

Grundwasserschutz bei wasserbaulichen Eingriffen in Fließgewässer

Hydrogeologische Aspekte

Christian Regli



Protection des eaux souterraines et aménagement des cours d'eau

Aspects hydrogéologiques

Divers projets de génie hydraulique sont à l'étude en Suisse dans le domaine de la protection contre les crues et de l'entretien des cours d'eau. La multiplicité des intérêts, tant du côté de l'utilisation que de la protection, pose de grands défis à l'aménagement des cours d'eau et à la protection des eaux souterraines. Le développement des modèles de protection actuels selon une approche fonctionnelle intégrant les interactions entre eaux de surface et eaux souterraines offre des perspectives prometteuses en termes d'objectifs au niveau de la protection durable des eaux souterraines et des écosystèmes hydrauliques quasi-naturels. L'analyse par scénarios permet de mieux prévoir l'impact des mesures de génie hydraulique sur les nappes fluviales et sur leur utilisation, également en conditions dynamiques. Ces résultats permettent d'identifier les dangers et d'affiner l'analyse des risques.

Ground Water Protection with Interventions on Flowing Water

Hydrogeological Aspects

With regard to flood protection and water maintenance measures, various hydraulic engineering interventions have been planned in Switzerland. Based on usage and protection interests, there are huge challenges facing hydraulic engineering and ground water projects. An extension of existing protection concepts through process-based approaches which take into account interactions between water above and below the ground is a source of significant opportunities to work towards obtaining sustainable ground water protection and natural water eco-systems. Through developing scenarios, the effects of hydraulic engineering measures on ground waters in the vicinity of rivers and the use of this water can be assessed even in a non-steady state, and a corresponding evaluation of dangers and risks can then be carried out.

Im Zusammenhang mit Hochwasserschutz- und Gewässerunterhaltmassnahmen sind in der Schweiz diverse wasserbauliche Eingriffe geplant. Aufgrund zahlreicher Nutz- und Schutzinteressen stehen sowohl der Wasserbau als auch der Grundwasserschutz vor grossen Herausforderungen. Eine Erweiterung der bestehenden Schutzkonzepte durch prozessbasierte Ansätze, welche die Wechselwirkungen zwischen ober- und unterirdischen Gewässern berücksichtigen, beinhaltet grosse Chancen, sich an den Zielen des nachhaltigen Grundwasserschutzes und naturnaher Gewässerökosysteme zu orientieren. Durch Szenarienentwicklung lassen sich Auswirkungen von wasserbaulichen Massnahmen auf das flussnahe Grundwasser sowie dessen Nutzung auch instationär erfassen und entsprechende Gefahren- und Risikobeurteilungen durchführen.

1. Einleitung

Grundwasser ist die wichtigste Ressource für die Produktion von Trinkwasser und damit eine der wichtigsten Produktionsgrundlagen für die Industrie, das Gewerbe und die Landwirtschaft. In der Schweiz werden etwa 40 % des Trinkwassers aus Filterbrunnen gefördert. Der Hochwasserschutz verfolgt heute das Ziel, auf Einzugsgebietsebene Auswirkungen von sehr grossen Hochwasserereignissen zu mildern und den Raumbedarf von Fließgewässern vermehrt zu berücksichtigen. Auch wurde erkannt, dass das Grundwasser bzw. der Grundwasserträger Lebensraum einer *natürlichen Biozönose* darstellt und mit den Fließ-

gewässern in vielfältigen Wechselwirkungen steht. Diese natürlichen Funktionen sollen vermehrt wiederhergestellt werden. Ein nachhaltiges, *integriertes Wassermanagement* wird somit in Zukunft sowohl auf lokaler als auch auf regionaler und überregionaler Ebene eine wesentliche Rolle spielen. Aktuelle Fragestellungen zum Gewässerschutz können deshalb nur mit einer umsichtigen Perspektive erfolgreich angepackt werden, wobei auch gesellschaftliche und technische Faktoren und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten berücksichtigt werden müssen.

In den Flusstälern der Schweiz erfolgt ein wesentlicher Teil der Grundwasserneubildung durch Flussinfiltration. Die *Wechselwirkungen* zwischen ober- und unterirdischen Gewässern unterliegen einer permanenten Dynamik bezüglich Wassermengen, Wasserqualität und Strömungsverhalten. Flussnahes Grundwasser hat deshalb keine einheitliche und gleichbleibende physikalische, chemische und biologische Signatur. Insbesondere kann die Zusammensetzung des Grundwassers je nach Tiefe und Abstand zum Fließgewässer sowie im zeitlichen Verlauf stark variieren. Flussnahes Grundwasser ist zudem durch Stossbelastungen in Fließgewässern gefährdet (z. B. Entlastung von Mischwasserkanalisationen).

Häufig steht die Nutzung des Grundwassers für Trinkwasserzwecke in Konkurrenz mit anderen Nutzungsansprüchen. So können z. B. bestehende Trinkwassernutzungen durch das Wachstum urbaner Regionen in den Flussebenen eingeschränkt und die Qualität von Fließgewässern beeinträchtigt werden.

Eine bessere Abstimmung von Nutzungsinteressen mit dem Grundwasserschutz beinhaltet neben Aspekten der Wasserqualität und -quantität auch die Wiederherstellung der

Fließgewässer in ihrer Funktion als artenreiche Ökosysteme, welche Landschaften gestalten und unterschiedliche Lebensräume miteinander vernetzen. *Wasserbauliche Eingriffe* in Fließgewässer haben also zum Schutz vor Hochwasser und zur Erhaltung bzw. Wiederherstellung der natürlichen Funktionen der Gewässer zu erfolgen (Art. 4 WBG, Art. 21 WBV, Art. 37 f. GSchG, Anh. 1 Ziff. 1 und Anh. 2 Ziff. 11 f. GSchV). Sie sind deshalb im Interesse eines naturnahen Wasserhaushalts zu verwirklichen. Die Entwicklungsziele für natürliche oder naturnahe Fließgewässer (ausreichender Gewässerraum, ausreichende Wasserführung und ausreichende Wasserqualität [1]) sind deshalb mit den Zielen des flächendeckenden und nutzungsorientierten Grundwasserschutzes zu koordinieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Auswirkungen von wasserbaulichen Eingriffen in Fließgewässer nicht nur lokal sind, sondern auch flussabwärts das Grundwasserfließregime, die Grundwasserqualität und die ökologischen Verhältnisse beeinflussen können. Betroffen ist daher nicht nur der unmittelbare Umkreis eines geplanten Eingriffs ins Gewässer, sondern je nach Dynamik des Grundwassersystems oftmals ein grösserer Bereich in der Flussebene [2].

