

# BERICHT

Projekt : RIKO-1

Cicerostr. 24  
D-10709 Berlin  
Germany  
Tel +49 (0)30 536 53 800  
Fax +49 (0)30 536 53 888  
www.kompetenz-wasser.de

## RISIKOANALYSE DES EINTRAGS MIKROBIELLER KONTAMINATION IN TRINKWASSERBRUNNEN UND ABLEITUNG VON VERMEIDUNGSSTRATEGIEN – PHASE 1

### Durchführung und Ergebnisse der Tracerversuche an Brunnen im Wasserwerk Jungfernheide

von  
Christian Menz

Abteilung "Nachhaltige Nutzung und Schutz der Ressource Grundwasser"  
Kompetenzzentrum Wasser Berlin, Cicerostraße 24, 10709 Berlin, Deutschland  
Email: [hella.schwarzmueller@kompetenz-wasser.de](mailto:hella.schwarzmueller@kompetenz-wasser.de), Tel. ++49 (0)30-536-53814

für die  
Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Die Erstellung dieses Berichtes wurde finanziell gefördert durch



Berlin, Germany  
2013

## **Important Legal Notice**

Disclaimer: The information in this publication was considered technically sound by the consensus of persons engaged in the development and approval of the document at the time it was developed. KWB disclaims liability to the full extent for any personal injury, property, or other damages of any nature whatsoever, whether special, indirect, consequential, or compensatory, directly or indirectly resulting from the publication, use of application, or reliance on this document. KWB disclaims and makes no guaranty or warranty, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of any information published herein. It is expressly pointed out that the information and results given in this publication may be out of date due to subsequent modifications. In addition, KWB disclaims and makes no warranty that the information in this document will fulfil any of your particular purposes or needs. The disclaimer on hand neither seeks to restrict nor to exclude KWB's liability against all relevant national statutory provisions.

## **Wichtiger rechtlicher Hinweis**

Haftungsausschluss: Die in dieser Publikation bereitgestellte Information wurde zum Zeitpunkt der Erstellung im Konsens mit den bei Entwicklung und Anfertigung des Dokumentes beteiligten Personen als technisch einwandfrei befunden. KWB schließt vollumfänglich die Haftung für jegliche Personen-, Sach- oder sonstige Schäden aus, ungeachtet ob diese speziell, indirekt, nachfolgend oder kompensatorisch, mittelbar oder unmittelbar sind oder direkt oder indirekt von dieser Publikation, einer Anwendung oder dem Vertrauen in dieses Dokument herrühren. KWB übernimmt keine Garantie und macht keine Zusicherungen ausdrücklicher oder stillschweigender Art bezüglich der Richtigkeit oder Vollständigkeit jeglicher Information hierin. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die in der Publikation gegebenen Informationen und Ergebnisse aufgrund nachfolgender Änderungen nicht mehr aktuell sein können. Weiterhin lehnt KWB die Haftung ab und übernimmt keine Garantie, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen der Erfüllung Ihrer besonderen Zwecke oder Ansprüche dienlich sind. Mit der vorliegenden Haftungsausschlussklausel wird weder bezweckt, die Haftung der KWB entgegen den einschlägigen nationalen Rechtsvorschriften einzuschränken noch sie in Fällen auszuschließen, in denen ein Ausschluss nach diesen Rechtsvorschriften nicht möglich ist.

# Impressum

## **Titel**

Risikoanalyse des Eintrags mikrobieller Kontamination In Trinkwasserbrunnen und Ableitung von Vermeidungsstrategien – Phase 1

## **Autoren**

Christian Menz, KWB

## **Qualitätskontrolle**

Hella Schwarzmüller, KWB

Gunnar Lorenzen, BWB

## **Veröffentlichung genehmigt durch das Technische Komitee**

Regina Gnirss, BWB F+E

Elke Wittstock, BWB WV

Dietmar Petersohn, BWB WV

Andreas Wicklein, BWB WV

Gesche Grützmaker, KWB

Andreas Hartmann, KWB

## **Leistung**

RIKO-1 Zwischenbericht Tracerversuche

## **Endversion**

25.02.2013

# Inhalt

KAPITEL 1 PROBLEMSTELLUNG.....	1
1.1 BRUNNENLAGE UND –AUSBAU .....	1
1.2 BISHERIGER UNTERSUCHUNGSUMFANG ZUR KONTROLLE DES BRUNNENAUSBAUS BEI DEN BWB .....	2
1.3 TRACERVERSUCHE IM DIREKTEN UMFELD EINES BRUNNENS .....	3
KAPITEL 2 VERSUCHSBESCHREIBUNG.....	4
2.1 BRUNNEN JUNOST-12 .....	4
2.1.1 Untersuchung auf Umläufigkeiten innerhalb der Brunnenstube .....	4
2.1.2 Bestimmung der Infiltrationsrate im direkten Brunnenumfeld .....	5
2.1.3 Berechnung der theoretischen Infiltrationszeit von der Geländeoberkante (GOK) zur Oberkante des ersten Filterabschnitts (FOK1) .....	6
2.1.4 Tracerversuch.....	8
2.2 .....	9
2.3 BRUNNEN JUNOST-06 .....	10
2.3.1 Untersuchung auf Umläufigkeiten innerhalb der Brunnenstube .....	10
2.3.2 Bestimmung der Infiltrationsrate im direkten Brunnenumfeld .....	11
2.3.3 Berechnung der theoretischen Infiltrationszeit von der Geländeoberkante (GOK) zur Oberkante des ersten Filterabschnitts (FOK1) .....	12
2.3.4 Tracerversuch.....	13
KAPITEL 3 DISKUSSION .....	19
3.1 DICHTIGKEIT DES SCHACHTBAUWERKS .....	19
3.2 INFILTRATIONSRATE.....	19
3.3 DICHTIGKEIT DES BRUNNENAUSBAUS .....	20
3.4 FUNKTIONALITÄT DER TONSPERRE .....	21
KAPITEL 4 SCHLUSSFOLGERUNGEN .....	22
4.1 MAßNAHMEN ZUR RISIKOMINIMIERUNG .....	22
4.2 EIGNUNG VON MARKIERUNGSVERSUCHEN ZUM NACHWEIS VON UMLÄUFIGKEITEN .....	22
REFERENZEN .....	24
ANHANG 1 AUSBAUZEICHNUNG DER BRUNNEN UND HYDROGEOLOGISCHES PROFIL DER GALERIE JUNGFERNHEIDE-OST .....	25
ANHANG 2 ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE .....	27

# Kapitel 1

## Problemstellung

Das Forschungsprojekt RIKO-1 wurde von den Berliner Wasserbetrieben (BWB) in Reaktion auf die Befundlage aus dem Spätsommer 2011 initiiert, als nach wiederholten Starkregenereignissen anhaltend Befunde hygienisch relevanter Mikroorganismen im Brunnenrohwasser auftraten. Basierend auf der systematischen Untersuchung möglicher Eintragspfade werden im Rahmen des Projektes Risiken mikrobieller Kontaminationen bewertet und Gegenmaßnahmen und Vorsorgestrategien abgeleitet.

