

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie
Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel
Band: 45 (2004)
Heft: 3

Artikel: Revitalisierung von Fließgewässern in Grundwasserschutzgebieten : ein Oxymoron*?
Autor: Huggenberger, Peter / Regli, Christian / Epting, Jannis / Guldenfels, Lorenz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1088390>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Revitalisierung von Fliessgewässern in Grundwasserschutzgebieten – ein Oxymoron*?

Peter Huggenberger, Christian Regli, Jannis Epting
und Lorenz Guldenfels

Zusammenfassung

Ziel des Gewässerschutzes ist es, möglichst naturnahe Funktionen von Fliessgewässern wieder herzustellen und eine gute Wasserqualität zu gewährleisten. Dies soll unter anderem mit Revitalisierungsmassnahmen an Fliessgewässern erreicht werden. Mit Hilfe von Feldexperimenten wurden Prozesse der Fluss-Grundwasserinteraktion in den Langen Erlen untersucht. Die Resultate lassen das Gefährdungspotenzial flussnaher Brunnen durch Verunreinigungen aus der Wiese abschätzen. Durch die Ausarbeitung von Modellszenarien können Revitalisierungsmassnahmen evaluiert und optimiert sowie erwartete Konsequenzen aus Entscheiden bewertet werden. Eine gezielte Aufgabe flussnaher Brunnen, verbunden mit dem Bau einiger weniger Ersatzbrunnen an geeigneten Standorten, würde zu einem grösseren Freiheitsgrad zukünftiger Revitalisierungsmassnahmen führen. Damit verbunden wäre ein grösserer Schutz des Grundwassers bezüglich dem Eindringen von wassergefährdenden Stoffen und Mikroorganismen aus der Wiese.

1 Einleitung

In der Schweiz stammen rund 40 % des Trinkwassers aus Porengrundwasserleitern. Trinkwasser, das in unmittelbarer Umgebung von Oberflächengewässern gefördert wird, besteht zu einem grossen Teil aus Uferfiltrat. In der Natur kommen Keime in allen Wässern vor. Kritisch sind Situationen, bei denen pathogene Keime, wie Bak-

Adresse der Autoren: Prof. Dr. Peter Huggenberger, Dr. Christian Regli, Dipl. Hydr. Jannis Epting, Dipl. Natw. ETH Lorenz Guldenfels, Geologisch-Paläontologisches Institut, Universität Basel, Bernoullistrasse 32, CH-4056 Basel

* Oxymoron: Widerspruch in sich; griechisch: oxys = scharf(sinnig); moros = dumm.

terien und Viren, ins Trinkwasser gelangen oder in grosser Anzahl im Rohwasser (Wasser vor der Aufbereitung zu Trinkwasser) auftreten und nachträglich keine Aufbereitung stattfindet (*Auckenthaler & Huggenberger 2003*).

Mikrobiologische Belastungen des flussnahen Grundwassers unterliegen grossen zeitlichen Schwankungen. Der Transport von Mikroorganismen in diesen Systemen wird gesteuert durch unterschiedliche Einträge aus der Landwirtschaft und der Siedlungsentwässerung sowie durch hydrologische (Niederschlag und Hochwasser) und betriebliche Randbedingungen der Wasserversorgung (Grundwasseranreicherung und Entnahme).

Wasserversorger befürchten, dass durch Revitalisierungsmassnahmen die Wasserwegsamkeit zwischen Oberflächen- und Grundwasser verbessert wird. Dadurch können kritische mikrobiologische Belastungen flussnaher Trinkwasserfassungen zunehmen und Zielkonflikte zwischen der Forderung nach Fliessgewässer-Revitalisierungen und dem Grundwasserschutz werden häufiger.

Gibt es eine Lösung für diese Zielkonflikte? Oder handelt es sich bei der Forderung der Fliessgewässer-Revitalisierung in Grundwasserschutzgebieten um einen Oxyoron? Solche, offenbar gegensätzlichen Ziele oder Interessen sind nicht nur im Gebiet der Langen Erlen, sondern auch bei einer Reihe von Revitalisierungsprojekten in Flussebenen des schweizerischen Mittellandes zu beobachten (*Willi 2001, Oplatka 2000*).

Im Hinblick auf den Grundwasserschutz hat das Tiefbauamt Basel-Stadt im Herbst 2001 in Absprache mit der Wiesekommission das Geologisch-Paläontologische Institut (GPI, Angewandte und Umweltgeologie) beauftragt, den Ist-Zustand des Grundwasser-Anreicherungs- und Entnahmesystems der Langen Erlen bei unterschiedlichen Wieseabflüssen zu untersuchen. Hierfür wurden Markierversuche, kombiniert mit physikalischen, chemischen und bakteriologischen Wasseruntersuchungen durchgeführt (*GPI 2003a, GPI 2004*). Parallel dazu wurde ein instationäres Grundwassermodell für das Gesamtsystem der Langen Erlen erarbeitet (*GPI 2003b*).

Das Modell hilft potenzielle Gefährdungen durch schon verwirklichte oder zukünftige Revitalisierungen der Wiese sowie Auswirkungen baulicher Massnahmen, wie z. B. die Abdichtung von Uferpartien, zu beurteilen. Auch sollen Auswirkungen solcher Massnahmen auf das Gesamtsystem (Grundwasserfliessregime, Anströmbereiche von Wasserfassungen, Wasserbilanzen) und auf einzelne Brunnen beschrieben werden.

Zusammen mit der Auswertung von Markierversuchen und Datensätzen zur Mikrobiologie sowie Partikelanalysen sollen die aus dem Grundwassermodell abgeleiteten Szenarienberechnungen zur Versachlichung der Entscheide beitragen.

In diesem Artikel werden einige wichtige Resultate dieser Studien im Hinblick auf das künftige Revitalisierungspotential der Wiese im Grundwasserschutzgebiet der Langen Erlen diskutiert und beurteilt. Daraus lassen sich eine Reihe von Modellszenarien ableiten, die eine gezielte Evaluierung und Optimierung von spezifischen Revitalisierungsmassnahmen erlauben.

2 Untersuchungsgebiet

Der nahezu unverbauete Raum der Langen Erlen (Abb. 1) umfasst eine Fläche von rund 700 ha und unterliegt durch die unmittelbare Nachbarschaft zu den dicht besiedelten urbanen Zentren Basel, Riehen, Weil am Rhein und Lörrach einem grossen Nutzungsdruck wie der Naherholung und Trinkwassergewinnung. Aufgrund der Schutzbestimmungen (Schutzzonen S1, S2a, S2b und S3) für die Grundwasserbrunnen und Anreicherungsfelder ist dieses Gebiet bis heute vor einer Überbauung verschont geblieben. Die Wiese durchfliesst auf den letzten Kilometern vor der Einmündung in den Rhein die Langen Erlen und verläuft, sieht man von einer kürzlich revitalisierten Strecke von 600 m ab, in einem Doppeltrapez-Profil.

Der Lockergesteinsaquifer der Langen Erlen weitet sich von der Verengung des Wiesetals bei Lörrach gegen Süden fächerförmig auf. Im Südosten wird er durch den Dinkelberg und im Norden durch den Tüllingerhügel begrenzt. Der ungespannte Aquifer besteht vornehmlich aus quartären sandigen Schottern der Wiese und des Rheins, wobei die Wieseschotter den Rheinschottern auflagern oder mit ihnen verzahnt sind.

