Schadenspotenzial und Verletzlichkeit von Grundwasser

Fallbeispiele bei Hochwasser und Starkniederschlägen

Potentiel de dommages et vulnérabilité des eaux souterraines

Cas de crues et de précipitations intenses

Le potentiel de dommages et la vulnérabilité des aquifères peu profonds sont particulièrement évidents en cas de crue ou de précipitations intenses. Les niveaux élevés des eaux souterraines peuvent inonder les terrains agricoles et les zones d'habitation le long des cours d'eau. En cas de fortes précipitations, l'eau ne s'infiltre que partiellement dans les eaux souterraines. La plus grande partie des précipitations ruisselle dans les eaux de surface et en augmente leur débit. Elle peut aussi déclencher des glissements de terrain ou des laves torrentielles. L'infiltration accrue des eaux de surface et l'inondation des zones de recharge peuvent entraîner une augmentation des bactéries fécales et d'autres polluants dans les aquifères et ainsi contaminer les captages d'eaux souterraines. Des méthodes de surveillance, des mesures préventives et la mise au point de scénarios de crise permettent toutefois de se prémunir contre une telle éventualité.

Groundwater Damage Potential and Vulnerability

Case Studies of Flooding and Heavy Precipitation

Flooding and heavy precipitation events repeatedly show the damage potential and the vulnerability of near-surface groundwater aquifers. High groundwater levels lead to flooding of low-lying cultural and residential areas. High levels of water quantities accumulating in the short term during heavy precipitation can only partially seep into the groundwater and are therefore increasingly added directly to the surface drainage. Furthermore, they can trigger landslides and debris flows. Faecal bacteria and other pollutants also increasingly enter into surface waters. Through increased river water infiltration into the groundwater, as well as through large scale flooding in recharge areas of pumping wells, these pollutants can enter into groundwater wells. By means of monitoring methods, preventative measures and damage case scenarios, these negative effects can be counteracted.

Marc Schürch



Hochwasser- und Starkniederschlagsereignisse zeigen immer wieder das Schadenspotenzial und die Verletzlichkeit von oberflächennahen Grundwasserleitern auf. Hohe Grundwasserstände führen zu Überflutungen von tiefliegendem Kultur- und Siedlungsraum. Hohe, kurzfristig anfallende Wassermengen bei Starkniederschlägen können nur zum Teil ins Grundwasser versickern und werden daher verstärkt direkt dem Oberflächenabfluss zugeführt. Zudem können sie oberflächennahe Rutschungen und Murgängen, auslösen. Auch Fäkalbakterien und andere Schadstoffe gelangen vermehrt in die Oberflächengewässer. Durch eine verstärkte Flusswasserinfiltration ins Grundwasser sowie grossflächige Überschwemmungen in Einzugsgebieten von Förderbrunnen können diese Schadstoffe in Grundwasserfassungen eingetragen werden. Mittels Überwachungsmethoden, Präventivmassnahmen und Schadensfallszenarien kann diesen negativen Auswirkungen begegnet werden.

1. Einführung

Die Hochwasser der jüngeren Vergangenheit wie die katastrophale Situation von 2002 im Freistaat Sachsen im Osten Deutschlands [1], von 2001 entlang der Somme in Nordfrankreich [2] sowie von 1999 und 2005 in der Schweiz [3, 4] haben gezeigt: Die *Grundwasserqualität* kann bei Hochwasserereignissen lokal massiv beeinträchtigt werden, und der Grundwasseranstieg führt zu erheblichen Flur- und Gebäudeschäden, auch über das eigentliche Überschwemmungsgebiet hinaus.

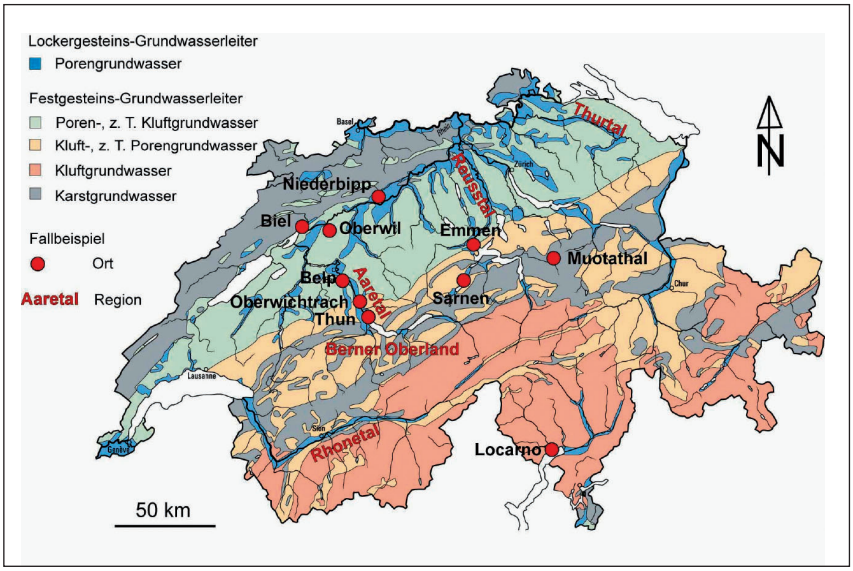


Abb. 1 Übersichtskarte der hydrogeologischen Einheiten in der Schweiz mit Lage der aufgeführten Fallbeispiele.

Dabei wirken sich die Grundwasserverhältnisse vor und während eines Hochwassers entscheidend auf die Intensität der Überschwemmungen aus.

Wenig weiss man über das komplexe, räumlich und zeitlich variable Zusammenspiel aus Niederschlagsmenge, Oberflächenwasserstand, Grundwasserstand und Bodenwassersättigung bei Hochwasserereignissen. Deshalb stellt sich die Frage, welche Überwachungsmethoden, Präventivmassnahmen und Schadensfallszenarien zur Verfügung stehen, um die Nutzung von verschmutztem Grundwasser zu verhindern und um Gebäude- und Flurschäden durch ansteigendes Grundwasser zu reduzieren.

Dieser Artikel stellt die Erfahrungen aus den Hochwasser- und Starkniederschlagsereignissen der letzten Jahre zusammen, welche nur selten dokumentiert und teilweise nur der lokalen Presse zu entnehmen sind. Ausgehend von den generellen Grundwasserverhältnissen der Schweiz werden die zu erwartenden Reaktionen der unterschiedlichen Grundwasserleitertypen auf Hochwasser und Starkniederschläge aufgezeigt. Verschiedenste *Fallbeispiele (Abb. 1)* illustrieren dann die konkreten Folgen für Qualität und Quantität von Grund- und Trinkwasser sowie die Auswirkungen von hohen Grundwasserständen auf Gebäude und Kulturland.

2. Grundwasserverhältnisse

Grundwasser wird in der Schweiz vor allem durch die *direkte Versickerung* von Niederschlagswasser sowie durch die *natürliche Infiltration aus Oberflächengewässern* und nur untergeordnet aus Zuflüssen von Talflanken bzw. unterlagernden Gesteinsschichten neu gebildet. Auf Grund der hohen Niederschlagsmengen im Voralpen- und Alpenraum von 1200 bis 2000 mm/Jahr ist Grundwasser hierzulande in ausreichender Menge und in guter Qualität vorhanden. Dennoch bedarf es zur langfristigen Sicherung der Grundwasserquantität und -qualität auch eines nachhaltigen Umgangs und eines umfassenden Schutzes; denn Grundwasser als wichtigste Trinkwasserressource ist zunehmend gefährdet oder teilweise bereits durch Schadstoffe beeinträchtigt [5, 6].

Niederschlags- und Trockenperioden wirken sich in Abhängigkeit vom Grundwasserleitertyp sehr unterschiedlich auf die Grundwasserverhältnisse aus. Oberflächennahe Grundwasservorkommen, eine in der Schweiz dominierende Situation, reagieren auf die Witterung meist rasch. Bei einem unmittelbaren Ansteigen von Quellschüttungen und Grundwasserständen handelt es sich in erster Linie um eine hydraulische Druckfortpflanzung und erst in zweiter Linie um Massentransportphänomene. Deshalb ist oft eine verzögerte Veränderung der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers zu beobachten. Dies ist vor allem bei niedrigen Sicker- und Fliessgeschwindigkeiten sowie einer breiten Durchmischung und daher langen Aufenthaltszeiten des Wassers im Grundwasserleiter der Fall. Generell reagiert Grundwasser auf Witterungseinflüsse umso träger, je länger die mittlere Aufenthaltszeit des Wassers im Untergrund ist. Besonders das Wasser in oberflächennahen Lockergesteins-Grundwasserleitern setzt sich aus Anteilen unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Herkunft zusammen.

Die wichtigsten *Grundwasserleitertypen* in der Schweiz sind in der *Abbildung 1* dargestellt und werden im Folgenden kurz beschrieben. Die *Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA* betreibt an *repräsentativen Messstellen* die Beobachtung der Grundwasserleitertypen und erlaubt somit eine landesweite Übersicht hinsichtlich Qualität und Quantität der schweizerischen Grundwasservorkommen [6, 7].