Die Untersuchungen an Brunnen im Wasserwerk Jungfernheide dienen dabei der qualitativen Abschätzung von möglichen unerwünschten Wasserzutritten entlang der Ausbaumaterialien (Vollrohr, Außenpegel, Ringraumverfüllung) in die Brunnen und das Rohwasser. Dazu wurden an zwei repräsentativen Vertikalfilterbrunnen mit verschiedenen baulichen Merkmalen (Tonsperre, mechanische oder chemische Dichtung zwischen Brunnenkopf und Brunnenschacht) Infiltrations- und Markierungsversuche durchgeführt. Anhand dieser Feldversuche konnten eine systematische Überprüfung von Undichtigkeiten und verkürzten Fließwegen an Brunnen dieses Bautyps vorgenommen und differenzierte Präventivmaßnahmen erarbeitet werden.

RIKO-1 diente dabei auch der ersten Beurteilung, ob vertikale Markierungsversuche zur Überprüfung von Kurzschlüssen an Abdichtungsvorrichtungen von Vertikalfilterbrunnen generell geeignet sind. Bei einem erfolgreichen Versuchsverlauf können im Anschluss systematische Untersuchungen an verschiedenen Kombinationen geologischer Gegebenheiten (Stauer, Grundwasserleitermaterial) und Brunnenkonstruktionstypen (Bohrdurchmesser, Länge der Tonsperre) empfohlen werden. Dabei sollte auch der Vergleich mit herkömmlichen geophysikalischen Verfahren zum Nachweis der Dichtigkeit von Brunnenbauwerken in Betracht gezogen werden.

### 1.1 Brunnenlage und –ausbau

Die Festlegung eines geeigneten Standorts für die Durchführung der Infiltrations- und Markierungsversuche erfolgte anhand baulicher, betrieblicher und wasserrechtlicher Gesichtspunkte.

Nach Einbezug obengenannter Kriterien wurden zwei Testbrunnen auf dem Gelände des Wasserwerkes Jungfernheide ausgewählt (Abbildung 1 und Tabelle 1), da der Standort folgende relevante Eigenschaften vereint:

- der Standort befindet sich nicht in einem Wasserschutzgebiet und eine Gefährdung für die Trinkwasserversorgung durch das verwendete Markierungsmittel kann ausgeschlossen werden;
- die Brunnen sind betriebsbereit und werden ausschließlich zur Grundwasserregulierung genutzt;
- das geförderte Wasser kann ohne erhöhten technischen Aufwand abgeleitet werden und
- am Standort finden sich Brunnen mit und ohne Tonsperre im Ringraum oberhalb des Filters

Da es sich bei den Vertikalfilterbrunnen am Standort Jungfernheide-Ost um typische Ausbaumformen von Brunnen im BWB-Bestand handelt, ist die Übertragung wesentlicher Ergebnisse und Schlussfolgerungen auf andere Brunnen verschiedener WW in Berlin möglich.

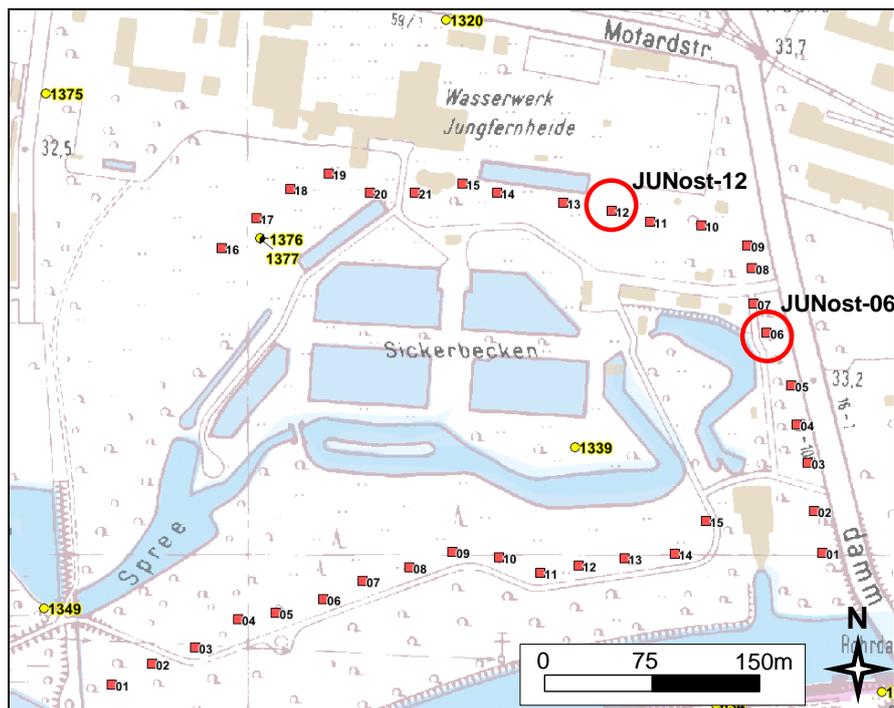


Abbildung 1: Lageplan des WW Jungfernheide mit den beiden für die Infiltrations- und Markierungsversuche ausgewählten Brunnen JUNost-06 und JUNost-12.

Tabelle 1: Ausbau-Charakteristika der für die Versuche ausgewählten Brunnen JUNost-06 und JUNost-12.

Brunnen		JUNost-12	JUNost-06
Baujahr	-	1988	1974
Ø Brunnenschacht	[m]	1,5	1,5
Tiefe Brunnenschacht		3,47	2,81
Ausbautiefe Brunnen	[m]	34,40	37,60
Filteroberkante	[m u GOK]	22	20
Filterrohlänge	[m]	10	13
Förderleistung	[m <sup>3</sup> /h]	156	100
RWS	[m u. GOK]	4,83	5,05
BWS IP	[m u. GOK]	6,65	6,33
BWS AP	[m u. GOK]	6,6	5,98
Aufsatzrohr	[m]	18,53	18,33
GW-Stockwerk	-	2.	2.
Tonsperren-Mächtigkeit	[m]	1,4	-
Oberkante Tonsperre	[m u GOK]	6,50	-

## 1.2 Bisheriger Untersuchungsumfang zur Kontrolle des Brunnenausbau bei den BWB

Zum Nachweis der Dichtigkeit nach Brunnenneubau oder im Zuge der Brunnenüberwachung kommen in der Regel bohrlochgeophysikalische Methoden zum Einsatz. Eine Übersicht über die generelle Eignung aktuell genutzter Methoden hinsichtlich einer Erfassung von vertikalen Umläufigkeiten am Brunnenbauwerk gibt Tabelle 2.

Neben bohrlochgeophysikalischen Messmethoden werden von den BWB Dichtigkeitstests am abgepackten Vollrohr und am Brunnenkopf gemäß der Arbeitsblätter W 122 (2011) und W 124 (1998) des DVGW durchgeführt.

Tabelle 2: Bohrlochgeophysikalische Methoden zur Überprüfung der Dichtigkeit an Brunnenbauwerken (DVGW 2005).

Messverfahren	Zielstellung	Erfassung
Gamma-Gamma-Dichtescan (GGD)	Einschätzung der Lagerungsdichte im Ringraum	Lithologie
segmentierter Gamma-Log (SGL)	Lokalisation und Abgrenzung von Ringraumabdichtungen	Ringraumverfüllung
Ringraum-Scan (RGG.D)	Ermittlung Klüftigkeit, Schichtengrenzen, Ringraumfüllung, Tonsperrennachweis	Rohrexzentrizität, Lithologie
gasdynamische Test (GDT)	Quantifizierung/ Lokalisierung von Migrationspfaden	Ringraumabdichtung
Tracer-Fluid-Logging (TFL)	Quantifizierung/ Lokalisierung von Fließbewegungen	Brunnen- und Bohrlochinnenraum

### 1.3 Tracerversuche im direkten Umfeld eines Brunnens

Ein vergleichbarer Tracerversuch zum phänomenologischen Nachweis von vertikalen hydraulischen Kurzschlüssen in Folge defekter Abdichtungsvorrichtungen wurde bei den BWB bisher noch nicht durchgeführt.

