

# Adaptives Grundwassermanagement in urbanen Gebieten

## Einfluss der Oberflächengewässer-Grundwasser-Interaktion am Beispiel künstlicher Grundwasseranreicherung sowie variabler In-/Exfiltration der Birs (Schweiz)

A. Affolter · P. Huggenberger · S. Scheidler · J. Epting

Eingang des Beitrages: 9. 7.2009 / Eingang des überarbeiteten Beitrages: 12. 1.2010 / Online veröffentlicht: 19. 6.2010  
© Springer-Verlag 2010

**Zusammenfassung** Der Nutzungsdruck auf Grundwasserressourcen in intensiv genutzten Flussebenen wird zunehmend größer. Ziel dieses Beitrages ist, anhand eines repräsentativen, instationären Datensatzes eines urbanen Grundwassersystems (Unteres Birstal CH) aufzuzeigen, wie mit Ansätzen des adaptiven Grundwassermanagements die Voraussetzungen für die nachhaltige Nutzung von Grundwasserressourcen geschaffen werden können.

Mithilfe eines instationären Grundwassermodells können spezifische Fragen der Fluss-Grundwasser-Interaktion und dem Betrieb künstlicher Grundwasseranreicherung beantwortet werden. Die Instationarität der Fluss-Grundwasser-Interaktion und eine damit zusammenhängende Änderung von In- und Exfiltrationsverhältnissen konnte für verschiedene Flussabschnitte ermittelt werden. Die Datenauswertung eines Jahrhunderthochwassers trug wesentlich zum Verständnis dieser Prozesse bei.

Durch ein Experiment mit der längerfristigen Außerbetriebnahme einer künstlichen Grundwasseranreicherung im Untersuchungsgebiet konnten die Auswirkungen von geplanten Nutzungsänderungen abgeschätzt werden.

Die Untersuchungen tragen zum Prozessverständnis des Grundwassersystems bei und liefern die Grundlage für eine Diskussion über lang-, mittel- und kurzfristige Ziele hinsichtlich der regionalen Bewirtschaftung urbaner Wasserressourcen.

### Adaptive groundwater management in urban areas

Effect of surface water-groundwater interaction using the example of artificial groundwater recharge and in- and exfiltration of the river Birs (Switzerland)

**Abstract** Groundwater resources in urban areas are under increasing pressure. The purpose of this manuscript is to demonstrate how adaptive groundwater management techniques can establish conditions for sustainable use of groundwater resources. To illustrate this, a representative transient dataset from the Lower Birs Valley (Switzerland) was investigated. The main focus of this work was to evaluate effects of river-groundwater interaction and artificial groundwater recharge. Results showed that the evaluation of a hundred year flood significantly contributed to the understanding of the transient character of river-groundwater interaction. An extended period without artificial recharge in the study area provided insights into the impact of planned changes in groundwater management. This investigation contributes to the better understanding of recharge processes in the groundwater system and provides a framework for discussion of goals for regional management of urban water resources.

**Keywords** Adaptive groundwater management · River-groundwater interaction · Artificial groundwater recharge

### Einleitung

In den meisten urbanen Gebieten stehen Grundwasserressourcen unter zunehmendem Nutzungsdruck. Nach Angaben der europäischen Umweltagentur leben 70 % der europäischen Bevölkerung in urbanen Gebieten, welche nur

---

Dipl.-Natw. A. Affolter (✉) · Prof. Dr. P. Huggenberger ·  
Dipl.-Hydrol. S. Scheidler · Dr. J. Epting  
Angewandte und Umweltgeologie (AUG), Institut für Geologie  
and Paläontologie, Departement Umweltwissenschaften,  
Universität Basel, Bernoullistr. 32, 4056 Basel, Schweiz  
E-Mail: [annette.affolter@unibas.ch](mailto:annette.affolter@unibas.ch)

25 % der Gesamtfläche abdecken (EEA 1999). Über 40 % des geförderten Trinkwassers in West- und Osteuropa sowie aus dem mediterranen Raum stammen aus Grundwasserleitern in urbanen Gebieten (Eiswirth et al. 2003, 2004). Um die Quantität und Qualität urbaner Grundwasserressourcen langfristig zu sichern und vielerorts zu verbessern, müssen effiziente Managementinstrumente für den Schutz von Grundwasserressourcen erarbeitet werden (Pahl-Wostl et al. 2005, 2006).

Der zunehmende Druck auf urbane Grundwasserressourcen erklärt sich durch die zahlreichen konkurrierenden Nutzungen, wie: (1) Grundwasserentnahmen als Brauch- oder Prozesswasser für die Trinkwasserversorgung, die Industrie und Landwirtschaft, (2) thermische Grundwassernutzung, einschließlich Grundwasserentnahmen und -rückgaben für Kühlzwecke oder Wärmegewinnung und (3) wasserbauliche Maßnahmen, einschließlich Hochwasserschutz, Bauwasserhaltungen und Bauten ins Grundwasser.

Vor allem in den dicht besiedelten und industriell intensiv genutzten Flussebenen häufen sich deshalb Nutzungskonflikte, da derzeit nur bedingt klare Vorgaben für die Nutzung des Untergrundes existieren. Zudem sind Grundwasserressourcen in urbanen Gebieten einer Vielzahl von Gefahren ausgesetzt, wie punktuell oder diffus eingetragenen Schadstoffe aus undichten Kanalisationen (Lerner 2002), der Infiltration von belastetem Oberflächenwasser und sporadischen Überflutungen in urbanen Siedlungsräumen bei Hochwasser. Massenflüsse von verunreinigtem Abwasser oder Oberflächenwasser in urbane Grundwassersysteme werden in Wolf et al. (2007), Reinstorf et al. (2009) und Leschik et al. (2009) beschrieben. Musolff et al. (2007) konnten zeigen, dass in einem urban geprägten Einzugsgebiet Xenobiotika sowohl im Oberflächen- als auch im Grundwasser ubiquitär vorhanden sind. Xenobiotika haben Indikatoreigenschaften, die der Erfassung bzw. der Bewertung des anthropogenen Einflusses auf den urbanen Wasser- und Stoffhaushalt dienen (Musolff et al. 2007).

Für den Grundwasserschutz existieren Instrumente sowohl für den planerischen Schutz von Grundwasserressourcen (in der Schweiz: GSchG, GSchV und Wegleitung Grundwasser; Gewässerschutzkarten), als auch für den fassungsspezifischen Schutz von Trinkwasserbrunnen (in der Schweiz: Schutzzonenbestimmungen; Lebensmittelbuch). Durch die dichte Bebauung in urbanen Gebieten ist es heute bei vielen Trinkwasserbrunnen nicht möglich, alle Anforderungen an die Schutzzonenbestimmungen zu erfüllen. In diesem Fall müsste bei den betroffenen Brunnen auf eine Förderung von Trinkwasser verzichtet werden. Dennoch muss die Wasserqualität solcher Trinkwasserbrunnen nicht immer generell schlecht sein und kann über weite Bereiche des Jahres ausreichend bis gut sein. Gefährdungen entstehen dabei vor allem bei bestimmten hydrologischen Randbedingungen, wie zum Beispiel während Hochwasserereignissen.

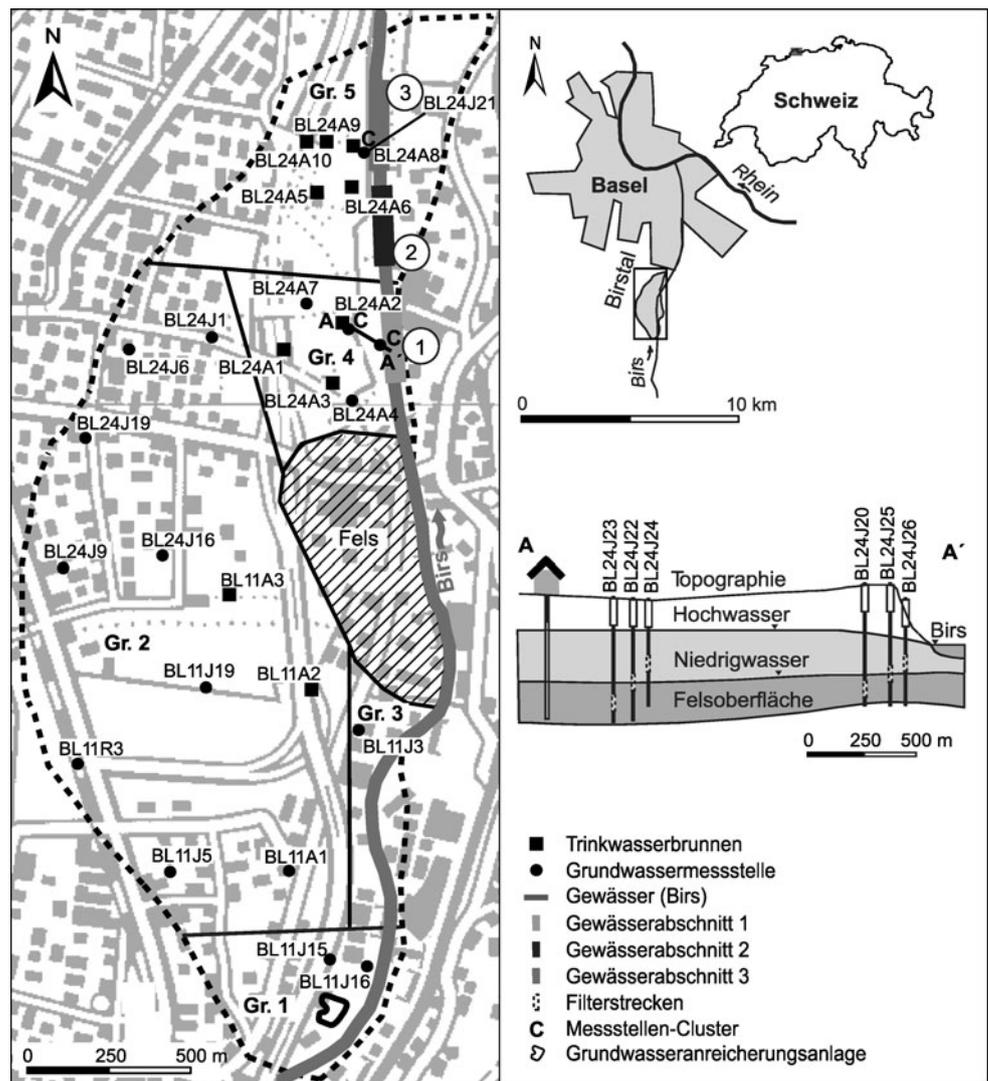
Andererseits existieren auch Trinkwasserbrunnen, die trotz gesetzlich konform ausgeschiedenen Schutzzonen die Qualitätsanforderungen nicht immer garantieren können. In der Vergangenheit kam der Nachweis, dass die Qualitätsanforderungen teilweise nicht erreicht werden, oft nur zufälligerweise zustande. Die Hauptursache dafür liegt vor allem darin, dass Trinkwasserbrunnen generell routinemäßig beprobt werden. Deshalb ist ein Paradigmenwechsel beim Beprobungsrhythmus notwendig, hin zu einer ereignisorientierten Beprobung und Analytik. Die oben genannten Widersprüche treten in der Praxis, besonders bei flusssnahen Trinkwasserbrunnen, häufiger auf als gemeinhin angenommen. Da im Gesetz solche Widersprüche nicht geregelt sind, müssen Trinkwasserbrunnen entweder stillgelegt oder technische Maßnahmen zur Sicherung der Wasserqualität angeordnet (z. B. Wasseraufbereitung) werden.