Die aus Pumpversuchen ermittelten hydraulischen Leitfähigkeiten (k_f -Werte) liegen im Bereich von $3.0E-3$ bis $7.5E-3$ m/s, die ermittelten nutzbaren Porositäten (n_{eff}) schwanken zwischen 0.08 und 0.15. Die Aqufermächtigkeiten variieren von sieben bis 20 m. Die Grundwassermächtigkeiten reichen von fünf bis zwölf Meter. Der Flurabstand beträgt maximal zehn Meter, meistens jedoch liegt er zwischen vier bis sechs Metern. Im Bereich der Anreicherungsfelder steigt der Grundwasser-

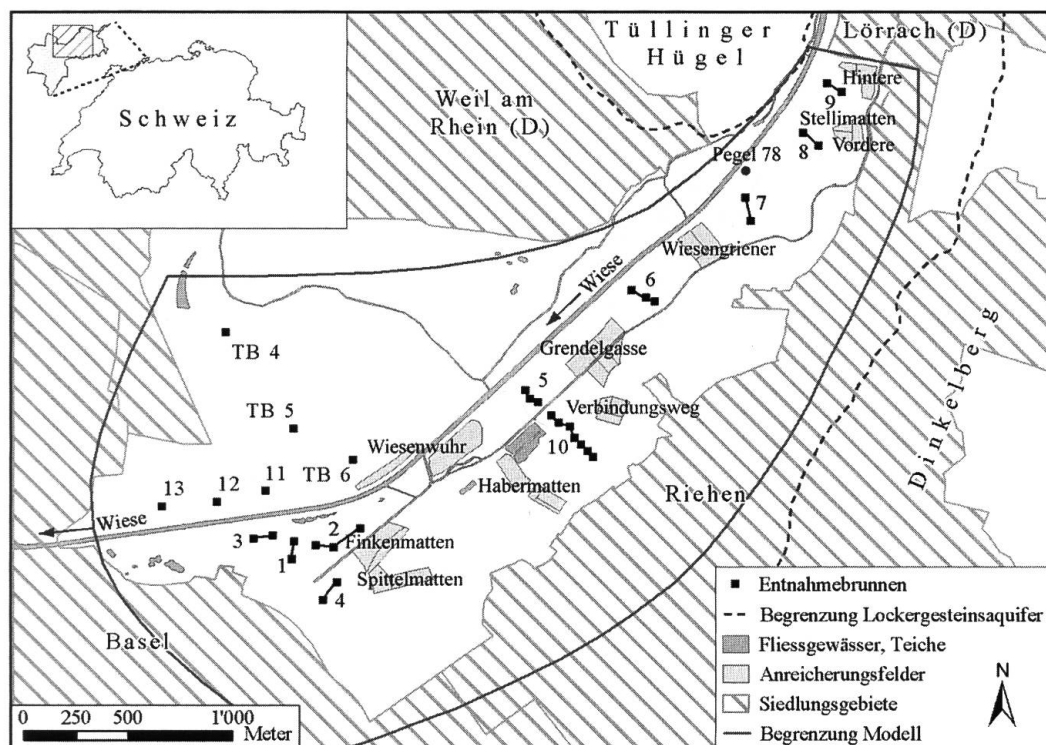


Abb. 1 Übersicht über das Grundwasser-Anreicherungs- und Entnahmegebiet der Langen Erlen, Basel-Stadt.

spiegel zuweilen bis weniger als drei Meter unter die Erdoberfläche an. Grundwasserstauer (Aquitard) sind oligozäne Tone und Mergel (Mergel der Tüllingerschichten, siltige Tone der Melettaschichten, Elsässermolasse und Cyrenenmergel). Diese Formationen können mit einem geschätzten k_f -Wert im Bereich von $1\text{E-}7$ bis $1\text{E-}8$ m/s als undurchlässig betrachtet werden (Zechner 1996).

Die hauptsächlichen Einflussfaktoren auf die Wasserbilanz, den Grundwasserstand und das Grundwasserfließregime in den Langen Erlen sind: (a) die Grundwasseranreicherung (11 Anreicherungsfelder) mit rund 10 Mio. m^3/Jahr , (b) die Grundwasserentnahme (16 Brunnen/Brunnengruppen) mit rund 13 Mio. m^3/Jahr und (c) der Abfluss beziehungsweise der Wasserstand der Wiese (Interaktion Fluss – Grundwasser).

Die Abb. 2 veranschaulicht die natürliche Dynamik von Niederschlag und Abfluss sowie die künstliche Grundwasseranreicherung (GW-Anreicherung) und Entnahme (GW-Entnahme) im gesamten Gebiet der Langen Erlen vom 10.03. bis 10.04.2002 während einem mittleren Hochwasser in der Wiese mit dem Abflussmaximum von $63.7 \text{ m}^3/\text{s}$ am 20.03.2002. In Abb. 3 ist der wiesenahe Grundwasserspiegel 78 dargestellt (Lokalität siehe Abb. 1). Dieser Pegel wird vor allem durch den Wasserstand der Wiese und mit etwas Verzögerung auch von der Grundwasseranreicherung in den Vorderen Stellmatten beeinflusst. Zwischen den Hochwasser-

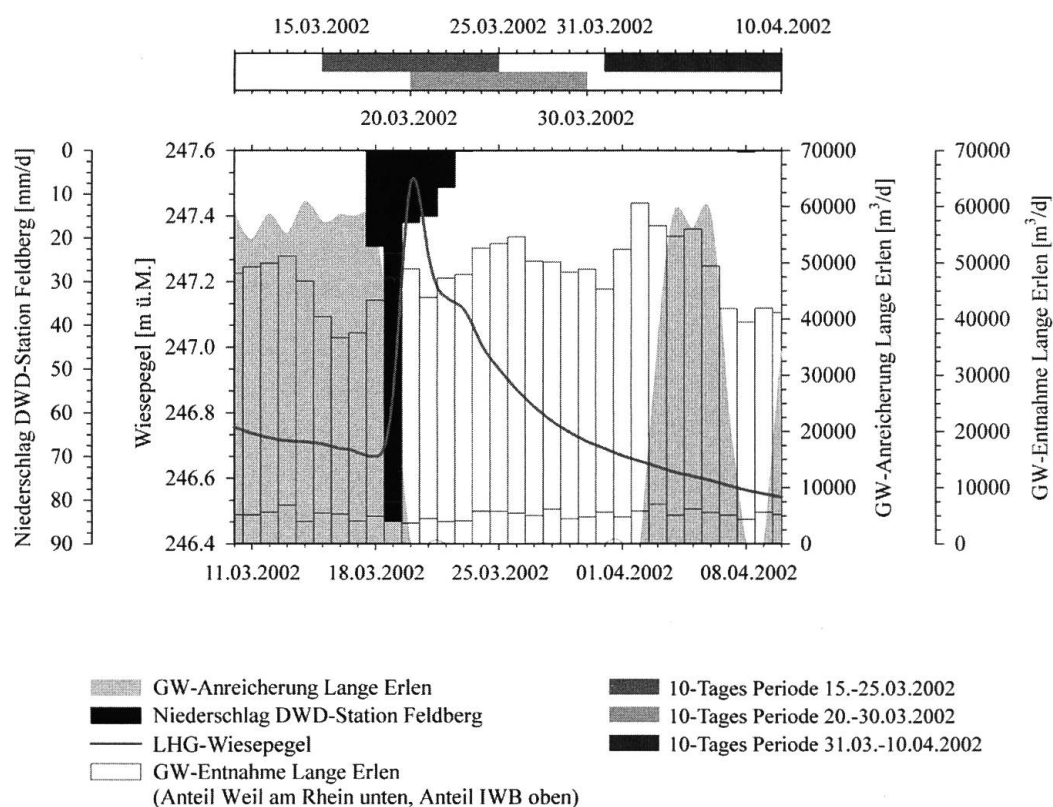


Abb. 2 Hydrologie und Grundwassernutzung vom 10.03. bis 10.04.2002 im Gebiet der Langen Erlen, Basel-Stadt. 10-Tages-Perioden beziehen sich auf die Zeitabschnitte, für die gerechnete Anströmbereiche mittels Stromlinien in Abb. 4 dargestellt sind. DWD: Deutscher Wetterdienst; LHG: Landeshydrologie; IWB: Industrielle Werke Basel.

