

1. Einleitung

Problemstellung

Weltweit ist man zu der Erkenntnis gelangt, daß die Versorgung der Bevölkerung mit ausreichend qualitativ gutem Wasser eine Aufgabe mit hoher Priorität in der heutigen Zeit und in der Zukunft darstellt, denn die Verfügbarkeit der bekannten Wasserressourcen zur Trinkwassergewinnung ist begrenzt. Dieser Zustand wird nicht nur durch den steigenden Bedarf einer wachsenden Weltbevölkerung weiter verschärft, sondern es erfolgt auch zunehmend eine Beschränkung des Dargebots durch großräumige Änderungen der klimatischen Rahmenbedingungen. Gerade in Hinsicht auf die Klimaentwicklung ist die Forschung mit Ergebnissen an Politik, Wirtschaft und die Öffentlichkeit herangetreten, die unter dem Schlagwort „globale Erwärmung“ erstmalig 1990 im Bericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) zusammengetragen wurden. Vor diesem Hintergrund wurde auf der dritten Klimakonferenz 1997 im japanischen Kyoto das Kyoto-Protokoll beschlossen, um durch weltweite Begrenzung der CO₂-Emissionen den Treibhauseffekt und damit eine weitere Erwärmung zu verlangsamen. Der Zusammenhang ist natürlich offensichtlich – mit steigenden Temperaturen wird der Bedarf an Trinkwasser wachsen und vorhandene Wasserreserven werden schneller mobilisiert (höhere Verdunstung, abschmelzen von Gletschern, etc.) und gehen damit für eine Nutzung verloren. Der globale Klimatrend zeigt allerdings regional unterschiedliche Auswirkungen, die auf dieser Maßstabsebene im Rahmen unterschiedlicher Forschungsprojekte untersucht werden. Innerhalb Europas wird sich dabei auf die Flußeinzugsgebiete konzentriert, wie es in der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT 2000) gefordert wird. Als ein Pilotprojekt gilt das BMBF-Programm GLOWA („Globaler Wandel des Wasserkreislaufes“, www.glowa.org), dessen Ziel es ist, anhand europaweiter Fallstudien Strategien für eine nachhaltige und vorausschauende Bewirtschaftung von Wasser im regionalen Maßstab zu entwickeln.

Eingebunden in das Teilprojekt GLOWA-ELBE liegen neueste Ergebnisse der Untersuchungen zur zukünftigen Entwicklung im Wasserhaushalt der Region Berlin/Brandenburg vor, die bereits regionale Klimaszenarien berücksichtigen (WECHSUNG et al. 2004). Um eine vollständige Analyse des Wasserhaushalts durchzuführen fehlt aber bisher die Kopplung zur Grundwasserdynamik. Dieser Aspekt wird um so wichtiger, wenn man bedenkt, daß der überwiegende Teil der Trinkwassergewinnung für Berlin und Brandenburg durch Grundwasserentnahmen gewährleistet wird.

Die Notwendigkeit die Region Berlin/Brandenburg hinsichtlich der begrenzten Verfügbarkeit seiner Wasserressourcen zur Trinkwassergewinnung zu untersuchen, kann bei einer oberflächlichen Betrachtung in Frage gestellt werden, denn in der Region erweckt eine Fülle an Oberflächengewässern den Eindruck von Wasserreichtum. Allerdings weist die klimatische Wasserbilanz auf Grund der geringen Niederschläge (im Durchschnitt weniger als 600 mm/a) und des geringen Zuflusses über Oberflächengewässer Berlin und sein Brandenburger Umland als eher trocken aus (GERSTENGARBE et al. 2003). Diese Tatsache allein birgt schon genügend Konfliktpotential hinsichtlich der vielfältigen Nutzungsansprüche an die Oberflächengewässer durch Industrie, Landwirtschaft, Schifffahrt, Naturschutz und Erholung. So herrscht also auch in der Metropole Berlin - wie in anderen urbanen Ballungszentren - eine angespannte Situation in Bezug auf die Nutzung und anthropogene Beeinflussung der Ressource Wasser. Auch im

umliegenden Brandenburg ist beispielsweise die Landwirtschaft in den Frühlings- und Sommermonaten bedingt durch geringe Niederschläge bereits sehr stark wasserlimitiert (GERSTENGARBE et al. 2003).