Da in vielen konkreten Situationen instationäre Prozesse zu unterschiedlichen Gefährdungssituationen für das flussnahe Grundwasser und dessen Nutzung führen, ist der Handlungsspielraum für wasserbauliche Eingriffe in Fließgewässer z. B. im Bereich von Grundwasserschutzzonen beschränkt. Innerhalb der Bandbreite von Lösungen, von der Aufgabe flussnaher Fassungen bis zum Verzicht auf entsprechende Eingriffe ins Gewässer, dürften sich jedoch noch weitere Möglichkeiten mit entsprechenden Massnahmen anbieten

[3]. In manchen Fällen besteht das Ziel darin, den Handlungsspielraum so zu vergrössern, dass wieder ausreichend Raum für die Grundwassernutzung und für die Fließgewässer bereitgestellt wird. Aufgrund dieser Herausforderung ergeben sich jedoch auch *erhöhte Anforderungen* an Untersuchungs- und Beurteilungsmethoden.

Voraussetzung für einen nachhaltigen Grundwasserschutz ist das Verständnis, wie die Grundwasserqualität an einem spezifischen Standort zustande kommt. Resultate aus differenzierten hydrogeologischen Untersuchungen und Abklärungen bezüglich der Standortgebundenheit von bestehenden Trinkwasserfassungen und deren betrieblichen Optionen bilden die Grundlage für die Beurteilung der möglichen Eingriffe. Dies schliesst das Aufzeigen der Auswirkungen von wasserbaulichen Massnahmen auf das flussnahe Grundwasser und dessen Nutzung mit ein und ermöglicht den zuständigen Behörden des Gewässer- und Hochwasserschutzes sowie der Raumplanung die Interessen gegeneinander abzuwägen und koordinierte Entscheide zu treffen.

2. Schutzkonzepte

Das Prinzip des *Ressourcenschutzes* basiert auf der Verhinderung bzw. Verminderung des Austrags von Schadstoffen in die Umwelt (Sorgfaltspflicht, Art. 3 GSchG; Verunreinigungsverbot, Art. 6 GSchG) und auf der quantitativen Erhaltung von Grundwasservorkommen (Art. 43 GSchG). Der Grundwasserschutz erfolgt deshalb flächendeckend und nutzungsorientiert.

Ziel des *flächendeckenden* Grundwasserschutzes ist die Erhaltung der physikalischen Eigenschaften von Grundwasserleiter, Grundwasserstauer, Deckschichten und der natürlichen Hydrodynamik sowie die Erhaltung der natürlichen chemischen Beschaffenheit und der natürlichen Biozönose des Grundwassers (Art. 43 GSchG, Anh. 1 Ziff. 2 GSchV). Der *nutzungsorientierte* Grundwasserschutz wird sichergestellt durch die Bezeichnung der besonders gefährdeten Gewässerschutzbereiche sowie die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen und -arealen (Art. 29 f. GSchG). Innerhalb dieser Bereiche, Zonen und Areale gelten abgestufte Schutzmassnahmen und Nutzungsbeschränkungen. Wird das Grundwasser als Trinkwasser genutzt, oder ist es für diese Nutzung vorgesehen, soll seine Qualität so beschaffen sein, dass das Wasser, allenfalls nach An-

wendung einfacher Aufbereitungsverfahren, die Anforderungen der Lebensmittelgesetzgebung erfüllt (Art. 20 f. GSchG, Anh. 4 Ziff. 1 und 2 GSchV).

Basierend auf den hydrogeologischen Grundlagen erfolgt der *planerische* Grundwasserschutz aufgrund der regionalen Versorgungs- und Standortplanung für Trinkwasserfassungsanlagen sowie der Verankerung der Belange des Grundwasserschutzes und der -bewirtschaftung in der Richt- und Nutzungsplanung. Die *Gewässerschutzkarte* ist dabei das zentrale planerische Instrument für den praktischen Vollzug des Grundwasserschutzes. Kriterien für die Bezeichnung und Dimensionierung der Elemente der Gewässerschutzkarte (Gewässerschutzbereiche A_U und A_O , Zuströmbereiche Z_U und Z_O , Grundwasserschutzzone und Grundwasserschutzareale) sind u. a. die Trennung von ober- und unterirdischen Gewässern, die Schutzwirkung der Deckschicht sowie die Grundwasseraufenthaltszeit und Mindestdistanz in Zustromrichtung (im Falle der Grundwassernutzung für Trinkwasserzwecke, d. h. für die Schutzzone S2, von 10 Tagen und 100 Metern).

Der ganzheitliche Schutzgedanke in der revidierten Gewässerschutzgesetzgebung (Revision des GSchG von 1991, Aufwertung der Lebensräume), der eingeleitete Paradigmenwechsel im Hochwasserschutz (Ziel der Gewährleistung der Hochwassersicherheit primär durch raumplanerische und ökologische Massnahmen und nicht durch harte Verbauungen) sowie die Forderung nach Wiederherstellung naturnaher Fliessgewässer, verlangen bei wasserbaulichen Eingriffen in Fliessgewässer die Berücksichtigung der unterschiedlichen Aspekte des Gewässerschutzes. Für die Beurteilung der Sicherheit von flussnahen Fassungen bezüglich der Wasserqualität drängen sich als Ergänzung zu den bestehenden Schutzkonzepten prozessbasierte Ansätze auf. Diese berücksichtigen die Mengenanteile und Qualität von Grundwasser aus «jüngerem» Flussinfiltrat und Grundwasser, welches sich aus «älterem» Flussinfiltrat und alluvialem Grundwasser zusammensetzt sowie die Aufenthaltszeiten dieser Grundwasseranteile im Untergrund (Verweilzeiten) [3] und die Reinigungsleistung im Bereich zwischen Fluss und Entnahmebrunnen.