Die Erfahrungen bei flusssnahen Trinkwasserbrunnen in urbanen Gebieten zeigen zudem, dass das Ziel, Grundwasserressourcen nachhaltig zu schützen, ein umfassendes Verständnis der lokalen und regionalen hydrologischen Zusammenhänge erfordert. Wegen der komplexen Dynamik von Gewässerökosystemen können viele Gefährdungen nur im Rahmen eines nachhaltigen Ressourcenschutzes, der sowohl den quantitativen und qualitativen Aspekt betrachtet, effizient angegangen werden (Woessner 2000, Huggenberger et al. 2004, Regli & Huggenberger 2006).

Wie in den meisten größeren Grundwassergebieten in der Region Basel wird auch im Unteren Birstal das Grundwasser über eine Anlage künstlich angereichert (Abb. 1). Im Rahmen einer Effizienz- und Bedarfsüberprüfung der über 30 Jahre alten Anlage wurde die Frage aufgeworfen, ob und wann eine Grundwasseranreicherung bei den derzeitigen Produktionszahlen für die regionale Wasserversorgung tatsächlich erforderlich ist. Im Fall einer Außerbetriebnahme der künstlichen Grundwasseranreicherung ergaben sich weitere Fragen, wie diejenige der Grundwassergefährdungen in den Zustrombereichen von Trinkwasserbrunnen bei zukünftiger Änderungen der Grundwassernutzung und unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Beantwortung von spezifischen Fragen, die sich im Zusammenhang mit der Fluss-Grundwasser-Interaktion ergeben. In vielen Flussgebieten stellen infiltrierende Oberflächengewässer einen wesentlichen Anteil der Grundwasserneubildung dar (Huggenberger et al. 2006, Epting et al. 2007).

Das Ziel dieses Beitrages ist es, anhand des urbanen Grundwassersystems im Unteren Birstal zu zeigen, wie mit Ansätzen eines adaptiven Grundwassermanagements Grundlagen für die nachhaltige Nutzung von Wasserressourcen geschaffen werden können. Mit dem Ansatz des adaptiven Managements sollen die Effekte der verschiedenen Einflussfaktoren auf ein Grundwassersystem verstanden und vorhergesagt werden können. Dabei werden Un-

**Abb. 1** *Oben rechts:* Lage des Untersuchungsgebiets. *Links:* Gruppierung der Grundwassermessstellen und Trinkwasserbrunnen im Untersuchungsgebiet und Darstellung von Gewässerabschnitten. *Mitte rechts:* Schematische Darstellung eines Querschnitts durch den Grundwasserleiter zwischen Fluss und Trinkwasserbrunnen mit Messstellen-Cluster



sicherheiten bezüglich der Prozesskenntnisse berücksichtigt. Diese Prozessidentifizierung im jeweiligen Grundwassersystem geschieht iterativ indem Ziele für die Entwicklung eines Grundwassersystems definiert und für die jeweiligen Fragestellungen Szenarien entwickelt werden, welche anhand spezifischer Feldversuche, Grundwassermonitoring und numerischer Modelle überprüft werden können. Dies entspricht einem „work in progress“ Ansatz (National Research Council 2004).

**Grundwassersystem Unteres Birstal**

Das Untersuchungsgebiet Unteres Birstal befindet sich südlich von Basel (CH) und ist ungefähr 12 km<sup>2</sup> groß. Das Untere Birstal verläuft von NNW nach SSE. Die Birs ebene ist Teil der Großagglomeration Basel und umfasst auf engstem Raum ein Nebeneinander von Wohn-, Gewerbe- und Industriezonen (Abb. 1).

Die Birs entspringt im Kanton Bern bei Tavannes und mündet nach 75 km Fließstrecke durch das schweizerische Jura Gebirge bei Basel in den Rhein. Das gesamte Einzugsgebiet der Birs beträgt 866 km<sup>2</sup>. Der mittlere Abfluss gemessen bei der Station Münchenstein-Hofmatt liegt bei 15,8 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (Zahlen 2005, Quelle: Bundesamt für Umwelt). Durch die Größe des Einzugsgebietes kann der Abfluss der Birs kurzfristig sehr hohe Abflussspitzen von bis zu 383 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (09.08.2007) erreichen.

Im Unteren Birstal wurde die Birs durch Begradigung und Kanalisierung im 20. Jahrhundert um den Faktor 3 bis 4 verkürzt. In den 70-er Jahren wurde der Verlauf der Birs in einigen Abschnitten baulich nochmals korrigiert. Durch die Verringerung des Abflussquerschnitts, den erhöhten Gradienten und der hohen Geschiebetransportkapazität schnitt sich die Birs in den unterliegenden Fels und wurde über weite Bereiche vom Schottergrundwasserleiter entkoppelt. Dies hatte zur Folge, dass sich der Grundwasserspiegel auf das neue Basisniveau ausrichtete und die natürliche Grund-

wasseranreicherung durch infiltrierendes Birswasser verringerte. Die Ergiebigkeit des Schottergrundwasserleiters reduzierte sich dabei irreversibel. Zudem sollten in den 1970er Jahren die Grundwasserentnahmen aus der zeitweise bereits übernutzten Grundwasserressource erhöht werden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sollte die Grundwasserabsenkung mit einer künstlichen Grundwasseranreicherung ausgeglichen werden. Dennoch konnte bei größeren Hochwasserereignissen in einzelnen Flussabschnitten weiterhin eine Eintiefung der Birssohle beobachtet werden. Damit verringert sich vor allem bei Trockenperioden in einzelnen Gebieten auch das Speichervolumen des sehr durchlässigen quartären Schottergrundwasserleiters. Um diesen Prozess aufzuhalten wurden verschiedene Flussaufweitungen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes, zur Verminderung einer weiteren Eintiefung der Birssohle und zur Schaffung von vielfältigeren Lebensräumen durchgeführt. Weitere Maßnahmen befinden sich im Bau oder sind geplant. Ein Teil des Gebietes ist als Naturschutzgebiet ausgewiesen, dort befinden sich acht der zehn Grundwasserfassungen.

Die lokalen Wasserversorger entnehmen in zehn Brunnen Grundwasser für die Trinkwasserversorgung, welche vorwiegend über Randzuflüsse, Flussinfiltrat und Grundwasseranreicherung gedeckt werden. Die entnommene Wassermenge beläuft sich pro Jahr auf etwa  $5,8E06 \text{ m}^3$ . Die Zuströmbereiche zu den Trinkwasserbrunnen verlaufen teilweise in intensiv genutzten Wohn-, Gewerbe- oder Industriegebieten. Zudem verläuft eine Autobahn teilweise durch die Schutzzonen. Landwirtschaftliche Aktivitäten finden hauptsächlich im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes statt (Abb. 1). Der Einfluss der landwirtschaftlichen Aktivitäten auf den Nitratgehalt im Grundwasser und in den Trinkwasserbrunnen wurde im INTTERREG-III-Teilprojekt „Nitratverlagerung“ beschrieben (Auckenthaler et al. 2006).

## Methoden

### Adaptives Management urbaner Grundwasserressourcen

Eine nachhaltige regionale und überregionale Grundwasserbewirtschaftung setzt voraus, dass die Auswirkungen von Einzeleingriffen auf ein Gesamtsystem verstanden werden (Epting et al. 2007). Grundwassersysteme sind meist zu komplex um die Auswirkung von spezifischen Maßnahmen exakt voraussagen zu können und um alle wichtigen Prozesse zu kennen und zu kontrollieren. Aufgrund des aktuellen Zustandes von Grundwasserressourcen in urbanen Gebieten, wird im Hinblick auf deren nachhaltige Nutzung, ein adaptives Management vorgeschlagen. Um einen gewünschten Zielzustand für ein Grundwassersystem zu erreichen, müssen Hypothesen formuliert und danach mit Feldexperimenten getestet werden (Pahl-Wostl 2006). Beim adaptiven

Grundwassermanagement handelt es sich deshalb um strukturierte iterative Prozesse, welche helfen die Annäherung an ein komplexes Grundwassersystem durch gezielte Fragestellungen und entsprechende Experimente zu verstehen. Sie können die Basis für unterschiedliche Optimierungsansätze liefern. Beispielsweise können hydrogeologische Modelle, die bei definierten hydrologischen Randbedingungen (Fluss- und Grundwasserstand, Eigenschaften des Grundwasserleiters, Grundwasserentnahme und -anreicherung, etc.) kalibriert wurden, sukzessive zum Verständnis der Grundwasserdynamik beitragen. Voraussetzung für die Kalibrierung solcher Modelle sind geeignete Messnetze und Instrumente zur Beobachtung des Grund- und Oberflächenwassers. Die Kombination der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden ermöglicht somit eine Gesamtsicht auf die Prozesse eines regionalen Grundwassersystems.

