

6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Der Wasserhaushalt der Region Berlin und dem angrenzenden brandenburger Umland wird durch die Förderung von Grundwasser zur Trinkwassergewinnung stark anthropogen überprägt. Dabei beträgt der durch Grundwasserneubildung in den Einzugsgebieten gebildete Anteil nur durchschnittlich die Hälfte der Entnahmen durch die Wasserwerke. Dieser Anteil ist im wesentlichen von klimatischen Prozessen abhängig. Die andere Hälfte wird durch den Prozeß der Uferfiltration den Oberflächengewässern entnommen. Die Uferfiltration muß in Abhängigkeit von der Entnahmemenge den zur Neubildung fehlenden Anteil an der Förderung bereitstellen. Diese Anteile erwiesen sich in der Vergangenheit aber keineswegs als konstant. Die Förderung ging seit 1989 wegen geringeren Wasserverbrauchs um bis zu 50% zurück, während sich gleichzeitig die Grundwasserneubildung laut Untersuchungen des Landesumweltamtes durch Klimaänderungen verringerte. Diese Trends setzen sich fort und zeigen bereits deutlich meßbare Auswirkungen auf die Grundwasserdynamik und die Abflußverhältnisse der Region. Um die Folgen für die regionale Grundwasserdynamik zu untersuchen wurde mit der vorliegenden Arbeit erstmalig ein 3D-Grundwasserströmungsmodell für die wasserwirtschaftlich bedeutende Region im Südosten Berlins aufgebaut. Das Modell umfaßt die durch Entnahmen von sechs Wasserwerken beeinflussten Bereiche ihrer Einzugsgebiete, die überwiegend im Berliner Urstromtal liegen. Simuliert wurde die Grundwasserströmung in den oberen genutzten süßwasserführenden quartären Grundwasserleitern. Die geringe Entfernung zwischen den Brunnengalerien der Wasserwerke und die gemeinsame Nutzung der hydraulisch verbundenen Grundwasserleiter lassen ein zusammenhängendes Einzugsgebiet entstehen, innerhalb dessen Konkurrenz um das Dargebot besteht. Eine solche regionale Betrachtung hat es für Berlin noch nicht gegeben. Eine Besonderheit dieses Betrachtungsgebietes ist auch die Tatsache, daß die Grundwasserentnahmen aus einem oberflächennahen Grundwasserleiter innerhalb des Stadtgebietes erfolgen. Dieses System ist daher sehr sensibel gegenüber anthropogenen Beeinflussungen und macht Simulationen dieser Zusammenhänge aus wasserwirtschaftlicher ökologischer und infrastrukturell-stadtplanerischer Sicht zwingend erforderlich.

Um die notwendigen hydrogeologischen Parameter (kf-Werte) für die Simulation in ihrer Verteilung im Raum zu erhalten, wurde ein datenbankgestütztes hydrogeologisches Modell der quartären Grundwasserleiter und Grundwasserhemmer mit einer Größe von 452 km² erstellt. Da zum Zeitpunkt der Bearbeitung kein einheitliches hydrogeologisches Kartenwerk vorlag, kamen als Grundlage vorhandene geologische Erkundungen von Teilflächen des Modellgebietes zur Anwendung. Neben der Vereinheitlichung der inhaltlichen Informationen mußte auch der Bezug aller Unterlagen zum genutzten Gaus-Krüger Koordinatensystem hergestellt werden. Im Ergebnis wurden acht stratigraphisch begründete Horizonte ausgewiesen. Für jeden Horizont sind die Informationen zu Stratigraphie, Petrographie und Mächtigkeit quadratkilometerweise gemittelt und ein Raster mit 452 Datenpunkten erstellt worden. Aus dieser Methodik resultierten Vereinfachungen, die sich auf die Modellgenauigkeit aber nur bei kleinräumigen Detailbetrachtungen auswirkten, wie an einem Beispiel gezeigt werden konnte. Für die Betrachtung der Grundwasserströmung auf der regionalen Maßstabsebene erwiesen sich Struktur und Auflösung des hydrogeologischen Modells als stabile Grundlage.