In der Literatur fand sich nur eine vergleichbare Studie zu Markierungsversuchen in der ungesättigten Zone (Ullsperger, Merkel et al. 1988). Diese umfasste in-situ-Beprobungen eines Kiesgrundwasserleiters bei Großhadern (Bayern) zur Beschreibung des Sickerwassertransportes in der ungesättigten Zone über einen Zeitraum von fünf Jahren. Unter anderem wurde anhand von Markierungsversuchen mit Uranin sowie von Tensiometer-Messungen die Sickergeschwindigkeit bzw. die mittlere Verweilzeit von infiltrierendem Wasser entlang eines begehbaren Probenahmeschachtes bestimmt. Die ermittelten Sickergeschwindigkeiten lagen in zwei Größenordnungsbereichen von wenigen Metern bis zu mehreren tausend Metern pro Jahr. Dies wurde vor allem auf Extremwetter-Ereignisse (anhaltende Niederschläge) zurückgeführt, in Folge derer sich die Sickergeschwindigkeiten stark erhöhten.

Eine weitere Studie (Hötzl & Göppert 2007) widmete sich einem Vergleich unterschiedlicher Markierungsstoffe und der Entwicklung einer optimierten Tracer-Technik zur Bewertung der hygienischen Gefährdung von Grundwässern. Ein wesentliches Ergebnis der Studie war, dass Partikel und Bakterien beim Transport in der gesättigten Zone einen deutlich schnelleren Ersteinsatz zeigen als gelöste bzw. konservative Markierungsstoffe wie Uranin. Da Partikel und Bakterien aufgrund ihrer Größe bevorzugt in den großen Poren entlang der Hauptfließpfade transportiert werden, kann ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit, in Abhängigkeit des durchströmten Materials, die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers übersteigen.

## **Kapitel 2**

### **Versuchsbeschreibung**

Im Folgenden werden die Versuche entsprechend ihrer zeitlichen Abfolge erläutert. Für jeden der beiden Testbrunnen werden dazu die Vorversuche zur Bestimmung der Infiltrationsrate sowie der Tracerversuch mit Methodik und Ergebnissen zusammengefasst.

#### **2.1 Brunnen JUNost-12**

Brunnen JUNost-12 wurde als Testbrunnen mit einer Tonsperre im Ringraum im Bereich von ca. 3-4m unterhalb der Unterkante der Brunnenstube ausgewählt. Damit entspricht er zwar nicht dem heutigen Standard der BWB-Brunnen, bei dem die Tonsperre von der Unterkante des Brunnenschachtes bis ca. 2m über die Filterstrecke reicht, unterscheidet sich jedoch von Brunnen ohne Ringraumabdichtung. Da der Brunnen zur Grundwasserregulierung eingesetzt wird und daher dauerhaft in Betrieb ist, konnte die Durchführung des Markierungsversuches ohne Betriebsunterbrechungen gewährleistet werden. Die Ausbauezeichnung befindet sich im Anhang.

##### **2.1.1 Untersuchung auf Umläufigkeiten innerhalb der Brunnenstube**

###### Methodik

Undichtigkeiten innerhalb des Brunnenschachtes können zum Zutritt von in der Brunnenstube ausgetretenem Rohwasser oder in die Brunnenstube eingedrunenem Sicker- oder Niederschlagswasser führen. Zur Untersuchung potentieller Undichtigkeiten wurde ein Infiltrationsversuch unternommen, bei dem die Brunnenstube bis zu einer Überstauhöhe von 40 bis 50 cm mit Rohwasser des Brunnens geflutet wurde. Diese Überstauhöhe bedingte eine Überflutung des Brunnenkopfes, um dessen Installationen in die Untersuchungen mit einzubeziehen. Anschließend wurde über einen Zeitraum von 90 Minuten hinweg in einem Zeitintervall von 15 Minuten eine potentielle Absenkung der Überstauhöhe ermittelt. Nach 24 Stunden erfolgte eine Kontrollmessung und der Versuch wurde beendet.

###### Ergebnis

Bei dem Infiltrationsversuch innerhalb der Brunnenstube wurden nur geringe Änderungen ( $<0,5$  cm) der Überstauhöhe während des Versuchszeitraumes festgestellt (Abbildung 2). Da die Änderungen im Bereich der Messungenauigkeit liegen und keine Entwicklung aufzeigten, können signifikante Undichtigkeiten im unteren Bereich der Brunnenstube und eine daraus resultierende Infiltration ins Grund- oder/und Rohwasser ausgeschlossen werden. Dementsprechend ist bei diesem Schachttypen auch nicht von systematischen Umläufigkeiten innerhalb der Brunnenstube auszugehen. Jedoch können bauliche Undichtigkeiten aufgrund von abweichenden Schachttypen und – installationen, sowie wartungs- oder alterungsbedingte Wegsamkeiten für andere Brunnen nicht ausgeschlossen werden.

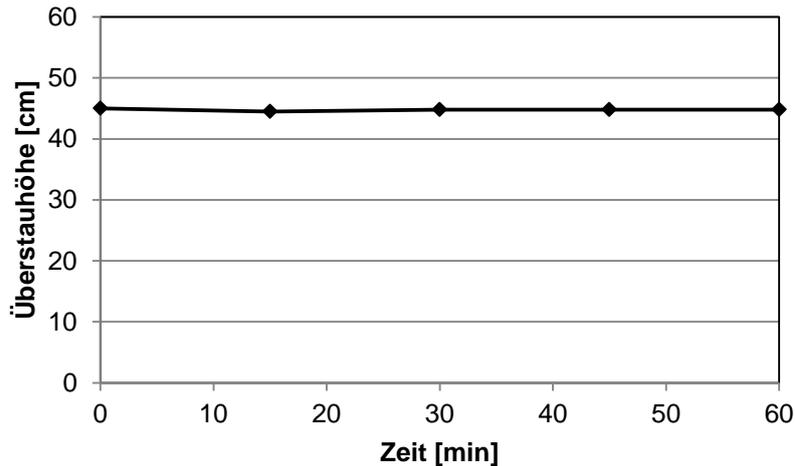


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf der Überstauhöhe während des Infiltrations-Versuches innerhalb des Brunnenschachtes von Brunnen JUNost-12.

## 2.1.2 Bestimmung der Infiltrationsrate im direkten Brunnenumfeld

### Methodik

Die Messung der Infiltrationsrate außerhalb des Brunnenschachtes erfolgte in einem improvisierten Ring-Infiltrometer. Dazu wurde im Abstand von 50 cm ringförmig um den Brunnenschacht von Brunnen JUNost-12 eine Wurzelsperre aus PVC aufgebaut (Abbildung 3). Diese wurde etwa 15 cm tief in den Boden eingelassen, um die Dispersion von aufgegebenem Wasser an der Erdoberfläche während der Infiltration zu verringern. Um eine ungehinderte Infiltration und eine genaue Ermittlung der Überstauhöhe zu ermöglichen, wurden die oberen 10 cm des Bodens (Grassoden) innerhalb des Infiltrometers abgetragen. Der Infiltrationstest erfolgte ohne vorherige Aufsättigung der ungesättigten Zone, wie es bei Ringinfiltrometerversuchen üblicherweise der Fall ist, da dies nach theoretischen Berechnungen eine Vorspülzeit von bis zu einem Jahr erforderlich gemacht hätte.