Wenn man neben diesem sichtbaren Bestandteil des Wasserhaushaltes der Region auch noch die damit gekoppelten Vorgänge im Grundwasser berücksichtigt, wird die Problematik besonders deutlich. Nicht sichtbar erfolgt hier eine wesentliche Beeinflussung des Wasserhaushaltes, da Berlin die oberen süßwasserführenden Grundwasserleiter durch die Berliner Wasserbetriebe (BWB) zur Trinkwassergewinnung nutzt. Dabei weist Berlin im Vergleich zu anderen Großstädten einige Besonderheiten auf. Der Wasserbedarf von ca. 650.000 m³/d wird komplett aus den Grundwasservorkommen gedeckt (BWB 1998). Die Förderbrunnen aller Wasserwerke befinden sich innerhalb des Stadtgebietes (außer Stolpe) im Bereich des Berliner Urstromtales und der Havelrinne. Sie fördern aber nur zum kleineren Teil von ca. 40% Grundwasser, welches durch Neubildung in den Einzugsgebieten entstanden ist, die weit über die Stadtgrenzen hinausreichen. Der überwiegende Anteil von ca. 60% (HEINZMANN 2000) des genutzten Grundwassers wird auf dem Wege der Uferfiltration aus den Oberflächengewässern zugeführt. Dies hat zur Folge, daß nahezu die gesamte Grundwasserdynamik und auch der Oberflächenwasserhaushalt im Stadtgebiet und im angrenzenden Brandenburger Umland durch anthropogene Nutzung überprägt sind.

Betrachtet man die Entwicklung der Wasserhaushaltsgrößen und die Entnahmen der Wasserwerke, lassen sich zwei gegensätzliche Tendenzen feststellen.

1. Tendenz: Steigende Grundwasserstände durch geringere Wasserwerksförderung.

Im Betrachtungszeitraum von 1989 bis 1999 hat sich die Beeinflussung der Grundwasserhältnisse durch die Grundwasserförderung sehr verändert. Der Wasserverbrauch und damit auch die Grundwasserförderung ist - besonders in den östlichen Stadtteilen - bis zu 50% zurückgegangen (BWB 1999), was zur Stilllegung von Brunnengalerien bis hin zu ganzen Wasserwerken führte. Die veränderten Entnahmemengen und -standorte haben Auswirkungen auf die regionale Grundwasserdynamik. Bei den allgemein niedrigen Flurabständen im Bereich des Urstromtales sind Schwankungen des Grundwasserspiegels meist direkt mit infrastrukturellen und ökologischen Folgen verbunden. So lassen sich die Auswirkungen der zurückgegangenen Wasserentnahme bereits an geringer werdenden Grundwasserflurabständen in einigen Stadtgebieten feststellen (BWB 1999). Die Tendenz eines geringeren Wasserverbrauchs und somit geringerer Entnahmen setzt sich abgeschwächt fort.

2. Tendenz: Sinkende Grundwasserstände durch verminderte Grundwasserneubildung.

Die anthropogen induzierten Einflüsse werden durch lang- und kurzfristige klimatische Veränderungen überlagert. Niederschlag, Temperatur und Verdunstung bestimmen die Abflußverhältnisse und damit auch den Anteil der Grundwasserneubildung. Dieser Anteil ist nach Analysen des Landesumweltamtes Brandenburg (LAHMER 2003A) bereits rückläufig und macht sich an vielen Meßstellen durch sinkende Grundwasserstände bemerkbar.

Diese Tendenz wird sich möglicherweise nach Annahme des wahrscheinlichsten Klimaszenarios für die Region Berlin/Brandenburg fortsetzen und kann zu einer Reduzierung des Abflusses der Oberflächengewässer und der Grundwasserneubildung führen

(LAHMER 2002A/B). Dieser Trend wird für die Spree zusätzlich noch durch Abnahme der künstlichen Speisung aus den Wasserhaltungen der Lausitzer Tagebaue mit beginnender Flutung der Restlöcher gestützt (KÖHLER et al. 2002). Insgesamt ist im Berliner Raum mit einem verminderten Wasserdargebot zu rechnen.