In *gut durchlässigen Lockergesteins-Grundwasserleitern* weist das Grundwasser in der Regel einheitliche Fliessgeschwindigkeiten von wenigen Metern pro Tag auf. Insbesondere bei einer hydraulischen Anbindung an Fliessgewässer besitzen diese Grundwasserleiter eine grosse Ergiebigkeit, was für die Wassergewinnung von Bedeutung ist. Bei Hochwasser steigen die Grundwasserstände in solchen Gebieten schnell an. *Abbildung 2* zeigt eine solche Situation, welche typisch für die grossen Flusstäler des Mittellandes ist. Die Empfindlichkeit (Vulnerabilität) von Lockergesteins-Grundwasserleitern gegenüber Schadstoffeinträgen von der Geländeoberfläche ist vergleichsweise gering. Die Gründe dafür liegen in der *natürlichen Schutzwirkung* eines meist gut entwickelten, biologisch aktiven Bodens und von bindigen Deckschichten.

Grosse Lockergesteins-Grundwasserleiter, die nicht mit einem Oberflächengewässer in Beziehung stehen, reagieren dagegen mehrheitlich *träge,* d. h. bis zu mehreren Monaten verzögert, auf Witterungsveränderungen *(Abb. 3).* Solche langsam reagierende Grundwasservorkommen sind vor allem an tiefe Rinnenfüllungen im Mittelland und im Jura gebunden. Anders sieht es bei Lockergesteinen quartärer Terrassen und Moränen aus, die Festgesteinen aufliegen. Sie sind zwar oft gut wasserdurchlässig, aber nur von geringer Ausdehnung. Insbesondere Quellen reagieren in einem solchen Milieu schnell auf Starkniederschläge, da sie aus jungem Niederschlagsinfiltrat gespeist werden, welches ohne grosse Umwege in die Quellgebiete gelangen kann. Aufgrund des limitierten Speichervolumens nimmt dann die Schüttung mit dem Ende der Niederschläge auch meist wieder relativ schnell ab.

In *Karst-Grundwasserleitern* sind die Fliessgeschwindigkeiten sowohl zeitlich wie auch räumlich sehr *variabel.* Einerseits fliesst das Grundwasser in Karströhren und Höhlen mit hohen Geschwindigkeiten von bis zu einigen 100 Metern pro Stunde. Andererseits bewegt es sich in schmalen Klüften und in Gesteinsporen der Karbonatgesteine sehr langsam. Karstquellen schwanken in ihrer Ergiebigkeit stark in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen und können bei Niederschlagsereignissen in kürzester Zeit extreme Schüttungen erreichen *(Abb. 4).* Karst-Grundwasserleiter sind in der Regel durch das Fehlen einer effektiv filtrierenden Bodenschicht *sehr anfällig* gegenüber Schadstoffeinträgen, weshalb Karstwässer vor allem im Zuge von Niederschlagsereignissen oft mikrobiell beeinträchtigt sind. Deshalb muss Karstwasser vor der Verwendung als Trinkwasser in den meisten Fällen einer *Aufbereitung* unterzogen werden.

In *Kluft-Grundwasserleitern* wird die Fliessgeschwindigkeit von der Öffnungsweite der Klüfte, von deren Häufigkeit und von deren Vernetzung bestimmt. Speicher- und Reinigungswirkung sind meist gering und ebenfalls vom Zerklüftungsgrad abhängig. Zu den wichtigen Kluft-Grundwasserleitern in der Schweiz gehören kristalline Gesteine, nicht verkarstete Kalke und Kalkschiefer. Die Sandstein- und Nagelfluhgesteine der Molasse im Mittelland sind ebenfalls Kluft-Grundwasserleiter, wobei dort das Grundwasser auch entlang der Schichtfugen und zum Teil auch in Poren fliesst. Starkniederschläge führen bei Quellen in diesen Gebieten ebenfalls zu einem Anstieg der Quell-

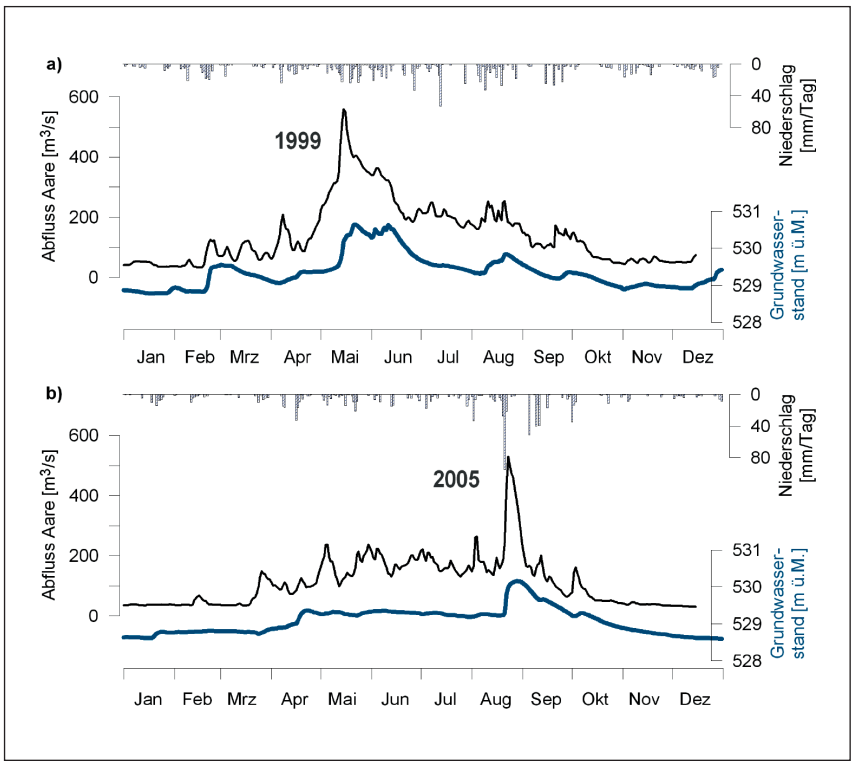


Abb. 2 Jahresgang des Abflusses der Aare bei Thun und des Grundwasserstandes an der NAQUA-Messstelle *Oberwichtrach* (BE) jeweils für die Jahre 1999 (a) und 2005 (b). Die hydraulische Anbindung wird durch den bei Hochwasser nur leicht verzögerten Anstieg des Grundwasserspiegels gegenüber der Aare belegt, wogegen das nachfolgende Absinken der Grundwasserstände deutlich träger vonstatten geht.

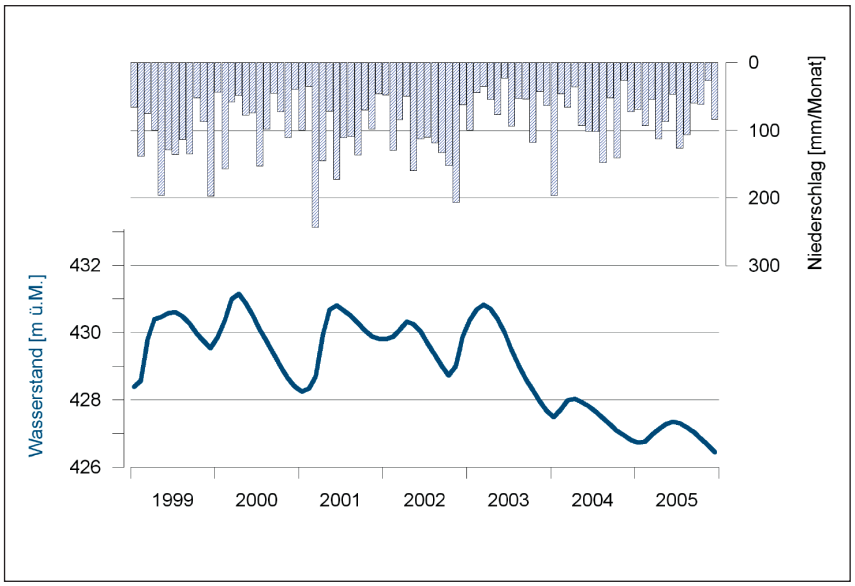


Abb. 3 Grundwasserstand in den Dünnerngäuschottern in Niederbipp (BE) zwischen 1999 und 2005. Das Grundwasser wird hier durch Niederschläge, durch unterirdische Zuflüsse aus der Balsthal-Klus sowie durch unterirdische Karstzuflüsse aus dem Jura gespeist. Der Grundwasserstand an der NAQUA-Station *Niederbipp* ist gegenüber niederschlagsreichen und trockenen Perioden um mehrere Monate verzögert und erreichte während des Hochwassers 2005 sogar einen neuen Tiefststand der letzten 20 Jahre für den Monat August.