Der Infiltrationsversuch wurde ohne die Zugabe eines Markierungsstoffes durchgeführt. Die Flutung des Infiltrometer-Ringes erfolgte mit Rohwasser des untersuchten Brunnens. Die Messung der Infiltrationsrate begann, sobald sich eine Überstauhöhe von 10 cm eingestellt hatte.

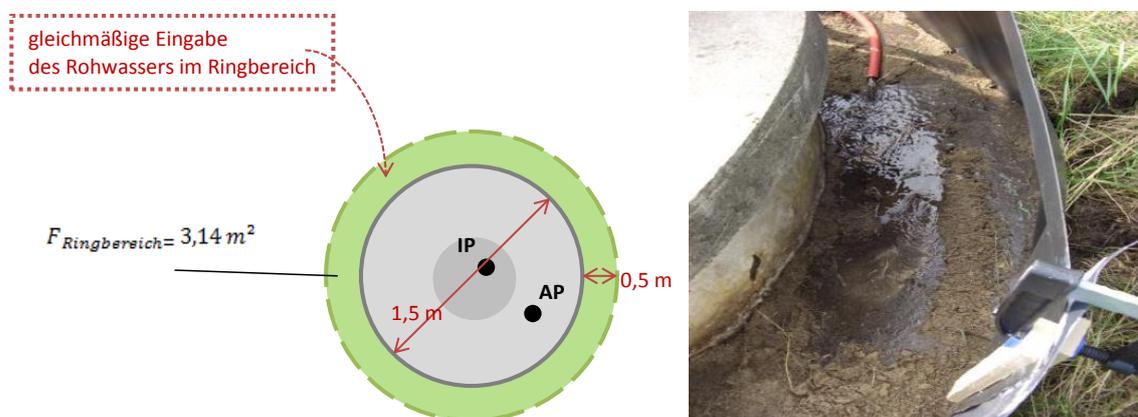


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Ringinfiltrometers (links) und Einleitung des Wassers zur Bestimmung der Infiltrationsrate

## Ergebnis

Bei der Erzeugung des Überstaus konnte aufgrund der schnellen Versickerung zusammen mit der geringen Durchflussrate am Probenahmeort des Brunnens nur eine maximale Höhe von 0,1 m ü. GOK erreicht werden. Bei einer Infiltrationsfläche von circa 3,14 m<sup>2</sup> (vgl. Abbildung 3) ergab sich daraus ein infiltrierbares Wasservolumen von 0,314 m<sup>3</sup>.

Stellt man den gemessenen Verlauf der Überstauhöhe über die Zeit dar (Abbildung 4), ergibt sich ein linearer negativer Anstieg. Daraus ist abzuleiten, dass eine konstante Infiltration in die oberflächennahe Bodenzone stattfand. Aus den ermittelten Daten ergibt sich eine Infiltrationsrate von 17,4 l/min.

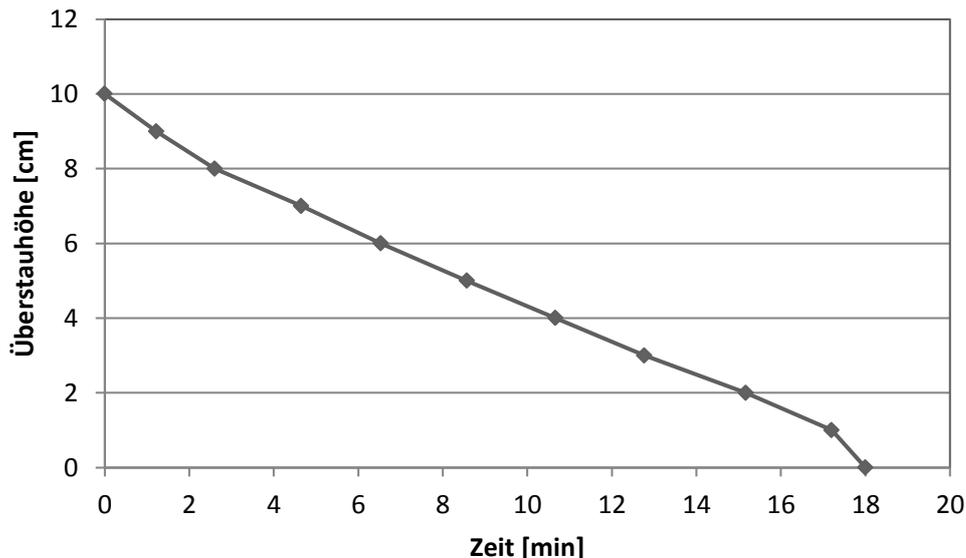


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Überstauhöhe während des Infiltrations-Versuches im direkten Brunnenumfeld von Brunnen JUNost-12.

### **2.1.3 Berechnung der theoretischen Infiltrationszeit von der Geländeoberkante (GOK) zur Oberkante des ersten Filterabschnitts (FOK1)**

Entscheidend bei der Betrachtung des vertikalen Transportes von pathogenen Keimen im Sickerwasser ist die Frage nach der minimalen Infiltrationszeit für einen Erstaustritt von infiltrierten Keimen an der FOK. Dabei müssen zwei Transportschritte unterschieden werden:

- 1) Ungesättigter Transport in der Bodenzone bis zur Grundwasseroberfläche;
- 2) Gesättigter Transport von der Grundwasseroberfläche bis zum Brunnen

In der ungesättigten Bodenzone variiert die hydraulische Leitfähigkeit stark in Abhängigkeit des Wassergehaltes, ist jedoch aufgrund zunehmender Fließstrecken und –widerstände, sowie des abnehmenden Fließquerschnittes deutlich geringer als in der gesättigten Zone. Somit benötigt Sickerwasser für den Transport durch die ungesättigte Zone ein Vielfaches der Zeit, die es für den Transport in der gesättigten Zone benötigt.

Da die für die Fragestellung relevanten Prozesse sich in relativ kurzfristigen Zeiträumen abspielen, wurde die minimale Infiltrationszeit nach dem Kolben-Fluss-Modell unter Annahme einer ausschließlich vertikalen Fließrichtung im aufgesättigten Boden oberhalb der Grundwasseroberfläche bestimmt (Abbildung 5).

Im Bereich der gesättigten Zone bewegt sich der Tracer der Brunnenanströmung folgend. Für die weiterführende Betrachtung in diesem Bereich des GW-Leiters muss ein verändertes Modell herangezogen werden.

Die genaue Bestimmung der Transportgeschwindigkeit erfordert eine komplexe Modellierung der Brunnenanströmung, einschließlich auftretender Effekte, wie z.B. dem Skineffekt.

Aufgrund der wesentlich höheren Fließgeschwindigkeit im gesättigten Nahbereich des Brunnens kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die zeitliche Komponente im Verhältnis zur Infiltration im ungesättigten Bereich vernachlässigbar klein wird. Abschätzungen zufolge kann beim Transport durch die gesättigte Zone von maximal mehreren Stunden ausgegangen werden.