Für die Grundwasserneubildung kamen langjährige Mittelwerte des Landes Brandenburg bezogen auf ein 4-Quadratkilometer-Raster zur Anwendung. Die den Szenarien zugrunde

liegenden Veränderungen der Grundwasserneubildung beruhen auf neuesten Forschungsergebnissen zur Klimaentwicklung in der Region Brandenburg, die in dieser Form bisher noch nicht vorlagen (LAHMER 2003A). Regionale Klimaprognosen wurden dazu mit Wasserhaushaltsmodellen im Rahmen des Projektes GLOWA („Globaler Wandel des Wasserkreislaufes“, www.glowa.org) gekoppelt, wodurch es erstmals möglich wurde, Aussagen über die mögliche langfristige Entwicklung der Grundwasserneubildung zu machen. Diese Arbeiten erfolgen nach den Erfordernissen der EU-WRLL und zukünftig auch mit dem Ziel, die Wasserhaushaltsmodelle mit Grundwassermodellen zu koppeln. Diese Kopplung wird bereits im Rahmen des Projektes KLIWA („Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, www.kliwa.de) angestrebt. Diese Idee wurde für die Szenarien-Rechnungen dieser Arbeit aufgegriffen und umgesetzt. Damit wurden erstmalig durch Klima-Szenarien gestützte Aussagen zur regionalen Entwicklung der Grundwasserneubildung mit dem Grundwassermodell einer Teilregion Berlin/Brandenburgs gekoppelt. Durch die Bilanzierung des grundwasserseitigen Teils des Wasserhaushaltes entsteht eine Entscheidungshilfe für das wasserwirtschaftliche Management dieser Region, das sowohl heutige und zukünftige Dargebotsfragen als auch ökologische Aspekte berücksichtigt und grundlegende Argumente für die zwingend notwendige nachhaltige Nutzung der Ressource Wasser in dieser Region liefert.

Zur Modellierung der Grundwasserströmung wurde der Simulator FEFLOW genutzt. Das Modellgebiet umfaßt eine Fläche von ca. 310 km² und wurde in 12 Modell-GWL mit durchschnittlicher Mächtigkeit von je 5 Metern untergliedert. Als Modellbasis wird die Oberkante des flächenhaft verbreiteten bindigen Holstein-Interglazial festgelegt. Das Finite-Elemente Netz umfaßt ca. 330.000 Knoten und 600.000 Elemente. Der Knotenabstand variiert von ca. 10-300 m. Die Diskretisierung erfolgte besonders entlang der Uferbereiche und der Brunnengalerien.

Für die Kalibrierung und Validierung des Modells lagen Förderdaten der Brunnengalerien und Ganglinien der Grundwassermeßstellen aus dem Bearbeitungszeitraum 1989-1999 vor. Die Modellkalibrierung erfolgte am Förderzustand der Wasserwerke im Mai 1996. Der Schwerpunkt der Kalibrierung lag auf der Anpassung der Austauschraten zwischen Oberflächen- und Grundwasser (Uferfiltration), da für diese Größe nur wenige Informationen vorlagen aber die Uferfiltration mit mehr als 50% der Grundwasserentnahmen einen wesentlichen Bilanzfaktor darstellt. Da die Geologie des Betrachtungsgebietes vergleichsmäßig gut erkundet ist, wird davon ausgegangen, daß mit dem vorliegenden hydrogeologischen Modell die höchstmögliche Anpassung erreicht ist. Daher wurden die kf-Werte als unveränderlich angesehen obwohl sie bei der Kalibrierung der sensitivste Faktor sind (SOMMERHÄUSER, 1998; MCADA & BARROLL, 2002 und HAUGH, 2002). Jede weitere Veränderung der kf-Werte kann zwar durch diese hohe Wichtung zu einer besseren Modellanpassung führen, muß aber keineswegs der Realität entsprechen.

Die beste Modellanpassung konnte durch die abschnittsweise Zuweisung des Transferfaktors entlang der Uferbereiche erzielt werden. Damit wird eine detaillierte Bilanzierung der Uferfiltratanteile einzelner Brunnengalerien möglich. Weiterhin bildeten die Anpassung des Finite-Elemente Netzes und der hydraulischen Verbindungen entlang der Modellbasis wichtige Teilschritte der Kalibrierung.

Zur Validierung wurden die hydraulisch abweichenden stationären Zustände Mai 1989 und Mai 1999 am Anfang und Ende des Betrachtungszeitraumes genutzt. Es wurde eine mit dem

kalibrierten Modell vergleichbare Modellanpassung erreicht, wenn man berücksichtigt, daß erst eine Plausibilitätsprüfung die Annäherung an die tatsächlichen Entnahmemengen für Mai 1989 ermöglichte. Die abschnittsweise Anpassung der Transferfaktoren konnte nicht validiert werden, so daß ein einheitlicher Transferfaktor für das gesamte Modellgebiet zur Anwendung kommt.