### Grundwasserbeobachtungsnetz

Im Untersuchungsgebiet Unteres Birstal umfasst das Messstellennetz zur Grundwasserbeobachtung insgesamt 27 Messstellen, welche Grundwasserspiegel und -temperatur kontinuierlich aufzeichnen. In 9 Messstellen wurde zusätzlich die elektrische Leitfähigkeit aufgezeichnet. Zur detaillierten Analyse der Fluss-Grundwasser-Interaktion wurden im nördlichen Modellgebiet im Nahbereich der Birs drei Messstellen-Cluster eingerichtet. Ein Cluster stellt je eine Gruppe bestehend aus drei Grundwassermessstellen dar, deren Bohrungen und Filterstrecken in unterschiedliche Tiefe reichen (Abb. 1).

Zur Überwachung von Qualitätsänderungen wurden bei allen Trinkwasserbrunnen im Untersuchungsgebiet sowie im Fluss chemische und mikrobiologische Standard-Qualitätsparameter gemessen. Die Abflussdaten der Birs und die Flusstemperatur stammen von der Station Münchenstein-Hofmatt im nördlichen Teil des betrachteten Gebietes.

### Grundwassermodell

Die räumliche und zeitliche hohe Variabilität der Prozesse in einem Grundwassersystem und im Zustrom von Trinkwasserbrunnen lässt sich am besten mit einem numerischen Grundwassermodell beschreiben. Kalibrierte Grundwassermodelle erlauben die Entwicklung von zusätzlichen Szenarien um die Gefährdung der Trinkwasserbrunnen bei unterschiedlichen hydrologischen und betrieblichen Randbedingungen abzuschätzen.

Beim Aufsetzen eines Grundwassermodells werden vorerst die spezifischen Eigenschaften des Grundwassersystems einer Region oder eines Grundwasserkörpers ermittelt (Epting et al. 2007). Dazu können klassische Methoden zur Beschreibung des Grundwasserfließregimes verwendet werden, wie zum Beispiel der Aufbau eines Messstellennetzes,

welches die notwendigen hydrologischen und hydrogeologischen Daten im betrachteten Gebiet aufzeichnet. Dabei sollte ein solches Messstellennetz insbesondere ermöglichen (1) die Randbereiche des Grundwassersystems zu beschreiben, (2) den instationären Charakter der Fluss-Grundwasser-Interaktion zu erfassen und (3) Gebiete mit besonderem Interesse (Trinkwasserbrunnen, Bereiche mit bekannten Risiken) zu berücksichtigen. Informationen zu anthropogenen Randbedingungen, die das Grundwassersystem beeinflussen, wie Grundwasserentnahmen, künstliche Grundwasseranreicherung, Altlastenstandorte im Einzugsgebiet, Infiltration von belastetem Oberflächenwasser, erhöhte Oberflächenversiegelung oder wasserbauliche Maßnahmen, werden zusätzlich ermittelt und in den Basisdatensatz integriert. Die Begrenzung des Modellgebietes und die Festlegung der vertikalen Ausdehnung des Grundwassermodells erfordern zusätzliche geologische Abklärungen. Die hydraulischen Eigenschaften werden durch hydrogeologische Faziesanalysen, Kurzpumpversuche und bei stark heterogenen Systemen durch hydrogeophysikalische Messungen (Multielektroden Geoelektrik, Direct Push, Georadar) und geostatistische Verfahren ermittelt.

#### *Randbedingungen und Hydrologische-Hydrogeologische Basisdaten*

Für das Untersuchungsgebiet von 2,8 km<sup>2</sup> wurde ein hochauflösendes Grundwassermodell (10 m × 10 m) erstellt. Der Grundwasserleiter verhält sich i. a. ungespannt und erschließt eine Schicht variabler Mächtigkeit (maximale Grundwassermächtigkeit 14 m). Die Simulation der Grundwasserströmung erfolgte in einer Modellschicht und wurde mit Groundwater Modeling System (GMS 6.5) von Environmental Modeling Systems Inc. (2006) auf der Basis MODFLOW (McDonald et al. 2000) berechnet (Abb. 1 und 2).

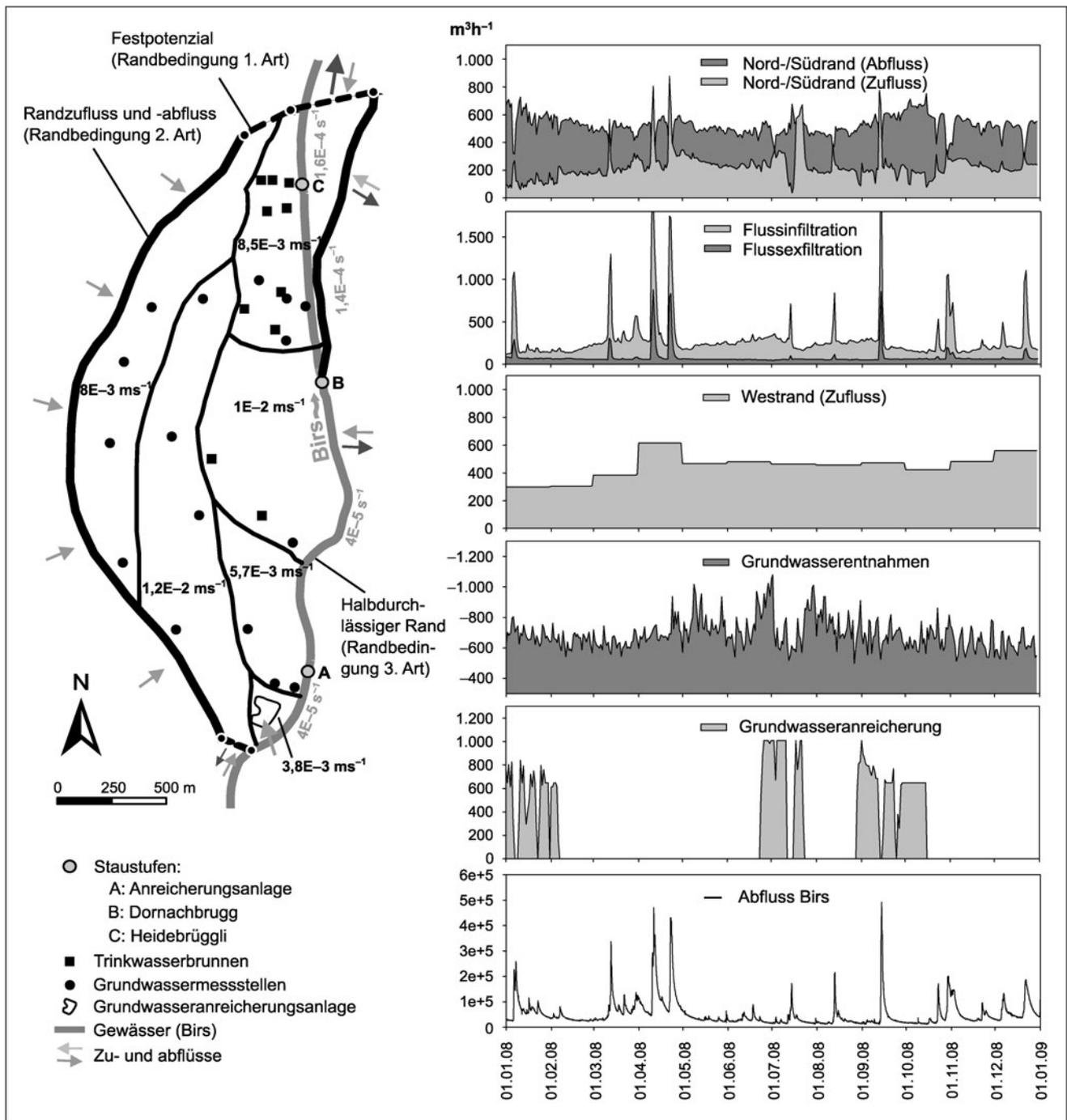
Die Verteilung und Abschätzung der  $k_f$ -Werte im Modellgebiet basiert auf Kurzpump- und Markierversuchen, sowie konzeptionellen Überlegungen zur Genese einzelner Schotterkörper des sich in einer Degradationsphase befindlichen Flusssystemes. Innerhalb der ausgewiesenen Zonen wurden die Parameterwerte als konstant angenommen, was eine Vereinfachung hinsichtlich der Heterogenität der Birsschotter darstellt und regionalisierten  $k_f$ -Werten entspricht. Die  $k_f$ -Werte variieren zwischen 1,0E–2 und 3,0E–3 m·s<sup>-1</sup>.

Das Modellkonzept (Abb. 2) zeigt die Grundwasserflüsse ins Modellgebiet hinein (im Süden) und hinaus (im Norden), welche als Randbedingungen 1. Art (Festpotenzial, variabel über die Zeit) definiert wurden. Ferner wurden die Ränder gegen Osten und Westen als Randbedingung 2. Art (Randzufluss und -abfluss, variabel über die Zeit) definiert. Für den westlichen Randzufluss konnten Monatsmit-

telwerte und für die nördlichen und südlichen Festpotenziale Stundenmittelwerte berücksichtigt werden. Für die Grundwasserneubildung wurde aufgrund der Daten, die im Rahmen des Interreg-III-Projekts MoNit (Huggenberger et al. 2006) ermittelt wurden und der verfügbaren meteorologischen Daten (Niederschlag und Verdunstung) ein monatlicher Wert für versiegelte (2–25 mm/Monat) und unversiegelte (5–45 mm/Monat) Flächen eingesetzt. Die Eingabe der Entnahme- und Anreicherungsdaten erfolgte gemäß den von den Trinkwasserversorgern aufgezeichneten Stundenmittelwerten. Der Birspiegel konnte ebenfalls in Stundenwerten berücksichtigt werden. Die Birs wird als Randbedingung 3. Art (halbdurchlässiger Rand, variabel über die Zeit) berücksichtigt.