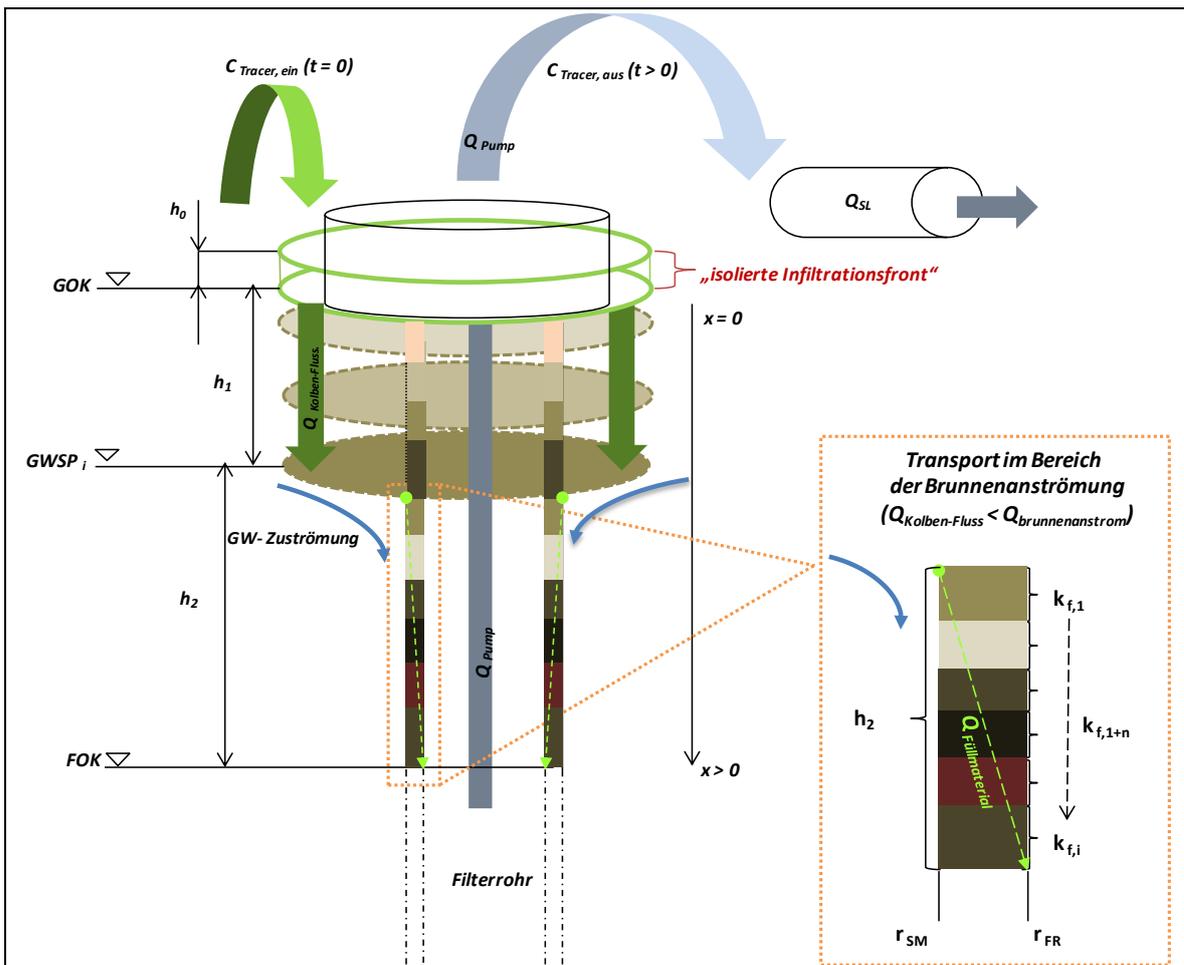


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Markierungsversuches im Kolben-Fluss-Modell

Bei der theoretischen Berechnung der maximalen Infiltrationsgeschwindigkeit im ungesättigten Bereich wurde der Einfluss der schichtspezifischen hydraulischen Leitfähigkeit im Verhältnis zu ihrer Mächtigkeit am Gesamtschichtpaket berücksichtigt. Die Abstandsgeschwindigkeit wurde aus der Versickerungsrate des Infiltrationsversuches im direkten Brunnenumfeld für die Strecke GOK-RWS von 4,83 m berechnet.

Unter der Annahme einer vollständigen Aufsättigung, errechnete sich für eine maximale Abstandsgeschwindigkeit von  $3 \cdot 10^{-4}$  m/s eine theoretische minimale Fließzeit von 4,3 Stunden.

## 2.1.4 Tracerversuch

### Methodik

Für den Markierungsversuch an Brunnen JUNost-12 wurde der Versuchsaufbau der bereits durchgeführten Vorversuche zur Infiltrationsrate verwendet.

Aufgrund der pH-Wert-Abhängigkeit des Markierungsstoffes Uranin erfolgte vor Beginn des Markierungsversuches eine Messung des pH-Wertes im Rohwasser. Anschließend wurde das Fluorometer mit dem Brunnenrohwasser und Uranin-Lösungen in drei unterschiedlichen Verdünnungen kalibriert (Abbildung 6 links). Da die Fluoreszenz des Tracers und die Frequenz des emittierten Lichtes direkt proportional zur Tracerkonzentration sind, genügt i.d.R. eine 2-Punkt-Kalibrierung zur Berechnung der Tracerkonzentration.

Der Markierungsversuch an Brunnen JUNost-12 wurde mit einer Uranin-Konzentration von 500 mg/l und einer Lösungsmenge von 1000 ml durchgeführt. Die Tracereingabe erfolgte einmalig, wobei die Uranin-Lösung gleichmäßig über die Infiltrometerfläche verteilt wurde. Anschließend wurde ein Überstau mit Rohwasser aus einem Wasserspeicher (1m<sup>3</sup>) sowie der angeschlossenen Probenahmeleitung erzeugt. Die aufgegebene Uranin-Stammlösung wurde daraufhin, soweit noch nicht infiltriert, möglichst homogen im überstauten Rohwasser vermischt. Innerhalb weniger Minuten kam es zur vollständigen Infiltration des Uranin-Rohwasser-Gemisches im Ringbereich des Infiltrometers. Zusätzlich zur einmaligen Aufgabe des Tracer-Rohwasser-Gemisches wurde durch die kontinuierliche Aufleitung von Rohwasser aus dem Probenahmehahn des Brunnens auf die Infiltrometerfläche während des gesamten Versuchs ein anhaltendes Starkregenereignis simuliert. Die Durchflussrate betrug ca. 2 L/ min.

Das Durchflussfluorometer zur Detektion des Uranins wurde für die Messung der Fluoreszenz im Rohwasser am Probenahmehahn des Brunnens JUNost-12 angeschlossen. Während des Versuchszeitraumes erfolgte eine kontinuierliche Durchströmung des Fluorometers mit Rohwasser. Das Messintervall der Uranin-Konzentration betrug 5 Sekunden.

Die Versuchsplanung sah einen Zeitraum von 10 Tagen für die Überwachung des Uranin-Gehaltes im Rohwassers vor. Die Zugabe des Markierungsstoffes erfolgte am 16.08.2012. Die Messung endete am 27.08.2012. Aufgrund der zweimaligen Unterbrechung der Stromversorgung während des Versuchszeitraumes wurde der Versuch im Zeitraum 10.09. bis 09.10.2012 mit einer erneuten Tracer-Zugabe wiederholt. So konnte ausgeschlossen werden, dass es womöglich während des ersten Versuchs zu einem unbeobachteten Durchbruch des Markierungsstoffes gekommen war. Zudem wurde die Beobachtungsdauer nach der zweiten Tracer-Eingabe auf 20 Tage verlängert.