2.1 Trennung von ober- und unterirdischen Gewässern

Im 19. und bis weit ins 20. Jahrhundert hinein wurde durch Begradigung und Verbau die

transversale und *vertikale* Vernetzung der Fliessgewässer mit der Flussebene und dem Grundwasser sowie die *longitudinale* Vernetzung zwischen verschiedenen Flussabschnitten zusehends eingeschränkt. Vielerorts ging dadurch die natürliche Dynamik der Fliessgewässer verloren. Kanalisierungsmassnahmen führten zu gleichförmigen Strömungsverhältnissen und erhöhten Spitzenabflüssen. Hart verbaute Ufer verhindern die Mobilisierung von Sedimenten durch laterale Erosion bzw. Umlagerungen im Gerinne. Vor allem fehlt der Geschiebeeintrag durch Seitenbäche, da diese zum grössten Teil mit Geschiebesammlern am Kegelhalbs verbaute sind. Dies führt zum Geschiebedefizit vieler Talflüsse und fördert die Kolmation der Flusssohle. Die Reinigungsleistung der Gewässer (Selbstreinigungsprozesse in der Flusssohle und im Interstitial) und die Grundwasserneubildung durch Flussinfiltration wird dadurch vermindert [4, 5]. Wasserbauliche Eingriffe in Fliessgewässer mit dem Ziel der Verzögerung und Dämpfung von Spitzenabflüssen sowie der Aufwertung und Verbesserung der Vernetzung von Lebensräumen sind bei vielen schweizerischen Gewässern geplant (Rhone, Rhein, Wiese, Kleine Emme etc.). Bei der Bezeichnung der Grundwasserschutzzone und unterirdischen Zuströmbereiche Z_U werden die Fliessgewässer jedoch nicht berücksichtigt.

Fazit

Das Konzept der Trennung von ober- und unterirdischen Gewässern ist für den Vollzug im planerischen Grundwasserschutz naheliegend (massiv unterschiedliche Dynamik, Fliessgeschwindigkeiten, Variabilität von Belastungen, Risiken, Schutzerfordernissen etc. in Fliessgewässern gegenüber dem Grundwasser). Das

Verständnis der Interaktionsprozesse dieser Teilsysteme wird durch diese Trennung jedoch erschwert. Für die Vollzugspraxis des Gewässerschutzes sind zudem in manchen Kantonen verschiedene Fachstellen zuständig. Dies kann die Koordination von Massnahmen erschweren.

2.2 Schützende Deckschicht

Die Deckschicht ist ein Element im Wirkungspfad *Luft – Boden – ungesättigte Zone – Grundwasser*. Sie schützt das Grundwasser vor Belastungen aus der Luft und der Bodenbewirtschaftung vor wenig mobilen Stoffen (Mineralölprodukte, Schwermetalle, Phosphor, einzelne Pflanzenschutzmittel etc.), pathogenen Mikroorganismen und partikulär gebundenen Schadstoffen. Die Erfahrungen gegen Ende des letzten Jahrhunderts z. B. mit Grundwasserverschmutzungen durch chlorierte Kohlenwasserstoffe, gewisse Pflanzenschutzmittel oder Nitrat haben die begrenzte Schutzwirkung der Deckschicht jedoch deutlich aufgezeigt. Zudem wurde eine Gefährdung des Grundwassers durch persistente und mobile Wasserinhaltsstoffe, welche über grössere Distanzen (bis zu mehreren Kilometern) transportiert werden können, erkannt und das Konzept des unterirdischen Zuströmbereichs Z_U entwickelt und eingeführt (Revision GSchV von 1998).

Im Kontext der Fluss-Grundwasser-Interaktion besteht der Wirkungspfad *Fluss – Flusssohle/Vorland – gesättigte/ungesättigte Zone – Grundwasser*. Ist das Grundwasser hydraulisch an den Fluss angebunden (gesättigte Zone), existiert keine Deckschicht. Ist das Grundwasser hingegen hydraulisch nicht an den Fluss angebunden (ungesättigte Zone), existiert eine Deckschicht. Die Infiltrationsrate kann starken Änderungen unterworfen sein und ist,

Untersuchungen an der Birs

Abbildung 1 zeigt die mit dem Grundwassermodell berechneten Grundwassergleiche im unteren Birstal zwischen Aesch und Arlesheim bei mittlerem Abfluss in der Birs (Situation A) und bei Hochwasser (Situation B). Deutlich sind in der Situation A die Auswirkungen des Betriebs der Anreicherungsanlage Aesch im Süden des Modellgebiets zu erkennen. Bei Hochwasser wird die Anreicherungsanlage ausser Betrieb genommen. Obwohl der Verlauf der Grundwassergleichen für beide Abflusssituationen vergleichbar ist, ist der Verlauf des Grundwasserspiegels in den Grundwassermessstellen 24J20 und 24J22 komplexer (Abb. 2). Dabei liegt der Grundwasserspiegel vor dem Hochwasser unterhalb des Birspegels (-0,4 m) und nach dem Hochwasser oberhalb des Birspegels (+0,6 m). Während Hochwasser wird die Potenzialdifferenz zwischen der Abflusshöhe in der Birs und dem Grundwasserspiegel erhöht. Zudem verändert sich die Durchlässigkeit der Flusssohle. Dadurch nimmt die Infiltrationsrate zu und der Grundwasserspiegel steigt an.

Abbildung 3 zeigt den Vergleich der gemessenen und berechneten Grundwasserspiegel in den Grundwassermessstellen 24J20 und 24J22. Bis zum Einsetzen des Hochwassers stimmt der Verlauf gut überein. Während und nach dem Hochwasser liegt der berechnete deutlich unter dem gemessenen Grundwasserspiegel. Um die erhöhte Flussinfiltration während und nach Hochwasser im Grundwassermodell adäquat zu berücksichtigen, müsste der Leakage-Koeffizient der Flusssohle auch als instationärer Parameter eingehen.

Das instationäre Infiltrationsverhalten von Fließgewässern wird an Untersuchungen an der Birs (Reinach, BL) illustriert.