Auch die Leckagemengen sind nicht für geänderte Fördermengen zu validieren. Daher wurde das Modell ohne Basis-Leckage verwendet. Nachdem das Modell an verschiedenen stationären Zuständen getestet wurde, erfolgte zur Bestätigung noch eine instationäre Verifizierung mit der Simulation des Jahresganges der Förderung der Wasserwerke 1996. Dieser Modellauf bestätigt die Ergebnisse der stationären Rechnungen. Als letzte Voraussetzung zur Eignung des Modells für die Rechnung von Szenarien wurde die Sensitivität des Modells gegenüber Veränderungen der Randbedingungen überprüft, die bei der Szenarienrechnung variiert werden sollten. So haben die Grundwasserneubildung und die Höhe im Randzustrom nachweisbar entscheidenden Einfluß auf die Modellanpassung.

Als weiteres Ergebnis dieser Tests wurde deutlich, daß die hier genutzte Auflösung des hydrogeologischen Modells keine Detailbetrachtungen auf der Maßstabsebene unterhalb einzelner Brunnengalerien zulassen. Teileinzugsgebiete der Brunnengalerien können aber ausgegrenzt und bilanziert werden. Außerdem kann die Interaktion zwischen Teileinzugsgebieten und der Umfang der Auslastung des gemeinsam genutzten Grundwasserleiters nachgewiesen werden. Hauptsächlich ist es mit diesem Modellkonzept möglich, regionale Zusammenhänge der Grundwasserdynamik zu modellieren und zu bilanzieren, ohne daß eine hohe Netzdiskretisierung und eine Überladung des Modells mit detaillierten geologischen Informationen die Modellperformance beeinträchtigen. Besonders aufgrund der Vereinfachungen beim Aufbau des hydrogeologischen Modells lassen sich mit diesem Konzept nur Grundwasserströmungsprozesse, aber keine Transportprozesse abbilden.

Mit dem Modell wurden zwei Szenariengruppen gerechnet, um die Auswirkungen der Einflußfaktoren „wasserwirtschaftliche Nutzung“ (Entnahmemenge) und „klimatische Einflüsse“ (Grundwasserneubildung) getrennt zu bestimmen und die Auswirkungen auf die Grundwasserdynamik zu bilanzieren und darzustellen:

1. Die „wasserwirtschaftlich begründeten Szenarien“ entsprechen strategischen Überlegungen der Berliner Wasserbetriebe. Sie zeigen die komplexen Auswirkungen unterschiedlicher Fördermengen und Förderstandorte auf die Grundwasserdynamik, von der Ausnutzung der genehmigten Fördermengen bis zu geplanten Strategien im Jahr 2010. Zusätzlich wurde die bestmögliche Näherung an den Zustand ohne Förderung simuliert.

Es konnte gezeigt werden, daß:

- sich die Änderung der Förderung einer Brunnengalerie (oder eines Wasserwerkes) nicht nur im zugehörigen Einzugsgebiet auswirkt, sondern auch eine Lageänderung der benachbarten Einzugsgebiete und dort die Veränderung der Bilanzanteile von Uferfiltrat und Neubildung bewirkt.
- die Anteile der (landseitigen) Grundwasserneubildung und der Uferfiltration abhängig vom Förderregime sind. Höhere Förderung bewirkt eine Konkurrenz der Einzugsgebiete durch Flächenvergrößerung, verstärkte Absenkungen und höhere Uferfiltratanteile. Der mengenmäßige Anteil der Grundwasserneubildung bleibt durch die flächenmäßige Begrenzung der Einzugsgebiete nahezu konstant.

- sich die Grundwasserstände in Abhängigkeit vom verwendeten Szenario entlang der Brunnengalerien um bis zu 5 Meter unterscheiden können. Bei der Stilllegung von Wasserwerken stellen sich im Urstromtal wieder Flurabstände kleiner zwei Meter ein und es erfolgt eine Exfiltration von Grundwasser in die Vorflut.

2. Die „hydrologisch begründeten Szenarien“ verdeutlichen die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Grundwasserdynamik und das Grundwasserdargebot. Die Auswirkungen einer langanhaltenden „Trockenheit“ und einer langanhaltenden „Nässe“ wurden verglichen.