Die Kalibrierung eines stationären Grundwassermodells wurde anhand einer Stichtagsmessung vom 25. August 2004 sowie eines Markierversuches am 22. November 2004 mit Uranin durchgeführt (Huggenberger et al. 2006). Die instationäre Grundwassermodellierung basiert auf einem vollständigen Datensatz über einen Zeitraum von 9 Monaten (1. September 2006 bis 31. Mai 2007). Ein Vergleich von gemessenen und berechneten Grundwasserpegeln zeigt für Piezometer in Ufernähe, dass bis zum Einsetzen eines Hochwassers berechnete und gemessene Grundwasserpegel gut übereinstimmen, mit dem Einsetzen des Hochwassers liegen dann die berechneten Grundwasserpegel deutlich unter den gemessenen. Die beiden Werte nähern sich nach etwa 40 Tagen wieder an (Huggenberger et al. 2006). Es war naheliegend, die Ursache dieser Entwicklung und die Dauer dieses Unterschiedes bei Dekolmations-Kolmationsprozessen zu suchen (Huggenberger 2001, Schälchli 1993). Die Schwierigkeiten, solche Prozesse zu bestimmen, sind auf die Heterogenität der Deckschicht und der darunterliegenden grobkörnigen Kiese zurückzuführen. Messanordnungen an der Flusssohle sind oft nicht hochwassertauglich, das heißt bei den Extremereignissen fehlen kontinuierliche Zeitreihen über die Veränderung der Deckschicht (Vogt et al. 2009). Zudem erlaubt die geringe Dichte von Messpunkten an der Flusssohle kaum ein „Upscaling“ für einen Flussabschnitt von mehreren hundert Metern. Insofern war die Wahl eines iterativen Ansatzes, zur Anpassung einer Kolmations-Dekolmationskurve an den Abfluss der Birs naheliegend.

Die Durchlässigkeit der Birssohle wurde im vorgeschlagenen Kolmations/Dekolmationsmodell als zeitlich variabel angenommen (Abb. 3). Das Modell beschreibt die Veränderung der hydraulischen Eigenschaften der Flusssohle: Bei geringem Abfluss verringert sich die Durchlässigkeit der Flusssohle bedingt durch das Absetzen und Eindringen von Feinpartikeln in den Porenraum der Deck- bzw. Filterschicht (Kolmation) und erreicht einen Basiswert. Dieser Basiswert wurde durch die Kalibration des stationären Modells ermittelt. Ab einem bestimmten Abfluss bei Hochwasserereignis-



**Abb. 2** Links: Modellkonzept mit Randbedingungen,  $K_f$ -Wert-Zonierung und Durchlässigkeit (Conductance-Werte) der Birssohle sowie schematische Darstellung der Modellab- und -zuflüsse. Rechts:

Wasserbilanz für den Betrachtungszeitraum 2008 (Flussinfiltration → Zufluss vom Fluss ins Grundwasser, Flussexfiltration → Abfluss vom Grundwasser in den Fluss)

sen ( $>30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) wird die kolmatisierte Flusssohle aufgerissen, die Durchlässigkeit erhöht sich sprunghaft. Nach dem Hochwasser setzt unmittelbar wieder eine Kolmation der Flusssohle ein. Dieses Verhalten der Durchlässigkeit wurde für das instationäre Modell mit folgender Formel beschrieben:

$$[1] \quad \frac{(Q_{\text{Birs}} - 30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})^2}{c} + b = \text{Durchlässigkeit [s}^{-1}\text{]} \text{ (Conductance-Wert)}$$

$Q$  = Abfluss [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $c$  = konst. Faktor,  $b$  = Basiswert der Durchlässigkeit [ $\text{s}^{-1}$ ]. Der Abfluss bei dem die kolmatisierte

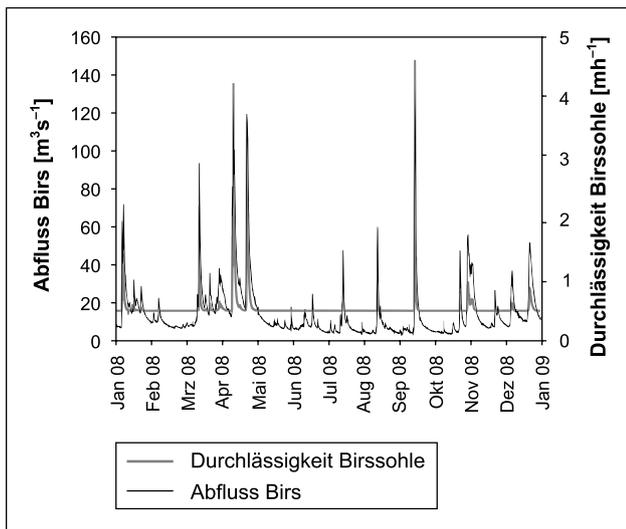


Abb. 3 Verlauf der Durchlässigkeit der Birsohle, abhängig vom Abfluss der Birs

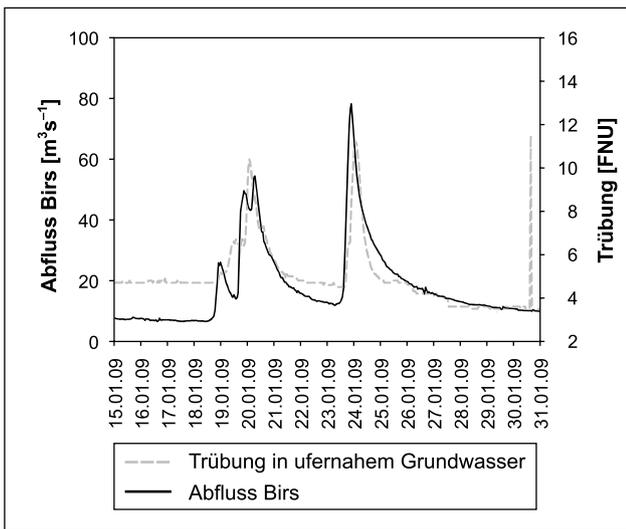


Abb. 4 Bei einem Anstieg des Birsabflusses ist im flussnahen Grundwasser auch ein Trübungsanstieg zu beobachten, was auf eine Dekolmation der Flusssohle hinweist

Flusssohle aufgerissen wird, wurde aufgrund der umfangreichen Grundwasserdaten entlang der Birs abgeschätzt. Anpassungen des konstanten Faktors erfolgten durch schrittweise Veränderung nach der Trial-and-error-Methode.

Eine Verifizierung des Modells kann anhand von Trübungsmessungen im Grundwasser in Ufernähe (BL24J26 Abb. 1) während Hochwasserereignissen gemacht werden. Abbildung 4 zeigt, dass ab einem Abfluss größer  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ein Anstieg der Trübung im Grundwasser zu erkennen ist. Dies kann ein Hinweis dafür sein, dass die Flusssohle dekolmatiert und sich dadurch die Durchlässigkeit erhöht und Partikel in den Aquifer gelangen können.

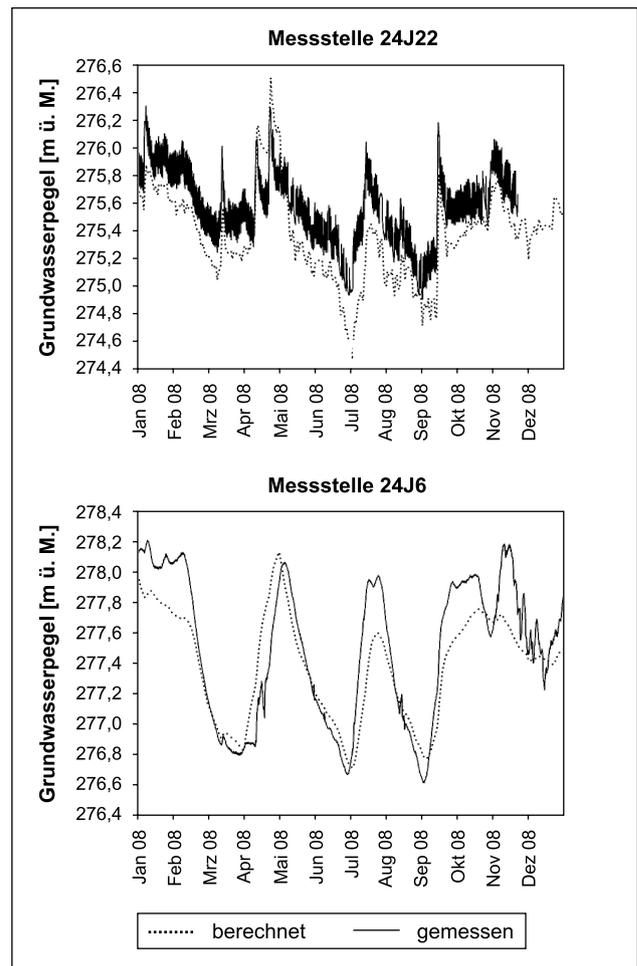


Abb. 5 Verlauf der gemessenen und berechneten Grundwasserpegel. Messstelle BL24J22 wird von der Birs beeinflusst, die Messstelle BL24J6 vom Betrieb der Anreicherungsanlage

Für den in diesem Artikel beschriebenen Datensatz über ein Jahr (1. Januar 2008 bis 31. Dezember 2008) wurden nur noch kleine Anpassungen beim Basiswert der Durchlässigkeit der Birsohle, jedoch nicht bei der Peakhöhe und -breite vorgenommen. Der Wert des RMSE (Root Mean Squared Residual) liegt für 14 Messstellen mit je 365 berechneten Werten bei 0,37, der Wert für die Nash-Sutcliffe-Effizienz bei 0,72.