### Ergebnis

Die Messergebnisse des ersten Versuchs zeigten zwei Frequenz-Ausschläge innerhalb der beobachteten Zeit nach der Tracer-Eingabe (Abbildung 6 rechts). Diese stehen jedoch im Zusammenhang mit einem jeweiligen Neustart des Fluorometers nach technisch bedingten Messunterbrechungen von jeweils mehr als 24 Stunden. Im weiteren Verlauf des ersten Markierungsversuches kam es nach 8 Tagen zu geringfügigen Frequenzerhöhungen, die nicht eindeutig einem Durchbruch des Markierungsstoffes zuzuordnen waren.

Nach Beendigung des Markierungsversuches (17 Tage nach der Tracer-Eingabe) wurde aufgrund der Messunterbrechungen und der nicht zuzuordnenden Frequenzschwankungen ein zweiter Markierungsversuch im Abstand von 10 Tagen durchgeführt.

Während der folgenden 23 Tage nach Eingabe des Markierungsstoffes konnten keine Frequenz-Abweichungen von der Nulllinie beobachtet werden (Abbildung 6 rechts).

Es zeigten sich jedoch nach Versuchsende deutliche Verockerungserscheinungen in den Schläuchen, am Auslauf und vor allem in der Messküvette des Durchfluss-Fluorometers (Abbildung 7 links). Dadurch wurden höchstwahrscheinlich die Fluoreszenz-Messungen während des zweiten Versuchs stark beeinträchtigt. Dennoch deuten die Ergebnisse darauf hin, dass es keinen Durchbruch des Markierungsstoffes gab.

Da es durch die Aufgabe und anschließende Vermischung des Uranins mit dem aufgeleiteten Wasser jedoch bereits zu einer starken Verdünnung innerhalb der ungesättigten Zone kam, sollte die eingegebene Menge des Uranins für noch ausstehende Versuche erhöht werden, um die Wiederfindung bei einem potentiellen Durchbruch sicherzustellen.

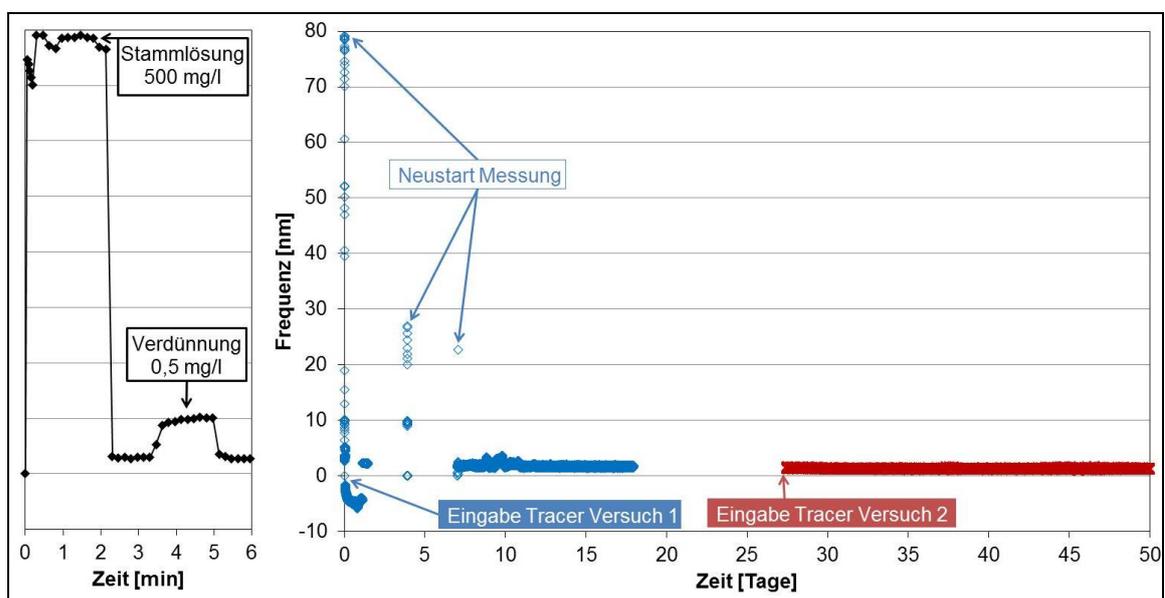


Abbildung 6: Ergebnisse der Fluoreszenz-Messungen im Brunnen-Rohwasser nach Eingabe des Markierungsstoffes im direkten Umfeld des Brunnes JUNost-12 (rechts) und zum Vergleich Frequenzen der gemessenen Kalibrierlösungen (links).



Abbildung 7: Messküvette des Durchfluss-Fluorometer nach 50 Tagen an Brunnen JUNost-12 (links) und nach 14 Tagen an Brunnen JUNost-06 (rechts).

## 2.2 Brunnen JUNost-06

Für die Bewertung der Schutzfunktion einer Tonsperre im Ringraum oberhalb der Filterstrecke wurde neben dem Brunnen mit vorhandener Tonsperre (JUNost-12) auch ein Brunnen ohne entsprechende Tonsperre bezüglich einer Gefährdung durch eindringendes Sickerwasser untersucht. Zu diesem Zweck wurden, äquivalent zu den Versuchen an Brunnen JUNost-12, Infiltrations- und Markierungsversuche am Brunnen JUNost-06, der ohne Tonsperre ausgebaut wurde, durchgeführt. Die Ausbauezeichnung des Brunnens JUNost-06 findet sich im Anhang.

### 2.2.1 Untersuchung auf Umläufigkeiten innerhalb der Brunnenstube

#### Methodik

Entsprechend der Durchführung des Infiltrationsversuches am Brunnen JUNost-12 wurde am Brunnen JUNost-06 ebenfalls zunächst die Brunnenstube bis zu einer Überstauhöhe von 50 cm über dem Schachtboden mit Rohwasser des Brunnens geflutet. Die Änderung des Wasserstandes wurde über einen Zeitraum von 90 Minuten in einem Intervall von 15 Minuten aufgezeichnet.

#### Ergebnis

Die Auswertung der Wasserstandsmessungen zeigte einen Wasserverlust innerhalb der ersten Stunde nach Beginn der Flutung (Abbildung 8). Die Überstauhöhe sank in diesem Zeitraum von 50 cm auf 39 cm. Im weiteren Verlauf war kein zusätzlicher Wasserverlust festzustellen.

Die Entwicklung des Wasserstandes deutet auf eine Undichtigkeit der Brunneninstallation im Bereich der Überstauhöhe hin. Hier kommen besonders die Durchführung des Innenpegels sowie der obere Flansch am Brunnenkopf in Frage. Das Schachtbauwerk als solches wies keine Undichtigkeiten auf.