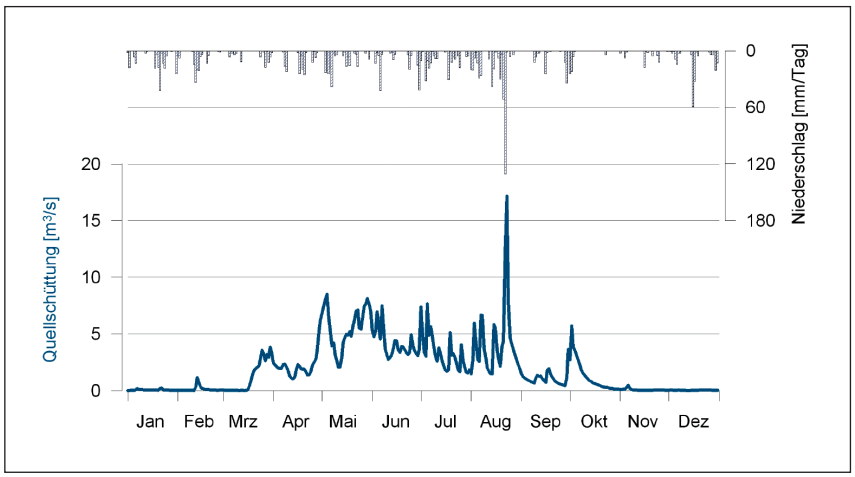


Abb. 4 Tagesmittelwerte der Quellschüttung an der NAQUA-Station *Schlichenden Brünnen in Muotathal* (SZ) des Jahres 2005. Die Quelle entwässert das ausgedehnte Höhlensystem des Hölloch und zeigt beispielhaft das Verhalten von Karstquellen als unmittelbare Folge der Witterungsverhältnisse an. Im Zuge der Starkniederschläge von August 2005 erreichte die Quellschüttung innerhalb kürzester Zeit einen neuen Spitzenwert von ca. 21 m³/s, wobei Messungen ergaben, dass dabei der Grundwasserspiegel innerhalb des Karstsystems um rund 300 m anstieg.

schüttung, doch ist dieser meist stark gedämpft und länger anhaltend.

3. Auswirkungen steigender Grundwasserspiegel

3.1 Reduziertes Aufnahmevermögen des Untergrundes

Hochwasser sind in der Regel die unmittelbare Folge aussergewöhnlicher meteorologischer Ereignisse. Dennoch hängt das Ausmass eines Hochwassers vom Zusammenspiel unterschiedlichster Faktoren im Einzugsgebiet ab: Niederschlagsmenge, Schneefallgrenze, Schneeschmelze, Verdunstung, Bodensättigung und aktueller Grundwasserstand [4, 8].
Die Böden und Lockergesteins-Grundwasserleiter insbesondere in den Talebenen weisen generell eine hohe Wasseraufnahmekapazität auf. Sie können bei Niederschlagsereignissen als Zwischenspeicher dienen, indem sie einen Teil des Wassers aufnehmen und somit dem Oberflächenabfluss vorübergehend entziehen. Ist der Untergrund jedoch nach einer längeren Regenperiode wassergesättigt und der Grundwasserstand hoch, ist die Wasseraufnahmekapazität stark reduziert *(Abb. 5)*. Grundwasserleiter mit hohen Grundwasserständen exfiltrieren zudem verstärkt in Oberflächengewässer und erhöhen deren Abfluss. Starkniederschläge bis in grosse Höhenlagen, die mit Schneeschmelze, wassergesättigten Böden und hohen Grundwasserständen einhergehen, bergen ein besonders hohes Hochwasserpotenzial.

Fallbeispiel Aaretal (BE) 1999

Die beiden *Starkniederschlagsperioden* vom 10. bis 15. Mai und vom 22. bis 24. Mai 1999 führten in der Schweiz zu grossen Hochwasserschäden [9]. Diese lagen in zwei- bis dreistelliger Millionenhöhe, bedingt durch die massiven Überschwemmungen beinahe aller Voralpenseen sowie ihrer Zu- und besonders ihrer Abflüsse. Wie kam es zu diesem sogenannten Jahrhunderthochwasser? Zunächst fielen im April 1999 150 bis 200 % der für diesen Monat üblichen Niederschlagsmenge. Dies führte zu einer *starken Durchnässung* der Böden und zu einem ausgeprägten Anstieg der Grundwasserspiegel. Um den 25. April setzte dann eine intensive Wärmeperiode ein, die zu *Schneeschmelze* bis in hohe Lagen und damit zu einem stark erhöhten Oberflächenabfluss führte. Am Thunersee im Berner Oberland führte allein die durch die Schneeschmelze zugeführte Wassermenge zu einem Seepegelstand nahe der Schadensgrenze. Unter den wassergesättigten Bodenverhältnissen genügte dann ein relativ unbedeutendes Niederschlagsereignis (Jahreswiederkehr < 3 Jahre), um einen Wasserstand des Thunersees zu erzeugen, der den bisherigen Höchststand aus dem Jahre 1910 um fast 50 cm übertraf. Dies wiederum verursachte in der Aare in Thun einen *Rekordabfluss* von 570 m³/s, der um rund 40 % über dem bisherigen Messwert aus dem Jahre 1970 lag [9]. In *Abbildung 2b* ist dieses Beispiel des Zusammenspiels von initialem Grundwasserstand und nachfolgendem Flusshochwasser anhand der NAQUA-Messstelle *Oberwichtrach* (BE) dargestellt.

3.2 Flurüberschwemmungen

In den Talebenen mit Lockergesteinsfüllung steht das Grundwasser oft in enger *hydraulischer Wechselwirkung* mit dem Oberflächen-

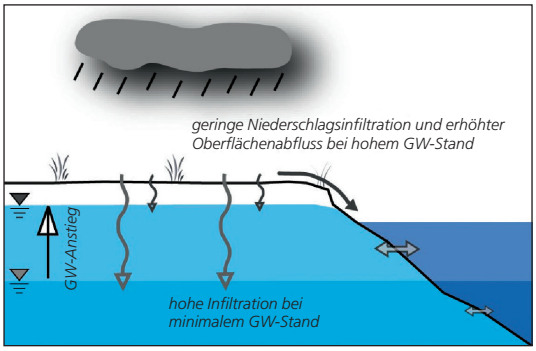


Abb. 5 Reduzierte Infiltration in den Untergrund aufgrund eines verringerten Wasseraufnahmevermögens, erhöhten Oberflächenabflusses und erhöhten Austauschs mit dem Fliessgewässer bei hohen Grundwasserständen. *(GW = Grundwasser)*

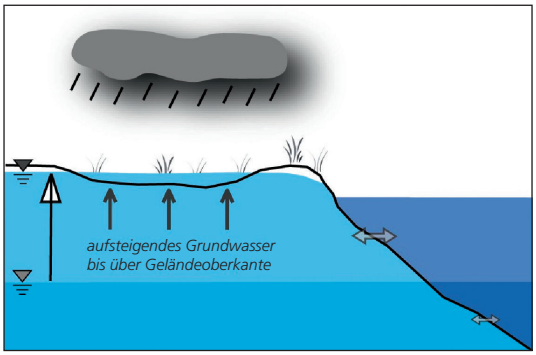


Abb. 6 Flurüberschwemmung durch aufsteigendes Grundwasser.

gewässer. Steigt der Wasserstand im Fluss oder im See an, so reagiert das hydraulisch angebundene Grundwasser entsprechend. Prinzipiell steigt bei Hochwasser der Druckspiegel in gespannten Grundwasserleitern rascher als in ungespannten Grundwasserleitern. Im Extremfall erreicht der freie Grundwasserspiegel die Landoberfläche und löst eine Überschwemmung aus *(Abb. 6)*. So verwandelte z. B. beim Hochwasser 2005 ansteigendes Grundwasser die Felder im tiefer liegenden *Kulturland im Freiamt* (AG) zu regelrechten Seen [10, 11]. Oberflächennahe, geringmächtige Grundwasserleiter bergen bei Hochwasser und Starkniederschlägen ein besonders hohes Risikopotenzial.

Fallbeispiele für Intensitäts-/Gefahrenkarten

Die Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen durch hohe Grundwasserstände kann mittels Intensitäts- und Gefahrenkarten beurteilt werden: Das Hochwasser der *Rhone im Wallis* vom 14. und 15. Oktober 2000 hatte einen sehr starken Anstieg der Grundwasserstände zur Folge, welche lokal zu Überschwemmungen führten [9]. Eine nachträgliche statistische Auswertung der Grundwasserstände innerhalb der Talebene erlaubte dabei die Erstellung einer Karte *(Abb. 7),* welche die Gebiete der Rhoneebene anzeigt, in denen im Zuge eines Hochwassers durch einen starken Grundwasseranstieg Kulturland und Siedlungen überschwemmt werden könnten [12]. Im Rahmen der geplanten dritten Rhone-Korrektion wird diese Karte derzeit überprüft und verfeinert.