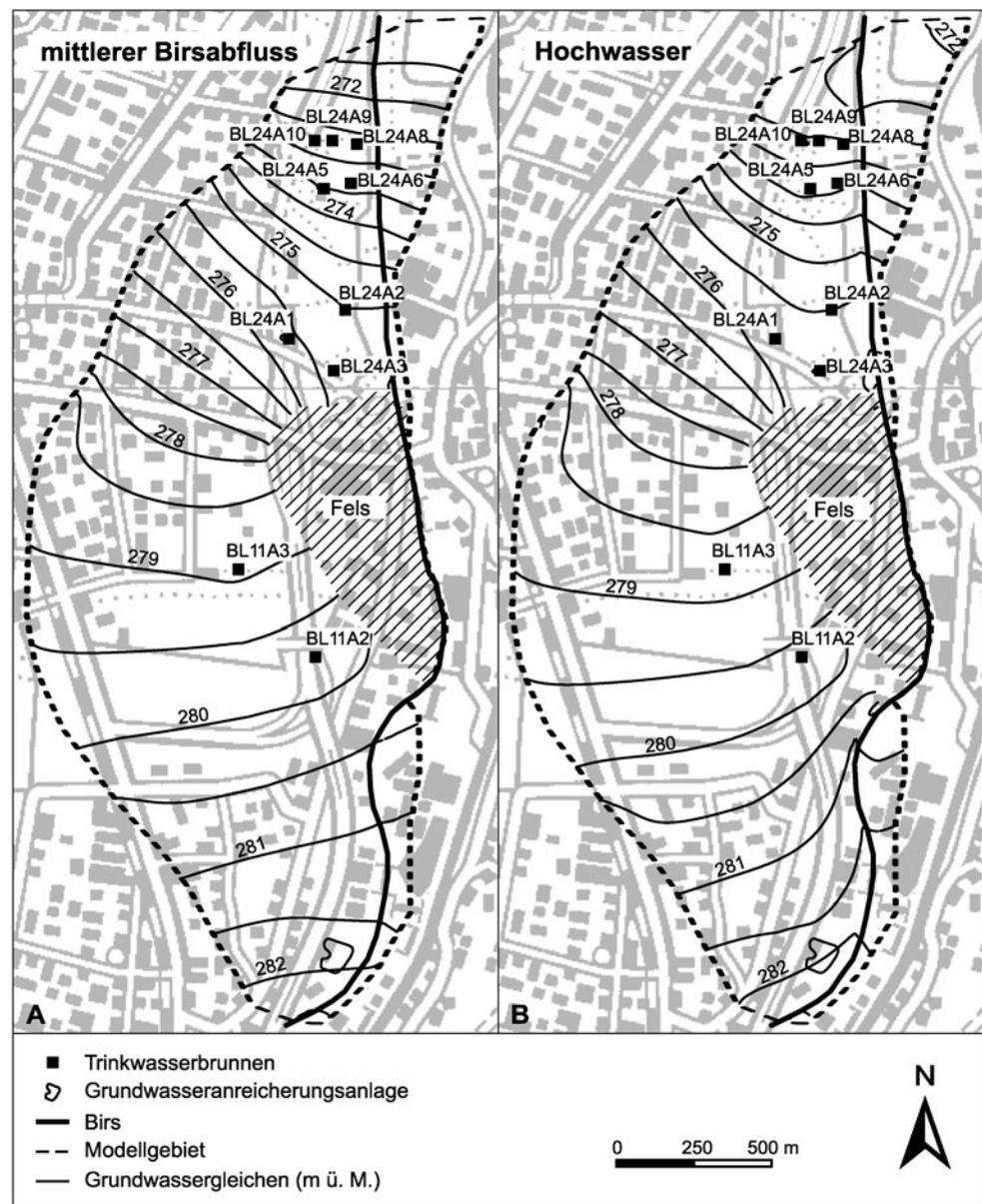
Abbildung 5 zeigt als Beispiel die berechneten und gemessenen Zeitreihen des Grundwasserpegels einer Messstelle nahe der Birs (BL24J22) und einer weiter entfernt von der Birs (BL24J6).

## Resultate

### Ist-Zustand

Die Resultate der Grundwassermodellierung zeigen, dass im untersuchten Gebiet eine starke Abhängigkeit der Grund-

**Abb. 6** Grundwassergleichen bei unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen. Links: Mittlerer Birsabfluss von  $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  am 6. Juni 2008 (A). Rechts: Hochwasser mit  $130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  vom 11. April 2008 (B)



wasserströmung von Anreicherung, Entnahme und Flusspegel besteht. Das rasche und zeitlich variable Zusammenspiel der einzelnen Faktoren wird durch die hohe Durchlässigkeit der quartären Schotter zusätzlich begünstigt.

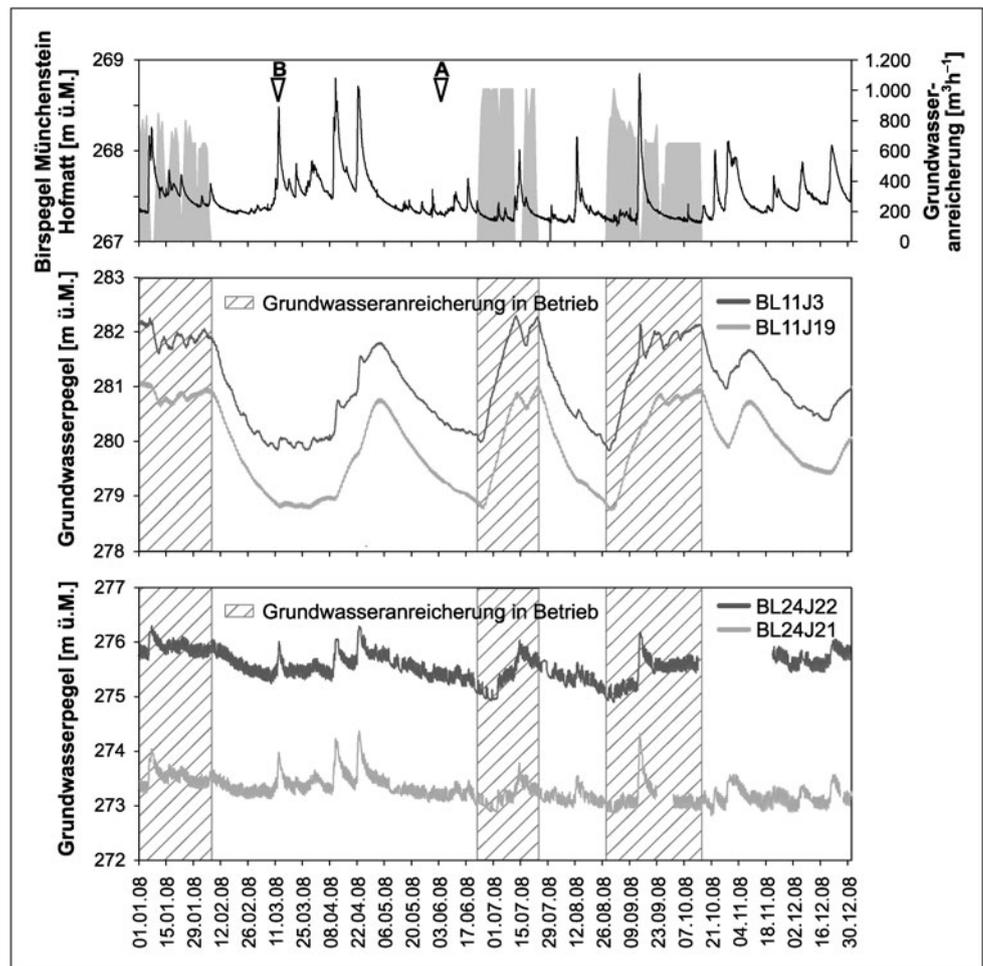
In Abbildung 2 sind die wichtigsten Randzu- und -abflüsse für den Zeitraum vom 1. Januar 2008 bis 31. Dezember 2008 zusammengestellt. Auffallend ist die teilweise hohe Instationarität einzelner Randbedingungen, insbesondere die nördlichen und südlichen Zu- und Abflüsse und der Einfluss der Fluss-Grundwasser-Interaktion in Abhängigkeit der Schwankungen des Birspegels.

Anfang Februar 2008 wurde die Anreicherungsanlage außer Betrieb genommen. Durch die Hochwasser im März und April 2008 konnte der Grundwasserspeicher wieder aufgefüllt werden und bis Ende Juni 2008 war keine künstliche

Anreicherung nötig. Um einen uneingeschränkten Pumpbetrieb während der eher trockenen Monate zu gewährleisten, musste die künstliche Anreicherung im Juli und im September 2008 wieder in Betrieb genommen werden.

Die Ergebnisse der instationären Grundwassermodellierung zeigen große Unterschiede zwischen normalen Birsabflüssen und Hochwassersituationen. Abbildung 6 zeigt das Grundwasserfließregime für mittleren Birsabfluss ( $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , (A) Abb. 6) und während eines Hochwassers ( $130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , (B) Abb. 6). Während Hochwasserereignissen kann, vor allem im nördlichen Teil des Modellgebiets, welcher stark durch die Birs beeinflusst ist, ein starker Anstieg des Grundwasserspiegels beobachtet werden. Im südlichen Teil des Modellgebiets ist in der Nähe der Birs, wenn auch nicht so ausgeprägt, ebenfalls ein Anstieg des Grundwasser-

**Abb. 7** Grundwasserspiegel im Vergleich zum Pegel der Birs, dargestellt mit Phasen der Grundwasseranreicherung. *Oben:* Grundwasserspiegel in den Messstellen BL11J3 und BL11J19 im südlichen Modellgebiet. *Unten:* Grundwasserspiegel in den Messstellen BL24J22 und BL24J21 im nördlichen Modellgebiet (Standorte der Messstellen siehe Abb. 1)



spiegels zu erkennen. Die Anreicherungsanlage war bei beiden Situationen nicht in Betrieb. Am Verlauf der Grundwasserspiegeln im Bereich der nördlichen Pumpwerke, kann durch die Grundwasserentnahmen ein Absenkttrichter erkannt werden.

