

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Straßer, Daniel; Montenegro, Héctor; Liesch, Tanja
Markierungsversuche zur Bestimmung der
Grundwasserströmungs- verhältnisse im
lösungsempfindlichen Baugrund

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102251>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Straßer, Daniel; Montenegro, Héctor; Liesch, Tanja (2015): Markierungsversuche zur Bestimmung der Grundwasserströmungs- verhältnisse im lösungsempfindlichen Baugrund. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Projekte der Geotechnik an Bundeswasserstraßen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 17-25.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Markierungsversuche zur Bestimmung der Grundwasserströmungsverhältnisse im lösungsempfindlichen Baugrund

Daniel Straßer, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Héctor Montenegro, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Tanja Liesch, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

1 Einführung

Staustufen an Bundeswasserstraßen dienen der Regelung von Wasserständen und bestehen meist aus einem mehrfeldrigem Wehr, einer Schleusenanlage und einem Kraftwerk. Insgesamt erzeugen 15 Staustufen entlang des Mittleren Neckars eine jahreszeitlich unabhängige schiffbare Wassertiefe. Einige dieser Bauwerke gründen in schwierigem Baugrund und sind inzwischen sanierungsbedürftig. Besonders an der Staustufe Hessigheim mussten in der Vergangenheit bereits mehrfach kostenaufwändige Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Auslaugungsprozesse in gipshaltigen Schichten des Mittleren Muschelkalks führen zu Setzungen und zur Schädigung der Bausubstanz. Eine Vielzahl an Bohrungen wurde in den letzten Jahrzehnten abgeteuft, um Aufschluss über das Fortschreiten des Auslaugungsprozesses zu erhalten. Sanierungsmaßnahmen, wie die Verpressung von Zement und der Einbau von Spundwänden, führten zu einer Reduzierung der Schädigungen. Dennoch kommt es noch immer zu Setzungen in unmittelbarer Umgebung des Bauwerks, wodurch die Bausubstanz beansprucht wird. Um detaillierte Kenntnisse der Grundwasserströmungsprozesse im Bereich der Schleuse zu erhalten, wurden umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen am Standort durchgeführt.

Ziel der Untersuchungen war, ein verbessertes Verständnis des komplexen hydraulischen Systems im Bereich der Staustufe zu erhalten. Ein umfassendes Verständnis der hydrogeologischen Verhältnisse ist für die Konzeption zukünftiger Sanierungsmaßnahmen erforderlich, durch die auch künftig ein reibungsloser Schiffsverkehr entlang des Neckars gewährleistet werden soll.

In Kooperation mit dem Institut für Angewandte Geowissenschaften, Abteilung Hydrogeologie, des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurde im Zuge der hydrogeologischen Untersuchungen im Herbst 2013 ein gekoppelter Grund- und Oberflächenwassermarkierungsversuch durchgeführt, wodurch Informationen über Fließwege und Strömungsgeschwindigkeiten im Untergrund gewonnen werden konnten. Die Ergebnisse dieser Versuche sollen nachfolgend genutzt werden, um ein verbessertes hydrogeologisches Modellverständnis zu erarbeiten.

2 (Hydro-)Geologie

Im Bereich der Stauanlage Hessigheim bilden sedimentär abgelagerte Gesteinsformationen des Mittleren Muschelkalks die Basis der Talsohle. Diese werden großflächig von einer Auflage aus quartärem Sediment überdeckt. Stellenweise ist eine bis zu mehrere Meter mächtige Hanglehm-/Residualtonschicht zwischengeschaltet. Die höheren Lagen der Region bestehen aus Kalkformationen des Oberen Muschelkalks mit lokaler Bedeckung aus Tonsteinen des Unteren Keupers und Löss.

Lösungsprozesse in den tieferliegenden Gesteinsschichten beeinflussen nicht nur die Ausbildung von Hohlräumen im Untergrund, sondern auch das Grundwasserfließsystem und die morphologische Struktur der Erdoberfläche maßgeblich. Setzungserscheinung an Bauwerken, Erdfälle und Dolinen resultieren aus starker Verkarstung von Gesteinsschichten bestehend aus wasserlöslichen Mineralen wie Calcit, Halit, Anhydrit oder Gips.