In ähnlicher Weise hat das *Bureau de recherches géologiques et minières* (BRGM) die Überschwemmungen der *nordfranzösischen Somme* im Oktober 2001 zum Anlass genommen, einen landesweiten *Gefahrenatlas* zu erarbeiten. Eine Modellierung der Hochwasserverhältnisse im Oktober 2001 zeigte, dass damals rund 80 % des Abflusses der Somme aus exfiltrierendem Grundwasser stammte und nur 20 % aus direktem Oberflächenabfluss [2]. Der Gefahrenatlas soll für ganz Frankreich die Zonen ausweisen, die bei Hochwasser infolge eines Grundwasseranstiegs gefährdet wären. Er wird – basierend auf dem quantitativen Grundwasserbeobachtungsnetz des BRGM und auf der vollständigen Kartierung von rund 1400 Grundwasserleitern – ein wertvolles Hilfsmittel für die Vorhersage von zukünftigen Überschwemmungen in Frankreich darstellen.

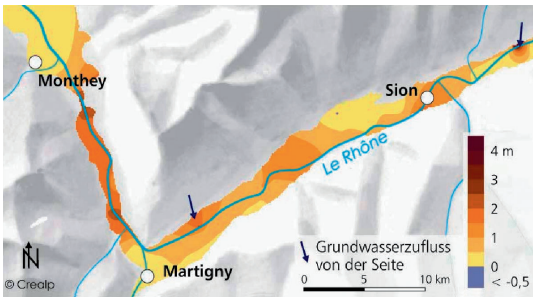


Abb. 7 Hochwasserereignis vom Oktober 2000 im Rhonetal: Ausschnitt aus der Karte der maximalen Amplitude des Grundwasserstandes am 16. Oktober 2000 [12].

Im *Freistaat Sachsen* stiegen während des Hochwassers von 2002 die Grundwasserstände in der Landeshauptstadt *Dresden* innerhalb kürzester Zeit um bis zu 5 m an und gingen auch in den darauffolgenden Monaten nur langsam auf ihre Normalwerte zurück. Die Stadt Dresden hatte somit nicht nur mit dem verheerenden Hochwasser selbst, sondern auch nach Beseitigung der Schäden und Instandstellung der Infrastruktur weiter mit dem Phänomen von hohen Grundwasserständen nach einem Hochwasser zu kämpfen. Ein Forschungsprojekt unter der Leitung des Umweltamtes der Landeshauptstadt Dresden bewertete daraufhin exemplarisch die Auswirkungen des Hochwassers auf den urbanen Grundwasserkörper [13]. Im Rahmen dieser Studie wurden Karten des Stadtgebiets u. a. für die Grundwasserflurabstände während des Extremereignisses und daraus abgeleitet grundhochwasserbedingte Einschränkungen z. B. der Tiefbaupotenziale erstellt. Die Ergebnisse liefern einerseits für die Vollzugsbehörde unmittelbar nutzbare Handlungsempfehlungen, und andererseits verallgemeinerbare Aussagen zu Beeinträchtigung von Talgrundwasserleitern in vergleichbaren urbanen Gebieten Deutschlands.

3.3 Flutung von Gebäuden und Infrastruktur

Gebäude werden im Allgemeinen so errichtet, dass ihr *Untergeschoss* oberhalb des höchsten bis dato beobachteten Grundwasserstandes liegt. Durch Unkenntnis (längere Perioden trockener Jahre) und infolge zunehmender Grundstückspreise und fehlender Bauflächen in Siedlungsgebieten werden Gebäude immer häufiger tiefer in den Untergrund gebaut und stehen somit oft im Bereich des saisonal schwankenden Grundwasserspiegels. Bei Hochwasserereignissen kann der Grundwasserspiegel nun so stark ansteigen, dass er die Untergeschosse erreichen und überschwemmen kann *(Abb. 8)*. Abhilfe können Gebäudekonstruktionen schaffen, welche gegenüber Überschwemmungen infolge hohen Grundwasserstandes (z. B. durch Wannenfundamente), aber auch vor Beschädigungen durch zunehmenden Grundwasserdruck baulich geschützt werden. Kurzfristig kann eine nachhaltige Beeinträchtigung der Statik auch durch eine gezielte Gegenbelastung im Gebäudeinneren verhindert werden.

Fallbeispiel Thun (BE) 1999

Im Thuner Gwattquartier wurden im Mai 1999 im Zuge eines Hochwassers mehrere hundert Keller durch Grundwasseranstieg überflutet [14]. Wegen der geringen Fliessgeschwindigkeit im Grundwasserleiter sanken die Grundwasserstände in der Folge weitaus langsamer als der Thunersee- und der Aarepegel. Dieser Umstand machte ein sofortiges Auspumpen der überschwemmten Kellerräume direkt nach Absinken des Seepegels unmöglich, da sonst der hohe Grundwasserdruck zu einem stetigen Nachfliessen in die Gebäude geführt hätte, respektive bei wasserdicht gebauten Fun-

damenten der Grundwasserauftrieb erhebliche bauliche Schäden hätte verursachen können. Der gleiche Effekt führte dazu, dass die Unterführung am Bahnhof Gwatt in Thun lange nicht ausgepumpt werden konnte, da die Fahrbahn sonst durch das Grundwasser angehoben worden wäre. Messungen des Grundwasserstandes lieferten in diesem Fall die notwendigen Grundlagendaten, um den optimalen Zeitpunkt für das Auspumpen festzulegen.

Fallbeispiele Sarnen (OW) und Thun (BE) 2005

Wie im Jahr 1999 wurden in der Schweiz auch beim Hochwasser vom August 2005 unzählige Keller durch eindringendes Grundwasser überschwemmt. Im *Kloster in Sarnen* waren zwar bei Renovierungsarbeiten aktuelle Sicherheitsnormen berücksichtigt worden; dies konnte jedoch massive Schäden durch eindringendes Grundwasser nicht verhindern. Die historischen Parkettböden wurden an einigen Stellen bis zu einem Meter hoch aufgewölbt. Vermutlich war der entstandene Grundwasserdruck der höchste seit dem Bau des Klosters im Jahre 1615 [15]. Ein gutes Beispiel, wie das Schadenspotenzial von grundwasserbedingten Überschwemmungen vermindert werden kann, sind die Gebäude einer Firma für elektrotechnische Anlagen im *Thuner Gwattquartier* [16]. Das Unternehmen hat Konsequenzen aus den Schäden des Hochwassers 1999 gezogen, als durch den Auftrieb des Grundwassers der Betonboden zerstört worden war. Bei der Reparatur der Schäden wurden deshalb Druckentlastungsrohre in das Fundament eingebaut. Sobald der Druck für den Gebäudeboden zu gross wird, steigt das Wasser in den Rohren auf, flutet allmählich den Raum und erzeugt so einen Gegendruck. Dieses System lässt genügend Zeit, wasserempfindliches Material rechtzeitig zu evakuieren, und verhindert gleichzeitig grösseren Sach- und Gebäudeschaden. Die Produktion musste zwar auch beim Hochwasser 2005 während einer Woche ruhen, doch Schäden und Ausfall blieben im Vergleich zu 1999 gering.

3.4 Rutschungen und Hangmuren

Die hydrogeologischen Verhältnisse spielen eine entscheidende Rolle bei der Entstehung von Massenbewegungen. Hanginstabilitäten beruhen auf Veränderungen des Gleichgewichts von rückhaltenden und treibenden Kräften infolge physikalischer und/oder geochemischer Prozesse, die ihrerseits durch verschiedene Faktoren gesteuert werden [17, 18]. Während zum Beispiel Verwitterungsprozesse langfristig die Stabilität von Hängen beeinflussen, sind Starkniederschläge oft der auslösende Faktor einer plötzlichen Massenbewegung [4].
Dabei kommen verschiedene Aspekte zum Tragen *(Abb. 9):* Durch das kurzfristige Anfallen grosser Niederschlagsmengen wird eine Wassersättigung des Untergrundes erreicht. Dies führt zu einer *Massenerhöhung des Hangpakets* und damit zur Zunahme der hangtreibenden Kräfte. Gleichzeitig kann sich das infiltrierende Wasser auf einem geringer durchlässigen Horizont stauen und durch den dann erhöhten *Wasserdruck* die Scherfestigkeit des Gesteins herabsetzen. Diese Horizonte dienen als *Gleitbahnen* von Rutschungen; im Festgestein kann der Wasserüberdruck in den Klüften zu Felsstürzen führen. Im Falle einer *Wasserübersättigung* werden v. a. in Lockermaterial, wie Moränen und Hangschutt, ganze Gesteinspakete durchtränkt, wodurch sich ein Gemisch aus Gestein, Bodenmaterial und Wasser bilden und als Murgang abfliessen kann [17].

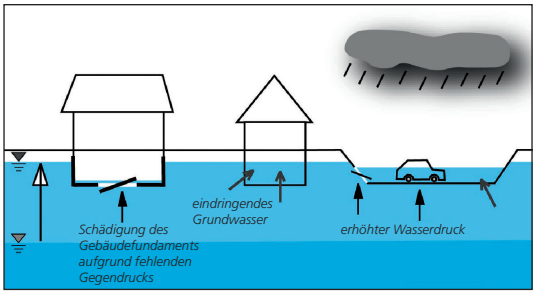


Abb. 8 Flutung und Beschädigung von Gebäuden und tiefliegender Infrastruktur infolge steigenden Grundwasserspiegels.