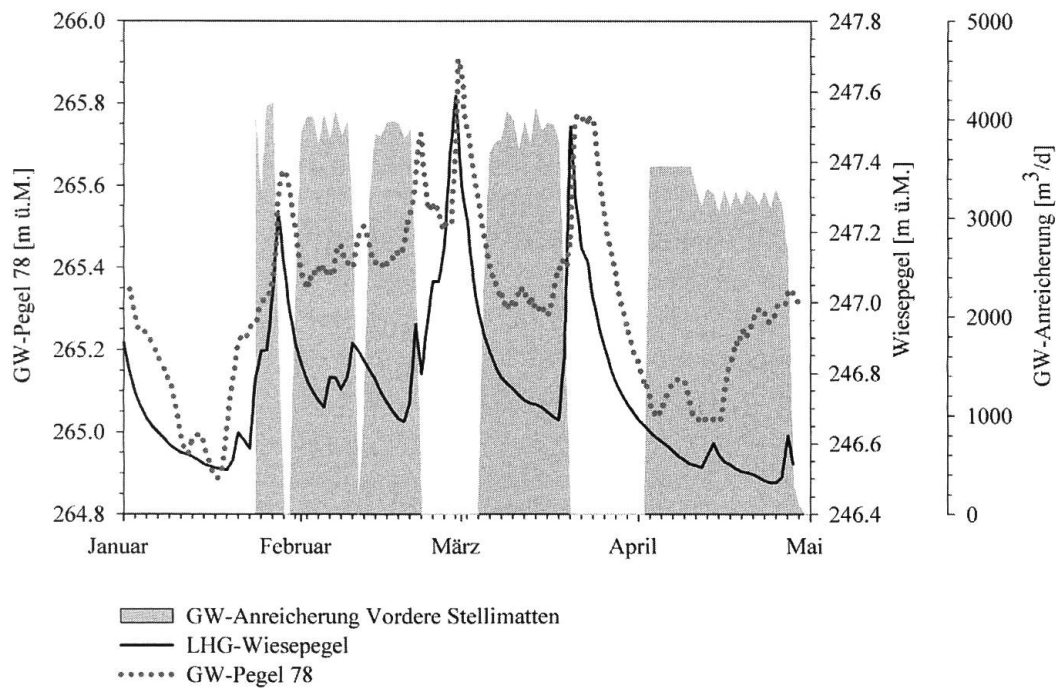


Abb. 3 Wasserstand der Wiese und in Piezometer 78 sowie Grundwasser-Anreicherung in den Vorderen Stellmatten von Januar bis Mai 2002.

Tab. 1 Grundwassermodell Lange Erlen

Grundwassermodell Lange Erlen

- Software: GMS 3.1 (*Environmental Modeling Systems Inc. 2002*)
- Quasi 3D Finite-Differenzen Grundwasser Fliessmodell: MODFLOW 96
- Instationäre Simulation der Grundwasserströmung vom 13.03. bis 10.04.2002 und des Stofftransports mittels particle tracking (Rückwärtsrechnung der Wanderung von Partikeln im Grundwasserströmungsfeld unter Berücksichtigung der Advektion, dargestellt als Stromlinien)
- Anzahl Schichten: 1, ungespannter Aquifer
- Räumliche Diskretisierung:
Ausgangssituation: Zellengröße 20 m x 20 m (regional)
Szenarien: Zellengröße 10 m x 10 m (lokal)
- Automatische Kalibrierung auf hydraulische Potenziale mittels UCODE

Resultate der Kalibrierung:

Die Grundlage für die Kalibrierung bildete eine Zonierung der hydraulischen Durchlässigkeit, basierend auf den Resultaten der Pumpversuche. Die ermittelten horizontalen k_f -Werte liegen zwischen $2.2E-3$ bis $7.0E-3$ m/s. Generell sind die k_f -Werte entlang der Wiese höher als gegen die Ränder des Modells (Niederterrassenablagerungen). Die ermittelten nutzbaren Porositäten liegen zwischen 0.06 und 0.13. Die Durchlässigkeit der Wiesesohle wurde mit $4.2E-6$ m/s ermittelt. Daraus ergibt sich ein Leakage-Faktor (Mass für die Wasserbewegung zwischen unterschiedlichen Kompartimenten) von $1.4E-5$ s⁻¹, bei Annahme einer Mächtigkeit der kolmatierten Wiesesohle von 0.3 m.

spitzen fällt der Grundwasserspiegel trotz Einfluss der Grundwasseranreicherung wieder auf ein tieferes Niveau ab. Die Grundwasserentnahme wirkt sich vor allem bei Piezometern aus, die mehrere 10er von Metern von der Wiese entfernt sind.

3 Resultate des Grundwassermodells Lange Erlen

Grundwassermodelle liefern Grundlagen zum Verständnis der Grundwasserströmung und des Transportes von Stoffen im Grundwasser. Sie helfen die komplexe Grundwasserdynamik der Langen Erlen besser zu verstehen.

Die Ergebnisse der regionalen Strömungsmodellierung (vgl. Tab. 1 Grundwassermodell Lange Erlen, vgl. Abb. 4) zeigen ein stark instationäres Grundwasserfließregime. Dieses wird vor allem durch den Entnahme- und Anreicherungsbetrieb der Wasserversorgung als auch durch das Hochwasser vom 20.03.2002 beeinflusst. Durch den Anstieg des Wasserstandes in der Wiese wird das Vorland überflutet und die Infiltration von Flusswasser ins Grundwasser erhöht.

Bei mittlerem Abfluss ist die Wiese vom Grundwasser entkoppelt, wobei der Abstand vom Grundwasser zum Wiesebett von den oberen Langen Erlen gegen unten zunimmt. Bei Hochwasser (Grundwasserhochstand und starke Infiltration von Wiesewasser ins Grundwasser) kommt es jedoch zu einer Anbindung des Grundwasserspiegels an die Wiese. Bei Hochwasser und gleichzeitigem Betrieb wiesenahe Brunnen wird der hydraulische Gradient erhöht und schnelle Grundwasserfließwege in den Anströmbereichen werden verstärkt aktiviert.

Aus der Wasserbilanzierung resultiert eine Infiltration von 700 l/s Wiesewasser ins Grundwasser. Für die modellierte Zeitperiode ergibt dies bei Hochwasser einen Wert von rund 13.8 m³/Tag und Laufmeter der Wiese (GPI 2003b). Der entsprechende Wert bei Niedrigwasser liegt bei 280 l/s (Zechner 1996). Ein Vergleich mit Infiltrationswerten verschiedener alpiner und voralpiner Flüsse zeigt, dass die Infiltrationsraten für die Wiese in einem realistischen Bereich liegen (Tab. 2).

Tab. 2 Spezifische Infiltrationsraten (Q) verschiedener alpiner und voralpiner Fließgewässer. Daten mit Ausnahme für die Wiese aus Hoehn 2002. HW: Hochwasser; NW: Niedrigwasser.

Fliessgewässer	Breite	Q [m ³ d ⁻¹ m ⁻²]	Datum
Poschiavino / Permunt	10	0.4-0.7 / 2-4	1989 / 1990
Limmat / Zürich	30	0.3	-
Limmat / Hardhof	30	1	-
Limmat / Dietikon	30	0.1	-
Glatt / Glattfelden	18	0.05-0.1	1979
Sissle / Eiken	12	0.08-0.2	1976
Töss / Linsental	20	0.05	1988
Rhein / Lustenau	65	3	2000
Thur / Grüneck-Feldi	50	0.3	-
Wiese / Lange Erlen (HW)	25	0.55	2003
Wiese / Lange Erlen (NW)	25	0.2	1996