Über kleine Spalten und Klüfte kann Wasser in das Gestein eindringen und diese zu Röhren und Kanälen erweitern. Die Durchlässigkeit des Gesteins steigt und es kommt zunehmend zur Durchströmung von untersättigtem Wasser. In diesem fortgeschrittenen Stadium findet Lösung und Austrag nahezu vollständig über die entstandenen Fließgerinne statt. Das kleinmaßstäbliche Kluftsystem kann vernachlässigt werden. Dieser Prozess gilt als transportbestimmt, d.h. er wird durch den Übergang von Ionen aus der Grenzschicht in die frei bewegliche Flüssigkeit kontrolliert und ist demnach sehr stark von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig (Böhringer et al., 1990). Bleibt der hydraulische Gradient in dieser Zeit erhalten, können durch den andauernden Materialaustrag große Hohlräume und Höhlen entstehen.

3 Markierungsversuch

3.1 Eingabe der Markierungsstoffe

Die Eingabe der Markierungsstoffe in Grund- und Oberflächenwasser erfolgte am 11.09.2013. Jeweils 1 kg des Fluoreszenzfarbstoffs Amidorhodamin G wurde hierbei direkt in den unteren Grundwasserleiter über zwei Grundwassermessstellen im Oberwasserbereich der Staustufe, jeweils eine direkt am östlichen und am westlichen Ufer, eingegeben. Der gelöste Markierungsstoff und das erforderliche Nachspülvolumen an Klarwasser wurden mit einer Pumpe direkt in den Bereich der Filterstrecke der jeweiligen Messstelle eingebracht. Die Auswahl der Eingabemessstellen erfolgte auf Grund deren gleicher Entfernung und ihrer symmetrischen Lage beidseitig zur Staustufe (Bild 1). Durch Voruntersuchungen wurde außerdem die Qualität der hydraulischen Anbindung der Messstellen an den Grundwasserleiter sichergestellt (Blechsmidt, 2013).