Für die umfassende Kenntnis der Vorgänge im Wasserhaushalt der Region und vor allem für eine langfristig gesicherte Trinkwasserversorgung ist es also von entscheidender Bedeutung, neben den Auswirkungen der Grundwasserentnahmen auch die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Grundwasserdynamik zu erfassen und zu quantifizieren. Dabei werden eine Vielzahl von Fragen aufgeworfen, deren Beantwortung nur über eine detaillierte Untersuchung möglich ist. Haben die Auswirkungen der Grundwasserentnahmen für die Trinkwasserversorgung auf die Grundwasserdynamik den gleichen Stellenwert wie klimatisch bedingte Änderungen der Grundwasserneubildung? Welcher Einflußfaktor überwiegt derzeit und wie sieht die zukünftige Entwicklung aus? Reicht das durch eine mögliche verminderte Neubildung begrenzte Dargebot um die Grundwasserentnahmen auf derzeitigem Niveau aufrechtzuerhalten? Wird bei langanhaltender Trockenheit der geförderte Uferfiltratanteil auch über den Mindestabfluß in den Gewässern gedeckt? Um diesen Fragenkomplex zu beantworten wird mit der vorliegenden Arbeit erstmalig die Grundwasserdynamik eines gesamten wasserwirtschaftlich wichtigen Teilraumes der Region Berlin/Brandenburg unter Anwendung eines numerischen Grundwasserströmungsmodells untersucht. Damit kann für diese Teilregion das fehlende Glied in der Betrachtung des Wasserhaushaltes ergänzt werden. Aufgrund des hohen Anteiles an der Trinkwassergewinnung findet dabei die Bestimmung der Uferfiltratanteile besondere Beachtung.

Für die Untersuchungen wurde die wasserwirtschaftlich bedeutende Region im Südosten von Berlin mit einer Größe von ca. 450 km² gewählt (s. Abb. 2.0-01). Sie umfaßt die zentralen Bereiche der zusammenhängenden Einzugsgebiete von sechs Wasserwerken, die ca. 40% der Berliner Trinkwasserversorgung gewährleisten (BWB 1998) und mit den Brandenburger Wasserwerken Eichwalde und Erkner auch die Regionen östlich und südlich Berlins versorgen. Mit dem Müggelsee im Zentrum durchfließen die Gewässer der Spree und der Dahme das Gebiet. Besonders durch den Einfluß der Uferfiltratgewinnung bei der Grundwasserentnahme erfolgt in diesem Bereich die Kopplung zwischen Oberflächen- und Grundwasser. Der Abfluß der Spree ist durch die fehlende Speisung durch Sumpfungswässer der Tagebaue und die Flutung der Tagebaurestlöcher im Oberlauf auf ein Minimum begrenzt. Bilanzbetrachtungen zum sensiblen Thema „Spreeabfluß“ können mit diesem Bilanzgebiet ebenfalls verknüpft werden.

Um die Reaktionen des Grundwassers auf die o.g. Einflüsse zu verstehen und auch in bestimmten Grenzen vorhersagen zu können kann man sich regionaler numerischer Grundwassermodelle bedienen (ANDERSON & WOESSNER 1992, KINZELBACH & RAUSCH 1995, HARBAUGH & MCDONNARD 1996, CHIANG & KINZELBACH 2001). Sie bieten den einzigartigen Vorteil, daß der Einfluß einer Teilkomponente (z.B. Grundwasserneubildung) getrennt von allen anderen Einflußgrößen, aber auch in Kombination, und vor allem für zukünftige Szenarien simuliert werden kann. Im Gegensatz dazu erfassen Grundwassermeßstellen immer die Wirkung aller Einflußgrößen des jeweiligen Ist-Zustandes. Zudem ermöglichen Modelle die räumliche

Interpretation der Daten aus den nur punktuell vorhandenen geologischen Aufschlüssen und die Abbildung zeitlicher Entwicklungen der Grundwasserstände.

Bilanzbetrachtungen von flächenmäßig kleinen Einzugsgebieten einzelner Wasserfassungen mit Hilfe numerischer Grundwasserströmungsmodelle sind inzwischen gängige Praxis. Mit der Entwicklung der notwendigen Rechentechnik und gleichzeitig zunehmenden Bereitstellung der erforderlichen digitalen Daten wird auch die Erstellung von Grundwasserströmungsmodellen auf der regionalen Größenskala und entsprechender Komplexität immer mehr vereinfacht. Weltweit werden solche Modelle für Fragestellungen des Wasserhaushaltes und speziell der wasserwirtschaftlichen Nutzung des Grundwassers einer ganzen Region meist innerhalb der Grenzen von Flußeinzugsgebieten herangezogen. So modellierten beispielsweise UDOH (1994) die Grundwasserströmung im Sokoto-Becken, MARTIN & FRIND (1998) das 400 km² große Einzugsgebiet der Waterloo Moraine in Ontario (Canada), HAUGH (2002) das ca. 100 km² große Cave Springs Gebiet in Tennessee (USA), GONZALES-HERRERA et al. (2002) die Grundwasserströmungsverhältnisse im Yucatan Karst Aquifer und MCADA & BARROLL (2002) diese im Mittleren Rio Grande Becken, das mit einer Ausdehnung von mehreren tausend Quadratkilometern eines der größten Modellgebiete darstellt. Dabei wird deutlich, daß aufgrund der unterschiedlichen Geologie und Hydrogeologie jeder Standort einzigartig ist und der Modellaufbau sowie die Wahl des Simulators für jeden Standort spezifiziert werden muß.