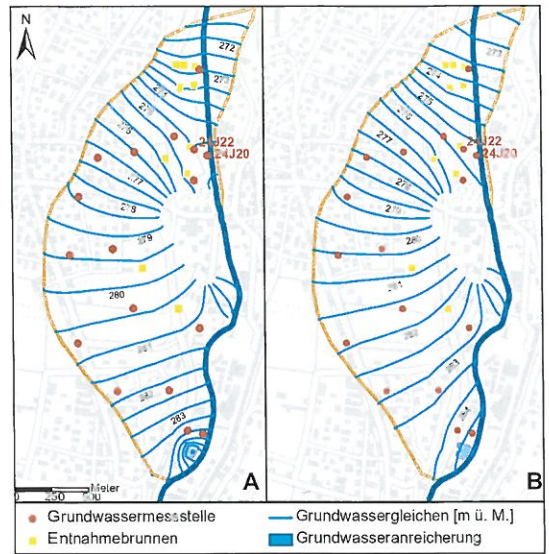


Abb. 1 Grundwassergleichen im unteren Birstal zwischen Aesch und Arlesheim.
Situation A: mittlere Abflussverhältnisse, 24. Okt. 2004, Abfluss Birs 10 m³/s; Situation B: Hochwasser, 27. Okt. 2004, Abfluss Birs 148 m³/s.

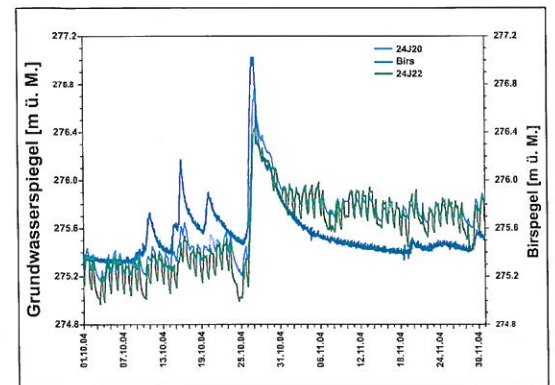


Abb. 2 Grundwasserspiegel in den flussnahen Messstellen 24J20 und 24J22 und Birspegel auf Höhe der Messstellen (Standorte der Messstellen siehe Abb. 1).

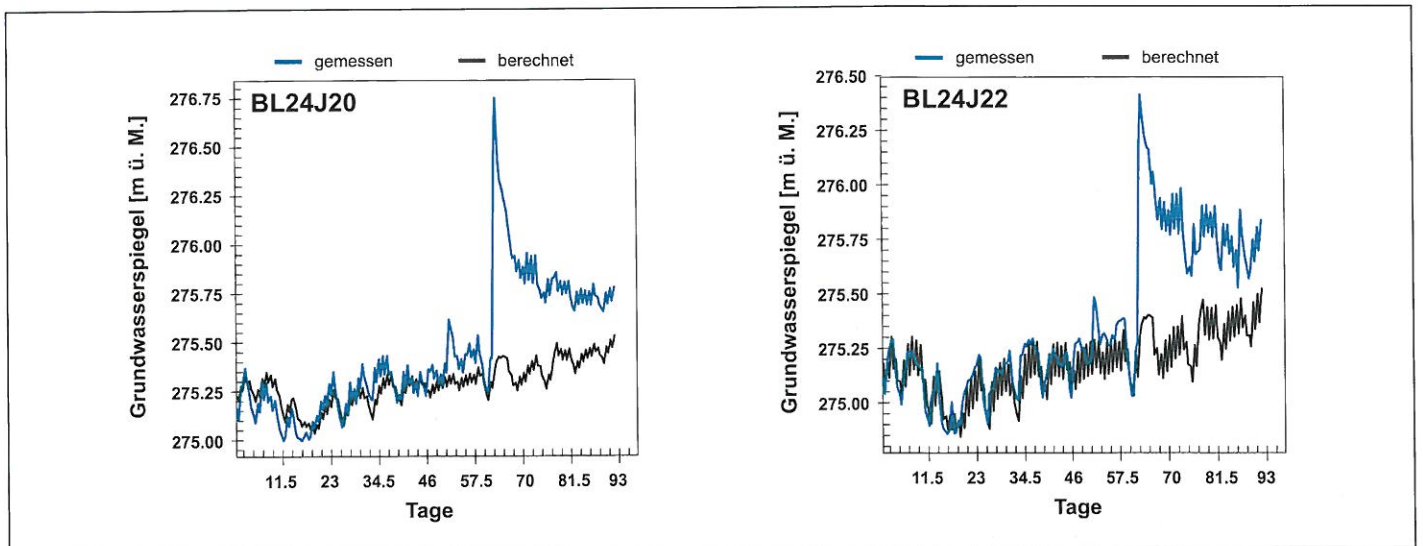


Abb. 3 Vergleich der gemessenen und berechneten Grundwasserspiegel in den Messstellen 24J20 und 24J22.

gemäss dem Leakage-Konzept, von der Mächtigkeit und Durchlässigkeit der kolmatierten Flusssohle, dem Verbauungsgrad der Uferbereiche und von der Potenzialdifferenz zwischen Abflusshöhe und Grundwasserspiegel (mit hydraulischem Anschluss) bzw. zwischen Abflusshöhe und Höhenkote der Flusssohle (ohne hydraulischen Anschluss) abhängig. Die Fluss-Grundwasser-Interaktion kann zudem durch flussnahe Grundwasserentnahmen und -anreicherungen verstärkt oder vermindert werden.

Fazit

Die Deckschicht ist wichtig für den natürlichen Schutz des Grundwassers vor Schadstoffeinträgen. Das Konzept der schützenden Deckschicht ist jedoch auf den Schutz des Grundwassers vor flächenhafter Belastung ausgerichtet und kann nicht direkt auf den Kontext der Fluss-Grundwasser-Interaktion übertragen werden, da im Bereich der Fliessgewässer oft keine Deckschicht existiert.