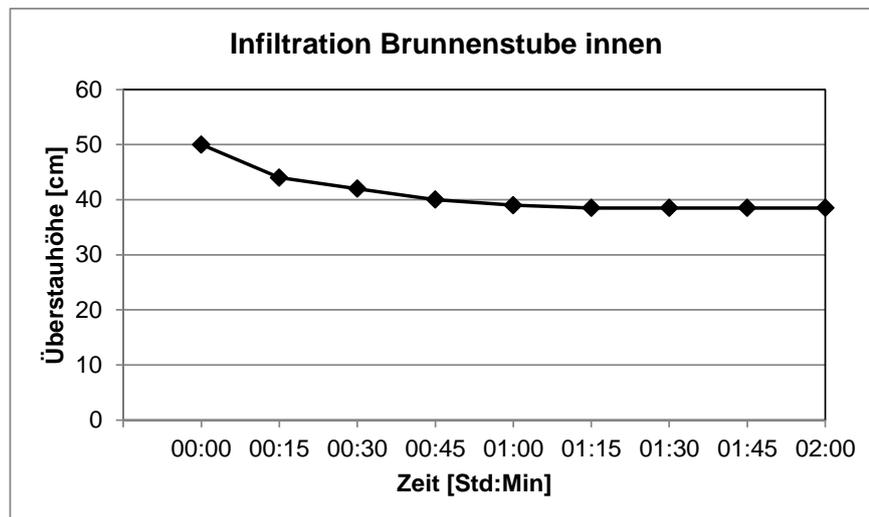


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Überstauhöhe während des Infiltrations-Versuches innerhalb des Brunnenschachtes von Brunnen JUNost-06.

## 2.2.2 Bestimmung der Infiltrationsrate im direkten Brunnenumfeld

### Methodik

Analog zu dem Infiltrationsversuch an Brunnen JUNost-12 wurde am Brunnen JUNost-06 ebenfalls ein provisorisches Ring-Infiltrometer in einem Abstand von 50 cm um den Brunnenschacht aufgebaut. Anschließend fand eine Flutung des Ringes mit Rohwasser des Brunnes statt (Abbildung 9).

Die Bestimmung der Infiltrationsrate erfolgte anhand der zeitlichen Entwicklung des Wasserstandes innerhalb des Infiltrometers. Dazu wurde die Zeit bestimmt, nach der die Versickerung des gesamten überstauten Wassers abgeschlossen war. Zusätzlich wurde die Zeit bestimmt, die ein Zentimeter Wassersäule zur Infiltration benötigte.



Abbildung 9: Einstellung der Überstauhöhe im Ringinfiltrometer (links) und bevorzugte Wegsamkeit während der Infiltration über Tiergänge auf der Infiltrationsfläche (rechts).

### Ergebnis

Bei der Durchführung des Infiltrationsversuches im Brunnennahfeld von Brunnen JUNost-06 konnte zu Beginn des Versuches aufgrund sehr schneller Versickerung nur eine Überstauhöhe von 5 cm im Ring-Infiltrometer eingestellt werden. Der Verlauf der Versickerungskurve deutet auf eine konstante Infiltration des aufgegebenen Wassers hin (Abbildung 10). Die Infiltrationsrate liegt bei 94,2 L/min.

Nach der Infiltration des eingeleiteten Wasservolumens zeigten sich mehrere im Durchmesser bis zu 5 Zentimeter messende Öffnungen auf der Infiltrationsfläche (Tiergänge). Bereits während der Versickerungsphase wurde ersichtlich, dass ein Großteil des eingeleiteten Wassers über diese Öffnungen in den Boden eindrang (siehe auch Abbildung 9). Diese Tiergänge auf der Infiltrationsfläche haben somit einen wesentlichen Einfluss auf die Versickerungsrate.

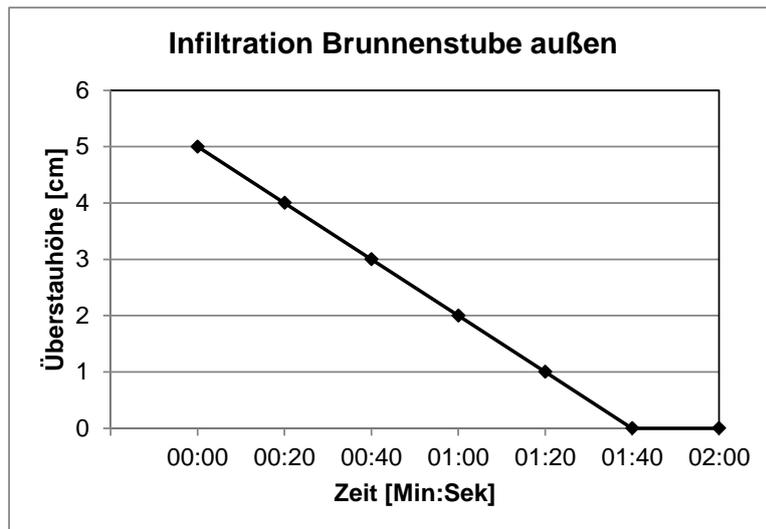


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Überstauhöhe während des Infiltrations-Versuches im direkten Brunnenumfeld von Brunnen JUNost-06

Der Infiltrationsversuch wurde nach der Durchführung des Markierungsversuches wiederholt, da nach 14 Tagen konstanter Aufleitung von Rohwasser quasi-gesättigte Verhältnisse im Untergrund angenommen werden konnten. Die Infiltrationsrate war mit 31,4 L/min deutlich geringer als beim ersten Infiltrationsversuch (94 L/min).

### 2.2.3 Berechnung der theoretischen Infiltrationszeit von der Geländeoberkante (GOK) zur Oberkante des ersten Filterabschnitts (FOK1)

Die minimale Infiltrationszeit bei der Bodenpassage wurde nach dem Kolben-Fluß-Modell, unter Annahme einer ausschließlich vertikalen Strömungskomponente, ermittelt (vgl. Abschnitt 2.1.3).

Unter der Voraussetzung einer vollständigen Aufsättigung des Bodens und der erreichten Überstauhöhe von ca. 5 cm errechnete sich für den ersten Infiltrationsversuch am Brunnen JUNost-06 eine Abstandsgeschwindigkeit von  $1,6 \cdot 10^{-3}$  m/s und für die Strecke GOK-RWS von 5,05 m eine theoretische minimale Fließzeit von 0,8 Stunden.

Aus dem zweiten Infiltrationsversuch, durchgeführt nach dem Markierungsversuch unter gesättigten Verhältnissen, errechnete sich eine theoretische minimale Fließzeit von 2,5 Std bis zum RWS. Da der gesättigte Transport aufgrund der größeren Fließquerschnitte in den Porenräumen deutlich schneller vonstattengeht als der ungesättigte Transport, wäre von einer geringeren Infiltrationsrate und damit längeren Fließzeiten unter ungesättigten Verhältnissen auszugehen. Das Gegenteil ist jedoch der Fall. Die hohe Infiltrationsrate unter ungesättigten Bedingungen kann nur mit dem Vorhandensein und der Flutung von Tiergängen begründet werden. Dies wird auch durch die gemessene Infiltrationsrate am Brunnen JUNost-12 bestätigt, die trotz einer höheren Durchlässigkeit der Sedimente geringer als die an Brunnen JUNost-06 ausfällt. Die Erhöhung der Infiltrationszeit unter gesättigten Bedingungen kann mit der bereits erfolgten Flutung der Tiergänge während des Versuchs und der daraus resultierenden geringeren Versickerungsleistung erklärt werden.

## 2.2.4 Tracerversuch

### Methodik

Für den Markierungsversuch an Brunnen JUNost-06 wurde ebenfalls der Versuchsaufbau des bereits vorher durchgeführten Infiltrationsversuches verwendet.