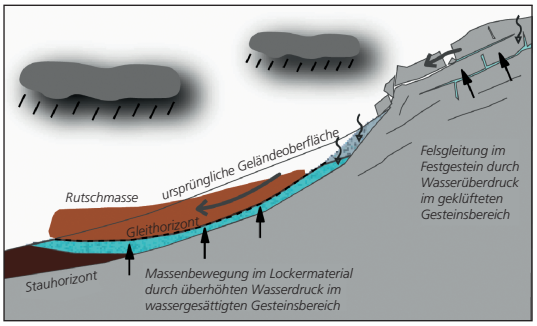


Abb. 9 Schematische Darstellung der grundwasserbedingten Mechanismen zur Auslösung von Massenbewegungen im Zuge von Starkniederschlägen.

Das Schadenspotenzial von Massenbewegungen ist je nach geologischer Situation und der im Gefahrenbereich befindlichen Sachwerte höchst unterschiedlich. Mitunter kann es aber bis zur Zerstörung ganzer Siedlungen kommen [19]. Kleinere oberflächennahe Rutschungen verursachen eher geringe Schäden. Allerdings können Beeinträchtigungen auch ohne oberflächlich sichtbare Hangbewegung entstehen, wie z. B. Gebäuderisse und zerstörte Rohrleitungen. Auch solche Beeinträchtigungen müssen ernst genommen werden; sie belegen die generelle Anfälligkeit eines Hanges für Massenbewegung und können ein Anzeichen für grössere und gravierendere Ereignisse im Zuge späterer Starkniederschläge sein.

Fallbeispiel Ostschweiz/Berner Oberland 1999

In der Schweiz am häufigsten sind lokal begrenzte, oberflächennahe Rutschungen sowie Murgänge, die praktisch bei jedem Starkniederschlagsereignis auftreten [4]. Während der Niederschlagsperiode vom 11. bis 15. Mai 1999 fielen in der Ostschweiz teilweise deutlich über 200 mm Niederschlag. Auch im Berner Oberland wurden verbreitet Werte von über 100 mm gemessen. Dies führte – in Verbindung mit dem hohen Grad der initialen Wassersättigung – allein im Berner Oberland zu mehr als 100 Rutschungen und Murgängen [17]. Die räumliche

Verbreitung dieser Massenbewegungen weist eine gute Korrelation mit der Niederschlagsverteilung, insbesondere mit Gebieten > 100 mm Niederschlag auf. Der Anteil der Schäden, welche aus Massenbewegungen resultieren, lag laut [17] für die Starkniederschläge vom Mai 1999 bei rund 10 bis 15 % der Gesamtschadenssumme.

4. Beeinträchtigte Grundwasserqualität

4.1 Verstärkte Infiltration aus Fliessgewässern

Die Grundwasserqualität in den Schotterebenen der grossen Flusstäler, aus welchen in der Schweiz rund die Hälfte des genutzten Grundwassers stammt, hängt stark von der Wasserqualität des jeweiligen Fliessgewässers ab. *Schadstoffe* gelangen mit dem infiltrierenden Flusswasser in den Grundwasserleiter und können ufernahe Pumpbrunnen erreichen [8]. Bei normalen Wasserständen reicht die *natürliche Filterwirkung* zwischen Fluss und Pumpbrunnen jedoch in der Regel aus, um im Brunnen Wasser guter Qualität fördern zu können [20, 21]. Anders sieht es bei Hochwasser aus: Einerseits ist das Flusswasser dann oft stark durch freigesetzte Schadstoffe und *pathogene Keime* belastet. Andererseits wird durch den hohen Flusswasserpegel die Infiltration in das Grundwasser verstärkt und es kommt innerhalb des Grundwasserleiters zu erhöhten Fliessgeschwindigkeiten. Auswaschungen von feinkörnigem Sedimentmaterial aus der Flusssohle und den Uferbereichen (Dekolmation) kann die Selbstreinigungskraft des Untergrundes zusätzlich herabsetzen *(Abb. 10)*. Diese Prozesse sind v. a. auch bei künstlichen Eingriffen in das Flussbett, wie z. B. im Rahmen von Revitalisierungsmassnahmen, zu berücksichtigen [22, 23].

Fallbeispiel Aareinfiltration

Zum Schutz ufernaher Fassungen ist es wichtig, den Anteil des Flusswasserinfiltrats an der Gesamtfördermenge des Brunnens zu kennen, wozu u. a. die Betrachtung der natürlichen Isotope des Wassermoleküls (z. B. der stabilen Isotope Sauerstoff-18 und Deuterium) einen wichtigen Beitrag leisten kann [24]. Das Flusswasser besitzt dabei in der Regel eine andere Isotopensignatur als das durch Niederschlagsinfiltration gebildete Grundwasser. *Abbildung 11* zeigt das Beispiel der Aare bei Aarberg, wo anhand der Sauerstoffisotopenverhältnisse der Anteil des Aareinfiltrats am Grundwasser bestimmt werden konnte [25]. Dabei zeigte sich, dass das an den Pumpbrunnen geförderte Grundwasser zum Untersuchungszeitpunkt teilweise zu über 50 % aus infiltriertem Flusswasser bestand, wobei dieser Anteil deutlichen zeitlichen Schwankungen unterworfen sein kann. Ähnliche Mischungsmodelle können auch mit anderen Umwelttracern, wie z. B. der Temperatur oder der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers, erstellt werden [20]. Daneben gibt es auch Ansätze, die Biodiversität im Oberflächen- und Grundwasser als natürlichen Indikator zur Abschätzung der Flusswasserinfiltration heranzuziehen [26, 27].

Grundlagen zum Abschätzen der *Mischungsanteile* infiltrierten Flusswassers und dessen Aufenthaltszeiten im Grundwasser liefern auch Versuche mit künstlichen *Markierstoffen* [28]. So wurde im Jahr 1994 im Auftrag des heutigen Amtes für Umwelt des Kantons Solothurn die Aare bei Biel (BE) mit 150 kg des Markierstoffes *Uranin* eingefärbt, um die

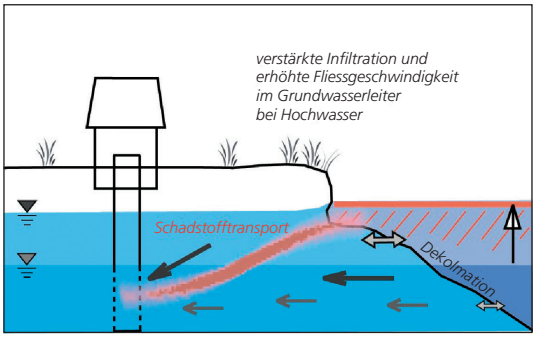


Abb. 10 Erhöhte Flusswasserinfiltration und schnellere Fliessgeschwindigkeit im Grundwasserleiter während Hochwasserereignissen.

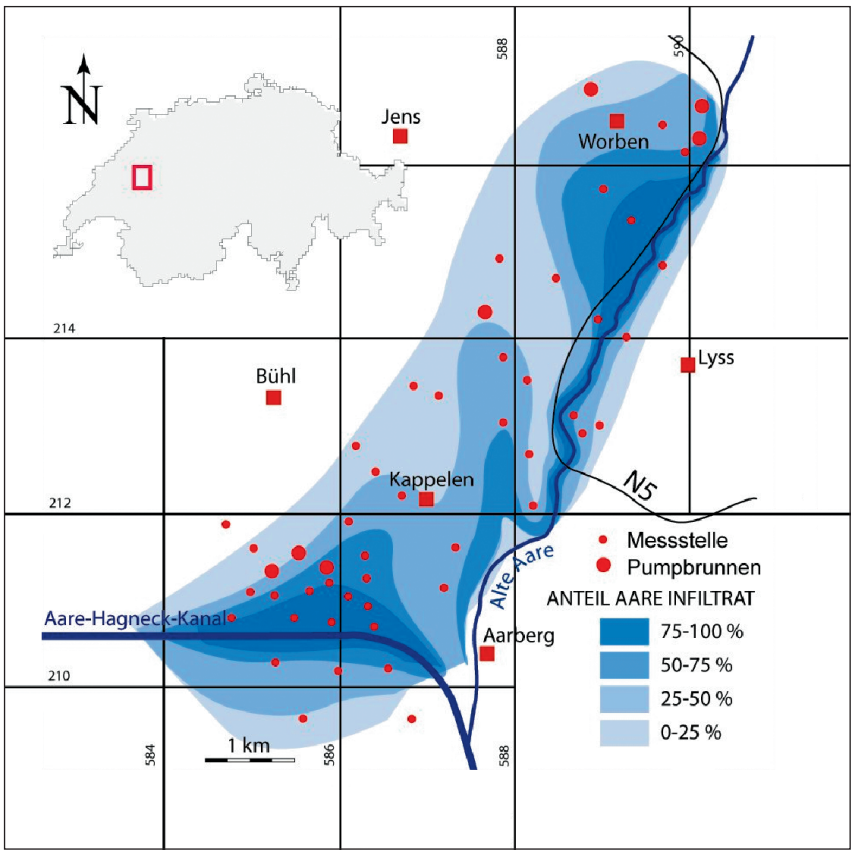


Abb. 11 Anteil des Aareinfiltrats am Grundwasser, bestimmt anhand des Sauerstoffisotopenverhältnisses an flussnahen Grundwassermessstellen (nach [25]).

hydraulische Verbindung zwischen dem Fluss und den für die Trinkwasserversorgung wichtigen ufernahen Grundwasserfassungen zu belegen, resp. zu quantifizieren [29]. Die Fliessverhältnisse in der Aare während des Versuches entsprachen einem mittleren Niedrigwasserabfluss. An 21 Pumpbrunnen wurde eine Anbindung an den Fluss nachgewiesen, welche unterschiedlich stark ausgeprägt war. Diese Ergebnisse legen nahe, dass vor allem bei Hochwasser mit erhöhter Verschmutzung der Aare mobile und persistente Schadstoffe in kurzer Zeit und in erhöhten Konzentrationen die Grundwasserfassungen erreichen können.