Es konnte gezeigt werden, daß:

- diese Prozesse die Grundwasserdynamik und das Dargebot mehr beeinflussen, als derzeitige und geplante Veränderungen im Förderregime der Wasserwerke! Bei geringerer bzw. fehlender Grundwasserneubildung reduziert sich ein wichtiger Bilanzteil, der dann nur durch Uferfiltration ausgeglichen werden kann. Allerdings ist dieser Anteil bei geringem Abfluß der Oberflächengewässer auch nicht endlos strapazierbar - z.Zt. werden maximal ca. 1,5 m³/s genutzt, die besonders in Trockenzeiten zukünftig nicht durch den Abfluß der Spree gesichert sind. Der Grundwasserleiter wird in dieser Situation beansprucht wie bei Annahme einer extrem hohen Förderung. Die Wasserstände im Urstromtal könnten dauerhaft bis zu 2 Meter absinken und die Einzugsgebiete vergrößern sich um durchschnittlich 30%. Es resultiert die flächenmäßige Auslastung des gesamten Grundwasserleiters, woraus eine natürliche Dargebotsbegrenzung folgt. Diesem Zustand sind weder das derzeitige Monitoring noch die auf Grundlage mittlerer Neubildung berechneten Schutzgebiete angepaßt.
- der Grundwasserspiegel zwischen dem Zustand einer langanhaltenden „Trockenheit“ und einer langanhaltenden „Nässe“ um bis zu vier Meter schwanken kann. Dabei sind die Bereiche entlang der Gewässer weniger beeinflusst als die gewässerfernen Modellgebiete im Anstrom von den Hochflächen.

Berücksichtigt man diese Erkenntnisse, müssen Dargebotsberechnungen, Festlegungen von Schutzgebieten und der Grundwasser-Monitoringnetze langfristige klimatische Trends und die Entwicklung des Abflusses der Oberflächengewässer beinhalten. Besonders die unter Punkt 1. genannten Ergebnisse zur Interaktion von Wasserwerkseinzugsgebieten begründen die Notwendigkeit der Verwendung solcher einzugsgebietsübergreifenden Wasserhaushalts-simulationen. Durch die Modellierung der Einzugsgebiete einzelner Wasserwerke können solche Zusammenhänge gar nicht erkannt werden. Da aber im berliner Raum eine Konkurrenz der Wasserwerksstandorte um ein gemeinsam genutztes Dargebot besteht, ist die vorgestellte regionale Betrachtung eine erforderliche Ergänzung zu den Detailmodellen einzelner Wasserwerke.

Sollte in Zukunft das in klimatischer Hinsicht wahrscheinlichste Szenario einer „Trockenheit“ Realität werden und dadurch bedingt die Wasserwerke ihre Leistung erhöhen, wird das nur über einen steigenden Anteil der Uferfiltration möglich sein. Daher müssen ein nachhaltiges wasserwirtschaftliches Management und auch die Forschung besonders auf die Erhaltung des hydraulischen Uferfiltrat-Vermögens sowie auf die Erhaltung eines ausreichenden Mindestabflusses der Oberflächengewässer ausgelegt sein. Dazu zählt auch die Verbesserung der Wasserqualität, da der Schwebstoffanteil den Kolmationsprozeß wesentlich beeinflusst.

Wird dagegen eine „Nässe“ Realität, sind in weiten Bereichen des Urstromtals verringerte Flurabstände und dadurch infrastrukturelle Probleme zu erwarten. Ein vergleichbarer Effekt tritt bei der Stilllegung von Brunnengalerien bzw. Wasserwerken ein. In einem solchen Fall müßte gleichzeitig zur Aufrechterhaltung der Gesamtmenge an anderen Standorten die Förderung erhöht werden. Verstärkte Absenkungen und forcierte Uferfiltration wären in diesen Bereichen die Folge und daher ist ein solches Szenario nicht für eine Realisierung zu empfehlen.

