen werden. Der Vergleich mit den simulierten Wasserständen hat somit in diesem Gebiet nur begrenzte Aussagekraft.

Hinzu kommen Fehlerquellen, die aus der Bearbeitungsmethodik bei der Erstellung des großräumigen Grundwassermodells abzuleiten sind. Sie wirken modellweit und erschweren die Anpassung. Dazu zählen die Verallgemeinerungen beim Aufbau des hydrogeologischen Modells, dessen Fehler statistisch gesehen über das Modellgebiet zu vernachlässigen ist, aber kleinräumig Abweichung bewirken kann. Genauso verhält es sich mit den Grundwasser-

neubildungsraten, die als Mittelwert der langjährigen Messreihe von 1961 bis 1990 in das Modell eingingen. Dieser Zeitraum ist jedoch für den Zustand der Kalibrierung nicht repräsentativ, wodurch besonders in den Hochflächenbereichen Fehler entstehen können.

Eine Verifizierung der Modellergebnisse durch eine instationäre Berechnung (Q₃₆₅) wurde im Rahmen der hydrologischen Berechnungen nicht durchgeführt, wäre aber durchaus sinnvoll. Anstelle eines Vergleichs mit weiteren Stichtagsmessungen bei anderen Entnahmemengen konnten die Ergebnisse von Zippel (2006) genutzt werden. Hier wurden für den zentralen Bereich der *Spreewerke* erfolgreich mehrere Entnahmezustände im Zeitraum von 1989 bis 1999 kalibriert und verifiziert.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ermittlung des Grundwasserdargebotes für die bei der Behörde beantragten Entnahmemengen (Q₃₆₅) erfolgte werksweise auf Basis der kalibrierten Modelle. Hierfür wurden die für die Kalibrierung verwendeten Entnahmemengen durch die beantragten Entnahmemengen ersetzt und anschließend die Dargebotsanteile berechnet (Tab. 3 und 4). Die neuen Teileinzugsgebiete der einzelnen Werke wurden dazu anhand der auf den beantragten Entnahmemengen basierenden Stromlinien im Anstrom auf die einzelnen Brunnengalerien ausgewiesen und separat betrachtet.

Tab. 3 Dargebotsanteile der sechs Spree-Werke auf Basis der Entnahmen Q365

Einzugsgebiete (EZG) der Werke	EZG [km²]	Neubildung [m³/d]	Uferfiltrat [m³/d]	% Uferfiltrat
FRI Nord (A bis F)	187,9	55.976	165.768	78,4
FRI Süd (G bis M)	63,2	16.799	68.248	82,2
Altglienicke (ALT)	31,1	10.381	2.267	17,2
Johannisthal (JOH)	96,3	30.931	17.235	43,3
Wuhlheide (WUH)	114,1	41.941	13.662	26,2
Kaulsdorf (KAU)	69,2	21.051	2.552	10,2
Buch (BUC)	44,7	12.054	1.574^{1}	11,71
Summe EZG	606,5	189.133	271.306	59,9

¹ Hier handelt es sich bei der Angabe zum "Uferfiltrat" nicht um Zufluss aus Oberflächengewässern, sondern aus unbedeckten Grundwasserleitern in bedeckte und tief liegende Grundwasserleiter (sog. "leakage"-Effekt)

Tab. 4 Dargebotsanteile der fünf Havel-Werke auf Basis der Entnahmen Q365 (GWA: Grundwasseranreicherung)

Einzugsgebiete (EZG) der Werke	EZG [km ²]	GWA [m³/d]	Neubildung [m³/d]	Uferfiltrat [m³/d]	% Uferfiltrat
Tegel (TEG)	108,6	21.918	19.469	131.739	78,5
Spandau (SPA)	93,4	32.877	27.888	28.806	29,8
Tiefwerder (TIE)	70,6	0	21.103	32.022	62,1
Beelitzhof (BEE)	144,5	8.219	21.108	76.731	59,4
Kladow (KLA)	19,7	0	7.727	11.475	83,1
Summe EZG	436,8	63.014	97.322	280.773	61,7