4.2 Überflutung von Pumpbrunnen

Bei Überschwemmungen können auch Pumpbrunnen und deren *direktes Einzugsgebiet* – z. B. der Bereich der Grundwasserschutzzonen – betroffen sein. Verschmutztes Oberflächenwasser kann dabei in den Untergrund versickern und in die Fassung gelangen *(Abb. 12)*. Fällt die Stromversorgung aus – was in solchen Überschwemmungssituationen nicht ungewöhnlich ist – kann die Förderung, Aufbereitung oder Verteilung von Grundwasser unterbrochen und damit die Wasserversorgung vorübergehend stillgelegt sein. Dringt verschmutztes Wasser in den Förderbrunnen ein, muss dieser mit hohem Aufwand gereinigt und desinfiziert werden.

Fallbeispiel Aaretal (BE) 1999

Während des Mai-Hochwassers 1999 war die Aare unterhalb von Thun deutlich mit Fäkalbakterien belastet. Mehrere ufernahe Pumpbrunnen im Aaretal wurden überflutet. An diesen Fassungen drohte damit Gefahr, dass verschmutztes Aarewasser in das Grundwasser eindringen könnte. Andere Orte hingegen hatten trotz Überflutung von Pumpbrunnen keine Engpässe in der Wasserversorgung, weil sie auf durch das Hochwasser unbeeinflusstes Grundwasser aus Quellen zurückgreifen konnten [30]. Im *Raum Biel/Aarberg* traten in einer ufernahen Grundwasserfassung am Hagneck-Kanal Probleme auf. Ein Pumpbrunnen musste dort wegen mikrobiologischer Verunreinigungen und hoher Grundwasserstände für längere Zeit abgestellt bleiben. Die *Stadt Biel* musste daher ihren Wasserbedarf vermehrt durch aufbereitetes Seewasser decken [31].

4.3 Aufschwemmen von Öltanks

Bei Hochwasser wird die Qualität des Oberflächenwassers und somit auch des Grundwassers immer wieder durch das Auslaufen von Heizöl gefährdet. Ursache dafür ist meist der Auftrieb durch hohe Grundwasserstände oder Überschwemmungen, wodurch die Heizöltanks aus ihrer Verankerung gehoben und zum Umstürzen gebracht werden *(Abb. 13)*. Das Öl breitet sich dann auf der Wasseroberfläche aus, und kann sich beim Rückgang des Wassers aus den überschwemmten Gebieten auf der Geländeoberfläche absetzen oder in den Untergrund gelangen.
Das natürliche Abbauvermögen des Bodens gegenüber Mineralölverunreinigungen ist allerdings relativ hoch, sodass entsprechende Konzentrationen bereits nach mehreren Wochen bis Monaten deutlich zurückgehen [32]. Aus präventiven Gründen werden stark verschmutzte Bodenschichten jedoch meistens *abgetragen,* um einen Eintrag des Öls in das Grundwasser zu verhindern. Im luzernischen Inwil veranlassten die Behörden nach dem Hochwasser 2005, mit Öl verunreinigtes Gras zu mähen und in einer Verbrennungsanlage zu entsorgen [33]. Erreichen Mineralölbestandteile erst einmal das Grundwasser, so kann

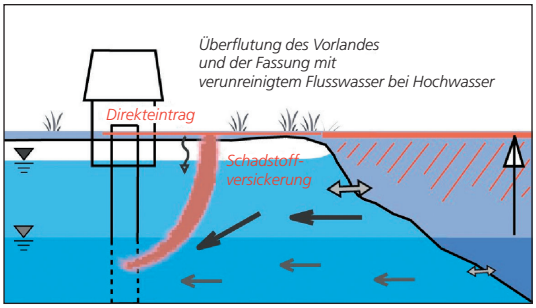


Abb. 12 Eindringen von Schadstoffen in ufernahe Grundwasserbrunnen durch Überflutung der Fassungsanlage bzw. Infiltration in unmittelbarer Umgebung.

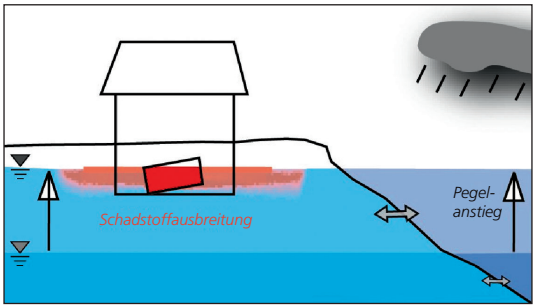


Abb. 13 Aufschwemmen von Öltanks durch Grundwasserauftrieb in Untergeschossen von Gebäuden, wie geschehen beim Hochwasser vom Oktober 2000 in Locarno durch massiven Pegelanstieg des Lago Maggiore (nach [34]).

dies über einen langen Zeitraum eine Verwendung des Wassers als Trinkwasser verunmöglichen. Zum Beispiel wurde deshalb in Littau (LU) eine Trinkwasserfassung vor rund 30 Jahren geschlossen und konnte bis heute nicht wieder in Betrieb genommen werden, da der Grundwasserleiter nach wie vor mit Kohlenwasserstoffen kontaminiert ist [33].

Fallbeispiel Locarno (TI) 2000

Vom 13. bis 17. Oktober 2000 fielen im Simplongebiet intensive Niederschläge, die auch zur Katastrophe von Gondo führten. Im Zuge der Starkniederschläge erreichte der Lago Maggiore, dessen Abflusskapazität am Auslass bei Sesto Calende begrenzt ist, einen sehr hohen Pegelstand. Verstärkt wurde dieser Effekt durch seitliche Zuflüsse, welche einen *Stau-effekt* im nördlichen Bereich des Sees bewirkten. Analog zum Seepegel stieg dort das Grundwasser rapide an und überschwemmte die Untergeschosse von Wohngebäuden in Locarno. Infolgedessen schwammen zahlreiche Heizöltanks auf und liefen aus. Da sich das ausgelaufene Heizöl nicht nur oberflächlich ausbreitete, sondern teilweise auch wieder mit dem Wasser in den Untergrund zurücksickerte, wurde das Grundwasser massiv verschmutzt [34].

4.4 Mobilisierung von Schadstoffen

Schadstoffe werden je nach individuellem Umweltverhalten, mikrobieller Aktivität der Humusschicht und Art der Pflanzendecke unterschiedlich stark im Boden zurückgehalten [35]. Ist die Sickerrate nach Starkniederschlägen aussergewöhnlich hoch, werden Schadstoffe weit weniger vom Boden aufgenommen und können mit dem Sickerwasser ins Grundwasser gelangen *(Abb. 14)*. Verstärkt wird dieses Phänomen durch das Vorliegen präferentieller Fliesswege, durch die das versickerte Regenwasser schnell und mit deutlich verminderter Filterwirkung das Grundwasser erreichen kann [36]. Ebenso können während Trockenphasen akkumulierte Schadstoffe durch nachfolgend hohe Grundwasserstände aus dem Untergrund ausgewaschen werden.

Fallbeispiel Karstquelle

Die Verminderung der Wasserqualität während bzw. nach Starkniederschlagsereignissen stellt für zahlreiche Quellfassungen ein Problem dar. In schnell reagierenden Grundwasserleitern, wie im Karst, kann so an Quellen z. B. die Trübung des austretenden Wassers während Starkniederschlägen sehr schnell zunehmen [37]. *Abbildung 15* zeigt das Beispiel einer Karstquelle, an der infiltriertes Niederschlags- und Bachwasser zu einer unmittelbaren Reaktion der Quellparameter führt. Ein Niederschlagsereignis von insgesamt etwa 120 mm zieht binnen kürzester Zeit einen Anstieg der Quellschüttung sowie ein Ansprechen der physikalisch-chemischen Wasserparameter nach sich. Der Anstieg der Temperatur sowie die Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit des Quellwassers zeigen dabei die Ankunft von frisch infiltriertem und somit potenziell schadstoffbelastetem Niederschlagswasser an. Die signifikante Erhöhung der Trübung belegt zudem die Mobilisierung bzw. den direkten Transport von Partikeln entlang präferentieller Fliesswege aus oberflächennahen Bereichen zur Quelle, wodurch in dieser Phase auch mit dem Auftreten von Fäkalbakterien z. B. durch Gülleausbringung gerechnet werden muss.