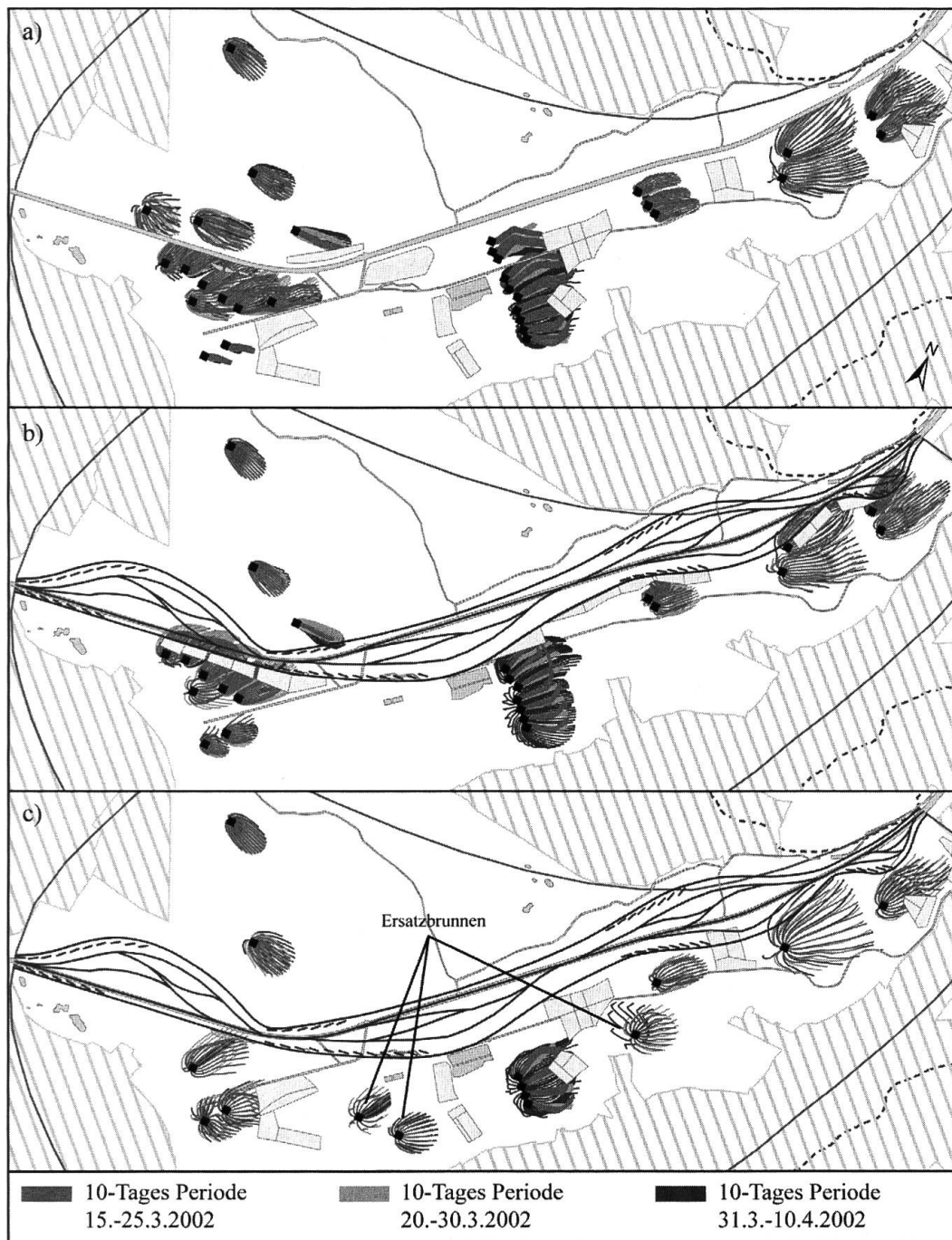


Abb. 4 Modellszenarien und Anströmbereiche von Grundwasserbrunnen für verschiedene 10-Tages-Perioden zwischen Mitte März und Mitte April 2002: a) Ist-Zustand; b) hydraulisch ausgerichtetes Szenario, Brunnen 2b, 5, 5a, 5b, 6a, 11, 12, und 13 aufgegeben; c) konzeptionell ausgerichtetes Szenario, Brunnen 1a, 2, 2a, 2b, 3, 3a, 5, 5a, 5b, 6, 6a, 7a, 8a, 10a, 10b, 10c, 11, 12, 13 und TB6 aufgegeben.

Die Berechnung der 10-Tages-Anströmbereiche liefert die Grundlage für die Bezeichnung der Grundwasserschutzzone S2 in Lockergesteins-Grundwasserleitern (BUWAL 2003). Diese Bereiche wurden für die Entnahmefrühen für die Zeitperioden vom 20. bis 30.03.2002, 15. bis 25.03.2002 und 31.03. bis 10.04.2002 (siehe Abb. 2) instationär gerechnet und mittels Stromlinien in Abb. 4a dargestellt.

Dabei wurden mehrere relevante Zustände des Grundwasserfließregimes im Anströmbereich der Brunnen in den Langen Erlen berücksichtigt (Hochwasser zunehmend, Hochwasser abnehmend, Niedrigwasser). Im Ist-Zustand ist die Wiese begradigt und verbaut, die Brunnen und Anreicherungsfelder sind bestehend, wurden aber nicht konstant betrieben. Brunnen 9, 9a und 13 sind ausser Betrieb.

Die 10-Tages-Anströmbereiche, die sich mit dem Lauf der Wiese überschneiden, verdeutlichen die potenzielle Gefährdung einer Reihe von Brunnen durch Fremdstoffe und Mikroorganismen im Wieseinfiltrat. Dies gilt insbesondere für die flussnahen Brunnen in den unteren Langen Erlen sowie den Brunnen TB 6 in Deutschland. Auch in den oberen Langen Erlen besteht für die flussnahen Brunnen mindestens zeitweilig eine Gefährdung durch mikrobiologische Verunreinigungen.

4 Resultate der mikrobiologischen Grundwasserüberwachung und Partikelanalyse

4.1 Mikrobiologie

Als Indikatoren für die hygienische Qualität des Grundwassers dienen die gesetzlich relevanten Indikatorkeime *Escherichia coli* (E. coli) und Enterokokken. Die aeroben mesophilen Keime (AMK) liefern ein Mass für die allgemeine mikrobiologische Aktivität in einer Wasserprobe. Diese Indikatoren wurden für Proben der Wiese und verschiedener Brunnen analysiert. E. coli und Enterokokken dürfen in 100 ml Wasser nicht nachweisbar sein und für unbehandeltes Trinkwasser bei Grundwasserbrunnen liegt der Toleranzwert für AMK bei 100 KBE/ml. Die hygienische Qualität des Grundwassers stellt für die Beurteilung der Freiheitsgrade bei Revitalisierungen eine der kritischen Grössen dar. Im Wiese-System wird die hygienische Qualität des Grundwassers weitgehend durch den Austausch mit Oberflächengewässern bei Hochwasser bestimmt.

Die AMK in der Wiese zeigen beim Hochwasserdurchgang am 20.03.2002 erhöhte Konzentrationen, die bis zum 21.03.2002 jedoch wieder zurückgehen (Abb. 5). Die Konzentrationen der Indikatorkeime waren mit Ausnahme der Enterokokken, welche ein charakteristisches Maximum während dem maximalen Abfluss aufweisen, nicht wesentlich erhöht. Die Konzentrationen an E. coli zeigen keine Korrelation mit dem Abfluss. Sie variieren zwischen 250 und 1600 KBE/100 ml. Im Vergleich dazu war die Konzentration an E. coli am 26.12.1999 bei einem Abfluss von $31.3 \text{ m}^3/\text{s}$ grösser als 10'000 KBE/100 ml.

Ein Vergleich mit Hochwasserdaten aus dem Zeitraum vom 10.07.2000 bis 22.05.2001 zeigt, dass das Hochwasser vom 20.03.2002 unterdurchschnittlich mikrobiologisch belastet war. Während vergleichbarer Hochwasser der Jahre 2001 und 2002 wurden signifikant höhere mikrobiologische Werte im Wiesewasser gemessen. Bei diesem Vergleich wurden nur Werte berücksichtigt, die während einem Abfluss von mehr als $20 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen wurden (Wiesepegel der Industriellen Werke Basel (IWB) > 260 m ü.M., 1. Alarmwert der IWB für wiesenahe Brunnen).