Das Grundwasserdargebot nach DIN 4049 umfasst die "Summe aller positiven Glieder der Wasserbilanz in einem Grundwasserabschnitt" (hier: in einem Einzugsgebiet eines Wasserwerkes). In Berlin liegt der Sonderfall vor, dass die meisten Brunnengalerien dafür konzipiert wurden, hauptsächlich – teilweise sogar ausschließlich – Uferfiltrat zu fördern. So wird der Hauptanteil des Dargebotes von 60 % und mehr über Uferfiltrat aus Oberflächengewässern gewonnen. Lediglich der geringere Teil wird durch Grundwasserneubildung und im Bereich der Havelwerke auch durch Grundwasseranreicherung bereitgestellt. Bei den Berechnungen wird deutlich, dass innerhalb der Teileinzugsgebiete der Werke bei den beantragten hohen Entnahmemengen nahezu der gesamte Anteil an Grundwasserneubildung durch die Entnahmen genutzt wird. Die Wasserwerksbrunnen nehmen also die Vorflutfunktion der Oberflächengewässer ein. Dabei tritt z.T. eine Beeinflussung der Einzugs- bzw. Teileinzugsgebiete der Werke untereinander auf.

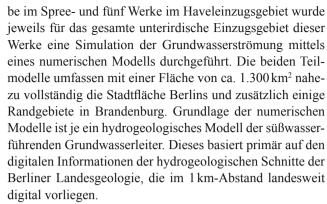
Der über die Neubildungsraten hinausgehende Bedarf kann mengenmäßig nur durch Uferfiltrat ergänzt werden. Dies hat zur Folge, dass der Bedarf bei höheren Entnahmen oder bei zukünftig aufgrund klimatischer Veränderungen verringerter Grundwasserneubildungsraten (BWB 2008) nur noch über eine verstärkte Nutzung des Uferfiltrats gedeckt werden kann. Zur Sicherung des Grundwasserdargebotes für die Region Berlin ist es daher außerordentlich wichtig, die durch die Natur bereit gestellte Möglichkeit der Uferfiltration im Ergebnis der hydraulischen Durchlässigkeit der Uferbereiche, der Gewässerqualität sowie der Abflussmenge der Oberflächengewässer langfristig zu erhalten.

Weiterhin bietet sich die Nutzung der Teilmodelle für Prognoserechnungen an. Durch die vollständige Abbildung der unterirdischen Einzugsgebiete der Wasserwerke und der Kopplung zu den Oberflächengewässern sind Aussagen hinsichtlich potenzieller klimatischer Veränderungen möglich. Auswirkungen möglicher Änderungen in der Höhe der Grundwasserneubildung sowie Variationen der Entnahmestandorte (Brunnengalerien) für den Bereich der "Spreewerke" konnten bereits bei Zippel (2006) gezeigt werden.

Für die Spreewerke wurde aufgrund der guten Datenlage die instationäre Simulation kurzfristiger Erhöhung der Entnahmemengen (Q₃₀, Q₇) erfolgreich durchgeführt. Damit konnte einerseits das Strömungsmodell verifiziert und andererseits die Ergiebigkeit des Grundwasserleiters für diese Extremfälle gezeigt werden. Hier wird die gängige Praxis der sommerlichen Spitzenentnahmen mit verstärkten Absenkungen entlang der Brunnengalerien im Modell nachvollzogen.

Zusammenfassung

Mit dem Ziel der Bewertung der beantragten Entnahmemengen (Q₃₆₅) für sechs Wasserwerke der Berliner Wasserbetrie-



Anschließend wurde das Teilmodell Spreewerke für den Zeitraum Mai 1991, das Teilmodell Havelwerke für Mai 2002 kalibriert und die wesentlichen Parameter ermittelt (z.B. Uferfiltratanteile). Hierfür konnte zum Vergleich u.a. der seitens des Senats erstellte Gleichenplan des Hauptgrundwasserleiters von Berlin herangezogen werden. Aus den sich ergebenden Stromlinien wurde die Abgrenzung des unterirdischen Einzugsgebietes aller Werke sowie der entsprechenden Teileinzugsgebiete abgeleitet. Im Modellgebiet liegen noch weitere Werke bzw. hydraulisch wirksame Anlagen, die jedoch nicht Gegenstand der Berechnungen waren. Mit dem lauffähigen stationären Modell wurden die Auswirkungen der beantragten Entnahmemengen sowie hieraus abgeleitete Erhöhungen dieser Mengen für die Grundwasserstände nachgebildet. Anschließend wurde eine Ermittlung der Vorräte im Gesamtgebiet und pro Werk durchgeführt. Für die Spreewerke konnte aufgrund der guten Datenlage auch eine instationäre Berechnung kurzfristiger Erhöhung der Entnahmemengen (Q₃₀, Q₇) simuliert werden.