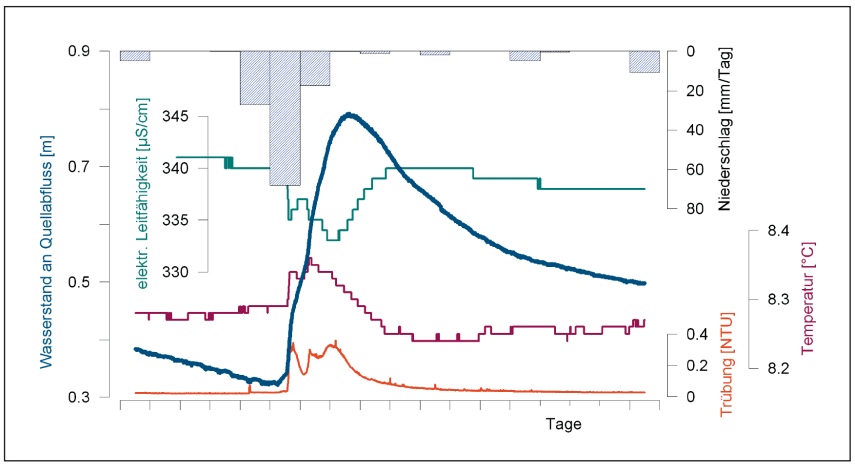


Abb. 15 Hydrogramm einer alpinen Karstquelle (NAQUA-Station NTQ 28) während eines Niederschlagsereignisses mit unmittelbarem Ansprechen der Quellschüttung und der physikalisch-chemischen Wasserparameter.

In der Praxis wird die *Trübung* deshalb als Indikator für eine mögliche Verschmutzung des Quellwassers eingesetzt. Das Gleiche gilt aber auch für Pumpbrunnen in Lockergesteinen, wo ein signifikanter Anstieg der Trübung auf eine mögliche Verschmutzung des geförderten Wassers hindeuten kann. Deshalb wird an vielen Fassungen bei einem Anstieg der Trübung meist vorsorglich das für die Trinkwasserversorgung genutzte Wasser behandelt bzw. verworfen, bis eine bakteriologische Untersuchung Klarheit darüber verschafft, dass das Wasser bedenkenlos konsumiert werden kann.

Fallbeispiel Nitratauswaschung

Im Rahmen einer Routineuntersuchung des Kantonalen Laboratoriums Bern wurden nach heftigen Niederschlägen im Oktober 2002 erhöhte Nitratwerte und Fäkalbakterien im Trinkwasser von *Oberwil bei Büren* (BE) nachgewiesen [38]. Dies war eine unmittelbare Folge der verstärkten Auswaschung von Schadstoffen aus dem Boden. Das Trinkwasser in Oberwil hatte bei heftigen Niederschlägen bereits häufiger erhöhte Nitratwerte aufgewiesen; Fäkalbakterien wurden jedoch zum ersten Mal entdeckt. Die Gemeinde Oberwil wurde nach diesem Ereignis eine Zeit lang nur mit Grundwasser aus der Talebene versorgt, welches unbelastet war.

Im *Unteren Thurtal* (TG) kam es während des trockenen Sommers 2003 zu einer vermehrten Speicherung von Nitrat bzw. von leicht mobilisierbarem organischem Stickstoff im Boden. Die einsetzenden Herbstniederschläge – respektive der einhergehende Grundwasseranstieg – führten dann zu einer Remobilisierung der Stickstoffvorräte und zum Auftreten erhöhter Nitrat-Konzentrationen im Grundwasser [39, 40].

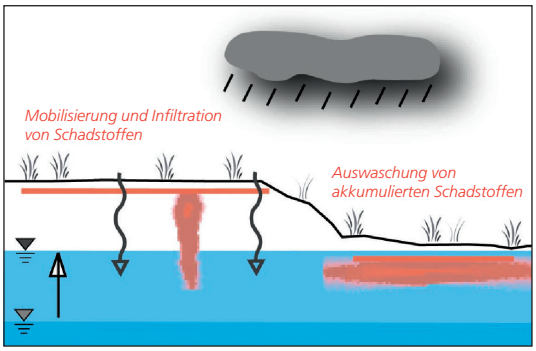


Abb. 14 Verminderte Rückhaltevermögen des Untergrunds und Remobilisierung von Schadstoffen aus dem Boden im Zuge von Starkniederschlägen.

5. Schlussfolgerungen

Meteorologische Extremereignisse führen in der Schweiz immer wieder zu massiven Überschwemmungen. Die Hochwasser der

Jahre 1999, 2005 und zuletzt auch wieder 2007 sind noch gut in Erinnerung. Gemäss jüngster Klima- und Hochwasser-Szenarien [41, 42] wird in der Schweiz die Häufigkeit von Starkniederschlägen und damit auch von Hochwasserereignissen in Zukunft noch weiter zunehmen.

Hochwassersituationen werden meist nur im Hinblick auf die direkten Auswirkungen der Oberflächengewässer wahrgenommen. Die Rolle, welches das Grundwasser in diesem Zusammenhang spielt, ist dabei weit weniger offensichtlich. Die Grundwasserverhältnisse können Überschwemmungen begünstigen oder gar bewirken, und sind auslösendes Moment von Massenbewegungen. Zudem ist die Qualität des Grundwassers bei Hochwasser verstärkt gefährdet. *Überwachungsmethoden, Präventivmassnahmen* und *Schadenfallszenarien* können dazu beitragen, die negativen Auswirkungen durch und auf das Grundwasser zu begrenzen. In jedem Fall ist die Kenntnis der hydrogeologischen Prozesse und der lokalen Verhältnisse für eine Einschätzung unabdingbar. Dies kann mittels *spezifischer Untersuchungen* und insbesondere durch die *Grundwasserbeobachtung* an geeigneten Beobachtungsdispositiven geschehen.

Laut [43] sind im Zuge des Hochwassers 2005 im Kanton Bern 5 % der Gebäudeschäden unmittelbar durch das Grundwasser verursacht worden. Generell können Hochwasser und deren Auswirkungen, vor allem im Bezug auf das Grundwasser, nur bedingt verhindert werden. Allerdings kann das Schadenspotenzial allfälliger Ereignisse reduziert werden, z. B. durch entsprechende *bauliche Anpassungen* an Gebäuden und anderen Installationen. Weiterhin können besonders sensible Bereiche, in denen Gebäude und Kulturland durch ansteigendes Grundwasser gefährdet sind, bestimmt und ausgewiesen werden [44]. Auf Basis solcher *Karten* wird das Schadensrisiko an Gebäuden und Kulturland vorhersagbar gemacht. Daraus können *Massnahmen* zur Anpassung der Bauzonen und Bodennutzung abgeleitet werden, wodurch letztendlich Schäden reduziert oder sogar verhindert werden können. Dies gilt auch und vor allem für Massenbewegungen. Gefahrenkarten mit Zonen erhöhter Hanginstabilität werden derzeit von den meisten Kantonen erarbeitet oder stehen bereits zur Verfügung.

In Bezug auf die Nutzung der *Ressource Grundwasser* haben sich verschiedene Überwachungsmethoden und Schadenfallszenarien bewährt, um rechtzeitig vor dem Konsum von verschmutztem Trinkwasser zu warnen und um auf andere, nicht verschmutzte Grundwasserfassungen ausweichen zu können. Dazu gehören *technische Massnahmen,* wie z. B. die vorsorgliche Wasseraufbereitung bei der Überschreitung von Indikatorparametern während eines Hochwasserereignisses. Auf jeden Fall sollten beim Bau von Trinkwasserfassungen die möglichen Auswirkungen von Hochwasser und Starkniederschlägen sowohl auf die Installationen als auch auf die Qualität des Grundwassers bereits bei der Planung mitberücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

[1] *Wricke, B.* (2004): Hochwasserkatastrophe 2002. Erfahrungen und Schlussfolgerungen der Wasserversorgungsunternehmen. Wasser, Abwasser 145: 181–188.

[2] *BRGM* (2001): Géosciences pour une terre durable. Rapport annuel 2001. Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Orléans, France.

[3] *BWG* (2000): Hochwasser 1999. Analyse der Ereignisse. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern-Ittigen, Studienbericht Nr. 10/2000.

[4] *Bezzola, G.R.; Hegg, C. (Ed.)* (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Umwelt-Wissen Nr. 0707, 215 S.

[5] *Greber, E.; Baumann, A.; Cornaz, S.; Herold, T.; Kozel, R.; Muralt, R.; Zobrist, J.* (2002): Grundwasserqualität in der Schweiz – NAQUA-TREND, das nationale Beobachtungsprogramm. Gas-Wasser-Abwasser, 3/2002, 191–101.

[6] *BUWAL, BWG* (2004): NAQUA – Grundwasserqualität in der Schweiz 2002/2003. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.

[7] *Buttet, P.; Eberhard, A.* (1995): Das Eidgenössische Grundwasser-Beobachtungsnetz. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, Hydrologische Mitteilungen 22.