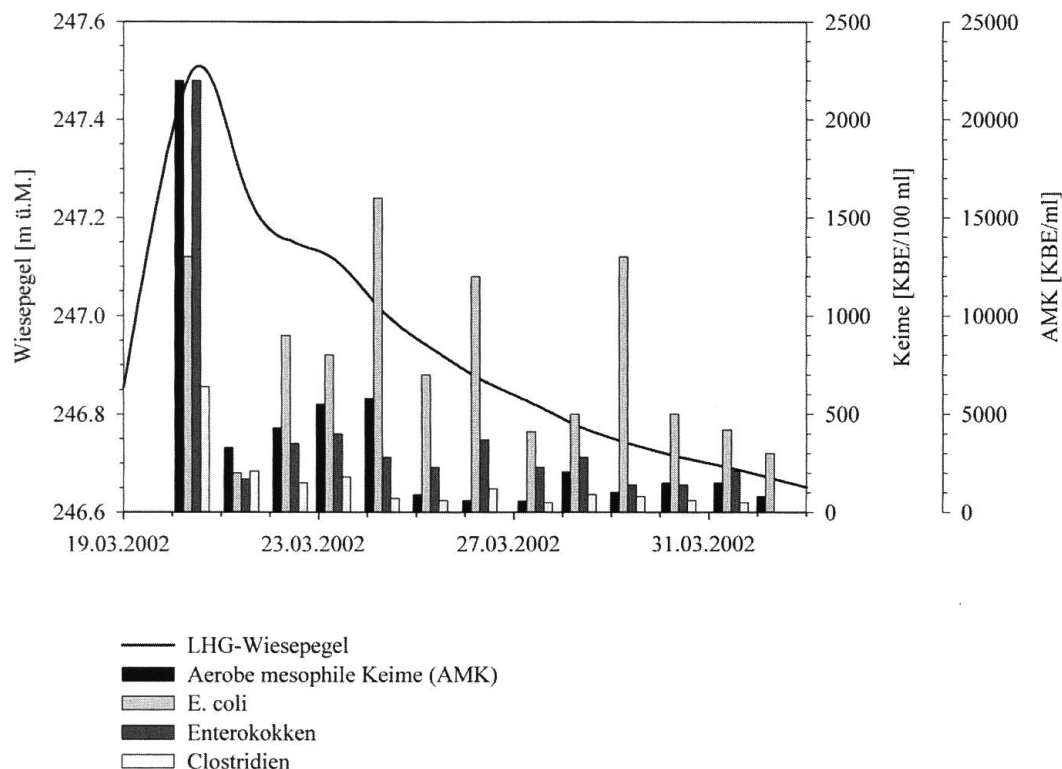


Abb. 5 Aerobe mesophile Keime, E. coli, Enterokokken und Clostridien in der Wiese (gemessene Tagesmaxima) vom 20. bis 31.03.2002; LHG: Landeshydrologie; KBE: Kolonien bildende Einheiten.

Mit einer Ausnahme fielen alle Analysen auf Indikatorkeime (E. coli und Enterokokken) in den Brunnen negativ aus. In Brunnengruppe 3 wurden am 26.03.2002 Clostridien festgestellt. Die AMK-Werte in Brunnen 1 und 2 weisen eine erhöhte mikrobiologische Aktivität auf, die mit der Hochwasserspitze vom 20.03.2002 übereinstimmt. In Brunnengruppe 3 und Brunnen 12 konnten keine erhöhten AMK-Werte festgestellt werden (Abb. 6; 16 KBE/ml). Die negativen Befunde von Indikatorkeimen in den Brunnen sind ungewöhnlich. Während vergleichbarer Hochwasser konnten in Brunnengruppe 3 und Brunnen 12 E. coli und Enterokokken nachgewiesen werden (GPI 1998).

Die Resultate deuten auf einen Zusammenhang zwischen Hochwasser und der mikrobiologischen Belastung wiesenaher Brunnen hin. Die Belastung einzelner Hochwasser variiert aber stark bezüglich Anzahl und Zusammensetzung an Mikroorganismen. Ein Vergleich von AMK-Werten zwischen dem kanalisierten und revitalisierten Zustand der Wiese, differenziert nach Hochwasser der IWB-Alarmstufen, ist für den Brunnen 13 nicht möglich, da entsprechende Messwerte von früheren Hochwassern nicht vorliegen. Bei niedrigen Wasserständen und kleineren Hochwassern liegen alle Messwerte beim Brunnen 13 unterhalb des Grenzwertes von 100 KBE/ml. Dies gilt sowohl für Proben, die vor als auch nach der Revitalisierung entnommen wurden.

4.2 Partikelanalyse

Ergebnisse von früheren Untersuchungen deuten darauf hin, dass Bakterien und Viren an Partikel gebunden mit der Grundwasserströmung transportiert werden (McCarthy & Zachara 1989). Die Partikelzahl ist somit ein weiterer relevanter Parameter für die Beurteilung der Wasserqualität. Zählungen von Partikeln mit dem Durchmesser zwischen 1–20 µm wurden in Brunnengruppe 3 online durchgeführt (Abb. 6). Die Partikelzahl im geförderten Wasser ist eindeutig vom Hochwasser beeinflusst, wobei das Maximum der Gesamtpartikelzahl mit geringer Verzögerung nach dem Hochwassermaximum gemessen wurde. Der Durchbruch der kleinen Partikel mit 1–5 µm Durchmesser erfolgt vor demjenigen der grösseren Partikel (5–20 µm). Die grösseren Partikel weisen eine Verzögerung des Durchbruchs um etwa einen Tag gegenüber dem maximalen Wieseabfluss auf.

E. coli und Enterokokken haben einen Durchmesser von ca. 0.5–1.5 µm und eine Länge von 2–4 µm. Sie können also mit den kleinen Partikeln von 1–5 µm Durchmesser verglichen werden. Eine erhöhte mikrobiologische Belastung von *E. coli* und Enterokokken in der Wiese wirkt sich sehr schnell in den Brunnen aus. Clostridien besitzen einen Durchmesser von 0.9–1.3 µm und eine Länge von 3–9 µm. Sie entsprechen dem Bereich der Partikel von 1–20 µm Durchmesser. Ausgehend von der Partikelanalyse ist anzunehmen, dass der Transport von Clostridien gegenüber *E. coli* und Enterokokken verzögert wird. Partikelzahlen stimmen mit den gemessenen AMK-Werten in Brunnengruppe 3 überein und lassen auf eine mikrobiologische Gefährdung dieser Brunnengruppe schliessen.

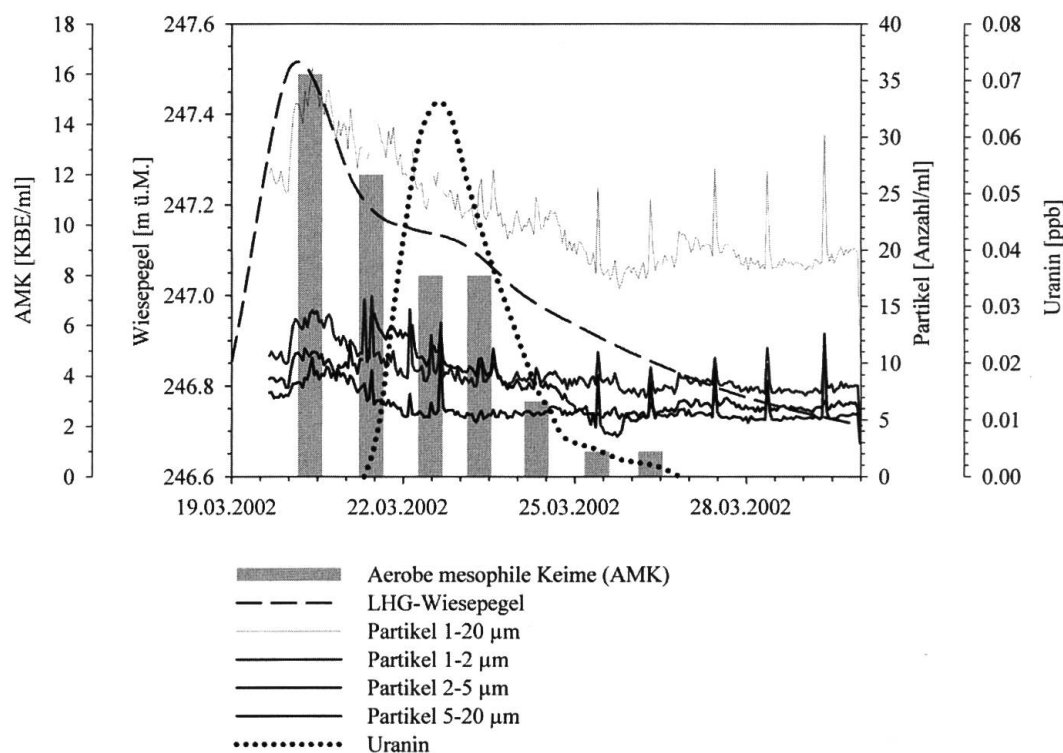


Abb. 6 Vergleich der Partikelanalyse mit der Uranin-Durchbruchskurve in Brunnen 3 vom 19. bis 30.03.2002; LIHG: Landeshydrologie.