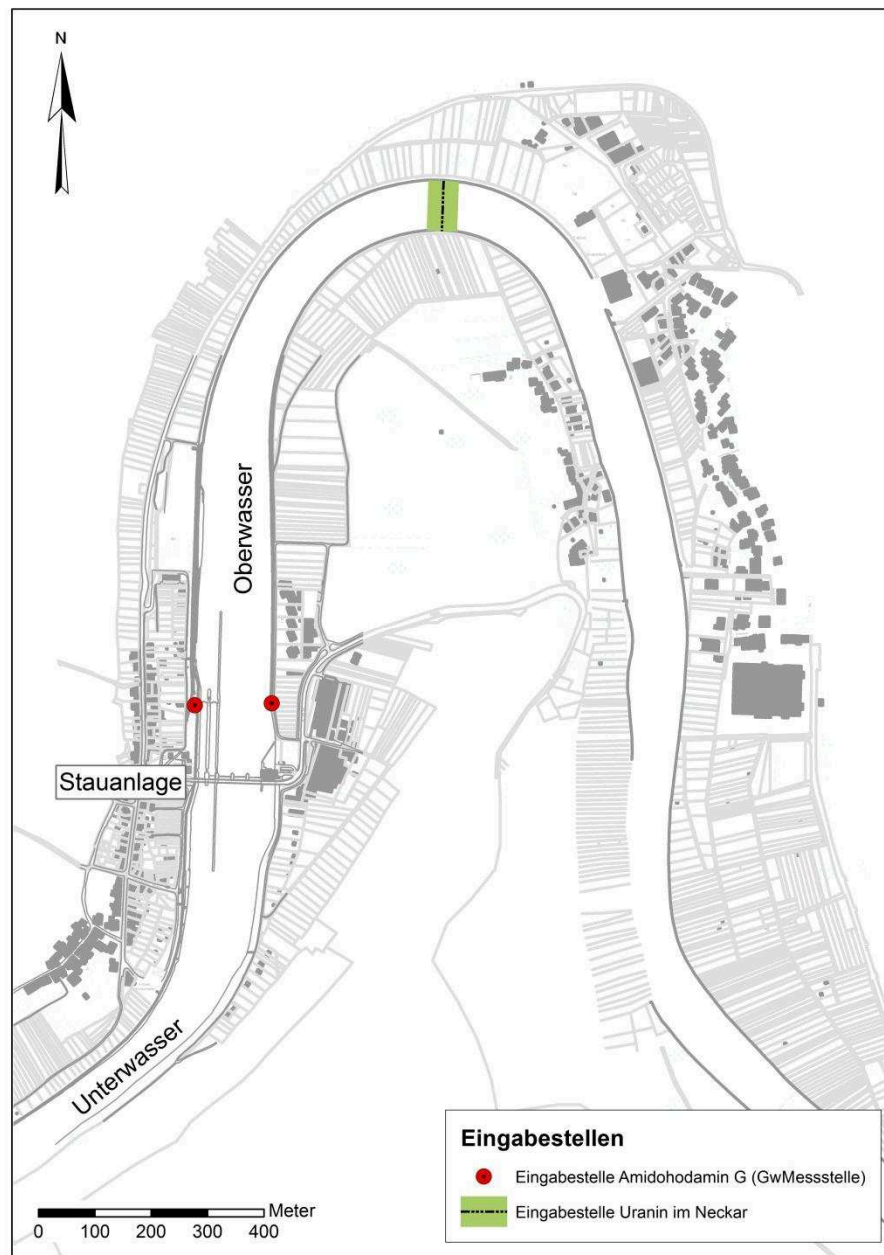


Bild 1: Eingabestellen der Markierungsstoffe Uranin und Amidorhodamin G

Die Eingabe von 5 kg des Markierungsstoffs Uranin in den Neckar erfolgte von Bord eines Schiffs. Über einen Querschnitt am Scheitelpunkt des Mäanders zwischen Hessigheim und Mundelsheim bei Neckarkilometer 144,1 km (Bild 1) wurde an fünf Punkten jeweils 1 kg des Markierungsstoffs verteilt über die gesamte Wassersäule eingegeben. Da zum Zeitpunkt der Eingabe ein relativ hoher Abfluss verbunden mit einer hohen Trübung herrschte, konnte bereits innerhalb weniger Stunden visuell die Grünfärbung des Neckarwassers (Bild 2), nicht mehr wahrgenommen werden.



Bild 2: Blick von Norden auf den durch den Markierungsstoff Uranin grün gefärbten Neckar an der Neckarschleife zwischen Mundelsheim und Hessigheim

Bei beiden Markierungsstoffen handelt es sich um human- und ökotoxikologisch unbedenkliche Fluoreszenzfarbstoffe, die über Fluorimetrie im Labor quantitativ nachgewiesen werden können (Behrens et al., 2001). Sie eignen sich auf Grund ihrer guten Wasserlöslichkeit, ihrer geringen Wechselwirkung mit anderen Stoffen und ihrer geringen Nachweisgrenze als Markierungsstoffe im Grund- und Oberflächenwasser. Die Nachweisgrenze von Uranin liegt dabei je nach Versuchsbedingungen bei 0,002 µg/l und von Amidorhodamin G bei 0,007 µg/l (LFU Bayern, 2002).

3.2 Monitoring

Unmittelbar nach Eingabe der Markierungsstoffe wurde ein umfangreiches Monitoringprogramm gestartet. An insgesamt 46 verschiedenen Stellen wurden regelmäßig, in hoher zeitlicher Auflösung, Grund- und Oberflächenwasserproben entnommen. Die Probenahmemethode wurde entsprechend der jeweiligen Anforderungen der Messpunkte angepasst (Bild 3). Vor der Eingabe des Markierungsstoffs wurden an allen Probenahmestellen Blindproben entnommen, um eine eventuell vorhandene Anfangskonzentration der Markierungsstoffe auszuschließen. An den ersten 6 Tagen wurden in 16 Grundwassermessstellen tiefenorientierte Schöpfproben, in 6 Grundwasserstellen Pumpproben und an drei Stellen Schöpfproben aus dem Flusswasser des Neckars in einem Zeitintervall von jeweils 3 Stunden entnommen. Danach wurde das Probenentnahmeintervall zunächst auf 4 Stunden und später schrittweise auf 6 bzw. 12 Stunden bis zum 23.09.2013 vergrößert. Danach wurde bis zum 03.10.2013 zweimal wöchentlich eine Pro-

benahme an allen Messpunkten durchgeführt, nachfolgend bis zum 17.10.2013 im wöchentlichen Rhythmus. Anschließend wurde ein monatliches Probenahmeintervall angestrebt.