Zudem werden meist gering besiedelte Gebiete betrachtet, da es aufgrund der Verschmutzungsempfindlichkeit nicht üblich ist, wie in Berlin, Grundwasser-Vorkommen unterhalb einer Großstadt zu nutzen. Eine Ausnahme wurde mit POPPEI et al. (2000) gefunden, der den Grund- und Oberflächenwasserhaushalt in Rostock-Warnemünde untersucht.

Allerdings wird die Möglichkeit der Erstellung regionaler Modelle immer auf die wenigen Standorte beschränkt bleiben, für die auch die wichtigen Eingangsdaten vorliegen. Zu diesen Unbekannten gehören detaillierte Angaben zur Geologie und Hydrogeologie, Grundwasserneubildungswerte und Grundwassermeßstellen zur Erfassung des Potentialdrucks der jeweiligen Grundwasserleiter. Die Grundwasserneubildung läßt sich aus den Abflußdaten als langjähriges Mittel noch relativ einfach ermitteln. Schwierig wird es bei der Erfassung der hydrologischen und hydrogeologischen Kennwerte und der Wasserstände zur Modellanpassung. Deren Beschaffung, Bearbeitung und Bewertung wird mit zunehmender Modellgröße immer schwieriger (CHRISTENSEN & RASMUSSEN 1998). Diese Informationen sind an ein dichtes Aufschlußnetz in Form von Bohrungen gebunden, die aber meist nur kleinräumig im Zusammenhang mit dem Bau von Wasserfassungen oder der Sanierung von Altlastenprojekten finanziert und errichtet werden. Alle Voraussetzungen sind selten gemeinsam für eine größere Region gegeben, weshalb die Zahl der regionalen Modellbetrachtungen noch relativ gering bleibt.

In dieser Hinsicht liegen vergleichsweise günstige Voraussetzungen für das Betrachtungsgebiet im Südosten Berlins vor. Es wurden zahlreiche hydrogeologische Erkundungen für den Betrieb der Brunnengalerien der dicht beieinander liegenden Wasserwerke durchgeführt und eine Vielzahl von Meßstellen wird zur Kontrolle der Wasserstände und der Qualität regelmäßig beprobt. Nur unter diesen Voraussetzungen kann ein hydrogeologisches Modell als Grundlage für eine Grundwasserströmungssimulation aufgebaut werden, welches die komplexen hydrogeologischen Verhältnisse in ihrer räumlichen Verteilung widerspiegelt. Es muß die Geometrie des Aquifersystems und die räumliche Verteilung der zur Lösung der

Strömungsgleichungen benötigten Materialparameter für den rechnergestützten Zugriff bereitstellen. Bei der Erstellung des vorliegenden hydrogeologischen Modells konnte die Herangehensweise des Modellaufbaus bei MANHENKE (1990) und SOMMERHÄUSER (1998) aufgrund des vergleichbaren geologischen Rahmens und ähnlicher regionaler Größenskala genutzt werden.

Zielstellung

In der vorliegenden Arbeit wird ein regionales 3D-Grundwasserströmungsmodell aufgebaut, das den Simulator FEFLOW (WASY 2001) nutzt. Die für die Simulation notwendigen Parameter werden aus einem hydrogeologischen Modell abgeleitet, das für die genutzten quartären süßwasserführenden Grundwasserleiter erarbeitet wird. Mit dem Modell wird eine einzugsgebietsübergreifende Simulation der Grundwasserströmung in den durch Wasserwerksförderung beeinflussten Teilen der Einzugsgebiete durchgeführt. Der Schwerpunkt liegt auf Betrachtungen der Gesamtdynamik und erst zweitrangig auf der Analyse der Teileinzugsgebiete. Daher wird versucht, die Modellstruktur und auch schon das hydrogeologische Modell so einfach wie möglich zu gestalten. Für die Modellkalibrierung und –validierung liegen Förderdaten der Brunnengalerien und Ganglinien der Grundwassermeßstellen aus dem Bearbeitungszeitraum 1989-1999 vor. Kalibriert wird das Modell an einem mittleren Förderzustand, wobei der Schwerpunkt auf der Anpassung der Uferfiltratanteile liegt. Zur Validierung werden die unterschiedlichen Entnahmen am Anfang und am Ende des Bearbeitungszeitraumes gewählt. Die Validierung soll zusätzlich durch die instationäre Verifizierung eines Jahrganges gestützt werden.

