Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie
DOI 10.1007/s00767-009-0109-x

FACHBEITRAG

Auswirkung einer künstlichen Hochwasserwelle auf den fließgewässernahen Grundwasserleiter

Stefan Banzhaf · Traugott Scheytt

Eingang des Beitrages: 1. 12. 2008 / Eingang des überarbeiteten Beitrages: 18. 3. 2009
© Springer-Verlag 2009

Kurzfassung Bei den Prozessen in der hyporheischen Zone handelt es sich häufig um instationäre Vorgänge, die insbesondere durch wechselnde hydraulische Randbedingungen, z. B. Hochwasserwellen im Oberflächengewässer, verursacht sind. Deren Auswirkungen sind allerdings meist schlecht abschätzbar. Deshalb wurde in der vorliegenden Untersuchung in einem kleinen Bach eine künstliche Hochwasserwelle gezielt ausgelöst, um deren Auswirkungen auf das Grundwasser zu untersuchen. Zur Beurteilung der Auswirkungen auf die Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser wurden die Parameter hydrostatischer Druck, Wassertemperatur und ionare Beschaffenheit untersucht. Bereits im Vorfeld wurden für dieses 2-stündige Ereignis mittels ins Grundwasser eingebrachter Temperaturlogger die Ganglinien der Grundwassertemperaturen über mehrere Wochen aufgezeichnet.

Die Auswertung des Feldversuches zeigt eine deutlich positive Korrelation von künstlicher Hochwasserwelle und Wasserständen im Grundwasser. Der Grundwasserstand reagiert ohne erkennbare Verzögerung auf den Durchgang der Hochwasserwelle. Der eigentliche Transport von Bachwasser ins Grundwasser, überprüft durch einen Tracer und die Messung von Indikatorparametern, konnte jedoch nicht belegt werden. Auch die Messungen der Temperaturen im Grundwasser während der Hochwasserwelle lassen einen Einfluss des zu diesem Zeitpunkt kühleren Bachwassers nicht klar erkennen. Die Ergebnisse zeigen, dass auch kurze und lokal beschränkte Änderungen der hydraulischen Verhältnisse eine deutliche Auswirkung auf den Grundwasserstand ausüben können.

Dipl.-Ing. S. Banzhaf (✉) · PD Dr. T. Scheytt
Technische Universität Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Hydrogeologie,
Ackerstr. 71–76, 13355 Berlin, Deutschland
E-Mail: s.banzhaf@tu-berlin.de, traugott.scheytt@tu-berlin.de

Effect of an artificial flood wave on the adjacent groundwater aquifer

Abstract The processes in the hyporheic zone due to varying hydraulic boundary conditions, e. g. flood waves in surface water are frequently characterized as transient. However, their effects are often difficult to assess. Therefore, the effects of a single artificial flood wave on the interaction between groundwater and surface water in the hyporheic zone was examined by measuring the responses of hydraulic head, temperature and chemical constituents in a stream and its floodplain. Before this hour event the groundwater temperatures were recorded over a period of several weeks using temperature loggers. The analyses of the field experiment show a significant positive correlation of artificial flood wave and hydraulic heads in the groundwater. The water level exhibits an immediate reaction on the passing flood wave. The transport of water from stream to groundwater which was tested by a tracer and measurements of indicator parameters has not been proven clearly. Also, measurements of temperature in the groundwater during the flood wave could not reveal an influence of cold water from the stream on the groundwater. The results show, however, that even short term and local changes in hydraulic conditions impose an effect on groundwater.

Keywords Groundwater · surface water · interaction · hyporheic zone · flood wave · temperature

Einleitung

Die Übergangszone von Grund- und Oberflächenwasser – die hyporheische Zone – ist Gegenstand derzeitiger Forschungen, da dieser kleinräumige Bereich komplexen Ein-

Published online: 17 June 2009

flüssen unterworfen ist. Der Begriff der hyporheischen Zone geht auf Orghidan (1959) zurück. Er beschrieb damit den Bereich unter und neben dem Flussbett, in dem sich Grundwasser und Oberflächenwasser mischen. Die Dynamik und das Verhalten der Wasserströmung in diesem Bereich werden als wichtig für die Interaktion von Oberflächenwasser und Grundwasser angesehen.

Die hyporheische Zone unterliegt einer verstärkten biogeochemischen Aktivität (Sophocleous 2002). Unterirdischer Austausch von Wasser beeinflusst hier in hohem Maße die Art und die Rate der stofflichen Veränderungen des Oberflächengewässers. Den Ort des Austausches von Grundwasser und Oberflächenwasser in Form von Wasser, gelösten Stoffen und Energie sieht er im flussbettnahen Bereich und direkt im Flussbett. Ziel von Kalbus et al. (2006) war es, das System Fluss-Grundwasserleiter als Ganzes zu betrachten. In ihrer Arbeit geben sie einen Überblick über die aktuell gängigen Verfahren, um die Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser zu messen. Sie nennen unter anderem die direkte Messung des Wasserflusses vom Grundwasser in den Vorfluter mithilfe von Versickerungsmessern, die Messung von Temperaturen im Grundwasser und im Oberflächengewässer, die Messung des hydraulischen Gradienten, die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes, Tracertests zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeit im Grundwasser und die Bestimmung von Kontaminationskonzentrationen anhand der Beprobung von Grundwassermessstellen, dem Einsatz von Passivsammlern, der Durchführung von integralen Pumpversuchen, der Untersuchung von Schöpfproben aus dem Vorfluter und der Analyse des Wassers aus den oben genannten Versickerungsmessern.

Winter (1999) machte deutlich, dass die Interaktion von Oberflächen- und Grundwasser von der geologischen Beschaffenheit, den klimatischen Bedingungen und der Position der Wasserkörper bezüglich der Grundwasserströmungssysteme abhängig ist. Untersuchungen entlang des Cache Rivers in Arkansas (USA) zeigten, dass Überflutungen der Sumpflandschaften zur Ausbildung von komplexen Strömungssystemen in der Grenzschicht zwischen Fluss und Grundwasserleiter führen. Woessner (2000) beschrieb die Ausbildung von hyporheischen Zonen in der Flussebene modellhaft. Er erläuterte die Abhängigkeit der Ausdehnung dieser Zonen von Wasserständen und Fließrichtungen, Strömungshydraulik und Ausbildung des Flussbettes. Er unterschied Bereiche des Flussbettes, denen Grundwasser zuströmt bzw. die Wasser ins Grundwasser abgeben. Auch definierte er Abschnitte, die vom Grundwasser durchflossen werden (Mäander senkrecht zur Strömung) und solche, in denen das Grundwasser parallel zum Fluss strömt.

Zusätzlich zu diesen großräumigen Effekten können die Topographie des Flussbettes und der damit verbundene Wasseraustausch mit dem Grundwasser zu einer Ausbildung von lokalen Fließsystemen führen (Woessner 2000). Allerdings merkte er an, dass diese kleinmaßstäblichen Systeme durch Beobachtungspegel unter Umständen nicht immer erfassbar sind. Langhoff et al. (2006) untersuchten den Karup, einen Alluvial-Fluss in Zentral-Jütland in Dänemark. Mittels der Messung der Aussickerung von Grundwasser in den Fluss im Flussbett und in der Flussböschung überprüften sie, auf welchem Weg das Wasser bevorzugt in den Fluss gelangt. Aufgrund ihrer Ergebnisse entwarfen sie zwei Modelle. Gemäß dem ersten Modell gelangte nahezu sämtliches Sickerwasser über das Flussbett in das Gewässer. Die Ergebnisse ließen aber auch ein zweites Modell zu. Demnach gelangte ein großer Anteil als oberflächennaher Abfluss über die Uferzone und der Rest unterirdisch über das Flussbett in den Vorfluter.