2.3 Grundwasseraufenthaltszeiten

Bei der Ausscheidung von Grundwasserschutz-zonen stehen vor allem hygienische Aspekte der Wasserqualität (Verunreinigungen durch pathogene Mikroorganismen) und Aspekte des Rückhalts und Abbaus von schwach mobilen oder gut abbaubaren Wasserinhaltsstoffen im Vordergrund. Für die Dimensionierung der Schutz-zonen S2 und S3 ist von der Wassermenge, die höchstens entnommen werden darf, und von niedrigen hydrologischen Bedingungen auszugehen. Die Ausweisung der Schutz-zone S2 soll gewährleisten, dass Grundwasser, bevor es gefasst wird, mindestens zehn Tage im Untergrund verweilt, wobei für die Berechnung der 10-Tage-Isochrone in der Regel die dominierende Verweilzeit massgebend ist (Zeitpunkt des Konzentrationsmaximums bei einer Tracerdurchgangskurve). Bei heterogenen Grundwasserleitern und bei möglichen Störfallszenarien wie z. B. Stossbelastungen in Fliessgewässern ist das *10-Tage-Kriterium* jedoch auf die minimale Verweilzeit anzuwenden (Zeitpunkt des Erstauftretens bei einer Tracerdurchgangskurve, Interventionszeit). Das 10-Tage-Kriterium wurde wegen der relativ grossen Fliessgeschwindigkeiten in den schweizerischen Grundwasserleitern, der relativ beschränkten räumlichen Verhältnisse sowie aufgrund von Untersuchungen festgelegt; sie zeigen, dass etwa 90 % der pathogenen

Mikroorganismen herausgefiltert oder inaktiv werden bzw. nach wenigen Tagen im Grundwasser absterben [6]. Die *Überlebensdauer* pathogener Mikroorganismen im Grund- und Trinkwasser variiert jedoch zwischen wenigen Tagen und mehreren Monaten [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Der Abbau von Mikroorganismen hängt massgebend von deren Aufenthaltszeiten und dem Nahrungsangebot im Grundwasser ab. Eine Verringerung der Aufenthaltszeiten des Grundwassers kann eine Verschlechterung der Wasserqualität zur Folge haben [13].

Flussnahe Fassungsstandorte haben den Nachteil, dass die Aufenthaltszeiten des Grundwassers von zehn Tagen oft unterschritten werden oder nur knapp eingehalten werden können. Bei Hochwasser verweilt das «jüngere» Flussinfiltrat bis zum Erreichen der Fassung oft nur wenige Tage im Grundwasser [3].

Fazit

Das Konzept zur Ausscheidung der Schutz-zone S2 orientiert sich primär am 10-Tage-Kriterium. Dieses allein bietet aber bei flussnahen Fassungen und stark schwankenden Belastungsspitzen in den Fliessgewässern (z. B. Entlastung von Mischwasserkanalisationen) sowie während Hochwasser in vielen Fällen nur unzureichend Gewähr, die Anforderungen bezüglich der Wasserqualität einzuhalten.

2.4 Mischungsverhältnisse im Grundwasser

Aufgrund unterschiedlicher *Infiltrationsraten* unterliegen die Mischungsverhältnisse im flussnahen Grundwasser dynamischen Veränderungen. Für deren Quantifizierung eignen sich verschiedene Methoden. Durch Auswertung der Durchgangskurven künstlicher Markierstoffe (z. B.

Uranin, Partikel), aber auch durch Messung der Konzentrationsverteilung von Umweltracern (z. B. Radon, Tritium) können Infiltrationsraten sowie Mengenanteile an «jüngere» Flussinfiltrat und Grundwasser, welches sich aus «ältere» Flussinfiltrat und alluvialen Grundwasser zusammensetzt, abgeschätzt werden. Die Messung von Ionenkonzentrationen bei verschiedenen Wassertypen und Darstellung in Mehrkomponentenplots ermöglicht ebenfalls eine Quantifizierung von Mischungsverhältnissen. Voraussetzung ist jedoch eine eindeutige Identifikation der Endglieder, d. h. der Wasserproben, die im untersuchten Gebiet einen eigenen, ungemischten Wassertyp repräsentieren (z. B. «jüngere» Flussinfiltrat bzw. Flusswasser, alluviales Grundwasser, Hangwasser).

Im unteren *Birstal* wurden ein umfassendes Grundwasserüberwachungssystem inkl. Grundwassermodell aufgebaut und umfangreiche Messkampagnen durchgeführt. Die gewonnenen Datensätze erlauben die Dokumentation der instationären Prozesse der Fluss-Grundwasser-Interaktion (*Kasten; Abb. 1–3*).

Fazit

Die Berücksichtigung des instationären Infiltrationsverhaltens und die damit verbundenen Änderungen der Mischungsverhältnisse im Grundwasser bei unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen fördern das Verständnis der Interaktionsprozesse zwischen ober- und unterirdischen Gewässern und sind eine notwendige Grundlage für die Abschätzung der Gefährdung des flussnahen Grundwassers und dessen Nutzung. Daraus lassen sich standortspezifische und adäquate Schutzmassnahmen für Fassungen und notwendige Anpassungen im Betriebsregime der Grundwasserförderung ableiten.

2.5 Reinigungsleistung zwischen Fluss und Entnahmebrunnen

Reinigungsprozesse im Untergrund, wie z. B. Filtration, Sorption oder biochemische Prozesse, welche für die Qualität des Grundwassers ausschlaggebend sind, finden vor allem im Boden und untergeordnet in der ungesättigten Zone statt. In der gesättigten Zone (Grundwasserleiter) erfolgt vorwiegend eine Verdünnung der gelösten Stoffe [14].

Eine schematische Darstellung der Qualität des «jüngeren» Flussinfiltrats bzw. Flusswassers (z. B. Konzentration eines Stoffes im Fließgewässer) gegen die Reinigungsleistung im Bereich zwischen Flusssohle/Vorland und Fassung erlaubt im Diagramm der *Abbildung 4* eine Bezeichnung von unterschiedlichen Risikobereichen, welche veranschaulichen, unter welchen Voraussetzungen wasserbauliche Eingriffe in Fließgewässer möglich bzw. nicht möglich sind (*Kap. 3.2*). Die Trennung dieser Risikobereiche kann durch die Linie beschrieben werden, welche den Zielwert eines Stoffes für Trinkwasser markiert (gestrichelte Linie, Zielwertüberschreitung bezüglich Stoffkonzentrationen). Die Wahl eines oder mehrerer Parameter (z. B. *E.coli*), welche für die Beurteilung der Sicherheit einer Fassung bezüglich der Wasserqualität berücksichtigt werden, sollte in Abhängigkeit der Problemstoffe im Fließgewässer respektive Einzugsgebiet erfolgen. Die Reinigungsleistung, als Quotient der Konzentration eines Stoffes im geförderten Grundwasser und im «jüngeren» Flussinfiltrat bzw. Flusswasser, ist insbesondere abhängig von der Belastung des Flusswassers, den strukturellen Eigenschaften der Flusssohle und des Aquifers (Infiltrationsraten, Mischungsverhältnisse im Grundwasser, Aufenthaltszeiten), der Grundwasserströmung, den Eigenschaften

des Stoffes und des Grundwassers sowie der Grundwasserentnahme im Brunnen.