5 Resultate der Markierversuche

Zur konkreten Ermittlung der potenziellen Gefährdung von flussnahen Brunnen bei Hochwasser wurden für den unteren und oberen Bereich der Langen Erlen zwei Markierversuche mit Uranin durchgeführt (GPI 2003a, GPI 2004). Die Auswertung der Durchgangskurven liefert neben Verweilzeiten auch Angaben über die Einmischung von Oberflächenwasser ins Grundwasser (Tab. 3).

Aus den Verweilzeiten können Interventionszeiten abgeleitet werden und ein Vergleich der Rückgewinnungsraten des Markierstoffs in den Brunnen hilft, das Gefährdungspotenzial bei Unfällen mit wassergefährdenden Flüssigkeiten abzuschätzen.

Tab. 3 Resultate der Markierversuche vom März 2002 und Januar 2004; n.b.: nicht berechnet.

Versuch	Brunnen	Abstand Wiese (60° \angle) [m]	Erstein- satzzeit [h]	Dominierende Verweilzeit [h]	Mittlere Verweilzeit [h]	Anteil Wiese- infiltrat [%]
Januar 2004	V	180	45	75	106	n.b.
	XIII	140	16	47	76	n.b.
März 2002	III	120	24	47	63	4.77
	XI	150	35	61	72	1.43
	XII	65	16	40	65	9.11
	TB 6	200	42	76	n.b.	1.44

Der Durchbruch von Partikeln erfolgt je nach Partikelgrösse um 1–2 Tage schneller als derjenige von Uranin (Abb. 6). Aufgrund dieser Beobachtung muss angenommen werden, dass bei infiltrierendem Flusswasser hydraulische, chemische und biologische Prozesse zur Gesamtfilterwirkung beitragen und sich auch unterschiedlich auf gelöste und partikuläre Stoffe auswirken. Als wesentliche Randbedingungen dieser Prozesse sind (a) die Filterwirkung von Flusssohle und Vorland, (b) die hydraulischen Randbedingungen (Wasserstände, Oberflächenabfluss und Grundwasserentnahme) und (c) die Inhomogenitäten des Untergrundes zu nennen (Huggenberger 2001).

In heterogenen Systemen wird ein Zusammenhang zwischen Partikeltransport und der Varianz der hydraulischen Leitfähigkeit vermutet (Rehmann et al. 1999). Zudem weist Uranin in sandigem Kies, wie er für die Wiesebene typisch ist, einen Retardationsfaktor von 1.2 auf, und die Nachweisgrenze liegt bei 0.002 ppb (Schudel et al. 2002). Bei den Partikeln muss jedoch angenommen werden, dass diejenigen, die den Durchbruch zu den Brunnen geschafft haben, bevorzugt schnelle Fliesswege benutzten. Durch weitere Forschungsarbeiten bleibt aber noch zu überprüfen, ob die gegenüber Uranin einen vorzeitigen Peak verursachenden Partikel während Hochwasser sich im Fliessgewässer oder bereits im Aquifer aufhalten und lediglich durch Druckübertragung von Hochwasserwellen weitertransportiert werden (piston-flow effect).

6 Diskussion und Beurteilung der Resultate

6.1 Ist-Zustand

Die klare Überschneidung der 10-Tages-Anströmbereiche mit Oberflächengewässern (Abb. 4a) wird durch Messungen von teilweise erhöhten Konzentrationen an Mikroorganismen in einzelnen Brunnen bestätigt. Kleine hydraulische Gradienten zwischen der Wiese und dem angrenzenden Grundwasserschutzgebiet reduzieren die mikrobiologische Belastung des Grundwassers durch Wieseinfiltrat.

Markierversuche zeigen, dass beim aktuellen System mindestens sechs Brunnen bei Hochwasser potenziell durch pathogene Keime gefährdet werden können. Berücksichtigt man jedoch nicht untersuchte, ungünstige Betriebszustände, können allenfalls noch weitere Brunnen oder Brunnengruppen betroffen sein.

Eine lokale Transportmodellierung des Markierversuchs vom 20.03.2002 im unteren Bereich der Langen Erlen zeigt, dass lokale Szenarienbetrachtungen gute Resultate liefern. Die Ausbreitung des Markierstoffs erfolgt vorwiegend auf der Basis der mittleren gerechneten Grundwasserströmung. Dabei konnte dort, wo das mittlere Fliessverhalten die entscheidende Rolle beim Transportverhalten von Uranin spielt, eine gute Übereinstimmung der Durchgangskurven erreicht werden. Bei anderen Messpegeln stimmt der gerechnete Ersteinsatz mit dem Feldexperiment nur annähernd überein (Brunnengruppe 3). Die in diesem Modell nicht vorgesehene Berücksichtigung der schnellen Fliesswege in der Strömungsmodellierung (stochastische Modelle) würden die gerechneten Aufenthaltszeiten der Transportmodellierung positiv beeinflussen (Regli 2003). Diese Resultate liefern deutliche Hinweise, dass Stoffeintrag von der Wiese zu den Brunnen vor allem über schnelle Fliesswege erfolgt.

6.2 Szenarien

Modelle erlauben auch eine Formulierung von unterschiedlichen Szenarien. Damit lassen sich Auswirkungen betriebstechnischer Massnahmen oder Revitalisierungen berechnen und visualisieren, und es können Konsequenzen von Entscheidungen bei der Wahl von Verfahren evaluiert und bewertet werden. Dies eröffnet Möglichkeiten, den Grundwasserschutz zu verbessern, aber auch weitere Revitalisierungsmassnahmen durchzuführen und zu optimieren.

Ausgehend vom kalibrierten Modell werden beispielhaft zwei Szenarien erläutert. Die Wiese wurde bei beiden Szenarien innerhalb eines Pendelbereichs bis auf maximal vier stabile Flussarme aufgeweitet und deren Infiltrationskapazität entsprechend angepasst. Die beiden Szenarien erfassen wiederum das mittlere Hochwasser vom März 2002 (Abb. 2). Der zeitliche Betrieb der Brunnen und Anreicherungsfelder, die Gesamtmenge an angereichertem und entnommenem Grundwasser sowie die Randbedingungen wurden nicht verändert. Die Auswirkungen dieser Szenarien auf die 10-Tages-Anströmbereiche der Grundwasserbrunnen wurden mit dem Modell berechnet (Regli et al. 2004).

Szenario 1:

Das erste Szenario beschreibt hydraulisch ausgerichtete Massnahmen und deren Auswirkungen auf die Fluss-Grundwasser Interaktion (Abb. 4b). Die Grundwasser-Anreicherungs-felder sind entlang der Wiese angelegt. Acht Brunnen beziehungsweise Nebenbrunnen wurden aufgegeben, wobei deren Entnahmemengen auf die noch verbleibenden Brunnen verteilt wurden. Die Brunnengruppe 9 ist ausser Betrieb. Die Lage und der Betrieb der Anreicherungs-felder und Grundwasser-brunnen wurde aus didaktischen Gründen nicht optimiert. Während dem eigentlichen Hochwasser in der Wiese vom 20.03. bis 02.04.2002 erfolgt also in den gesamten Längen Erlen keine Grundwasseranreicherung.