Wett et al. (2002) untersuchten in der Enns (Österreich), wie sich die Uferfiltration unter Einfluss eines Hochwassers verhält. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass der Anteil von Uferfiltrat in der untersuchten Grundwassermessstelle (GWM) direkt nach dem Hochwasser signifikant abnahm. Sie gaben zwei mögliche Ursachen dafür an: Einen Anstieg des Grundwasserspiegels infolge Niederschlags und damit verbundenem erhöhten Abfluss oder einen angestiegenen Grundwasserspiegel verbunden mit einem absinkenden Wasserspiegel im Fluss nach dem Hochwasser. Aus beiden Varianten resultiert ein geringeres hydraulisches Gefälle zwischen Fluss und Grundwasser sowie eine reduzierte Sickerrate (ca. 50 % des Durchschnittswertes). Butturini et al. (2002) beschrieben anhand eines mediterranen intermittierenden Flusses den Einfluss der Uferzone und der hyporheischen Zone auf die Interaktion von Vorfluter und Grundwasser. Sie beobachteten auf einer Untersuchungsfläche parallel zum Fluss, wie sich die Piezometerhöhen über einen längeren Zeitraum verhalten. Sie wiesen eine Verschiebung der Mischungszone von Fluss- und Grundwasser in Abhängigkeit der klimatischen Bedingungen nach: Infolge eines erhöhten Abflusses ist die „Mischungslinie“ mehrere Meter vom Ufer entfernt, es herrschen influente Strömungsverhältnisse. Während trockener Perioden verschieben sich die Grundwassergleichen, die Mischungszone rückt direkt ans Ufer vor und es liegen nunmehr effluente Strömungsbedingungen vor. Laut Wondzell & Swanson (1999) können Wasserstandsänderungen im Fluss sowohl die vertikale als auch die horizontale Ausdehnung der hyporheischen Zone beeinflussen. Aufgrund der weiträumigen lateralen Ausbreitung des Anstieges in der Überflutungsebene werden Wasserstände und Fließwege im Grundwasser verändert. Ob die hyporheische Zone dabei verkleinert oder vergrößert wird, hängt von der Beschaffenheit des Flussbettes und des Grundwasserleiters im entsprechenden Abschnitt des Flusses ab.

Die Dynamik von Hochwasserwellen wurde in der Literatur bereits ausgiebig beschrieben. Lighthill & Whitham stellten 1955 die kinematische Wellentheorie auf. Demnach

existieren kinematische Wellen, wenn es einen funktionellen Zusammenhang zwischen Abfluss, Konzentration und Ort gibt. Ausgedrückt wird die kinematische Wellentheorie mathematisch durch das Gesetz der Massenerhaltung in Form der Kontinuitätsgleichung und einer Abfluss-Konzentrations-Beziehung. Anhand ihrer Theorie beschrieben Lighthill & Whitham (1955) Flutbewegungen in Gewässern; allerdings nur für große Flüsse. Als Konsequenz der Funktion einer Hochwasserwelle als kinematische Welle besteht eine Verzögerung zwischen der Änderung des Abflusses und der Änderung der chemischen Zusammensetzung des Wassers: Die Druckwelle ist deutlich schneller als das „frische" Wasser, das den zusätzlichen Abfluss zur Folge hat.

Neuere Forschungen zeigen, dass kinematische Wellen auch in kleineren Gewässern auftreten. De Sutter & Krein (2001) wiesen in Versuchen mit künstlichen Hochwasserwellen im Olewiger Bach (Rheinland-Pfalz) nach, dass aufgrund von kinematischen Wellen signifikante Zeitverzögerungen zwischen dem Anstieg des Pegels im Gewässer und der Ankunft des Flutwassers bestehen. Ihre Ergebnisse fielen aufgrund der signifikanten Abweichung der elektrischen Leitfähigkeit von Hochwasser und Bachwasser deutlich aus: Sie zeigten, dass eine große Menge „alten Wassers" vor der Welle hergeschoben wurde und so den steigenden Wasserstand im Bach verursachte. Es besteht nachweislich ein direkter Zusammenhang zwischen der Menge des Hochwassers und der beschriebenen Zeitverzögerung von Druckwelle und eigentlichem Hochwasser. Größere Hochwasser mit höheren Wellengeschwindigkeiten bewirken geringere Zeitverzögerungen als kleinere Hochwasser (De Sutter & Krein 2001).

Nolan & Hill (1990) setzten ihren Fokus mehr auf die Herkunft des Hochwassers („neues" Regenwasser oder „altes" Grund- bzw. Bachwasser), beleuchteten aber auch die Thematik der kinematischen Wellen. Zu diesem Zweck analysierten sie Niederschlags-/Abflussereignisse im Permanente Creek in Kalifornien, USA. Mit ihren Ergebnissen wiesen Nolan & Hill (1990) die Verzögerung zwischen Druckwelle und „neuem" Wasser ebenfalls über die elektrische Leitfähigkeit nach. Auch stellten sie fest, dass die Druckwelle schneller war als die Fließgeschwindigkeit des Baches: Sie ermittelten eine kinematische Welle mit einer ca. 1,7 Mal höheren Geschwindigkeit als das normal fließende Wasser im Bach.

Allerdings sind die oben beschriebenen Effekte der kinematischen Wellentheorie nach wie vor umstritten. So stellte Kirchner (2003) zwar ebenfalls fest, dass eine direkte Reaktion der Abflüsse auf Regenereignisse und eine gedämpfte Reaktion von Tracern (in dieser Publikation Chlorid) besteht. Kirchner (2003) nannte mehrere in den letzten Jahren verfolgte Lösungsansätze (Piston Flow, kinematische Wellen, Transmissivity Feedback, Austausch zwischen Matrix und Makroporen, etc.), machte aber gleichzeitig deutlich, dass kein Ansatz eine zufriedenstellende Erklärung der beobachteten Effekte liefert. Daher formulierte er als Ziel der diesbezüglichen Forschung das Auffinden einer einheitlichen Theorie.

Der Parameter Temperatur wird zunehmend verwendet, um den Austausch von Oberflächen- und Grundwasser zu untersuchen. Er hat sich als Tracer für die Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser bewährt (z. B. Anderson 2005, Hoehn & Cirpka 2006, Schmidt et al. 2006). Zusätzlich ist dieser Parameter relativ leicht und günstig zu messen. Bisherige Forschungen (z. B. Conant 2004, Hatch et al. 2006, Silliman et al. 1995) konzentrierten sich dabei meist auf das Flussbett unterhalb des Flusses. Der Austausch in horizontaler Richtung, also mit der Uferzone, wird nicht betrachtet.

Ziel des Feldexperiments dieser Arbeit war die Untersuchung der Auswirkungen einer singulären und gezielt ausgelösten Hochwasserwelle auf das Grundwasser im ufernahen Bereich. Die Messungen erfolgten in einem schmalen Uferbereich, der maximale Abstand vom Bach betrug zwei Meter. Um die Reaktionen von Wasserstand, Temperatur und chemischer Zusammensetzung des Grundwassers kleinräumig bestimmen zu können, wurden Beobachtungspiezometer und Temperaturlogger in hoher Auflösung installiert.

Standortbeschreibung

Das Untersuchungsgebiet befindet sich am Olewiger Bach, südöstlich des Stadtteils Olewig (Trier) in Rheinland-Pfalz. Der Olewiger Bach ist ein Zufluss der Mosel und fließt dieser im Stadtgebiet von Trier zu. Sein Einzugsgebiet umfasst rund 35 km². Am Olewiger Bach wurden bereits von De Sutter & Krein (2001) Versuche mit einer künstlich ausgelösten Hochwasserwelle durchgeführt. Diese Versuche im Oberflächenwasser bilden die Grundlage der hier vorgenommenen Untersuchungen zur Interaktion von Oberflächenwasser mit dem Grundwasser. Die Dimension der erzeugten Hochwasserwelle orientierte sich an dem von De Sutter & Krein (2001) untersuchten künstlichen Hochwasser. Ihre Erkenntnisse bezüglich des Auftretens von kinematischen Wellen konnten somit bei der Planung und Auswertung des Feldexperimentes berücksichtigt werden.

Am Olewiger Bach werden unterdevonische Schiefer, die überwiegend als Tonschiefer ausgebildet sind, angetroffen (Meyer 1986). Auch morphologisch deutlich zu erkennen sind Quarzithärtlingszüge. Die direkte Umgebung des Baches ist aus Talalluvionen aufgebaut, die Talflanken werden von Schiefern gebildet. In den höheren Lagen sind die Ablagerungen der Hauptterrassen der Mosel anzutreffen (Negendank 1974).