Fazit

Die Berücksichtigung der Reinigungsleistung im Bereich zwischen Fluss und Entnahmebrunnen orientiert sich an Zielwertüberschreitungen bezüglich Stoffkonzentrationen und repräsentiert einen systemorientierten Ansatz (Interaktionssystem Fluss-Grundwasser). Damit gewinnt auch die Forderung nach Verbesserung der Fließgewässerqualität an Bedeutung.

3. Szenarienentwicklung und Massnahmen

Das Zulassen einer natürlichen Dynamik der Fließgewässer verändert die Strömungsverhältnisse und erhöht die Mobilisierung von Sedimenten durch laterale Erosion bzw. Umlagerungen im Gerinne. Dadurch erhöht sich die Varianz der Durchlässigkeit der Flusssohle mit

entsprechenden Auswirkungen auf die Infiltrationsraten, die Mischungsverhältnisse im Grundwasser sowie der Aufenthaltszeiten der verschiedenen Grundwasseranteile. Wasserbauliche Eingriffe in Fließgewässer erfordern deshalb eine sehr sorgfältige und umfassende Beurteilung der Auswirkungen auf das flussnahe Grundwasser und dessen Nutzung. Detaillierte, standortspezifische hydrogeologische Kenntnisse, unter Berücksichtigung unterschiedlicher hydrologischer Bedingungen, bilden dabei eine notwendige Grundlage.

Im Zusammenhang mit wasserbaulichen Eingriffen in Fließgewässer und hydrologischen Gefahrenprozessen (z. B. Hochwasser mit Stossbelastungen) sind solche Beurteilungen jedoch schwierig durchzuführen. Für verschiedene Flussabschnitte sind zudem unterschiedliche Auswirkungen auf das flussnahe Grundwasser und dessen Nutzung möglich. Wegen dieser grossen Komplexität und Vielfalt an möglichen Prozessabläufen muss bei der Gefahren- und Risikobeurteilung für flussnahe Fassungen mit Szenarien gearbeitet werden. Diese müssen zudem relevante Betriebsituationen der Entnahmebrunnen berücksichtigen. Szenarien stehen stellvertretend für mögliche reale Ereignisse und Ereignisabfolgen und dienen der Erfassung und Darstellung einer repräsentativen Auswahl möglicher Dispositionen und Prozessabläufe. Szenarienentwicklung bedeutet aber auch Vereinfachung und Beschränkung auf die wesentlichen, das System beeinflussenden Randbedingungen.

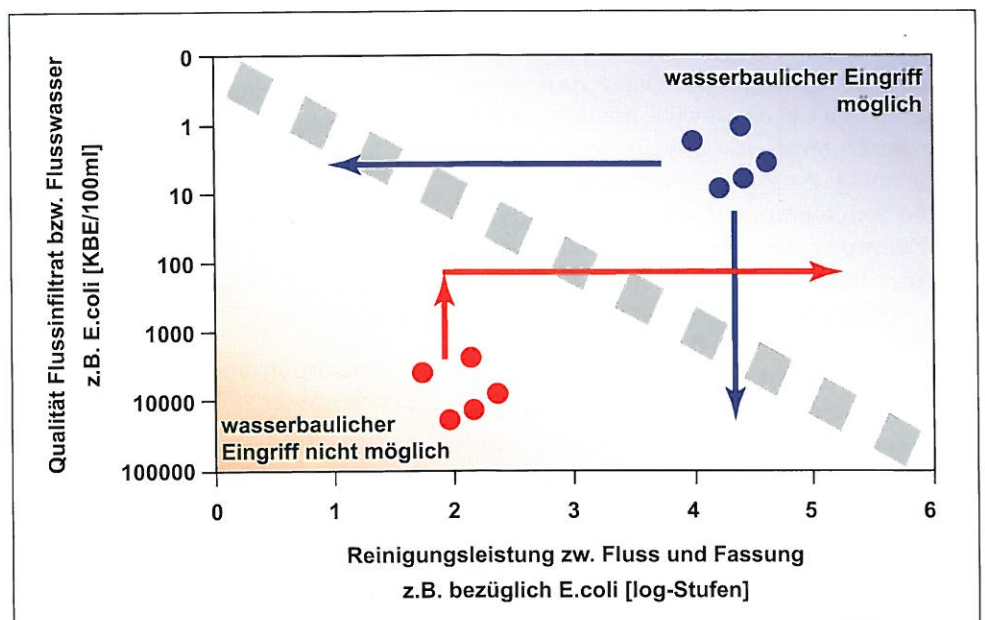


Abb. 4 Konzeptionelles Beurteilungsdiagramm für wasserbauliche Eingriffe in Fließgewässer. Gestrichelte Linie: Definition einer Zielgrösse, z. B. Einhaltung des Toleranz- oder Grenzwerts in der Fassung.

3.1 Grundwassermodellierung

Für das Aufzeigen der Auswirkungen von wasserbaulichen Massnahmen auf das Grundwasser sowie die Beurteilung der Sicherheit von Fassungen bezüglich der Wasserqualität eignet sich die Anwendung von *numerischen Simulationsmodellen*. Fliessgewässer werden in Grundwassermodellen meist nach dem Leakage-Konzept definiert (Kap. 2.2). Diese Randbedingung ist von besonderer Bedeutung. Auf hydrologische und -geologische Daten sowie Betriebsdaten basierende *Grundwassermodelle* stellen ein wertvolles Hilfsmittel dar, um Anströmbereiche von Trinkwasserfassungen zu bestimmen bzw. abzuschätzen. Sie erlauben auch, die Sensitivität des untersuchten Systems auf bestimmte Parameter und Bedingungen zu untersuchen. Die Kopplung eines Grundwassermodells mit einem hydrodynamischen Fliessgewässermodell kann insbesondere bei der Problemlösung instationärer Prozesse sehr nützlich sein und erleichtert die Entwicklung von Handlungsstrategien. Geplante Massnahmen können zudem evaluiert und optimiert sowie erwartete Konsequenzen aus Entscheiden bewertet werden. Die Unsicherheiten von solchen Prognosen müssen jedoch berücksichtigt werden. Neben einer rein anwendungsorientierten Verwendung solcher Modelle soll dabei auch die Weiterentwicklung von Modellwerkzeugen anvisiert werden (z. B. Berücksichtigung von instationären Leakage-Koeffizienten bzw. Infiltrationsraten).