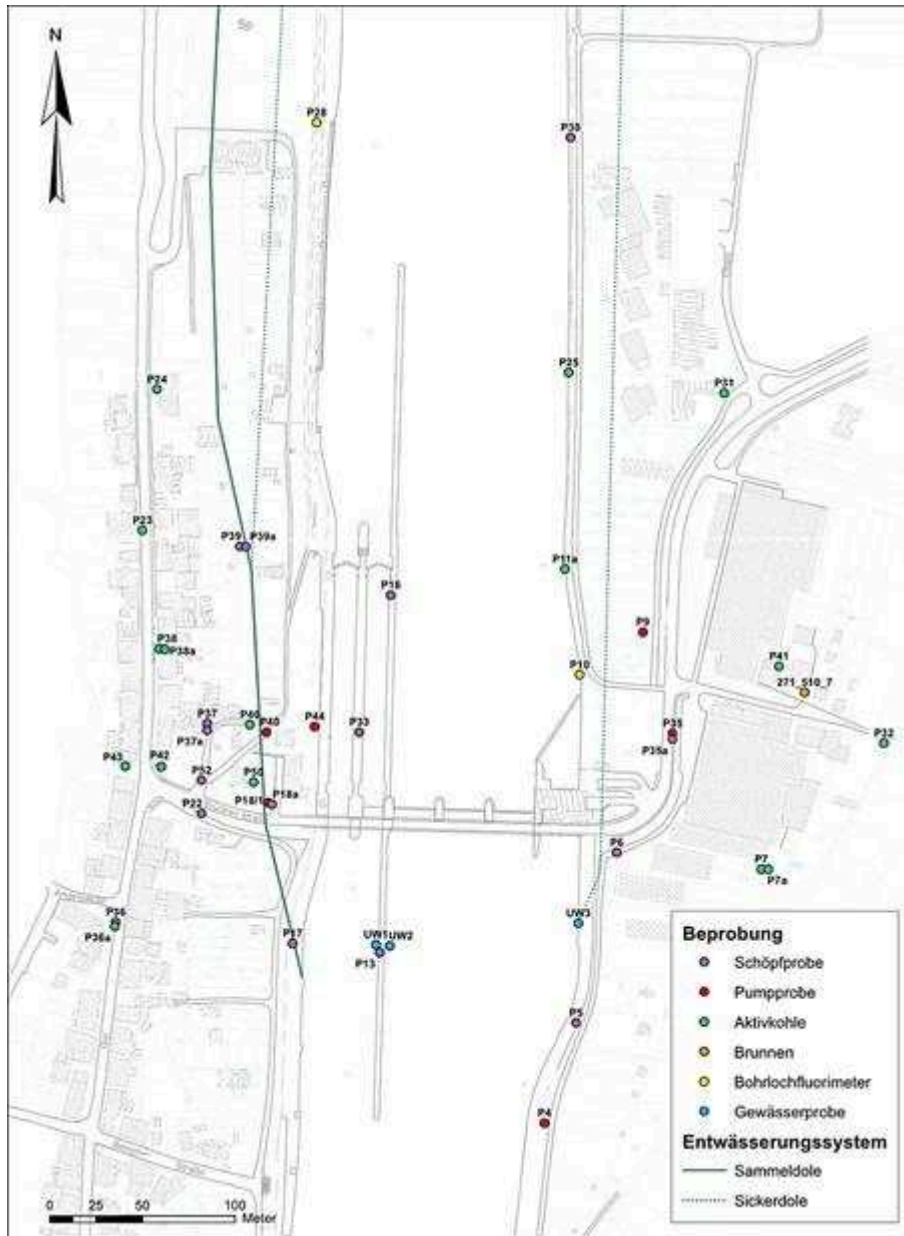


Bild 3: Im Rahmen des Markierungsversuchs beprobte Messstellen mit der Art der Probenentnahme

4 Ergebnisse

Im Zuge des Markierungsversuchs wurden die Fluoreszenzfarbstoffe Uranin in den Neckar und Amidohordamin G in den Grundwasserleiter (Messstellen P11 und P20) eingegeben. Während

des anschließenden Monitoringprogramms konnten die Markierungsstoffe in mehreren Messstellen nachgewiesen werden. Einen Überblick, sowie mögliche Fließwege zeigt Bild 4.