Für das Untersuchungsgebiet relevante Grundwasserleiter (GWL) sind in den unterdevonischen Schiefern und Quar-

ziten ausgebildet. Dabei stellen die Schiefer eher schlechte GWL dar. Die aus ihnen gespeisten Quellen habe eine geringe und unregelmäßige Schüttung. Günstigere Grundwasservorkommen sind im Verbreitungsgebiet der teils mächtigen Quarzite anzutreffen, jedoch haben diese eher lokale Bedeutung (Jätzold 1984). Grundwasser leitende Eigenschaften werden nur für die Kies- und Schieferbruchschichten angenommen, der Auelehm und die stark tonige und siltige Schicht werden als undurchlässig angesehen.

Die Messstellen (GWM und Temperaturlogger) befinden sich ca. 1,5 km stromab des Hochwasser gebenden Ablasses der Stadtwerke Trier. Der Verlauf des Baches ist teils mäandrierend teils geradlinig, die Messstellen befinden sich in einem geradlinigen Abschnitt von ca. 50 m Länge. Das Bachbett ist an dieser Stelle drei Meter breit und bei einem für diese Jahreszeit typischem Abfluss (120 l/s) auf einer Breite von 1,5 m gefüllt. Am installierten Pegel entspricht das einem Wasserstand von 0,17 m. Das ebene Ufer liegt bei diesem Wasserspiegel ca. 0,3 m über der Wasseroberfläche. Bei einem natürlichen Hochwasser im März 2008 wurde ein Abfluss von 850 l/s gemessen, der Pegel des Baches betrug hier 0,32 m.

Der Schnitt der beim Setzen der Grundwassermessstellen angetroffenen Schichten (Abb. 1) zeigt eine durchgehend auflagernde Auelehmschicht mit einer Mächtigkeit von ca. 0,4 m. Darunter folgt bei den GWM TU_01 bis TU_03 (0,3 bis 1,0 m Abstand vom Bachufer) zunächst eine von Kies und Schieferbruch aufgebaute Schicht (0,4–0,9 m mächtig), die als Bachablagerung zu beschreiben ist. Im Liegenden folgt eine stark tonige und siltige Schicht mit einer Mächtigkeit von 0,65–0,85 m. Am jeweils tiefsten erbohrten Punkt wird wiederum eine Kies- und Schieferbruchschicht angetroffen.

Bei der GWM TU_04 (2,0 m vom Ufer entfernt) fehlt die erste Kies- und Schieferbruchschicht, hier folgt auf den Auelehm direkt die stark tonige und siltige Schicht. Bei einer Tiefe von 1,5 m unter Geländeoberkante (GOK) wird aber eine Kies- und Schieferbruchschicht erbohrt. Der Schnitt zeigt deutlich, dass diese Schicht nicht an die obere Kies- und Schieferbruchschicht angebunden ist.

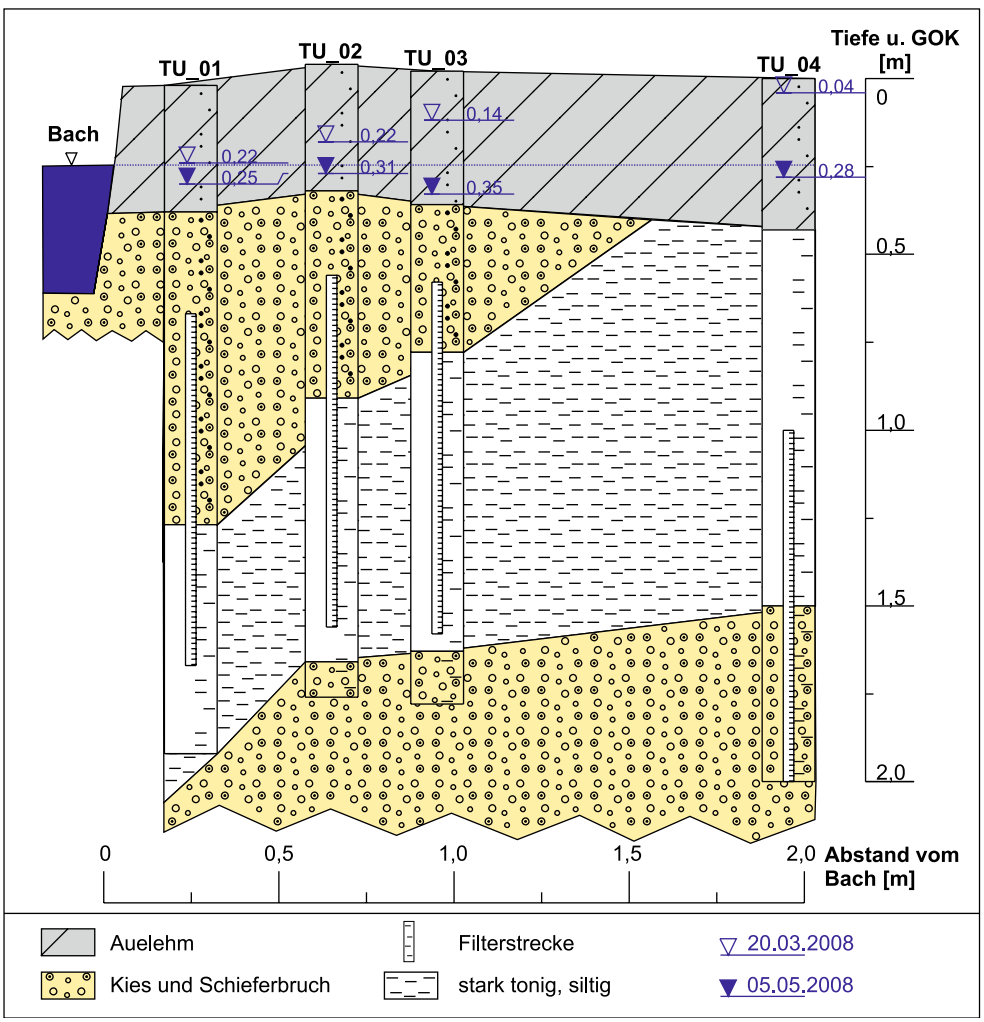

Abb. 1 Schnitt mit Flurabständen am 20. 3. und 5. 5. 2008

Methodik

Zur Untersuchung des Eindringens einer künstlich erzeugten Hochwasserwelle ins Grundwasser wurden vier GWM mit Abständen von 0,3, 0,7, 1,0 und 2,0 m senkrecht vom Ufer des Olewiger Baches installiert. Der Ausbau erfolgte mittels 2"-PEHD Rohren und Filterrohren. Er bestand stets aus 1 m Filterrohr zuunterst und 1 m Vollrohr darüber, die Filterstrecken lagen zwischen 0,6 und 2,0 m unter Geländeoberkante (Abb. 1). In diesen GWM wurden im Vorfeld des Versuches (eine Messung im März 2008 nach Setzen der Messstellen sowie je eine Messung am 3., 4. und 5. Mai 2008) und während des Durchlaufes der Welle die Piezometerhöhen gemessen sowie vor und nach dem Versuch Probennahmen durchgeführt. Auf eine Beprobung der GWM während der Welle wurde aufgrund der zu starken Beeinflussung der Strömungsverhältnisse im Grundwasser verzichtet.

Als weiterer Parameter wurde die Temperatur im Grundwasser gemessen. Zu diesem Zweck wurden neun Temperaturlogger mittels Zaunpfählen ins Grundwasser eingebracht. Es handelte sich um das Modell TL20 der Firma 3M. Sie wurden bisher nicht für Temperaturmessungen im Grundwasser verwendet. Die Logger waren ebenfalls in einer Transsekte senkrecht zum Bach und mit einem Abstand von 1 m parallel zu den GWM installiert, allerdings betrug ihr jeweiliger Abstand durchgängig nur ca. 0,2 m (Abb. 2). Die Einbautiefe der Logger betrug 0,39–0,72 m unter Geländeoberkante. Mit dieser hohen Dichte sollte der Einfluss des Bachwassers über die Temperaturänderungen ermittelt werden. Die Temperaturlogger verblieben über einen Zeitraum von sechs Wochen (21. 3.–7. 5. 2008) im Grundwasser, um längere Ganglinien zu erhalten, und nahmen alle zehn Minuten eine Messung vor.