Damit steht erstmalig ein Grundwasserströmungsmodell für das gemeinsame Einzugsgebiet aller Berliner Wasserwerke zur Verfügung. Diese Modellgrundlage erlaubt die realitätsnahe Ermittlung der Dargebotsmengen sowie weiterführende Prognoserechnungen, z.B. hinsichtlich klimatisch bedingter, zukünftiger Änderungen der Wasserbilanz in der Region. Wechselwirkungen der Teileinzugsgebiete und der Einfluss von Neubildungs- und Uferfiltratanteilen werden erkennbar.

Literatur

ad-hoc-AG Hydrogeologie: Hydrogeologische Kartieranleitung. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Staatliche Geologische Dienste der Bundesrepublik Deutschland, Geologisches Jahrbuch, Reihe G, Heft 2; Hannover (1997)

BWB: Wasserversorgungskonzept für Berlin und für das von den BWB versorgte Umland (Entwicklung bis 2040). http://www.bwb.de/content/language1/downloads/Wasserversorgungskonzept.pdf (2008)

DGG: Hydrogeologische Modelle – Ein Leitfaden für Auftraggeber, Ingenieurbüros und Fachbehörden in der Grundwasserwirtschaft. AK "Hydrogeologische Modelle" der Fachsektion Hydrogeolo-



- gie in der DGG. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft 10; Hannover (1999)
- Hannappel, S., Jahnke, C., Eichberg, M.: Hydrogeologisches Strukturmodell im Rahmen des Wasserwirtschaftlichen Ressourcenmanagement für das Wasserwerk Tegel der Berliner Wasserbetriebe. In: Wasserbewirtschaftung – einzugsgebietsbezogen und integrativ. Aktuelle Reihe der BTU, Teil II, BTUC-AR 4.2/2000, ISSN 1434-6834; Cottbus (2000)
- Hannappel, S., Asbrand, M.: Entwicklung eines hydrogeologischen Modells im unterirdischen Einzugsgebiet eines Wasserwerks im Lockergestein. In: Fachsektion Hydrogeologie der DGG (Hrsg.): Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft 24, Hydrogeologische Modelle, 55–68; Hannover (2002)
- HYDOR: Hydrologische Berechnungen zum Nachweis des Grundwasserdargebotes für die Wasserwerke Tegel, Spandau, Tiefwerder, Kladow und Beelitzhof der Berliner Wasserbetriebe. Gutachten im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin (unveröff.) (2004)
- HYDOR: Hydrologische Berechnungen zum Nachweis des Grundwasserdargebotes für die Wasserwerke Friedrichshagen, Altglienicke, Johannisthal, Wuhlheide Kaulsdorf und Buch der Berliner Wasserbetriebe. Gutachten im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin (unveröff.) (2007)

- LBGR: Hydrogeologische Karte von Brandenburg 1:50.000, Blatt L3746 Königs Wusterhausen. Landesamt für Bergbau, Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg; Cottbus (2004)
- Limberg, A., Thierbach, J.: Hydrostratigrafie in Berlin. Korrelationen mit dem norddeutschen Gliederungsschema. Brandenburger Geowiss. Beitr. 9(1/2), 65–68 (2002); Kleinmachnow
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W.: MODFLOW a modular free dimensional finite difference ground water flow model. U. S. Geological Survey, Open file report, 83–875, Kap A1 (1988)
- Senstadt: Digitaler Umweltatlas Berlin, Karten 02.13 Oberflächenabfluss, Versickerung, Gesamtabfluss und Verdunstung aus Niederschlägen (Ausgabe 2007); http://www.stadtentwicklung. berlin.de/umwelt/umweltatlas/ib213.htm (2007)
- Sommer-von Jarmersted, C.: Hydraulische und hydrochemische Aspekte der Uferfiltration an der Unterhavel in Berlin. Berliner Geowiss. Abh., Reihe A, 140–149 (1992); Berlin
- WHI: Visual Modflow, The industry standard for 3D groundwater flow and contamination transport modeling. Waterloo Hydrogeologic, User's Manual; Waterloo, Ontario (2005)
- Zippel, M.: Modellgestützte Bilanzierung der unterirdischen Wasserressourcen Berlins – die Grundwassersituation im weiteren Einzugsgebiet des Müggelsees. Diss. FU Berlin; http://www.diss. fu-berlin.de/2006/668 (2006)