**Einfluss der Anlage zur künstlichen Grundwasseranreicherung**

Aufgrund von Effizienzproblemen der Grundwasseranreicherungsanlage in der Gemeinde Aesch und im Hinblick auf eine Optimierung des Betriebes der Trinkwasserbrunnen in der Birs ebene wurde insbesondere der Einfluss der in den 1970er Jahren errichteten Grundwasseranreicherungsanlage auf das Grundwasserfließregime und die Grundwasserqualität untersucht. Dazu wurde die im Süden des Grundwassergebietes gelegene Anlage Anfang Februar 2008 außer Betrieb genommen. Betrachtet man den Verlauf des Grundwasserspiegels in verschiedenen Messstellen, können zwei Haupteinflüsse auf die Entwicklung des Grundwasserspiegels unterschieden werden (Abb. 7): (1) Grundwasserspiegel (BL11J3 und BL11J19) mit deutlicher Reaktion auf den

Betrieb der Anreicherungsanlage und den Abfluss der Birs sowie (2) Grundwasserspiegel (BL24J22 und BL24J21) bei dem der Verlauf vom Abfluss der Birs dominiert wird. Tabelle 1 fasst zusammen, welche Art der Beeinflussung und in welchem Ausmaß sie bei den jeweiligen Grundwassermessstellen und Trinkwasserbrunnen beobachtet wurde. So ist zum Beispiel in den Grundwassermessstellen BL11J15 und BL11J16, welche nur etwa 100 m weiter nördlich der Anreicherungsanlage liegen (Gruppe 1; Abb. 1), eine starke Abnahme des Grundwasserspiegels um bis zu 5 m während der Außerbetriebnahme der Anreicherungsanlage zu beobachten. Je weiter nördlich die Grundwassermessstellen von der Anreicherungsanlage liegen, desto weniger deutlich ist ein Einfluss der Grundwasseranreicherung zu beobachten. Ist die Anreicherungsanlage in Betrieb, liegt der Grundwasserspiegel bei den Messstellen in der Nähe der Trinkwasserbrunnen der Gemeinde Aesch (BL11J19 und BL11J3, Gruppe 2) um etwa 2 m höher als während der Außerbetriebnahme. Der Einfluss der Anreicherungsanlage auf den Grundwasserspiegel im nördlichen Modellgebiet, bei den Trinkwasserbrunnen der Gemeinde Reinach (BL24A1, BL24A2, BL24A3, BL24A5, BL24A6, BL24A8, BL24A9

**Tab. 1** Bewertung der Beeinflussung von Grundwasserspiegeln und Trinkwasserbrunnen durch die künstliche Grundwasseranreicherung und die Birs (Gruppen siehe Abb. 1)

Gruppe	Grundwassermessstellen und <i>Trinkwasserbrunnen</i>	Beeinflussung durch Grundwasser- anreicherungsanlage (GW-Absenkung nach Außerbetriebnahme)	Beeinflussung durch Birs
Gr. 1	BL11J15, BL11J16	Stark (4–5 m)	Schwach
Gr. 2	BL11J5, BL11A1, BL11J19, BL24J16, BL11R3, BL24J9, BL24J19, BL24J1, BL24J6 <i>BL11A2, BL11A3</i>	Mittel (2–3 m)	Keine Beeinflussung
Gr. 3	BL11J3	Mittel (2,5 m)	Mittel
Gr. 4	BL24A4, BL24A7, BL24J20, BL24J22 <i>BL24A1, BL24A2, BL24A3</i>	Schwach (0,65 m)	Stark
Gr. 5	BL24J21	Keine Beeinflussung	Stark

und BL24A10), ist nur noch schwach zu erkennen. In der Messstelle BL24J22 (Gruppe 4) liegt der Grundwasserspiegel während der künstlichen Grundwasseranreicherung um etwa 0,5 m höher als während der Außerbetriebnahme. Die Grundwasserabsenkung hat in diesem Gebiet zur Folge, dass die Flusswasserinfiltration durch den Anstieg des Gradienten zwischen Fluss- und Grundwasserspiegel zunimmt. Der Verlauf des Grundwasserspiegels der weiter nördlich gelegenen Messstelle BL24J21 (Gruppe 5) zeigt keine Reaktion auf den Betrieb der Anreicherungsanlage. Der Grundwasserspiegel wird in diesem Bereich stärker durch die Birs beeinflusst.

Die Auswertung der Grundwasserpegeldata und die Resultate der Grundwassermodellierung zeigen, dass das Grundwasserfließregime für die verschiedenen Bereiche im Untersuchungsgebiet unterschiedlich stark von der Grundwasseranreicherung, den Grundwasserentnahmen und vom Birsabfluss beeinflusst wird. Beim Birsabschnitt im südlichen Modellgebiet (im Bereich Gruppe 1 und Gruppe 2) infiltriert die Birs ins Grundwasser. Die Infiltration steigt bei Hochwasser an, ist sonst aber konstant. Beim Birsabschnitt auf Höhe der Gruppe 4 sowie im südlichen Teil der Gruppe 5 (oberhalb Heidebrüggli) infiltriert ebenfalls Flusswasser. Die Infiltration steigt einerseits bei Hochwasser an, andererseits wird die Infiltration mit sinkendem Grundwasserpegel ebenfalls größer. Nach großen Hochwasserereignissen kann es auf diesem Abschnitt auch zu exfiltrierenden Verhältnissen kommen. Unterhalb des Heidebrüggli exfiltriert das Grundwasser in den Fluss.

Um jederzeit den Pumpbetrieb aller Trinkwasserbrunnen garantieren zu können, wurde von den bewilligenden Behörden für den Brunnen BL11A3 ein kritischer Grundwasserspiegel definiert. Beim Unterschreiten dieses kritischen Grundwasserspiegels wurde die Anreicherungsanlage wieder in Betrieb genommen. Dies war Ende Juni, Juli und August 2008 der Fall. Diese Randbedingung hatte zur Folge, dass der Verlauf des abfallenden Grundwasserspiegels nicht

bis zu einem stationären Niedrigwasserzustand verfolgt werden konnte, mit dem das Grundwasserdargebot für den betrachteten Grundwasserkörper bei Niedrigwasser hätte abgeschätzt werden können.

Weiterhin wurde auch das Risiko einer möglichen negativen Veränderung der Grundwasserqualität bei einer Außerbetriebnahme der künstlichen Grundwasseranreicherung untersucht und abgeschätzt. Die Ermittlung der Zuströmbereiche zu den einzelnen Trinkwasserbrunnen stellt ein wichtiges Element bei der Sicherstellung des planerischen Grundwasserschutzes dar. Die mit dem instationären Grundwassermodell ermittelten Zuströmbereiche zu den Trinkwasserbrunnen sind sowohl vom Betrieb der Grundwasseranreicherungsanlage als auch von Entnahmemengen der Trinkwasserbrunnen und der Fluss-Grundwasser-Interaktion abhängig. Unter Berücksichtigung der verschiedenen möglichen hydrologischen und betrieblichen Randbedingungen, welche mit Szenarienberechnungen ausgewertet wurden, können die Zuströmbereiche im Hauptgrundwasserstrom den gesamten intensiv genutzten Bereich südlich der Trinkwasserbrunnen einnehmen (Abb. 8). Der Einfluss der landwirtschaftlichen Aktivitäten, welche hauptsächlich im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes und im angrenzenden Einzugsgebiet stattfinden, auf den Nitratgehalt im Grundwasser ist bei den am westlichen Rand des Grundwasserleiters gelegenen Trinkwasserbrunnen zu beobachten. Dort werden oft Nitratkonzentrationen über dem Qualitätsziel von  $25 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  im geförderten Rohwasser aufgewiesen (Auckenthaler et al. 2006). Durch die Außerbetriebnahme der Grundwasseranreicherungsanlage in der Gemeinde Aesch verändern sich die Zuströmbereiche zu einigen Trinkwasserbrunnen (BL24A5, BL24A9 und BL24A10). Ohne die Grundwasseranreicherung verschiebt sich der Zustrom in Richtung des landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiets im Westen, was eine Erhöhung der Nitratkonzentrationen im Grundwasser zur Folge haben kann. Es wird deshalb erwartet, dass sich bei Niedrigwassersituationen die Wasserquali-

**Abb. 8** Zuströmbereiche zu den Trinkwasserbrunnen der Gemeinde Aesch und Reinach mit (*links*) und ohne (*rechts*) Grundwasseranreicherung bei hydrologischen Randbedingungen mit tiefem Grundwasserspiegel sowie geringem Flusspegel



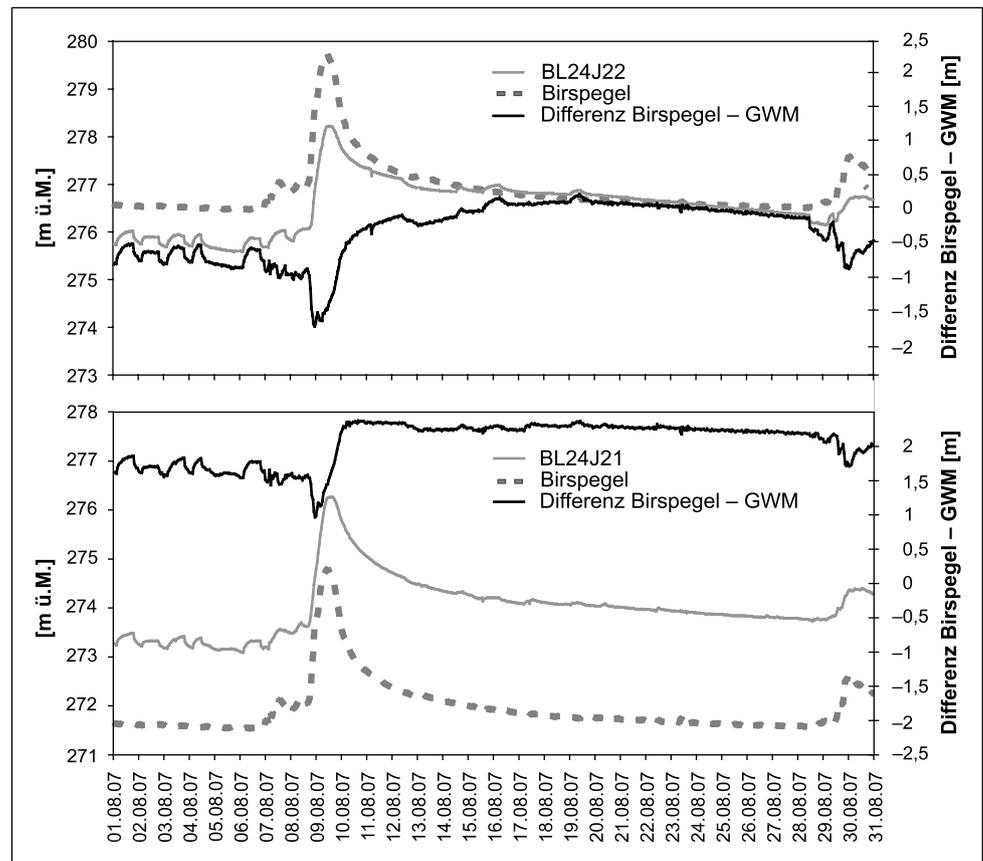
tät bezüglich des Nitratgehalts im Rohwasser einiger Trinkwasserbrunnen (z. B. BL24A5) verbessert und bei anderen (z. B. BL24A9) verschlechtert.