Die aus der Durchgangskurve von Amidorhodamin G gewonnenen Ergebnisse zeigen eine direkte hydraulische Verbindung mit hoher Grundwasserströmungsgeschwindigkeit zwischen den Messstellen P11 und P10 am östlichen Ufer. Der Ersteinsatz des Markierungsstoffs in P10 fand bereits 7 Stunden nach der Eingabe statt. Die an der weiter östlich, 35 Meter abseits des Neckars, gelegenen Messstelle P35 ermittelten Werte unterscheiden sich davon deutlich. Hier wurde das Eintreffen des Markierungsstoffs erst nach 14 Tagen ermittelt, die berechnete Fließgeschwindigkeit ist entsprechend wesentlich geringer. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird angenommen, dass der Hauptabfluss entlang des Ufers in unmittelbarer Nähe zum Kraftwerk verläuft. Im Bereich des Unterwassers der Staustufe existieren am östlichen Ufer nur wenige Messstellen. In keiner von diesen konnte bisher einer der Markierungsstoffe nachgewiesen werden.

Am westlichen Ufer erreichte der Markierungsstoff Amidorhodamin G, ausgehend von der Eingabestelle P20, nach 2 Tagen die Messstelle P40. Die Dispersivität ist höher, der Anteil der mobilen Phase und die Fließgeschwindigkeit geringer als bei der hydraulischen Verbindung zwischen P10 und P11 am östlichen Ufer. Als mögliche Ursache hierfür wird die stauende Wirkung des hier vorhandenen Dichtungsschleiers angenommen. Durch die Wirkung des Dichtungsschleiers, der auf der Westseite etwa 80 m über das Neckarufer hinaus verlängert wurde, wird der hydraulische Gradient in diesem Bereich gegenüber der Ostseite, wo der Dichtungsschleier direkt am Ufer endet, verringert, woraus geringere Fließgeschwindigkeiten resultieren. Nach 78 Tagen konnte der Markierungsstoff auch im Abstrom des Dichtungsschleiers, im Flachpegel P18a, nachgewiesen werden. Das Grundwasser strömt im Staubereich, oberstromig des Dichtungsschleiers, vom unteren Grundwasserleiter in den oberen Grundwasserleiter. In diesem Punkt bestätigen die Ergebnisse des Markierungsversuchs die zuvor auf Grundlage von Wasserstandsmessungen getroffene Annahme. Ob anschließend eine Um- oder Durchströmung des Dichtungsschleiers erfolgt, konnte auf Grundlage der Ergebnisse des Markierungsversuchs nicht abschließend geklärt werden, da dazu die Anzahl der Flachpegel im relevanten Bereich nicht ausreichte. Fehlstellen im oberen Bereich des Dichtungsschleiers (Neckarkies) stellen jedoch einen möglichen Interpretationsansatz der Messwerte dar. Eine Umströmung im oberen Grundwasserleiter erscheint relativ unwahrscheinlich, ist aber nicht auszuschließen. Im parallel durchgeführten Versuchsteil wurde der Markierungsstoff Uranin in den Neckar eingegeben. Durch die kurze Verweildauer im Staubereich konnte nur ein geringer Teil des eingegebenen Markierungsstoffs in den gesättigten Uferbereich infiltrieren. Der Großteil des infiltrierten Uranins umströmte dabei die Staustufe an beiden Ufern durch den oberen Grundwasserleiter (Neckarkies). Auch eine Durchströmung des Dichtungsschleiers am Westufer erscheint auf Grund der Ergebnisse mit Amidorhodamin G wahrscheinlich. Die Versuchsergebnisse zeigen außerdem eine hydraulische Verbindung zwischen den beiden Grundwasserstockwerken, wie

sie auch auf Grund der geohydraulischen Untersuchungen vermutet wurde, da der Markierungsstoff Uranin auch in einigen Tiefpegeln am westlichen und östlichen Ufer nachgewiesen werden konnte.