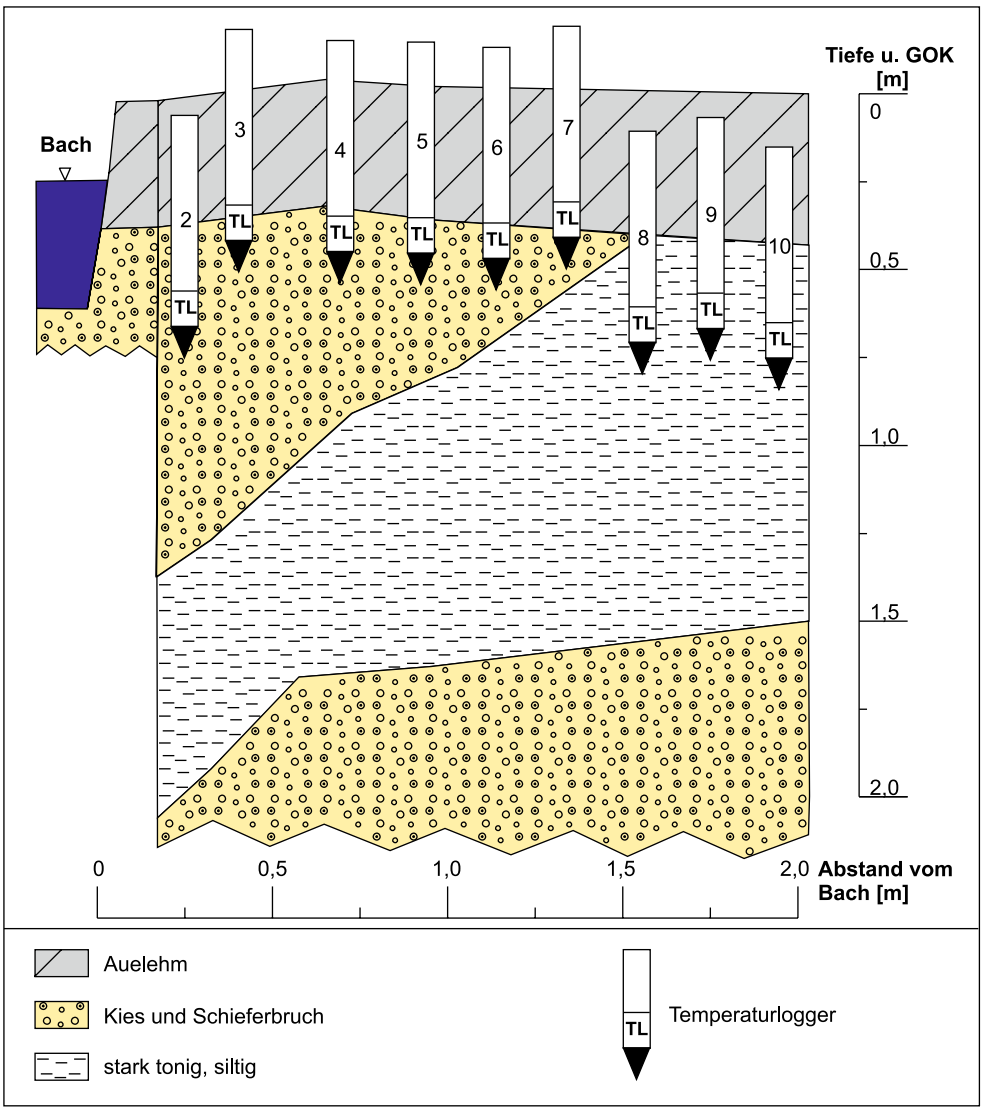

Abb. 2 Schnitt mit Lage der Temperaturlogger

Am 6. 5. 2008 erzeugten die Stadtwerke Trier über einen Zeitraum von zwei Stunden (9:00–11:00 Uhr) ein künstliches Hochwasser im Bach. Dazu wurde Stauwasser aus der Riveris-Talsperre, das normalerweise für die Trinkwasserversorgung der Stadt Trier aber auch für die Stromerzeugung genutzt wird, in den Olewiger Bach abgelassen.

In den Scheitel der Welle wurde 100 m oberhalb der Messstellen ein Fluoreszenztracer (Uranin) eingegeben, der mithilfe von Passivsammlern (Aktivkohle) detektiert wurde. Passivsammler befanden sich in allen vier GWM und im Bach auf Höhe der GWM. Mittels dieser Methode sollte ein absoluter Nachweis über ein Eindringen von Bachwasser ins Grundwasser infolge der Welle erbracht werden.

In zwei GWM (TU_01 und TU_03) befanden sich zu diesem Zeitpunkt Drucksonden (Modell Levelogger Gold, Firma Solinst) für eine permanente Aufzeichnung des Wasserstandes (eine Messung pro Minute), in den beiden anderen GWM wurde der Wasserstand mithilfe eines Lichtlotes in festen Intervallen von zehn Minuten gemessen. Dies war erforderlich, um in diesen GWM Proben für die Bestimmung der stofflichen Parameter zu gewinnen. Im Olewiger Bach war ein Starflow-System der Firma Unidata installiert, das Fließgeschwindigkeit und Wasserstand mithilfe von Ultraschall aufzeichnet, um die Hochwasserwelle in ihrer Form zu erfassen. Ergänzend zum Wasserstand wurde der Abfluss im Bach mittels eines Salinomadd-Gerätes der Firma MADD Technologies im Plateau und nach der Welle direkt bestimmt. Dieses Gerät misst den Abfluss mit der Methode der chemischen Lösung.

Als Indikatorparameter für den Nachweis des Eindringens von Bachwasser wurden Chlorid, Nitrat, Calcium, Magnesium und Natrium aufgrund ihres Konzentrationsgefälles zwischen Bach und Grundwasser ausgewählt. Die Analysen erfolgten mit ICP-AES Trace Scan Thermo Jarrell (Anionen) bzw. AAS-Analytik Jena NovAA 400G (Kationen).

Am auf den Versuch folgenden Tag wurden die Temperaturlogger ausgebaut und ausgelesen. Auch die Drucksonden wurden zu diesem Zeitpunkt den GWM entnommen und ausgewertet.

Ergebnisse

Hydraulische Messungen

Die Flurabstände in der Aue sind gering und bei starkem Hochwasser wird das Ufer im Bereich der GWM sogar überflutet. Die Wasserstände im Uferbereich zeigten eine hohe zeitliche Dynamik: Zwischen dem 20. 3. 2008 und dem 5. 5. 2008 hat ein Wechsel von effluenten zu influenten Verhältnissen stattgefunden (Abb. 1).

Der Abfluss im Olewiger Bach war 24 Stunden vor der Welle konstant bei ca. 120 l/s. Die ermittelten Abflüsse im Bach wiesen im Plateau der Welle einen Wert von 273,9 l/s und nach der Welle von 118,8 l/s auf. Daraus resultiert eine Abgabe der Stadtwerke Trier von 155,1 l/s. Diese Menge wurde über die vollen zwei Stunden abgegeben, was sich auch in der Ganglinie des Wasserstandes im Olewiger Bach widerspiegelt (Abb. 3). Der Druck der Hochwasserwelle erreichte den Untersuchungsort gegen 9:45 Uhr. Zeitgleich stiegen die Wasserstände im Bach und in den GWM signifikant an. Der Wasserstand des Olewiger Bachs stieg um 0,06 m an. Der maximale Anstieg der GWM betrug bei