**Auswirkungen während Hochwasserereignissen**

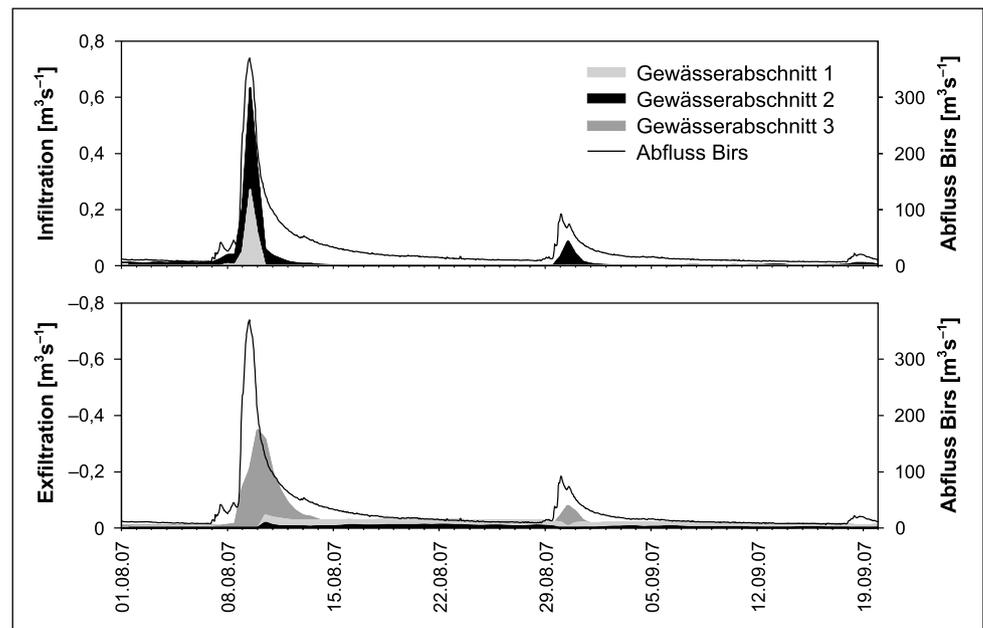
Der starke Anstieg des Grundwasserspiegels während eines Hochwasserereignisses, kann zu Veränderungen der Infiltrations- und Exfiltrationsverhältnisse führen (Abb. 6). Grundsätzlich findet im südlichen Teil des Modellgebiets, bis zu einer markanten Felsschwelle (Dornachbrugg, Abb. 2, Staustufe B) eine Infiltration von Birswasser ins Grundwasser und im nördlichsten Teil (Gewässerabschnitt 3, Abb. 1) eine Exfiltration von Grundwasser in die Birs statt (Abb. 1). Dazwischen existiert ein Flussabschnitt, an welchem sowohl In- als auch Exfiltration beobachtet werden können

(Gewässerabschnitt 1 und 2, Abb. 1). Die In- und Exfiltration variiert abhängig vom Abfluss und Pegel der Birs. Das 300-jährige Hochwasser am 9. August 2007 löste einen außerordentlich raschen Anstieg des Grundwasserspiegels aus, was zu massiven Änderungen des Grundwasserfließregimes führte (Abb. 9). Der Grundwasserspiegel in der Grundwassermessstelle BL24J22 südlich der Staustufe C (Abb. 2) erfolgt gegenläufig zum Hochwasserdurchgang. Vor dem Hochwasser liegt der Grundwasserspiegel unterhalb des Birspegels (−0,7 m) und nach dem Hochwasser oberhalb des Birspegels (+0,1 m) (Abb. 9). Die Änderung der Differenz zwischen Fluss- und Grundwasserpegel hat zur Folge, dass in gewissen Bereichen vor dem Hochwasser Oberflächenwasser ins Grundwasser infiltriert und während und nach dem Hochwasser Grundwasser in das Oberflächengewässer exfiltriert (Abb. 10).

**Abb. 9** Grundwasserspiegel in den Messstellen BL24J22 und BL24J21 im Vergleich zum Pegel der Birs. Auch dargestellt: die Differenz zwischen Grundwasserspiegel und Pegel der Birs (Standorte der Messstellen siehe Abb. 1)



**Abb. 10** Verlauf der Mengenanteile Infiltration (vom Fluss ins Grundwasser) und Exfiltration (vom Grundwasser in den Fluss) vor, während und nach dem Jahrhunderthochwasser vom 9. August 2007 für 3 Gewässerabschnitte (Standorte der Gewässerabschnitte siehe Abb. 1)



Nördlich des Heidebrüggli (Abb. 2) liegt der Grundwasserspiegel sowohl vor als auch nach Hochwasserereignissen über dem Flusspegel (Abb. 9). In diesem Bereich exfiltriert das Grundwasser immer in den Fluss. Vor dem

Hochwasser liegt die Differenz zwischen Birs- und Grundwasserpegel bei etwa 1,7 m, während des Hochwassers nur noch bei 1 m und nach dem Hochwasser bei etwa 2,3 m.

Modellberechnungen zu Mengenanteilen der Infiltration und Exfiltration für drei ausgewählte Gewässerabschnitte (Abb. 1) vor, während und nach dem Jahrhunderthochwasser zeigen, dass flussnahe Trinkwasserbrunnen vor allem im Bereich des Gewässerabschnitts 2 im Allgemeinen einen variablen Anteil an Birswasser fördern (Abb. 10). Während der zwei Wochen nach dem Hochwassermaximum änderten die infiltrierenden zu exfiltrierenden Verhältnissen. Im Gewässerabschnitt 1 besteht nur bei extremen Hochwasserereignissen eine Gefährdung von flussnahen Trinkwasserbrunnen durch potenziell belastetes Flusswasserinfiltrat. Im Gewässerabschnitt 3 besteht auch für die flussnahen Trinkwasserbrunnen kein Risiko einer Verunreinigung durch Flusswasserinfiltrat. Hier dominiert sowohl vor, während, als auch nach Hochwasserereignissen die Exfiltration von Grundwasser in das Oberflächengewässer.

Diese Beispiele machen deutlich, dass für ein differenziertes Gefährdungsbild einzelner Trinkwasserbrunnen das Verständnis der Dynamik des Gesamtsystems bei unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen erforderlich ist. Dadurch wird es möglich, adäquate Maßnahmen für ein Grundwassermanagement unter Berücksichtigung der Instationarität der Fluss-Grundwasser-Interaktion abzuleiten.

## Diskussion

Eines der zentralen Elemente eines adaptiven Grundwassermanagementsystems bildet die Erfassung von natürlichen und anthropogenen Randbedingungen eines Grundwassersystems. Die Ermittlung dieses Ist-Zustandes wurde anhand eines einjährigen repräsentativen, instationären Datensatzes (inkl. der Berücksichtigung eines Jahrhunderthochwassers) aus dem Grundwassersystem Unteres Birstal illustriert.

Die Untersuchungen zeigten, dass bei einer Außerbetriebnahme der Anreicherungsanlage die Trinkwasserbrunnen in der Gemeinde Aesch während längerer Trockenperioden mit Einschränkungen der Grundwasserförderung rechnen müssen. In solchen Perioden müsste Trinkwasser über ein regionales Netz von anderen Trinkwasserproduzenten bezogen werden. Da der betroffene Trinkwasserbrunnen regional betrachtet jedoch die Grundwasserschutzbestimmungen am besten erfüllt und im Vergleich zu anderen Trinkwasserbrunnen nur geringfügige Risiken im Bereich des Zustroms aufweist, werden weitere Risikovergleiche mithilfe der Werkzeuge des adaptiven Grundwassermanagements zu einer Entscheidungsfindung beitragen.

Für die Trinkwasserbrunnen im nördlichen Modellgebiet (BL24A1, BL24A5, BL24A8, BL24A9 und BL24A10) spielt die künstliche Anreicherung nur eine untergeordnete Rolle, die quantitative Grundwasserversorgung ist gesichert. Hingegen ist hier die Qualität des Grundwassers unter stärkerem Druck. Bei einigen Trinkwasserbrunnen ist es wegen

des stark genutzten Gebietes nicht möglich die Schutzzonen gesetzeskonform auszuschneiden. Je nach hydrologischer Situation stellt auch die flussnahe Lage der Trinkwasserbrunnen eine Gefährdung dar. Zudem ändern sich bei einer Außerbetriebnahme der Anreicherungsanlage die Zuströmbereiche zu einigen flussfernen Trinkwasserbrunnen so, dass bei bestimmten hydrologischen Situationen der Anteil des Grundwassers aus dem westlich gelegenen landwirtschaftlichen Einzugsgebiet zunimmt, wodurch sich die Nitratkonzentrationen im Rohwasser einzelner Trinkwasserbrunnen erhöhen können. Insgesamt ist aber nach einer Außerbetriebnahme der Grundwasseranreicherung nur in wenigen Fällen mit einer Verschlechterung der Grundwasserqualität zu rechnen.