[8] *Spreafico, M.; Weingartner, R. (Ed.)* (2005): Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 7, Bern, 137 S.

[9] *BWG* (2002): Hochwasser 2000. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern-Ittigen, Berichte des BWG, Serie Wasser 2.

[10] *Neue Nidwaldner Zeitung* (2005): Der Reussdamm hält vorerst noch dicht. 23.08.05.

[11] *Neue Luzerner Zeitung* (2005): Lage normalisiert sich zusehends. 27.08.05.

[12] *Fagerlund, G.* (2001): Etude des chroniques piézométriques en 2000 de la nappe alluviale du Rhône de Viège au Léman (Valais). Interprétation des réponses de l'aquifère face à la crue d'octobre 2000. Diplomarbeit, Centre d'hydrogéologie, Universität Neuenburg.

[13] *Landeshauptstadt Dresden, Umweltamt* (2005): Auswirkungen des Hochwassers 2002 auf das Grundwasser. Forschungsbericht, 69 S.

[14] *Berner Zeitung* (2005): Auspumpen nur mit dem Fachmann. 21.05.05.

[15] *Basler Zeitung* (2005): Der Schutzengel machte Pause. 29.08.05.

[16] *Der Bund* (2005): Hochgerüstet gegen die Flut. 06.09.05.

[17] *AGN* (2000): Ursachenanalyse der Hanginstabilitäten 1999. Bull. angew. Geol. 5: 3–152.

[18] *Keller, B.* (2003): Durch den Wolkenbruch vom 6./7. Juni 2002 ausgelöste gravitative Prozesse am Sonnenberg bei Luzern: Ereignisse, Simulationen und Beurteilung. Bull. angew. Geol. 8/2: 5–23.

[19] *Bollinger, D.* (2006): Der Bergsturz von Goldau 1806: Rückblick und Ausblick. Bull. angew. Geol. 11/2: 3–12.

[20] *Hoehn, E.; Cirpka, O.A.; Hofer, M.; Zobrist, J.; Kipfer, R.; Baumann, M.; Scholtis, A.; Favero, R.* (2007): Untersuchungsmethoden der Flussinfiltration – In der Nähe von Grundwasserfassungen. Gas-Wasser-Abwasser 7/07, 497–505.

[21] *Angehrn, D.* (2001): Keine Pflanzenschutzmittel im Trinkwasser. Gas-Wasser-Abwasser 12/01: 3–8.

[22] *Pfändler, S.; Wülser, R.; Biner, M.; Kaiser, H.-P.; Buchs, U.; Leuthardt, P.; Hoehn, E.; Krähenbühl, W.; Berdat, F.* (2007): Flussrevitalisierung – Auswirkungen im Einflussbereich von Trinkwasserfassungen. Gas-Wasser-Abwasser, 7/07, 507–519.

[23] *Regli, C.; Huggenberger, P.* (2007): Grundwasserschutz bei wasserbaulichen Eingriffen in Fliessgewässer. Gas-Wasser-Abwasser, 7/07, 521–528.

[24] *Etcheverry, D.* (2002): Valorisation des méthodes isotopiques pour les questions pratiques liées aux eaux souterraines. Isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern-Ittigen, Berichte des BWG, Serie Geologie 2.

[25] *WEA (Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern)* (1989): Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern – Seeland: Infiltration aus Hagneckkanal und Alter Aare. Bern.

[26] *Gonser, T.* (2003): Biologie der Grenzbereiche Fluss-Grundwasser und Fluss-Uferzone. Jahrestagung der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie in Basel, 10./11. Mai 2003.

[27] *Hunkeler, D.; Goldscheider, N.; Rossi, P.; Burn, C.* (2006): Biozönosen im Grundwasser – Grundlagen und Methoden zur Charakterisierung von mikrobiellen Gemeinschaften. Umwelt-Wissen Nr. 0603, Bundesamt für Umwelt, Bern, 113 S.

[28] *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-Ittigen, Berichte des BWG, Serie Geologie 3, Bern, 75 S.

[29] *AWW* (1996): Markierversuch Aare 03/1994 – Bestimmung der Aare-Infiltration in 23 Grundwasserfassungen des Kantons

Solothurn. Kantonales Amt für Wasserwirtschaft, Baudepartement des Kantons Solothurn.
[30] *Der Bund* (1999): Aaretal: Immer noch Probleme bei der Wasserversorgung. 11.06.99.
[31] *Energie Service Biel/Bienne* (1999): Geschäftsbericht.
[32] *Basler Zeitung* (2005): Trinkwasser ist nicht gefährdet – trotz des Hochwassers wenig Ölverschmutzung. 27.08.05.
[33] *TagesAnzeiger* (2005): Heizöl verschmutzt ganze Dörfer. 27.08.05.
[34] *Dupasquier, S.; Parriaux, A.* (2002): Typische Grundwasserverschmutzungen. Hydrologischer Atlas der Schweiz. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern-Ittigen.
[35] *Haderlein, S.* (2000): Chemische Spione im Untergrund. EAWAG news 48: 21–22.
[36] *Gimmi, T.* (2004): Verlagerung gelöster Stoffe durch den Boden ins Grundwasser. Schriftenreihe Umwelt Nr. 349, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 46 S.
[37] *Schudel, P.; Lange, J.; Leibundgut, C.* (2000): Karstquellen im Einzugsgebiet des Weigistbachs. Gas – Wasser – Abwasser, 11/00, 807–812.
[38] *Berner Zeitung* (2002): Fäkalbakterien im Wasser. 24.10.02.
[39] *AFU* (2004): Nitratauswaschung im Unteren Thurtal im Winter 2003/2004. Bericht vom 22. April 2004. Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen.
[40] *BUWAL, BWG, MeteoSchweiz* (2004): Auswirkungen des Hitzsommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369, Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 174 S.
[41] *OcCC* (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC), 168 S.
[42] *KOHS* (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Wasser Energie Luft 2007(1), 55–57
[43] *Berner Zeitung* (2005): Wer zahlt welche Schäden? 01.09.05.
[44] *Robins, N.S.; Forster, A.; Lewis, M.A.; Butcher, A.S.* (2003): Shallow and perched groundwater hazards and hazard mapping in the United Kingdom. Proceedings 1st International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk, Salamanca, Mexico, Vol. 2: 251–259.

Keywords
Hochwasser – Starkniederschlag – Grundwasserleiter – Grundwasserqualität – Schweiz

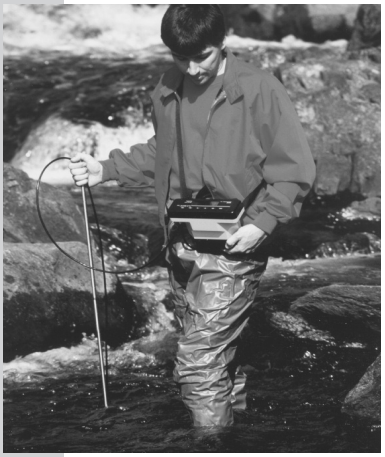
Adresse der Autoren
Marc Schürch, Dr. sc. nat.
marc.schuerch@bafu.admin.ch

Ronald Kozel, Dr. sc. nat.
Leiter Sektion Hydrogeologie.
ronald.kozel@bafu.admin.ch

Michael Sinreich
michael.sinreich@bafu.admin.ch

Bundesamt für Umwelt
Abteilung Hydrologie, Sektion Hydrogeologie
CH-3003 Bern
Tel +41 (0)31 324 77 58
Fax +41 (0)31 324 76 81

isiflex®
...wenn es sicher sein muss!
Klemmverbinder für Stahlrohre
aus duktilem Gusseisen, feuerverzinkt
■ für Gas PN 4 und Wasser PN 16
■ komplettes Programm von 3/8" – 4"
auch mit HTB-Dichtung
■ die Konstruktion der Verschraubung erlaubt einen abgewinkelten Einbau bis zu 3 Grad
SVGW SSIGE
Die Verbindungsprogramme von Reuflex bieten dem Anwender verschiedene Problemlösungen für die unterschiedlichen Einsatzbereiche in Haustechnik, Industrie und Landwirtschaft
Hess Metalle AG
Lerzenstrasse 11 · 8953 Dietikon
Tel. 044 740 25 25 · Fax 044 740 25 15
E-Mail: hessmetalle@bluewin.ch
www.hessmetalle.ch

imeth
messbar besser
Geschwindigkeits-Messung von Fliessgewässern
Für die Kalibrierung von Durchfluss-messern, Fremd-wasserunter-suchungen und allgemeinen Messung in Flüssen und Bächen.
Wichtig
• Messprinzip: magnetisch induktiv
• Keine beweglichen Teile
• Mobil
• Sehr präzise
• Unempfindlich gegenüber Feststoffen
• Datenspeicher

IMETH AG
Mess-, Steuer- und Prozessmesstechnik
Motorenstrasse 109
8621 Wetzikon 4
Tel. 044 931 38 88
Fax 044 931 38 99
info@imeth.ch
www.imeth.ch