Zusammenfassend kann eine Grundwasserentnahme im Sinne einer nachhaltigen Nutzung der Ressource Wasser wie folgt empfohlen werden. Wenn die Entnahme nicht durch andere Umstände beschränkt wird, sollte sie mit einer gleichmäßigen geringen Lastverteilung über alle verfügbaren Brunnengalerien erfolgen. Damit wird das verfügbare landseitige Dargebot einer möglichst großen Einzugsgebietsfläche genutzt, was besondere Bedeutung erlangt, wenn sich dieses Dargebot im Falle einer „Trockenheit“ verringert. Zusätzlich kann so auch die Uferfiltratentnahme mit geringer Leistung auf lange Uferbereiche verteilt werden. Damit verlangsamt sich eine mögliche Kolmation der betroffenen Bereiche, da die geringere Absenkung entlang der Galerien den Prozeß begrenzt. Die geringe Absenkung verhindert auch einen möglichen förderbedingten Salzaufstieg. Dieses Konzept der dezentralen und über lange Galerien verteilten Entnahmen kann auch so gesteuert werden, daß Feuchtgebiete erhalten und an anderen Standorten geringe Flurabstände vermindert werden. Diese Steuerung setzt aber voraus, daß diese Gebiete auch im Absenkungsbereich der Galerien liegen. Denn diese Arbeit hat gezeigt, daß gerade der Einfluß geringer Entnahmen durch die Auswirkungen klimabedingter Prozesse überlagert werden können.

Aussichten

Da inzwischen für Berlin und das angrenzende Land Brandenburg flächendeckend hydrogeologische Karten vorliegen, könnte auf dieser Basis das Modellkonzept auch für den gesamten Großraum Berlin ausgebaut werden. Damit würde ein Instrument für die Betrachtung des Wasserhaushaltes vorliegen, das mit den Untersuchungen zum gesamten Einzugsgebiet der Spree gekoppelt werden kann. Dieses Strömungs- und Bilanzmodell kann die Grundlage bilden, die Betrachtung an Problembereichen auf Untersuchungen zum Stofftransport auszuweiten. Dafür muß aber die Auflösung des hydrogeologischen Modells erheblich verbessert werden, denn für die realitätsnahe Abbildung des Stofftransportes ist jedes Hindernis in Form noch so geringmächtiger stauender Horizonte von Bedeutung (HANSEN & GRAVESEN, 1996). Diese erforderliche Genauigkeit kann für regionale Betrachtungen nur mit großem Aufwand erreicht werden. Meist ist jedoch die Datenlage nicht ausreichend. So begründet sich, daß bisher nur Transportmodelle für kleinere Gebiete bekannt sind. Auch die Verwendung von stochastischen Verfahren zur Darstellung der geologischen Verhältnisse scheitert in diesem Falle an der notwendigen Datendichte und sie sind zudem nicht für Transportprobleme geeignet (HANSEN & GRAVESEN, 1996). Eine Lösung stellt eventuell die Einbindung hochauflösender Teilmodelle im Umkreis von interessierenden Standorten dar. So kann die regionale Dynamik mit dem kleinräumigen Fließgeschehen gekoppelt werden.

Neben der o.g. flächenmäßigen Vergrößerung des Modellgebietes sollte eine Fortführung des Modellvorhabens vor allem auch unter der Berücksichtigung der tieferen Grundwasserleiter erfolgen. Bisher erfolgt die Begrenzung im Liegenden des Hauptgrundwasserleiters mit dem Holstein-Interglazial als Liegendstauer. Da dieser schon im vorliegenden Betrachtungsgebiet und

erst recht berlinweit Fehlstellen aufweist, müssen die tieferen quartären und tertiären Grundwasserleiter in die Betrachtung mit einbezogen werden. Auf dieser Basis könnten dann auch regional die Möglichkeiten für natürliche und förderbedingte Salzaufstiege simuliert werden. Die Ausrichtung des wasserwirtschaftlichen Managements auf den Erhalt der süßwasserführenden Grundwasserleiter zur Sicherung der Trinkwasserversorgung hat höchste Priorität.

Eine weitere Verbesserung des Modells würde eine instationäre Betrachtung über einen längeren Zeitraum darstellen, der nicht nur wechselnde Fördermengen, sondern auch die zeitliche Variation der tatsächlichen Grundwasserneubildungsmengen zugrunde liegen. In der vorliegenden Arbeit wurden langjährige Mittelwerte variiert und eine Tendenz aus den Niederschlagssummen abgeleitet. Aber für exakte Bilanzbetrachtungen eines Wasserhaushaltsjahres sind auch die entsprechenden Neubildungswerte erforderlich. Werden diese Neubildungsganglinien mit den Klimaszenarien verknüpft, lassen sich Szenarien für mögliche zukünftige innerjährliche Schwankungen ableiten.