3.2 Gefahren- und Risikobeurteilung

Für mögliche Dispositionen kann die Reinigungsleistung im Bereich zwischen Fluss und Entnahmebrunnen und die Qualität des «jüngeren» Flussinfiltrats bzw. Flusswassers im Diagramm von *Abbildung 4* dargestellt werden (Punktwolke). Durch wasserbauliche Eingriffe im Fliessgewässer und durch Hochwasserereignisse kann die Reinigungsleistung zumindest zeitweise abnehmen (blauer horizontaler Pfeil). Um die Qualitätsziele in der Trinkwasserfassung möglichst zu erreichen, darf die Linie, welche den Zielwert eines Stoffes für Trinkwasser markiert, jedoch nicht unterschritten werden. Durch eine Verschlechterung der Qualität des «jüngeren» Flussinfiltrats bzw. Flusswassers (z. B. Stossbelastung bei Hochwasser) kann diese Zielwertlinie ebenfalls unterschritten werden (blauer vertikaler Pfeil). Kann für eine flussnahe Fassung eine Punkt- wolke charakterisiert werden, die unterhalb der Zielwertlinie liegt (Qualitätsziele für Trink-

wasser werden dabei nicht erreicht), so ist, um die Chance und den Freiheitsgrad von wasserbaulichen Eingriffen in Fliessgewässer überhaupt erst zu ermöglichen bzw. zu erweitern, die Qualität des «jüngeren» Flussinfiltrats bzw. Flusswassers zu verbessern und/oder die Reinigungsleistung zu erhöhen (rote Pfeile). Zu berücksichtigen ist, dass durch die Verbesserung des ökologischen Zustandes des Fliessgewässers auch die Reinigungsleistung in der Flusssohle und im Interstitial zunimmt. Die Quantifizierung der dadurch erreichbaren Qualitätsverbesserung des Grundwassers ist jedoch schwierig. In Flussabschnitten mit permanenter Exfiltration und bei grossen Flurabständen sind wasserbauliche Eingriffe für die Grundwasserqualität meist unproblematisch.

Die Herausforderung besteht in der Festlegung von Schutzziele auf der Grundlage von risikobasierten Überlegungen. Diese versuchen das Risiko eines wasserbaulichen Eingriffs und das Hochwasserrisiko für eine flussnahe Grundwassernutzung möglichst effektiv und effizient auf ein akzeptables Mass zu reduzieren. Soll ein wasserbaulicher Eingriff in der Nähe einer flussnahen Fassung vorgenommen werden, ist das Risikomanagement dieses Eingriffs und der nachfolgenden Hochwasserereignisse in Abhängigkeit der Notwendigkeit der betroffenen Fassung zu definieren und umzusetzen. Dabei sind diejenigen Hochwasser zu definieren, bei denen eine eingeschränkte Nutzung noch möglich ist (z. B. Jährlichkeit der Ereignisse bzw. Abflussmenge, Höchstwert der Konzentration von Stoffen im Flusswasser, Dauer der akzeptierten eingeschränkten Nutzung).

Die Berücksichtigung der Reinigungsleistung zwischen Fluss und Entnahmebrunnen und die Berücksichtigung der Mischungsverhältnisse

im Grundwasser erlauben eine Abschätzung der Gefährdung von flussnahen Fassungen durch geplante wasserbauliche Eingriffe und durch Hochwasser. Das Risiko ergibt sich v. a. aus der Häufigkeit entsprechender Hochwasser und des damit verbundenen Schadenausmasses für die Wasserversorgung und muss von den verantwortlichen Fachstellen für den Vollzug des Gewässerschutzes beurteilt werden.

3.3 Mögliche Massnahmen

Zur Erhöhung des Freiheitsgrades von wasserbaulichen Eingriffen in Fliessgewässer sind *planerische, organisatorische* und *technische* Massnahmen möglich und bei der Planung und Beurteilung als Optionen zu berücksichtigen. Durch die Richt- und Nutzungsplanung ist primär eine Nutzungsentflechtung anzustreben. Dabei sollte auf regionaler Ebene die Diskussion über den Trinkwasserverbrauch geführt werden (Trennung der Produktion von Trink- und Brauchwasser bei der industriellen und landwirtschaftlichen Nutzung). Massnahmen im Einzugsgebiet, wie z. B. die Optimierung der Siedlungsentwässerung, zielen auf eine Verbesserung der Fliessgewässerqualität. Mit organisatorischen und technischen Vorkehrungen an der Trinkwasserfassung, wie Neukonzessionierung, Verbundsysteme, Anpassung der Grundwasserentnahme und -anreicherung an Abflussverhältnisse und damit verbundene Belastungsschwankungen (Stossbelastungen) oder Ausserbetriebnahme der Trinkwasserfassung (adaptives Grundwassermanagement), UV-Anlagen etc., sind die kleinsten irreversiblen baulichen Massnahmen erforderlich. Mögliche technische Massnahmen sind z. B. die Anpassung der geplanten Eingriffe in das Fliessgewässer, das Versetzen flussnaher Fassungen (Vergrösserung der Fil-

terstrecke und damit auch der Reinigungsleistung), die Anreicherung von Grundwasser oder das Verlegen von Geotextilien (hydraulische und technische Barrieren, Veränderung des Grundwasserfließregimes). Alle diese Massnahmen erfordern eine sorgfältige Abstimmung unter den verschiedenen Fachstellen und Bewilligungsbehörden.