Das so vorbereitete Modell bildet die Grundlage für die Simulation von zwei Gruppen von Szenarien. Die wasserwirtschaftlich begründeten Szenarien entsprechen strategischen Überlegungen der Berliner Wasserbetriebe. Sie zeigen die Auswirkungen unterschiedlicher Fördermengen und Förderschwerpunkte auf die Grundwasserdynamik, von der Ausnutzung der genehmigten Fördermengen bis zu geplanten Strategien ab 2010. Die hydrologisch begründeten Szenarien basieren auf den Ergebnissen der regionalen Klimaszenarien hinsichtlich der möglichen Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung. So wird die Reaktion der Grundwasserdynamik auf die möglichen positiven und negativen Abweichungen der Grundwasserneubildung vom Mittelwert gezeigt und mit den Folgen veränderter Förderung verglichen. Die Ergebnisse werden anhand von Grundwasser-Isohypsenplänen und dem Vergleich der Modellbilanzen dargestellt.

Eine ähnliche Zielstellung und vergleichbare Komplexität im Modellaufbau findet sich bei STAMOS et al. (2001) mit einer Grundwasserströmungssimulation des Mojave River Becken (USA). Sie kalibrierten ihr Grundwasserströmungsmodell für den Zeitraum 1931-1994. Im Anschluß führten sie eine Validierung mit den Daten von 1995-1999 durch, um mit diesem Modell wasserwirtschaftliche Managementstrategien simulieren zu können. Diese wurden in das Szenario einer längeren Trockenperiode eingebettet. Aspekte der Vorgehensweise im Ablauf der Modellierung dienten als Vorbild für die Gliederung der vorliegenden Arbeit.

Zusammenfassend wird mit der Umsetzung des Modellvorhabens im Südosten Berlins ein Standort mit einzigartigen Rahmenbedingungen beschrieben. Eine Häufung von Wasserwerken entnimmt aus oberflächennahen Grundwasserleitern im Stadtgebiet Berlins Grundwasser für die Trinkwasserversorgung. Komplexe Szenarien zur Strategie des Entnahmeregimes und der

Einfluß von langfristigen Klimaveränderungen auf die Grundwasserdynamik als Teil des Wasserhaushaltes der Region werden verglichen. Mit der Realisierung dieser Zielstellung werden schwerpunktmäßig folgende Fragen beantwortet:

1. Kann bei der Größe des Modellgebietes die Struktur des hydrogeologischen Modells vereinfacht werden, ohne die Aussage des Grundwasserströmungsmodells zu beeinträchtigen?
2. Lassen sich mit dem Modell die Wasserstände von bekannten Förderzuständen in diesem großen Gebiet mit komplexer Geologie und intensiver wasserwirtschaftlicher Nutzung mit hinreichender Genauigkeit abbilden?
3. Läßt sich das Modell trotz seiner Komplexität instationär verifizieren?
4. Zeigt sich das Modell sensitiv gegenüber Änderungen der Randbedingungen?
5. Läßt sich der Anteil der Uferfiltration an der Förderung für einzelne Galerien bzw. für die betroffenen Uferbereiche feststellen und verifizieren?
6. Erlaubt die erreichte Modellgenauigkeit die Simulation von Szenarien?
7. Bewirken die den Szenarien zugrunde liegenden Variationen der Einflußgrößen überhaupt nennenswerte Veränderungen der Grundwasserdynamik und läßt sich eine Wichtung ableiten?
8. Sind durch Änderung der Randbedingungen Interaktionen zwischen Teileinzugsgebieten erkennbar und in der Bilanz zu quantifizieren?
9. Welche Konsequenzen haben die Ergebnisse für den Wasserhaushalt der Region und das wasserwirtschaftliche Management der Wasserbetriebe?
10. Ist neben wissenschaftlicher Erkenntnis auch eine praktische Anwendung denkbar?