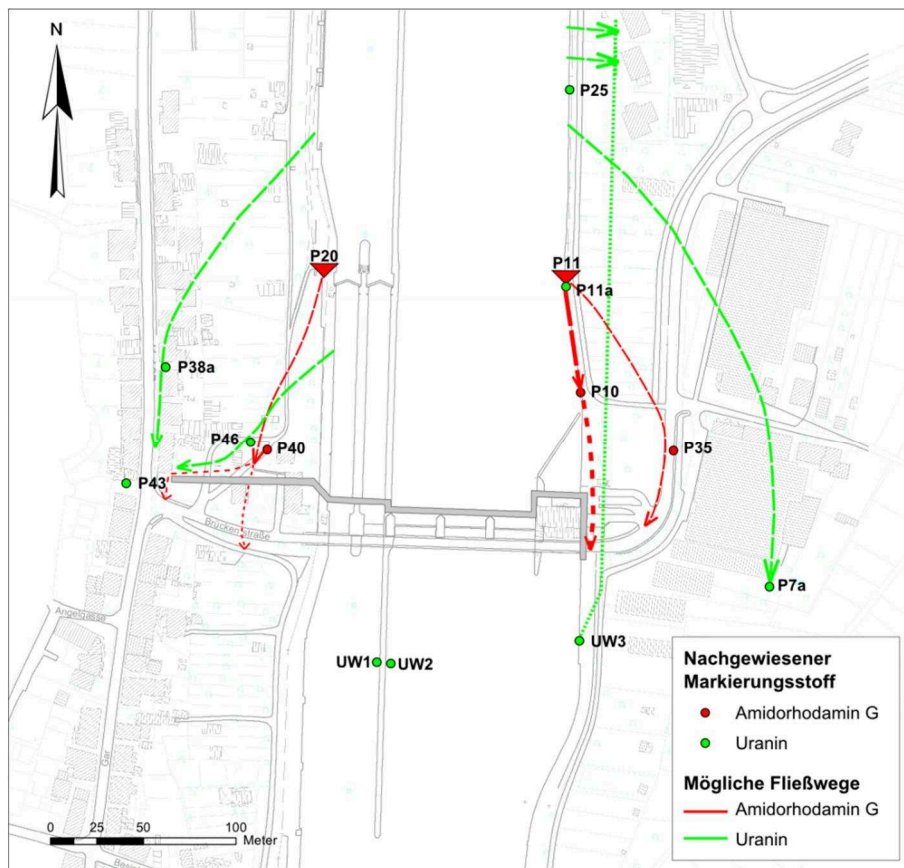


Bild 4: Übersicht zu den Ergebnissen des Markierungsversuchs und möglichen Fließwegen (verändert nach Blechschmidt, 2013)

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen konnte eine Modellvorstellung des Aquifersystems entwickelt werden. Auf kleinem Raum ändern sich die hydraulischen Eigenschaften des Aquifers teilweise signifikant. Der fortschreitende Auslaugungsprozess im unteren Grundwasserleiter führt außerdem zu einer stetigen Veränderung von dessen Struktur, wodurch keine langfristig gültigen Aussagen getroffen werden können. Während im Bereich des Oberwassers an einigen Messstellen Amidorhodamin G oder Uranin nachgewiesen werden konnte, lieferte der Versuch bisher nur wenige Informationen über den Verbleib der Markierungsstoffe im Unterwasserbereich. Mit den im Rahmen des Markierungsversuchs gewonnenen Informationen kann der untere Grundwasserleiter als ein Karstsystem mit größtenteils von Norden nach Süden verlaufenden Hauptfließwegen und abzweigenden Fließgerinnen beschrieben werden (Bild 5). Der Hauptabfluss erfolgt auf kurzem Weg durch kanalartige, präferenzielle Fließwege. Ein kleinerer Teil des Grundwasservolumens durchströmt mit geringeren Fließgeschwindigkeiten