Die Modellergebnisse zeigen, dass durch den Betrieb flussnaher Grundwasseranreicherungen lokale Grundwasserberge entstehen, welche den hydraulischen Gradienten in den Anströmbereichen zwischen flussnahen Brunnen und der Wiese reduzieren. Durch die geeignete Anordnung und den Betrieb von Anreicherungs-feldern können sich hydraulische Barrieren bilden, die den Schutz flussnaher Grundwasserbrunnen gewährleisten (Abb. 7). Mittels Stromlinien konnte nachgewiesen werden, dass während gewisser Zeitabschnitte hydraulische Verbindungen zwischen der Wiese und den Grundwasserbrunnen möglich sind, welche im Modell eine geringere Aufenthaltszeit als zehn Tage aufweisen. Das gewählte Szenario

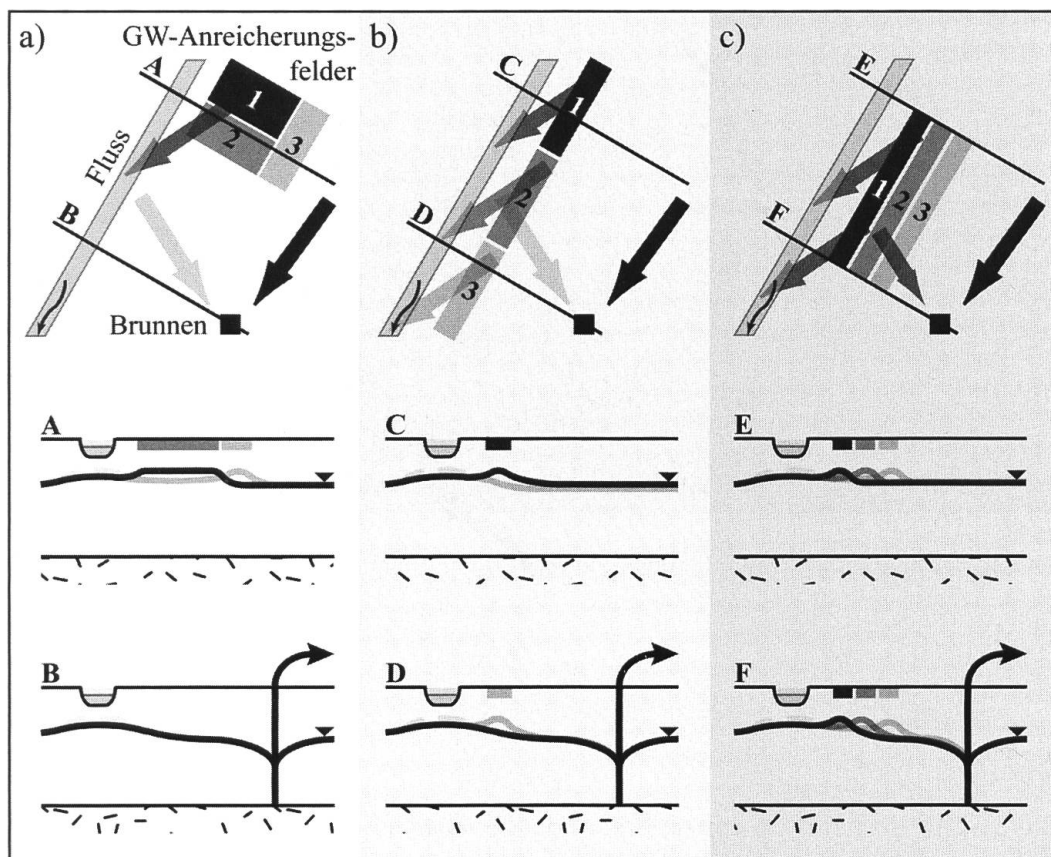


Abb. 7 Hydraulische Massnahmen und Auswirkungen auf die Fluss-Grundwasser Interaktion: a) Ist-Zustand; b) Anreicherungs-felder parallel zum Fliessgewässer; c) Anreicherungs-felder senkrecht zum Fliessgewässer; Nummern der Anreicherungs-felder dokumentieren abwechselnde Zeitperioden des Betriebs der Anreicherungs-felder.

zeigt, dass Optimierungen bezüglich Aufenthaltszeiten in der Anordnung und im Betrieb der Anreicherungsfelder und Grundwasserbrunnen bestehen. Diese müssen jedoch auf die tatsächliche Gefährdung bei Hochwasser ausgerichtet sein.

Bis 1964 wurde Wiesewasser für die Anreicherung des Grundwassers verwendet. Aus Qualitätsgründen sind die IWB dann auf vorfiltriertes Rheinwasser umgestiegen. Neuere Versuche in den Stellimatten zeigen jedoch, dass eine bezüglich Trübung (Anlagerung von Bakterien und Schadstoffen an Trübstoffe) und UV-Extinktion (Nachweis für Doppelbindungen von im Wasser gelösten organischen Verbindungen) überwachte Einleitung von Wiesewasser (ausgenommen bei Hochwasser) ohne Aufbereitung möglich ist, ohne dass die Grundwassernutzung gefährdet wird (Wüthrich et al. 2003). Naturnahe, ökologisch und morphologisch vernetzte Anreicherungsfelder, wie in Abb. 8 dargestellt, könnten wieder viele Funktionen von Überflutungs- und Auengebieten etablieren oder wahrnehmen.



Abb. 8 Grundwasser-Anreicherungsfield Hintere Stellimatten, Lange Erlen, Basel-Stadt.
Photo: U. Geissbühler

Szenario 2:

Das zweite Szenario ist konzeptionell ausgerichtet (Abb. 4c). 19 Brunnen beziehungsweise Nebenbrunnen der IWB sowie der Brunnen TB 6 der Wasserwerke Weil am Rhein wurden aufgegeben und deren Entnahmemengen auf die verbleibenden sowie drei flussfernere Ersatzbrunnen verteilt. Die Brunnengruppe 9 ist ausser Betrieb. Die Standorte der Anreicherungsfelder wurden nicht optimiert und es erfolgt keine Grundwasseranreicherung während dem Hochwasser. Durch diese

Modellanordnung werden die Verweilzeiten des Grundwassers verlängert und die Wahrscheinlichkeiten des Anströmens von infiltrierendem Flusswasser zu Brunnen minimiert.

Ein Szenarienvergleich zeigt, dass mit konzeptionellen Szenarien die kleinsten irreversiblen baulichen Massnahmen erforderlich wären, um den gesetzlich geforderten ökologischen und nachhaltigen Gewässerschutz zu gewährleisten.

7 Fazit

Der Grundwasserleiter in den Langen Erlen wird bei Mittelwasser in der Wiese über die teilweise kolmatierte Flusssohle mit Flussinfiltrat gespiesen (*Huggenberger* 2003). Während Hochwasser ändern sich die Infiltrationsbedingungen. Aufgrund des Anstiegs des Wiesepegels wird auch das Vorland während 20 bis 40 Tagen pro Jahr überflutet. Wiesewasser kann dabei auch über das durchlässigere Vorland (praktisch keine Bodenbildung, nur Sand, darunter direkt Kies) ins Grundwasser infiltrieren.

Die Ergebnisse der beiden Markierversuche vom März 2002 und Januar 2004 haben gezeigt, dass die Aufenthaltszeiten des Grundwassers zwischen der Wiese und einzelnen Brunnen signifikant kleiner sind als die in der Gewässerschutzverordnung und der Begleitung Grundwasserschutz geforderten zehn Tage. Trotzdem können, berücksichtigt man die bisher ausgewerteten Ereignisse, die Grenzwerte bezüglich einer Verkeimung bei Mittelwasser eingehalten werden. Bei grösseren Abflüssen wird z. B. beim Brunnen 13 ein markanter Anstieg der Keimzahlen beobachtet. Allerdings erfolgt eine gezielte Hochwasserbeprobung der Brunnen in den Langen Erlen erst seit 1999 mit dem Beginn des Baus der Pilotrevitalisierung. Entsprechend lassen sich die Daten nicht mit dem Zustand vor der Revitalisierung vergleichen (Routineuntersuchungen). Langjährige Grundwasseruntersuchungen der IWB zeigen, dass auch im nicht revitalisierten Zustand wiesennahe Brunnen der mittleren und oberen Langen Erlen zur Verkeimung neigen.