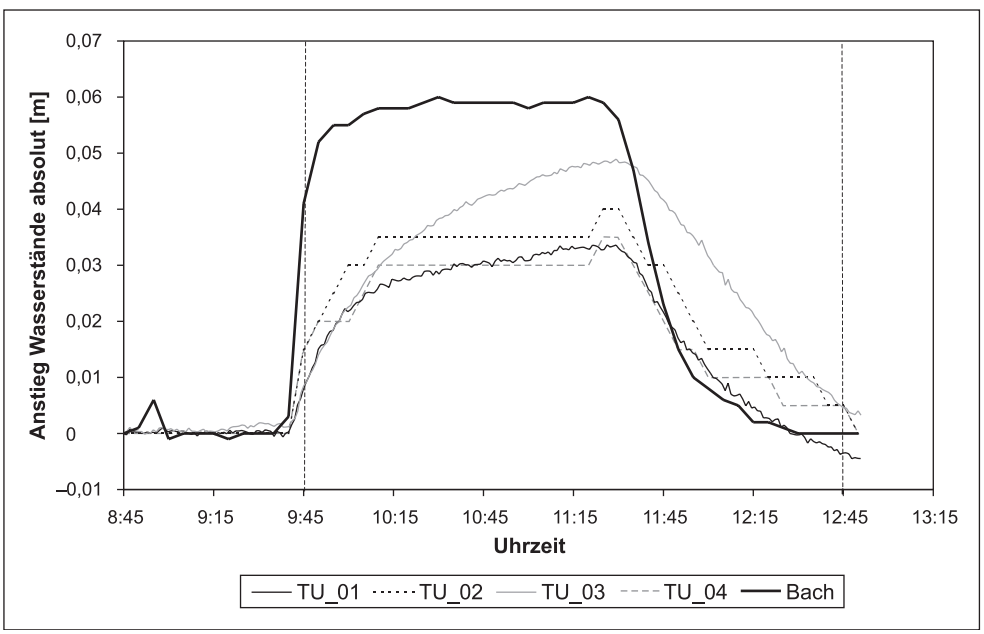

Abb. 3 Wasserstände von Bach und GWM während der Welle

TU_01 bachnah 0,034 m, bei TU_02 0,04 m, bei TU_03 0,048 m und bei TU_04 0,035 m. Auch der Verlauf des Anstieges erschien zunächst bei den GWM verschieden. In den GWM TU_02 und TU_04 stellte sich nach 25 Minuten ein stabiler Wasserstand ein, lediglich zum Ende der Welle um 11:30 Uhr stieg der Wasserstand nochmals kurz um 0,005 m an. Bei den GWM TU_01 und TU_03 stieg der Wasserstand hingegen kontinuierlich an und erreichte sein Maximum unmittelbar vor dem Absinken. Allerdings ist hier die beschränkte Genauigkeit der Lichtlotmessungen (1 cm Teilung, halbe Zentimeter abgeschätzt) in TU_02 und TU_04 als Hauptursache anzunehmen. Die Auflösung der Drucksonden liegt hingegen im mm-Bereich. Es ist daher eher von einem gleichen Verlauf des Anstieges und lediglich von unterschiedlichen maximalen Anstiegen auszugehen.

Die Normalisierung der Wasserstände nach dem Durchlaufen der Welle erfolgte nahezu synchron. Um 12:50 Uhr hatten alle vier GWM wieder ihre Wasserstände vor der Welle erreicht. Damit verlief die Reaktion gegenüber dem Bach leicht verzögert, dieser erreichte sein Ausgangsniveau bereits um 12:30 Uhr.

Eine positive Korrelation der künstlichen Hochwasserwelle mit den Druckspiegeln im Grundwasser wird deutlich. Durch den zeitlichen Zusammenfall des Anstiegs des Wasserstandes im Olewiger Bach und dem Ansteigen der Piezometerhöhen in den vier GWM ist eine direkte Interaktion der Systeme Bach und Grundwasser hinsichtlich der Druckverhältnisse belegt. Die zeitliche Verzögerung der Druckspiegeländerungen ist dabei gering.

Aus Siebkurven des beim Bau der GWM gewonnenen Bohrgutes sind k_f-Werte nach Beyer (1964) für die grundwasserleitenden Kies- und Schieferbruchschichten ermittelt worden. Für die erste leitende Schicht beträgt der k_f-Wert $8 \cdot 10^{-4}$ m/s (TU_01) bzw. $2 \cdot 10^{-5}$ m/s (TU_03) und für die zweite leitende Schicht $1 \cdot 10^{-3}$ m/s (TU_04).

Temperaturmessungen

Über den dokumentierten Zeitraum vom 21. 3.–7. 5. 2008 unterliegen die Temperaturen im Grundwasser deutlich messbaren Schwankungen (Abb. 5). Die Spannweite reicht von 4,7 bis 11,4 °C. Bei den Ganglinien der Temperaturlogger fällt auf, dass sich insgesamt betrachtet weniger die Temperaturverläufe der Logger ähneln, die horizontal nahe beieinander liegen, sondern die, die in ähnlichen Tiefen eingebaut sind. Über den gesamten beobachteten Zeitraum verlaufen die Messwerte der am tiefsten gelegenen Messgeräte (TL_08, TL_09 und TL_10; 62–72 cm unter GOK) am gleichmäßigsten. Der Einfluss der Lufttemperatur auf das oberflächennahe Grundwasser wird hier deutlich sichtbar. Dieser Effekt wird auch durch den Verlauf der Temperatur des Olewiger Baches dokumentiert (04. 5.–07. 5.). Deutlich ist hier das Oszillieren der Bachtemperatur in Abhängigkeit von Tag und Nacht erkennbar (Abb. 6). Die Werte schwanken dabei von 7,7 °C (Minimum morgens gegen 8:00 Uhr) bis 15,0 °C (Maximum abends gegen 18:00 Uhr). Auffällig ist, dass die flacher gelegenen Logger diesem Auf und Ab folgen, allerdings erfolgt ihre Reaktion abgeschwächt und