Ereignisse wie das Jahrhunderthochwasser im August 2007 tragen zum Prozessverständnis der Fluss-Grundwasser-Interaktion bei und liefern Grundlagen für die Beurteilung seltener Risiken der Verunreinigung von flussnahen Trinkwasserbrunnen. Das Identifizieren und Lokalisieren von möglichen Gefährdungen ermöglicht, einen differenzierteren Grundwasserschutz zu betreiben als mit den gängigen Methoden und entsprechende adaptive Schutzvorkehrungen zu treffen. Zudem sind Aussagen über das Grundwasserfließregime und die verschiedenen hydrologischen und betrieblichen Randbedingungen, die das Regime beeinflussen, möglich. Der rasche Anstieg des Grundwasserspiegels bei einem Hochwasser ist ein Hinweis für einen Übergang zu zeitweilig gespannten Grundwasserhältnissen bei Hochwasser. Eine Erklärung dieses Verhaltens liegt in der Verteilung der schlecht durchlässigen Sedimente der ehemaligen Flussauen im Vergleich zu den stark durchlässigen Sedimenten der Birsschotter in den aktiven Kanalgrütern des damaligen Ablagerungssystems.

Durch die starke Nutzung im Bereich des Grundwasserzustroms zu den Trinkwasserbrunnen bestehen, je nach Lage und Aktivitäten in den einzelnen Teilbereichen, unterschiedliche Gefährdungen für das Grundwasser. Eine wesentliche Gefährdung geht bei flussnahen Trinkwasserbrunnen von infiltrierendem Oberflächenwasser aus. Bisher wurde die Fluss-Grundwasser-Interaktion meist nur annähernd berücksichtigt (Erfahrungswerte, Ergebnisse von Modellkalibrierungen). Mithilfe von Kolmations-Dekolmationsmodellen kann der zeitliche Verlauf der In- und Exfiltration bei normalen Abflüssen und bei Hochwasser abgeschätzt und bilanziert werden. Die Resultate dieser Bilanzierungen zeigen u. a. den Anteil an Oberflächenwasser im jeweiligen Brunnen im Normalbetrieb und während eines Hochwasserereignisses. Entsprechend können diese Massenflüsse in Beziehung zu den Konzentrationen von unterschiedlichen Stoffen im Flusswasser gesetzt und Gefährdungen differenzierter betrachtet werden. Dies ermöglicht es, Managementmaßnahmen für flussnahe Trinkwasserbrunnen ebenfalls differenzierter zu evaluieren und umzusetzen.

## Schlussfolgerungen

Bei den Resultaten der Modellrechnungen im Vergleich mit den Zeitreihen der Pegeldata und der Abschaltung der Anreicherungsanlage handelt es sich um Experimente, die ein zentrales Element eines adaptiven Managementansatzes darstellen. Sie erlauben, den Einfluss von geplanten Veränderungen abzuschätzen. Die Resultate bilden auch die Basis für die Berechnung von Szenarien, wo verschiedene reale Ereignisse und Randbedingungen bei der Evaluation von möglichen Systementwicklungen berücksichtigt und die Resultate der Evaluation zu Händen der Entscheidungsträger illustriert werden. Vor der Realisierung von geplanten Änderungen, wie in diesem Fall die Außerbetriebnahme der künstlichen Grundwasseranreicherung in der Gemeinde Aesch, können somit qualifizierte Entscheidungsgrundlagen erarbeitet werden. Diese Entscheidungen beruhen nicht nur auf den lokalen, projektbezogenen Fragestellungen, sondern sie zeigen auch den Einfluss von geplanten Maßnahmen auf das gesamte Wasserversorgungssystem.

Um konkrete Maßnahmen für die nachhaltige Nutzung von Wasserressourcen zu erarbeiten, müssten insbesondere lang- und mittelfristige Ziele für die Sicherung der Grundwasserqualität und -quantität formuliert werden. Mögliche Ziele beinhalten zum Beispiel: (1) eine Minimierung der Infiltration von Oberflächenwasser durch geeigneten Betrieb der Trinkwasserbrunnen, (2) eine Verbesserung der Grundwasserqualität aus dem westlichen Einzugsgebiet durch Reduktion des landwirtschaftlichen Nitratreintrages, (3) die Erarbeitung eines Konzepts für die Sicherung der quantitativen Grundwasserversorgung der Trinkwasserbrunnen in der Gemeinde Aesch, (4) ein qualitätsorientiertes Grundwassermanagement und (5) eine Langzeitverbesserung der Grundwasserqualität bezüglich diffuser Belastungen aus den intensiv genutzten Gebieten der Zuströmbereiche. Für eine solche Zieldiskussion müssten sich die betroffenen Gemeinden und Wasserversorger auf eine nachhaltige Strategie der Zusammenarbeit im Bereich der Nutzung der Wasserressourcen einigen.

**Danksagung** An dieser Stelle möchten wir uns bei Ina Spottke bedanken, die mit ihrer Projektarbeit im Untersuchungsgebiet wesentliche Grundlagen für die Hydrogeologie des Birstals erarbeitet hat. Zudem danken wir dem Amt für Umweltschutz und Energie Basellandschaft für das zur Verfügung stellen der Grundwasserpegeldata sowie dem Wasserwerk Reinach und Umgebung und der Wasserversorgung Aesch für die Bereitstellung der Nutzungsdaten.

## Literatur

Auckenthaler, A., Epting, J., Huggenberger, P., Rüetschi, D.: INTERREG III Grundwasserqualität Oberrhein, Teilmodul Nitratherkunft (Nitrat-Transportmodellierung), Monit: Entwicklung von Prognosewerkzeugen, LUBW, Karlsruhe (2006)

- EEA—European Environment Agency: Environment in the European Union at the turn of the century, 446 S. Copenhagen, Denmark (1999)
- Eiswirth, M., Hötzl, H., Cronin, A., Morris, B., Veselić, M., Buefler, R., Burn, S., Dillon, P.: Assessing and improving sustainability of urban water resources and systems. *RMZ, Mater. Geoenviron.* **50**, 117–120 (2003)
- Eiswirth, M., Wolf, L., Hötzl, H.: Balancing the contaminant input into urban water resources. *Environ. Geol.* **46**, 246–256 (2004)
- Environmental Modeling Systems Inc.: GMS, groundwater modeling system v6.0. <http://www.ems-i.com> (2006)
- Epting, J., Regli, C., Huggenberger, P.: Groundwater protection in urban areas incorporating adaptive groundwater monitoring and management. In: Pahl-Wostl, C., Kabat, P., Möltgen, J. (Hrsg.) *Adaptive and Integrated Water Management, Coping with Complexity and Uncertainty*, S. 440. Springer, Berlin (2007). ISBN: 978-3-540-75940-9
- Huggenberger, P.: Wiese Revitalisierung: Führen die Veränderungen der Sohlenstruktur zu einer Trinkwassergefährdung? *Reg. Basil.* **421**, 63–76 (2001)
- Huggenberger, P., Regli, C., Epting, J., Guldenfels, L.: Revitalisierung von Fließgewässern in Grundwasserschutzgebieten – ein Oxymoron? *Reg. Basil.* **45/3**, 195–212 (2004)
- Huggenberger, P., Epting, J., Spottke, I., Regli, C., Zechner, E.: INTERREG III A-Projekt MoNit „Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben“. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Teilprojekte Nitratherkunft (Nitrat-Transportmodellierung) und Fluss-Grundwasser-Interaktion (regionale hydrologische Grundlagendaten) (2006)
- Lerner, D.N.: Identifying and quantifying urban recharge: a review. *Hydrogeol. J.* **10**(1), 143–152 (2002)
- Leschik, S., Musolff, A., Krieg, R., Martienssen, M., Bayer-Raich, M., Reinstorf, F., Strauch, G., Schirmer, M.: Application of integral pumping tests to investigate the influence of a losing stream on groundwater quality. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **13**(10), 1757–1774 (2009)
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C.: Modflow-2000. The U.S. geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. US Geological Survey Open File Report 00-92 (2000)
- Musolff, A., Leschik, S., Reinstorf, F., Strauch, G., Moeder, M., Schirmer, M.: Xenobiotics in groundwater and surface water of the city of Leipzig. *Grundwasser* **12**(3), 217–231 (2007)
- National Research Council: Adaptive management for water resources project planning, 138 S. National Academies Press, Washington (2004)
- Pahl-Wostl, C.: Newsletter No. 1. <http://www.newwater.info> (2006)
- Pahl-Wostl, C., Möltgen, J., Sendzimir, J., Kabat, P.: New methods for adaptive water management under uncertainty—the NeWater project. In: EWRA Conference Proceedings 2005, Menton, France (2005)
- Regli, C., Huggenberger, P.: Entwicklung nachhaltiger Strategien für den Grundwasserschutz. In: Revitalisierung urbaner Flusslandschaften, Schlussbericht zum MGU\_Forschungsprojekt F1.03, S. 47–61 (2006)
- Reinstorf, F., Leschik, S., Musolff, A., Osenbrück, K., Strauch, G., Moeder, M., Schirmer, M.: Quantification of large-scale urban mass fluxes of xenobiotics and of the river-groundwater interaction in the city of Halle, Germany. *Phys. Chem. Earth* **34**(8–9), 574–579 (2009)
- Schälchli, U.: Die Kolmation von Fließgewässersohlen: Prozesse und Berechnungsgrundlagen. *Mitt. VAW* **124**, 1–273 (1993)

- Vogt, T., Hoehn, P., Schneider, P., Cirpka, O.A.: Untersuchung der Flusswasserinfiltration in voralpinen Schottern mittels Zeitreihenanalyse. *Grundwasser* **14**(3), 179–194 (2009)
- Woessner, W.W.: Stream and fluvial plain ground water interactions: rescaling hydrologic thought. *Ground Water* **38**(3), 423–429 (2000)
- Wolf, L., Klinger, J., Hoetzi, H., Mohrlök, U.: Quantifying mass fluxes from urban drainage systems to the urban soil-aquifer system. *J. Soils Sediments* **7**(2), 85–95 (2007)