schmale Fließgerinne oder Klüfte in der Aquifermatrix. Im Bereich des Oberwassers kommt es zur Infiltration von Flusswasser in beide Grundwasserleiter. Die Infiltration in den unteren Grundwasserleiter erfolgt entweder über den oberen Aquifer oder direkt über Versturzungen. Landseitig, westlich der Staustufe wurde im Zuge ehemaliger Sanierungsmaßnahmen ein Dichtungsschleier installiert. Im Staubereich dessen ist eine Umkehrung des vertikalen hydraulischen Gradienten entstanden, was zeigt, dass der Dichtungsschleier eine hydraulische Barriere darstellt und damit in seiner Wirkung größtenteils intakt ist. Es erfolgt eine vertikale Grundwasserströmung vom unteren in den oberen Grundwasserleiter. Die beiden Grundwasserleiter interagieren demnach bereichsweise über hydraulische Kurzschlüsse untereinander und mit dem Neckar. Die Ergebnisse des Markierungsversuchs lassen aber auch die Vermutung zu, dass der Dichtungsschleier im oberen Bereich am Westufer nicht vollständig dicht ist.

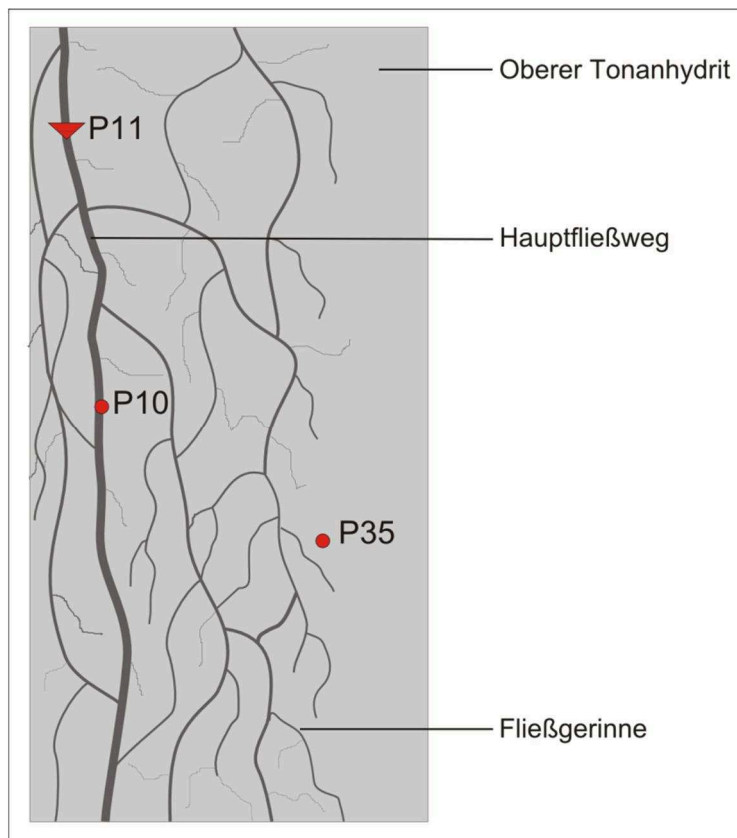


Bild 5: Modellvorstellung zu den Fließwegen am östlichen Ufer (verändert nach Blechschmidt, 2013)

Literatur

Behrens, H., Beims, U., Dieter, H., Dietze, G., Eikmann, T., Grummt, T., Hanisch, H., Henseling, H., Käß, W., Kerndorff, H., Leibundgut, C., Müller-Wegener, U., Rönnefahrt, I., Scharen-

- berg, B., Schleyer, R., Schloz, W. & Tilkes, F. (2001). Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers. *Hydrogeology Journal*, 9(3), 321-325.
- Blehschmidt, L. (2013): Hydrogeologische Untersuchungen zu den grundwasserinduzierten Veränderungen im lösungsempfindlichen Baugrund im Bereich der Staustufe Hessigheim am Neckar, unveröffentlichte Masterarbeit, Karlsruhe
- Böhringer, J., Jenni, J. P., Hürlimann, W., Reserle, G., Grauer, R., Norbert, J. (1990): Anhydritvorkommen als Wirtgestein für die Lagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle dargestellt am Beispiel des Bois de la Glaive: Statusbericht, Technischer Bericht 88-15. Baden, Schweiz: NAGRA Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle.
- LFU Bayern (2002): Merkblatt Nr. 3.1/2: Hinweise für die Durchführung und die Begutachtung von Markierungsversuchen in Gewässern.
abgerufen am 21.10.2013 von:
http://www.lfu.bayern.de/wasser/merkblattsammlung/teil3_grundwasser_und_boden/doc/nr_311.pdf