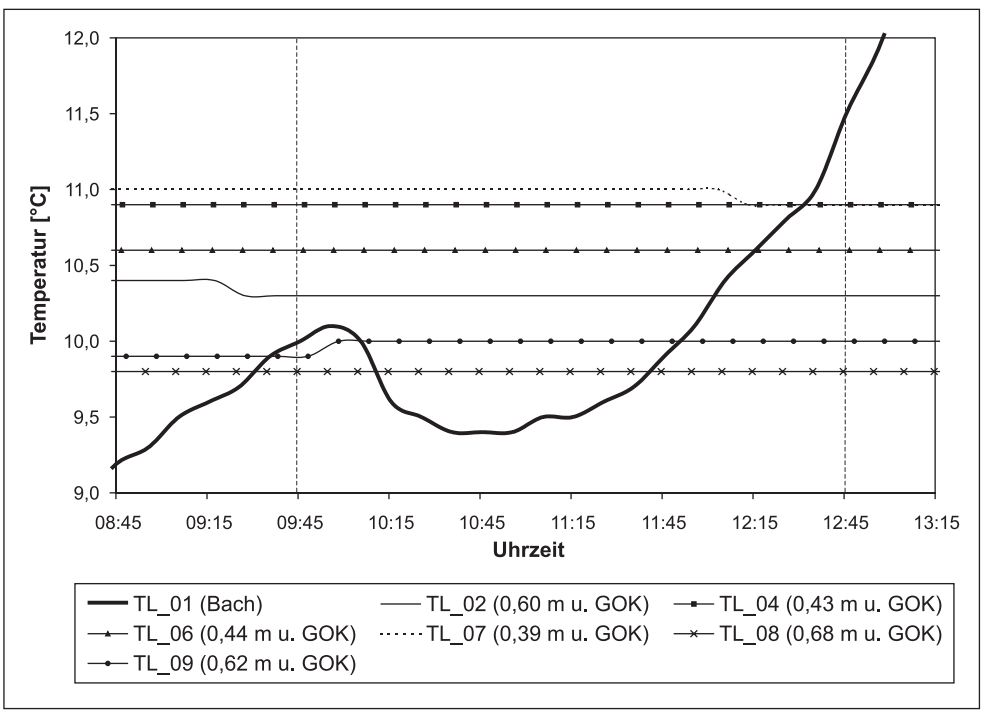

Abb. 4 Temperaturen von Bach- und Grundwasser während der Welle

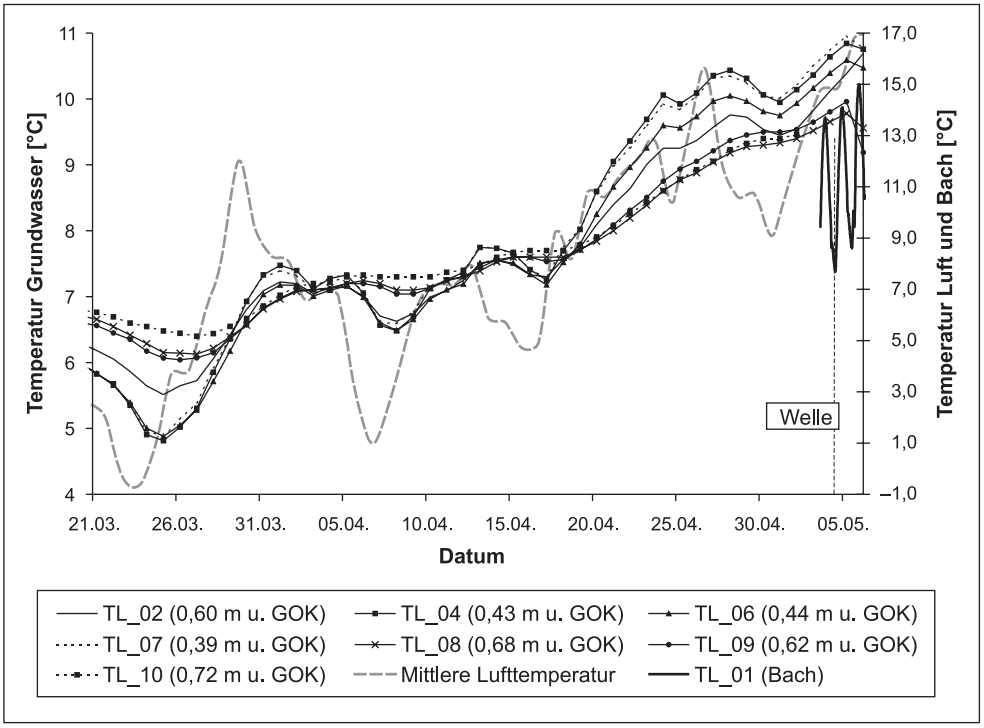

Abb. 5 Temperaturen von Bach- und Grundwasser (21.3.–7.5.2008)

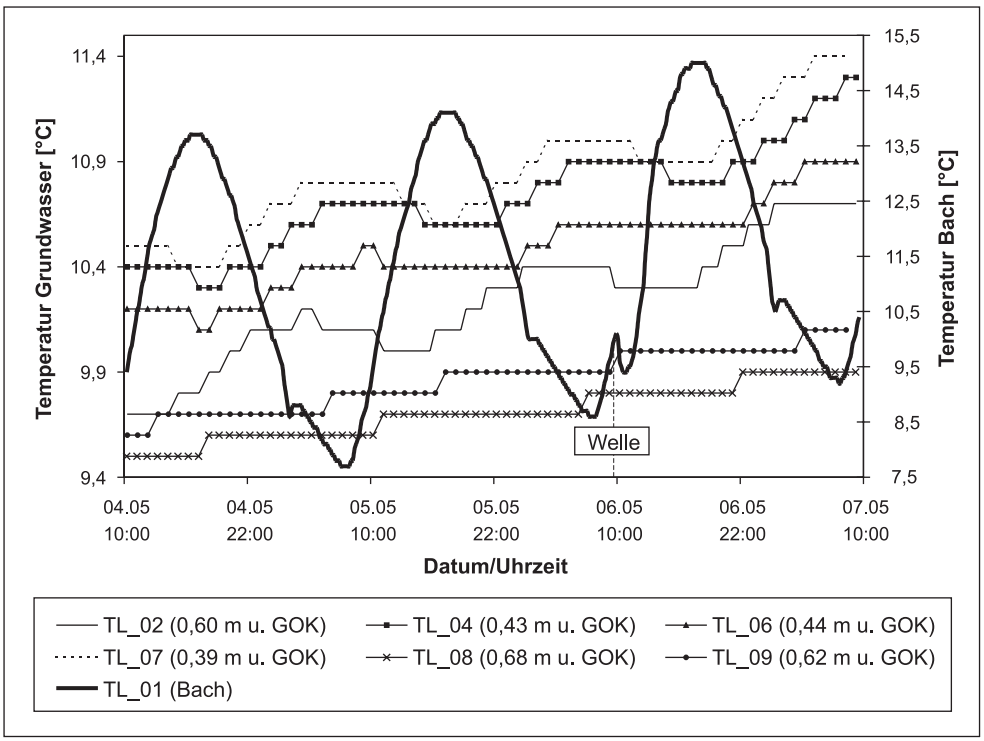

Abb. 6 Phasenverschiebung der Temperaturen von Bach- und Grundwasser

relativ exakt phasenverschoben (Abb. 6). Die Schwankungen von Maximum (gegen 8:00 Uhr) zu Minimum (gegen 18:00 Uhr) reichen von 0,1 °C bis 0,5 °C, die Reaktion des Grundwassers ist also in der Höhe der Schwankungen gedämpft sowie zeitlich verzögert.

Der Ausschnitt der gewonnenen Daten aus den Temperaturloggern für den Zeitraum der Welle ist in Abbildung 4 dargestellt. Dabei sind größere Änderungen der Temperatur nur im Olewiger Bach gemessen worden. Sie steigt hier von 9,2 °C um 8:45 Uhr bis auf 10,1 °C um 10:00 Uhr, fällt dann

wieder auf 9,4 °C ab um ab 11:00 Uhr wieder kontinuierlich bis auf 12 °C um 13:05 Uhr anzusteigen.

Der Temperaturabfall um 10:00 Uhr fällt mit einem gemessenen Abfall der elektrischen Leitfähigkeit im Bach zusammen. Zu diesem Zeitpunkt erreicht das „frische" Wasser aus der Talsperre den Versuchsort und das Bachwasser (~ 220 µS/cm) mischt sich mit dem Talsperrenwasser (~ 60 µS/cm).

Die Logger TL_04 (10,9 °C), TL_06 (10,6 °C) und TL_08 (9,8 °C) verzeichnen keinerlei Temperaturänderungen während der Welle. Der Logger TL_02 registriert gegen 9:20 Uhr einen Abfall von 10,4 auf 10,3 °C, wohingegen TL_09 gegen 10:00 Uhr einen Anstieg von 9,9 auf 10,0 °C anzeigt. Deutlich nach der Welle im Bach verzeichnet der Logger TL_07 um 12:10 einen Abfall von 11,0 auf 10,9 °C.

Die Auflösung der Logger beträgt 0,1 °C, die Messgenauigkeit wird vom Hersteller mit 0,5 °C angegeben. Damit liegen die gemessenen Änderungen in der Größenordnung, die die Geräte erfassen können. Ein Einfluss der Welle auf die Temperatur im Grundwasser ist folglich nicht eindeutig zu belegen.

Stofftransport

Es wurden drei Probennahmen in den nicht mit Drucksonden bestückten GWM sowie dem Olewiger Bach vorgenommen. Eine Probennahme erfolgte am 20. 3., eine am 5. 5. (vor der Welle) und eine am 6. 5. (nach der Welle). Anhand der Probennahme am 20. 3. wurden die Parameter festgelegt, die aufgrund ihres Konzentrationsgefälles für den Nachweis eines Stofftransportes vom Bach ins Grundwasser geeignet sind: Nitrat, Natrium, Calcium, Magnesium und Chlorid. Die Nachweisgrenzen für Nitrat und Chlorid lagen bei 0,1 mg/l, für Natrium bei 0,2 mg/l, bei Calcium und Magnesium bei 0,1 mg/l. Wenn Bachwasser eindringt, müsste der Nitratgehalt im Grundwasser ansteigen, die übrigen Parameter müssten abnehmen. Im Folgenden wird lediglich auf die Werte der Parameter vor und nach der Welle eingegangen, sämtliche Gehalte sind aber in Abbildung 7 dargestellt.

Die Nitratwerte des Baches vor und nach der Welle unterscheiden sich lediglich um 0,5 mg/l. In der GWM TU_02 bleibt der Nitratgehalt mit 10,4 mg/l und 10,3 mg/l nahezu unverändert. Die Ganglinie der GWM TU_04 verläuft ähnlich, die Werte betragen 10,8 mg/l und 10,7 mg/l.