4. Schlussfolgerungen

Jeder wasserbauliche Eingriff in ein Fließgewässer, welcher die flussnahe Grundwassernutzung tangiert, setzt hohe Anforderungen an einen effizienten Grundwasserschutz. Nicht in jedem Einzelfall ist ein solcher Eingriff ins Fließgewässer jedoch sinnvoll und möglich. Voraussetzungen sind eine ausreichende Qualität des «jüngeren» Flussinfiltrats bzw. Flusswassers und/oder eine ausreichende Reinigungsleistung im Bereich zwischen Flusssohle/Vorland und Fassung. Um die Durchführbarkeit eines wasserbaulichen Eingriffs zu beurteilen reicht die Anwendung der bestehenden Schutzkonzepte in vielen Fällen nicht aus, da die Wechselwirkungen von ober- und unterirdischen Gewässern sehr instationär und komplex sind. Bestehende Schutzkonzepte sollten deshalb durch prozessbasierte Ansätze ergänzt werden und bei der Erarbeitung von Schutzmassnahmen sollten die Mengenteile und Qualität des «jüngeren» Flussinfiltrats und des Mischgrundwassers sowie die Aufenthaltszeiten dieser Grundwasseranteile im Untergrund und die Reinigungsleistung im Bereich zwischen Fluss und Entnahmebrunnen berücksichtigt werden. Die damit verbundene Forderung nach Verbesserung der Fließgewässerqualität gewinnt an Bedeutung, verstärkt das in der Gewässerschutzgesetzgebung verankerte Vor-

sorge- und Verursacherprinzip und wirkt sich demzufolge auf den gesamten Gewässerschutz positiv aus. Durch Szenarientwicklung lassen sich mögliche Auswirkungen von wasserbaulichen Eingriffen in Fließgewässer und von Hochwasserereignissen auf das flussnahe Grundwasser und dessen Nutzung erfassen und entsprechende Gefahren- und Risikobeurteilungen durchführen. Hinsichtlich des Bewusstseins, dass keine absolute Sicherheit möglich ist, stellt sich die Frage nach dem akzeptablen Risiko bzw. nach der optimalen Reduktion des Risikos und allenfalls notwendigen zusätzlichen Aufbereitungsmassnahmen. Hierzu ist ein Risikodialog notwendig, bei dem Risiken und Schutzkonzepte offen und transparent kommuniziert werden sowie die unterschiedlichen Interessen an der Entscheidungsfindung bezüglich eines wasserbaulichen Eingriffs berücksichtigt werden. Ein effektiver und effizienter Grundwasserschutz bei wasserbaulichen Eingriffen in Fließgewässer und bei Hochwasserereignissen setzt detaillierte hydrologische und -geologische Kenntnisse sowie die Bereitschaft voraus, auf dynamische Veränderungen der hydrologischen Bedingungen und auf Belastungsschwankungen in Fließgewässern einzugehen. Dieser Ansatz ermöglicht, sich an den Zielen des nachhaltigen Grundwasserschutzes und naturnaher Gewässerökosysteme zu orientieren. Durch planerische, organisatorische und technische Massnahmen lässt sich zudem ein grosser Handlungsspielraum für wasserbauliche Eingriffe in Fließgewässer erschliessen. Stellt sich im Einzelfall heraus, dass nicht beide Ziele (effizienter Grundwasserschutz und wasserbauliche Massnahmen) vereinbar sind, ist eine Interessenabwägung vorzunehmen.

Literaturverzeichnis

- [1] BUWAL, BLW und ARE (2003): Leitbild Fließgewässer Schweiz. Für eine nachhaltige Gewässerpolitik. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) und Bundesamt für Raumplanung (ARE), Bern, 1–12.
- [2] Huggenberger, P.; Epting, J.; Regli, C.; Spotke, I.; Zechner, E. (2006): Fluss-Grundwasser-Interaktion. MoNit: Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben. INTERREG III A-Projekt. Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 1–110.
- [3] Hoehn, E. (2005): Flussnahes Grundwasser strömt in Etagen. Gas Wasser Abwasser 11: S. 905.
- [4] Kozel, R. (2005): Viele Pumpbrunnen stehen zu nahe am Fluss. Aqualterra 2: 11–12.
- [5] Regli, C.; Huggenberger, P. (2006): Entwicklung nachhaltiger Strategien für den Grundwasserschutz. In: Revitalisierung urbaner Flusslandschaften, Schlussbericht zum MGU-Forschungsprojekt F1.03: 47–61.
- [6] Merkli, B. (1975): Untersuchungen über Mechanismen und Kinetik der Elimination von Bakterien und Viren im Grundwasser. Dissertation Nr. 5420, ETH Zürich.
- [7] Seiler, K.-P. (1988): Die mechanische Ausfiltration von *Escherichia coli* in quartären Kiesen Oberbayerns. Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft 139: 475–484.
- [8] Blotzenhard, K. (2000): Viren als Erreger wasserbedingter Infektionen. Mitteilungen aus Lebensmitteluntersuchung und Hygiene 91: 26–43.
- [9] Nadal, D. (2001): Virusinfektionen beim Menschen, Infektionsketten, Auswirkungen von Prophylaxe. Gas Wasser Abwasser 5: 299–303.
- [10] Auckenthaler, A.; Huggenberger, P. (2003): Pathogene Mikroorganismen im Grund- und Trinkwasser. Transport – Nachweismethoden – Wassermanagement. Birkhäuser Verlag, Basel, 1–184.
- [11] Fuchsli, H.P.; Beuret, C.; Egli, T. (2005): Mikrobiologische Belastung des Trinkwassers – In Trinkwasserfassungen ländlicher Regionen. Gas Wasser Abwasser 11: 859–865.
- [12] Greber, E.; Cornaz, S.; Herold, T.; Kozel, R.; Metzler, A.; Traber, D. (2005): Viren und Protozoen in schweizerischen Grundwasservorkommen. Gas Wasser Abwasser 11: 867–877.
- [13] Hoehn, E. (2007) Überwachung der Auswirkungen von Flussaufweitungen auf das Grundwasser mittels Radon. Grundwasser 12: 66–72.
- [14] BUWAL (2004): Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 1–141.

Verdankung

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts bedanken sich die Autoren bei *Jannis Epting* und *Veronika Huber-Wälchli*.

Keywords

Grundwasserschutz – Wasserbau – Fließgewässer – Schutzkonzepte – Szenarientwicklung

Adresse der Autoren

Christian Regli, Dr., GEOTEST AG
Promenade 129, CH-7260 Davos Dorf
Tel. +41 (0)81 420 15 59
christian.regli@geotest.ch

Peter Huggenberger, Prof. Dr.
Departement Umweltwissenschaften
Angewandte und Umweltgeologie
Bernoullistrasse 32, CH-4056 Basel
Tel. +41 (0)61 267 35 92
peter.huggenberger@unibas.ch