Messungen von Partikeln und aeroben mesophilen Keimen in Brunnengruppe 3 zwischen dem 19.03. und 03.04.2002 zeigen einen Zusammenhang zum Hochwasser vom 20.03.2002. Nicht unerwartet beobachtet man den Durchbruch der kleineren Partikel (1–5 μm) rund 1–2 Tage früher als denjenigen der grösseren Partikel (5–20 μm). Flussnahe Brunnen verkeimen generell schneller und in grösserem Ausmass als flussferne.

Heute stehen Methoden und Werkzeuge zur Verfügung, um komplexe Grundwasser-Anreicherungs- und Entnahmesysteme zu verstehen und den Transport von Partikeln und Mikroorganismen im Grundwasser zu beurteilen (*Regli et al.* 2003). Für Trinkwassernutzungsgebiete, die heute schon die Anforderungen an die Schutzzone S2 nicht erfüllen können, sollten Lösungen gefunden werden, welche den Anforderungen der Wasserversorger und der Fliessgewässerökologie gleichermaßen entgegenkommen.

Die Anliegen des Grundwasserschutzes und der Grundwasserbewirtschaftung müssen vorausschauend mit sonstigen raumplanerischen Interessen abgestimmt und in Richt- und Nutzungsplänen verankert werden (Art. 46 GSchV). Die Grund-

wasserbewirtschaftung soll auf regionaler Ebene durch umsichtige Versorgungsplanung sichergestellt werden, welche sowohl die Erfordernisse als auch die Möglichkeiten der zukünftigen Grundwassernutzung aufzeigt. Damit könnten die Wasserversorger sich klar an den Zielen der nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung in einem regionalen Kontext orientieren.

Bei der Beurteilung des Revitalisierungspotenzials der Wiese fällt auf, dass mit einer gezielten Aufgabe gefährdeter flussnaher Brunnen, verbunden mit dem Bau einiger weniger Ersatzbrunnen, der Freiheitsgrad für zukünftige Revitalisierungsmassnahmen bereits wesentlich erhöht werden kann. Inwiefern eine Optimierung der Lage von Anreicherungsfeldern (Feuchtgebieten, etc.) beziehungsweise technische Massnahmen zu einer weiteren Verbesserung der Grundwassersicherheit führen können, könnte anhand weiterer Szenarien näher untersucht werden. Alternativ dazu könnte durch ein gezieltes Management wiesenaher Brunnen (z. B. variable Pumpraten, Abschalten von Brunnen) die Gefährdung verringert werden. Eine gezielte Änderung von Anreicherungsfeldern könnte allenfalls auch die Defizite bezüglich naturnahen, ökologisch und morphologisch vernetzten Überflutungsflächen und attraktiven Pufferzonen kompensieren.

Aufgrund der vorliegenden Daten und der Kenntnisse der Prozesse der Fluss-Grundwasser Interaktion in den Längen Erlen sollte eine Umsetzung von Revitalisierungsmassnahmen in diesem Grundwasserschutzgebiet, unter vermehrter Berücksichtigung der natürlichen Dynamik sowie der betrieblichen Randbedingungen der Wasserversorgung, realisierbar sein. Damit ist die zu Beginn gestellte Frage, ob die Revitalisierung von Fliessgewässern in Grundwasserschutzgebieten ein Oxymoron sei, beantwortet, vorausgesetzt, dass die jeweiligen Entscheidungsträger auch bereit sind, eine nachhaltige Lösung zu finden.

Verdankung

Die Autoren bedanken sich bei C. Butscher und Ch. Wüthrich für die kritische Durchsicht des Manuskriptes sowie beim Baudepartement des Kantons Basel-Stadt für die Erlaubnis, die Ausgangsdaten für die Berechnung der Modellszenarien verwenden zu dürfen, und bei den Industriellen Werken Basel für die Bereitstellung der Analysedaten. Ein besonderer Dank gilt dem Programm MGU (Mensch-Gesellschaft-Umwelt) für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit.

Literatur

- Auckenthaler A. & Huguenberger P. 2003. *Pathogene Mikroorganismen im Grund- und Trinkwasser, Transport – Nachweismethoden – Wassermanagement*. Birkhäuser, Basel, 1–184.
- BUWAL Hrsg. 2003. *Wegleitung Grundwasserschutz – Konsultationsentwurf Oktober 2003*. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 1–135.

- Environmental Modeling Systems Inc. 2002. GMS: Groundwater Modeling System, EMS-I, South Jordan, Utah.
- GPI 1998. *Pilotprojekt Revitalisierung Wiese, Voruntersuchungen Grundwasser, Markierversuche Lange Erlen, Brunnen 8013*. Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Basel, Baudepartement Basel-Stadt, 1–100.
- GPI 2003a. *Austauschprozesse Fluss-Grundwasser – Markierversuch und begleitende Feldexperimente*. Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Basel, Bericht und Auswertung. Baudepartement Basel-Stadt, 1–72.
- GPI 2003b. *Lange Erlen – Grundwassermodell 2002*. Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Basel, Technischer Bericht. Baudepartement Basel-Stadt, 1–42.
- GPI 2004. *Markierversuch Wiese Januar 2004*. Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Basel, Bericht und Auswertung. Regierungspräsidium Freiburg im Breisgau (D), 1–37.
- Hoehn E. 2002. Hydrogeological issues of riverbank filtration – a review. In: Ray C. (ed.): *Riverbank Filtration: Understanding Contaminant Biogeochemistry and Pathogen Removal*. Kluwer Academic Publishers, 17–34.
- Huggenberger P. 2001. Wiese-Revitalisierung: Führen die Veränderungen der Sohlenstruktur zu einer Trinkwassergefährdung? *Regio Basiliensis* 42(1): 63–76.
- Huggenberger P. 2003. Transport von Mikroorganismen. In: Auckenthaler A. & Huggenberger P. (Hrsg.): *Pathogene Mikroorganismen im Grund- und Trinkwasser, Transport – Nachweismethoden – Wassermanagement*. Birkhäuser, Basel, 55–77.
- McCarty J.F. & Zachara J.M. 1989. Subsurface transport of contaminants. *Environmental Science & Technology* 23/5: 496–502.
- Oplatka M. 2000. Die teilweise befreite Töss gestaltet ihr Flussbett. In: *Wasserbau im Kanton Zürich – Ökologie, Hochwasserschutz, Wiederbelebung, Unterhalt*. AWEL, Zürich, 49–52.
- Regli C. 2003. *Integration of geological and geophysical data of different quality into the stochastic description of aquifers*. Dissertation Nr. 26, Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Basel, 1–96.
- Regli C., Rauber M. & Huggenberger P. 2003. Analysis of aquifer heterogeneity within a well capture zone, comparison of model data with field experiments: A case study from the river Wiese, Switzerland. *Aquatic Sciences* 65: 111–128.
- Regli C., Guldenfels L. & Huggenberger P. 2004. Revitalisierung von Fliessgewässern im Konflikt mit der Grundwassernutzung. *Gas, Wasser, Abwasser* 4: 261–272.
- Rehmann L., Welty C & Harvey R. 1999. Stochastic analysis of virus transport in aquifers. *Water Resources Research* 35/7: 1987–2006.

- Schudel B., Biaggi D., Dervey T., Kozel R., Müller I., Ross J.H. & Schindler U. 2002. *Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie – Praxishilfe*. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, Serie Geologie Nr. 3, 1–75.
- Willi H.P. 2001. Fliessgewässer brauchen mehr Raum. *Thema Umwelt* 1: 4–5.
- Wüthrich Ch., Huggenberger P., Gurtner A., Geissbühler U., Stucki O., Zechner E. & Kohl J. 2003. *Machbarkeit, Kosten und Nutzen von Revitalisierungen in intensiv genutzten, ehemaligen Auenlandschaften (Fallbeispiel Lange Erlen)*. Schlussbericht zum MGU Forschungsprojekt F2.00. Universität Basel, 1–156.
- Zechner E. 1996. *Hydrogeologische Untersuchungen und Tracertransport – Simulation zur Validierung eines Grundwassersmodells der Langen Erlen (Basel-Stadt)*. Dissertation Nr. 8, Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Basel, 1–156.