Die Ganglinien der Natriumgehalte verlaufen für Bach und GWM nahezu parallel. Die Werte sind in TU_02 stets 8,9–9,0 mg/l höher als im Olewiger Bach und in TU_04 0,4–0,5 mg/l höher als in TU_02. Eine Veränderung der Gehalte während der Welle erfolgt ebenfalls nur in der Nachkommastelle. Der Olewiger Bach bleibt unverändert bei 9,8 mg/l, in TU_02 erfolgt ein Anstieg von 18,7 mg/l auf 18,8 mg/l und in TU_04 ein Anstieg von 19,1 mg/l auf 19,3 mg/l. Bei den Calciumgehalten ist kein Trend erkennbar. Im Olewiger Bach fällt er von 17,3 mg/l auf 15,6 mg/l. In TU_02 fällt der Calciumwert von 18,9 mg/l auf 18,3 mg/l. Bei TU_04 steigt der Wert hingegen von 20,8 mg/l auf 21,3 mg/l.

Auch die Ganglinien der Magnesiumgehalte verlaufen verschieden. Der Gehalt im Bach fällt von 9,0 mg/l auf 8,9 mg/l. In den GWM sind die Werte stets höher als im Bach, verlaufen aber voneinander abweichend. In TU_02 fällt er von 11,1 mg/l am auf 10,8 mg/l. In TU_04 steigt er von 12,0 mg/l geringfügig auf 12,1 mg/l an. Der Chloridge-

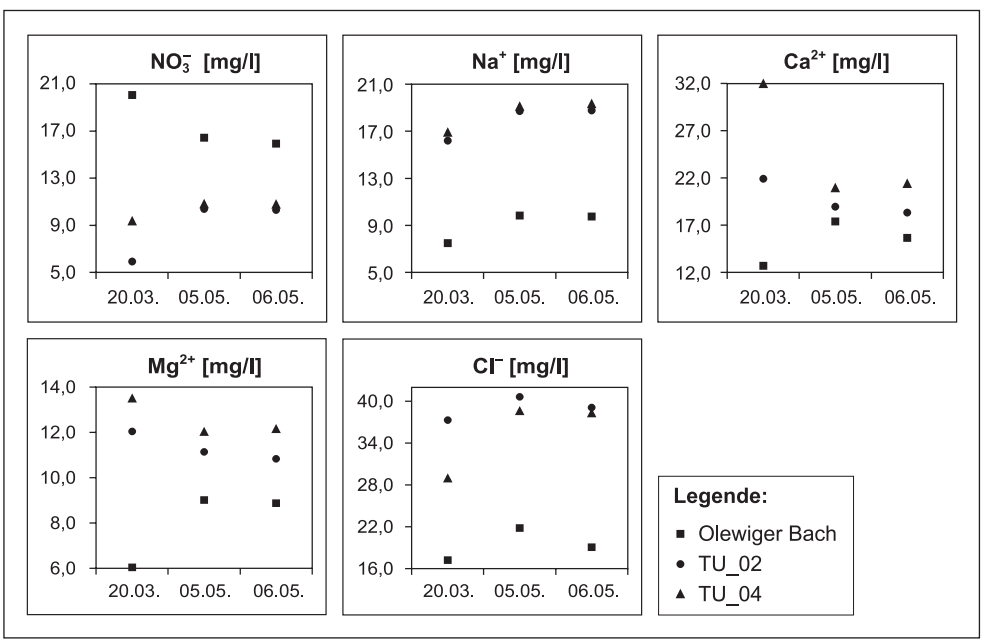

Abb. 7 Werte der Indikatorparameter

halt fällt in TU_02 von 40,6 mg/l auf 39,1 mg/l und in TU_04 von 38,6 mg/l auf 38,3 mg/l. Der Gehalt im Olewiger Bach fällt von 21,8 mg/l auf 19,1 mg/l.

Die beschriebenen Analysen der Indikatorparameter lassen folgende Schlüsse zu: Der mögliche Anstieg der Nitratgehalte in den GWM kann weder für TU_02 noch für TU_04 belegt werden. Bei der Reaktion der übrigen Parameter muss zwischen der Reaktion in TU_02 und TU_04 unterschieden werden. Natrium erfährt in TU_02 vom 5. 5. auf den 6. 5. keine aussagekräftige Veränderung. Die Konzentrationen von Calcium, Magnesium und Chlorid verringern sich zwar, allerdings sind die Änderungen von Calcium und Magnesium gering. Lediglich Chlorid nimmt mit 1,5 mg/l geringfügig stärker ab. Es gilt aber für alle Werte, dass ihre Änderungen vom 20. 3 auf den 5. 5 größer sind als vom 5. 5. auf den 6. 5.

In TU_04 ist eine Aussage hinsichtlich eines erfolgten Stofftransportes ebenfalls schwierig. Entgegen den Annahmen steigen die Gehalte von Natrium, Calcium und Magnesium an. Allerdings sind die Anstiege mit 0,1–0,5 mg/l wenig aussagekräftig. Auch in TU_04 fällt der Chloridgehalt und erfüllt damit zwar die Hypothese für einen Stofftransport vom Bach ins Grundwasser, die Änderung ist mit 0,3 mg/l aber nicht aussagekräftig.

Insgesamt kann eine Beeinflussung der gemessenen Indikatorparameter infolge der durchlaufenden Welle nicht ermittelt werden. Die Analysen der direkt nach dem Durchlaufen der Welle entnommenen Passivsammler auf Uranin weisen den Tracer im Olewiger Bach eindeutig nach (Konzentration: 0,92 µg/l). Die Proben aus den GWM enthalten hingegen keine messbare Konzentration des Uranins (alle Werte kleiner als der Blindwert von 0,58 µg/l). Die Ergebnisse der Traceranalysen lassen folglich den Schluss zu, dass kein Bachwasser bis zu den GWM eindringen konnte.

Zu den stofflichen Messungen muss bemerkt werden, dass eine kurze Hochwasserwelle (zwei Stunden) mit aller Wahrscheinlichkeit zu kurz ist, um ein tiefes Einströmen vom Bach bis zu den GWM zu ermöglichen. Da die GWM TU_01 0,3 m vom Bachufer entfernt war und hier kein Eindringen von Bachwasser während der Welle nachgewiesen werden konnte, kann lediglich eine horizontale Transportweite von weniger als 0,3 m vermutet werden. Erst bei einer längerfristigen Umkehrung der Strömungsverhältnisse, wie es beispielsweise bei einem mehrwöchigen Winterhochwasser der Fall ist, wird ein Eintrag ins Grundwasser als wahrscheinlich erachtet.

Zusammenfassung und Fazit

Die erwartete Druckreaktion des Grundwassers in der Uferzone des Olewiger Baches auf die künstliche Hochwasserwelle konnte klar nachgewiesen werden. Bei geringerer Mächtigkeit der Wasser leitenden Schichten bewirkte die Druckwelle einen größeren Anstieg in den entsprechenden GWM. Die Systeme Bach und Grundwasser interagierten dabei annähernd ohne zeitliche Verzögerung.

Die Zusammensetzung des Sedimentes in der Uferzone ist jedoch heterogen, sodass die ermittelten k_f-Werte nur orientierenden Charakter haben. Auch wurden bei der Siebanalyse sowohl Schichtung als auch eventuelle präferentielle Fließwege zerstört, sodass die k_f-Werte hinsichtlich der tatsächlichen Fließvorgänge nicht sehr aussagekräftig sind. Auffällig ist aber, dass der k_f-Wert bei der GWM TU_04 deutlich höher ist. Allerdings ist diese Schicht laut Profil nicht mit derjenigen verbunden, in der die GWM TU_01 bis TU_03 verfiltert sind (Abb. 1).

Bestätigung für die Interpretation des Profils liefern die Anstiege der Wasserspiegel in den GWM. Aufgrund der abnehmenden Mächtigkeit der wasserleitenden Kies- und Schieferbruchschicht von TU_01 (0,89 m) bis TU_03 (0,42 m) kann sich der Druckimpuls aus dem Bach mit zunehmender Entfernung nur in einer Erhöhung des Druckspiegels auswirken. Somit ist der höchste Anstieg in TU_03 mit 0,048 m und der geringste Anstieg in TU_01 mit 0,034 m plausibel zu erklären. Die GWM TU_04 kann an dieser Stelle nicht direkt mit den anderen GWM verglichen werden. Dem Profil (Abb. 1) ist zu entnehmen, dass in den GWM zwei verschiedene grundwasserleitende Schichten (Kies und Schieferbruch) verfiltert sind. Allerdings sind potenzielle laterale Verbindungen der Schichten mit dem dargestellten Profil unter Umständen nicht erfasst worden, sodass aufgrund der ähnlichen hydraulischen Reaktionen auf die Druckwelle Verbindungen möglich sind.

Die Strömungsverhältnisse zwischen Bach und Grundwasser sind dynamisch. Der Vergleich des Gradienten im Grundwasser von März und Mai 2008 zeigte einen Wechsel von effluenten Verhältnissen im März zu influenten Verhältnissen im Mai.

Die erstmals eingesetzten Temperaturlogger und die Einbaukonstruktion lieferten gut verwertbare Daten. Zwei Geräte (TL_03 und TL_05) fielen jedoch aufgrund von Funktionsstörungen vollständig aus und lieferten keine Daten, die Werte von TL_10 waren nur teilweise auslesbar.

Anhand der vorgenommenen Temperaturmessungen konnte der angestrebte Nachweis eines Einflusses des Olewiger Baches bei Hochwasser auf die Grundwassertemperatur nicht eindeutig erbracht werden. Allerdings dokumentierten die Logger den Wärmefluss zwischen Oberfläche und Grundwasser.

Die theoretische horizontale Eindringtiefe des Temperatursignals der künstlichen Welle (x in m) im Falle eines rein konduktiven Wärmetransportes (kein Wasseraustausch zwischen Bach und ufernahem Grundwasser) lässt sich näherungsweise aus der Temperaturleitfähigkeit des Sediments a ($1 \cdot 10^{-6}$ m²/s als Richtwert für feuchten Ton) und der Ein-

wirkzeit t (7.200 s als Durchlaufzeit der Welle) berechnen (Gl. 1).

$$[1] \quad x = \sqrt{a \times t}$$

Damit ergibt sich eine rechnerische Eindringtiefe von 0,08 m. Durch einen rein konduktiven Wärmetransport wäre folglich der bachnächste Temperaturlogger (Abstand vom Ufer ca. 0,2 m) nicht vom kurzen Temperatursignal der Welle erreicht worden. Die Dauer des Hochwasserzustandes müsste für eine größere konduktive Eindringtiefe also wesentlich länger sein.

Die Ergebnisse der Messungen zum Stofftransport lassen keine eindeutige Aussage über einen Eintrag von Wasser aus dem Olewiger Bach ins Grundwasser aufgrund der künstlichen Welle zu. Der ins Bachwasser eingegebene Tracer konnte in den GWM nicht nachgewiesen werden und bei den betrachteten Parametern zeigt lediglich Chlorid eine messbare Änderung in der Konzentration vor und nach der Welle.

Insgesamt werden die angewandten Methoden von den Autoren als geeignet erachtet um eine Beeinflussung des fließgewässernahen Grundwasserleiters durch Hochwasser zu erfassen. Für weitere Untersuchungen werden jedoch Änderungen in der Anordnung der Messvorrichtungen als sinnvoll erachtet. So waren die Temperaturlogger unter Umständen zu tief installiert, sodass die Eindringtiefe des Bachwassers nicht groß genug war, um die Messgeräte zu erreichen. Gleiches gilt für die Grundwassermessstellen, deren Filterstrecken ebenfalls oberflächennäher und in einem schmaleren Tiefenbereich installiert werden sollten. Auch der Einsatz von Temperaturloggern mit höherer Auflösung und Messgenauigkeit sowie besserer Wasserbeständigkeit (Ausfall von drei Loggern) sollte in Erwägung gezogen werden.

Danksagung Für die Unterstützung bei Feld- und Laborarbeiten geht der Dank an Dr. Reinhard Bierl, Berenike Meyer und Dr. rer. nat. habil. Andreas Krein vom Fachgebiet Hydrologie an der Universität Trier. Den Stadtwerken Trier gilt der Dank für die Erzeugung der künstlichen Hochwasserwelle.

Literatur

Anderson, M. P.: Heat as a ground water tracer.- Ground Water **43**(6), 951–968 (2005)

Beyer, W.: Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve.- Wasserwirtschaft Wassertechnik **14**(6), 165–168 (1964)

Butturini, A., Bernal, S., Sabater, S., Sabater, F.: The influence of riparian-hyporheic zone on the hydrological responses in an intermittent stream.- Hydrol. Earth Syst. Sci. **6**(3), 515–525 (2002)

Conant, B. J.: Delineating and quantifying ground water discharge zones using streambed temperature.- Ground Water **42**(2), 243–257 (2004)

De Sutter, R., Krein, A.: Use of artificial flood events to demonstrate the invalidity of simple mixing models.- Hydrol. Sci. J. **46**(4), 611–622 (2001)

Hatch, C. E., Fisher, A. T., Revenaugh, J. S., Constantz, J., Ruehl, C.: Quantifying surface water – groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: Method development.- Water Resour. Res. **42**, W10410 (2006). doi: 10.1029/2005WR004787

Hoehn, E., Cirpka, O. A.: Assessing residence times of hyporheic ground water in two alluvial flood plains of the Southern Alps using water temperature and tracers.- Hydrol. Earth Syst. Sci. **10**(4), 553–563 (2006)

Jätzold, R.: Der Trierer Raum und seine Nachbargebiete. Trierer Geographische Studien Sonderheft 6.- 360 S.; Selbstverlag der Geographischen Gesellschaft Trier in Zusammenarbeit mit der Fachgruppe Geographie/Geowissenschaften der Universität Trier (1984)

Kalbus, E., Reinstorf, F., Schirmer, M.: Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review.- Hydrol. Earth Syst. Sci. **10**(6), 873–887 (2006)

Kirchner, J. W.: A double paradox in catchment hydrology and geochemistry.- Hydrol. Process. **17**, 871–874 (2003)

Langhoff, J. H., Rasmussen, K. R., Christensen, S.: Quantification and regionalization of groundwater-surface water interaction along an alluvial stream.- J. Hydrol. **320**, 342–358 (2006)

Lighthill, M. J., Whitham G. B.: On kinematic waves: 1. Flood movement in long rivers. Proc. R. Soc. London A, Math. Phys. Sci. **29**(1178), 281–316 (1955)

Meyer, W.: Geologie der Eifel.- 614 S. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart (1986)

Negendank, J.: Trier und Umgebung. Sammlung Geologischer Führer Band 60.- 116 S. Gebrüder Borntraeger, Berlin (1974)

Nolan, K. M., Hill, B. R.: Storm-runoff generation in the Permanente Creek drainage basin, west central California – an example of flood-wave effects on runoff composition.- J. Hydrol. **113**, 343–367 (1990)

Orghidan, T.: Ein neuer Lebensraum des unterirdischen Wassers: Der hyporheische Biotop.- Arch. Hydrobiol. **55**, 392–414 (1959)

Schmidt, C., Bayer-Raich, M., Schirmer, M.: Characterization of spatial heterogeneity of groundwater-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale.- Hydrol. Earth Syst. Sci. **10**(6), 849–859 (2006)

Silliman, S. E., Ramirez, J., McCabe, R. L.: Quantifying downflow through creek sediments using temperature time series: one-dimensional solution incorporating measured surface temperatures.- J. Hydrol. **167**, 99–119 (1995)

Sophocleous, M. A.: Interactions between groundwater and surface water: the state of the science.- Hydrogeol. J. **10**(1), 52–67 (2002)

Wett, B., Jarosch, H., Ingerle, K.: Flood induced infiltration affecting a bank filtrate well at the River Enns, Austria.- J. Hydrol. **266**, 222–234 (2002)

Winter, T. C.: Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems.- Hydrogeol. J. **7**(1), 28–45 (1999)

Woessner, W. W.: Stream and fluvial plain ground water interactions: rescaling hydrologic thought.- Ground Water **38**(3), 423–429 (2000)

Wondzell, S. M., Swanson, F. J.: Floods, channel change, and the hyporheic zone.- Water Resour. Res. **35**(2), 555–567 (1999)