Aufgrund der Erfahrungen aus dem Markierungsversuch an Brunnen JUNost-12 wurde die Eingabemenge des Markierungsstoffes um eine Größenordnung erhöht. Insgesamt wurden 5 Liter einer Uranin-Lösung mit einer Konzentration von 1g/L aufgegeben, was einer Gesamteingabemenge von 5 Gramm entspricht.

Die Uranin-Lösung wurde gleichmäßig auf der Infiltrometerfläche verteilt. Anschließend fand eine Flutung des Infiltrometers mit einem Kubikmeter Rohwasser des Brunnens statt, um eine gleichmäßige Infiltration des Markierungsstoffes zu gewährleisten (Abbildung 12). Das gesamte aufgeleitete Wasservolumen infiltrierte innerhalb weniger Minuten vollständig.

Zur sicheren Wiederfindung des Markierungsstoffes Uranin wurde an Brunnen JUNost-06 zusätzlich zu dem bereits an Brunnen JUNost-12 verwendeten Durchfluss-Fluorometer ein Tauch-Fluorometer verwendet. Vor und nach dem Beginn des Markierungsversuches wurden beide Messgeräte einer Mehrpunkt-Kalibrierung mit dem Rohwasser des Brunnens unterzogen (Abbildung 11). Die erste Kalibrierung wurde im Labor, die zweite Kalibrierung vor Ort am Brunnen durchgeführt. Aufgrund der abweichenden Kalibriergeraden wurde die zweite Kalibrierung zur Berechnung der Uranin-Konzentrationen herangezogen, da sie die tatsächlichen Bedingungen vor Ort besser wiedergibt.

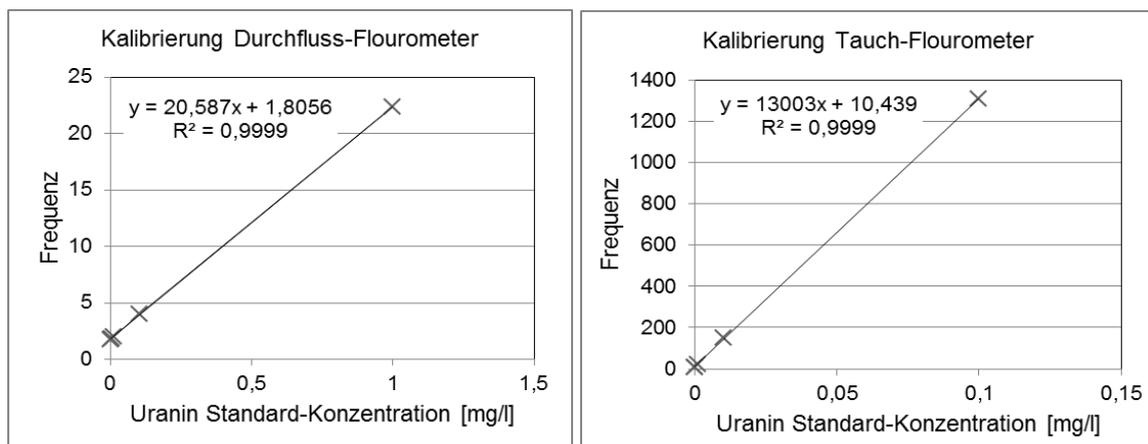


Abbildung 11: Kalibriergeraden der verwendeten Fluorometer. Für die Messung der Uranin-Konzentration im Rohwasser wurde ein Durchfluss-Fluorometer verwendet, für die Messung im anströmenden Grundwasser im Filterbereich des Außenpegels ein Tauch-Fluorometer.

Die Aufzeichnung der Markierungsstoff-Konzentration im Rohwasser erfolgte entsprechend des Versuches an Brunnen JUNost-12 kontinuierlich in einem Intervall von 10 Sekunden mit dem Durchfluss-Fluorometer am Probenahmehahn des Brunnens.

Zusätzlich zur Messung im Rohwasser wurde die Stoffkonzentration unter Verwendung eines Tauch-Fluorometers in einem Messintervall von 60 Sekunden im zuströmenden Grundwasser gemessen. Das Tauch-Fluorometer wurde dazu im durchflusswirksamen Filterbereich des Außenpegels (21 Meter unter OKS, vgl. Anhang 1) installiert. Der Außenpegel wurde gewählt, um die Förderpumpe des Brunnens nicht zu beeinträchtigen.

Um mittels des Tauch-Fluorometers alle Strompfade innerhalb des Brunnens abzubilden und einen potentiellen Durchbruch sicher erfassen zu können, hätte das Messgerät direkt unterhalb der Pumpe mittig im Zustrom positioniert werden müssen. Durch die Messung im Durchfluss und in-situ im Außenpegel konnten bei einer potentiellen Wiederfindung des Markierungsstoffes außerdem die Eintragspfade genauer unterschieden werden.

Zur Simulation eines dauerhaft anhaltenden Regenereignisses wurde während der gesamten Versuchszeit kontinuierlich Rohwasser auf die Infiltrometerfläche geleitet. Ein Teil des Rohwassers, etwa 1,5 L/min, wurde durch das Durchfluss-Fluorometer geleitet, bevor es infiltrierte. 5 L/min wurden direkt aus der Probenahme-Leitung auf die Infiltrometerfläche aufgebracht und versickert. Daraus ergibt sich für den Versuchszeitraum eine zusätzliche Aufleitung von 93,6 m<sup>3</sup> Wasser, was einer Niederschlagshöhe von etwa 30.000 Litern pro Quadratmeter entspricht.



Abbildung 12: Messaufbau zur Bestimmung der Fluoreszenz im Brunnen-Rohwasser über die Probenahmeleitung und im Grundwasser über den Außenpegel (links) und die Einleitung und Infiltration des Markierungsstoff-Gemisches (rechts)

## Ergebnis

Die Ergebnisse des Markierungsversuches an Brunnen JUNost-06 zeigten ebenfalls keinen eindeutigen Durchbruch des Markierungsstoffes im Rohwasser während des beobachteten Zeitraumes von 14 Tagen (Abbildung 13).

Die erhöhten Frequenzen zu Beginn des Versuches sind vermutlich durch eine verlängerte Aufwärmphase des Durchfluss-Fluorometers bedingt. Nach ca. 12 Stunden haben sich die Werte stabilisiert. Im weiteren Verlauf des Versuches nahm die gemessene Frequenz kontinuierlich ab. Die nach 3 bis 8 Tagen auftretenden Frequenz-Schwankungen zeigten keinen eindeutigen Trend und die gemessenen Werte schwankten gleichverteilt nach unten und oben. Im Vergleich mit den Frequenzen, gemessen für Uranin-Standard-Konzentrationen, zeigte sich, dass Uranin-Konzentrationen unterhalb von 0,01 mg/L mit dem verwendeten Gerät nur bedingt nachweisbar sind. Bei einer Zugabe von 5.000 mg Uranin entspricht dies einer Verdünnung von 1:500.000.

Entsprechend der Kalibrierung wies das Rohwasser zu Versuchsbeginn eine Konzentration von 1 mg/L Uranin auf (Abbildung 14, blaue Kurve). Die Konzentration ging im weiteren Verlauf bis auf 0.0001 mg/L zurück.

Durchgehend auftretende Schwankungen der Uranin-Konzentration ließen sich aufgrund ihrer geringen Schwankungshöhen und –breiten nicht als Tracer-Durchbruch interpretieren und stehen wohl eher mit Schwankungen der Stromzufuhr in Zusammenhang.

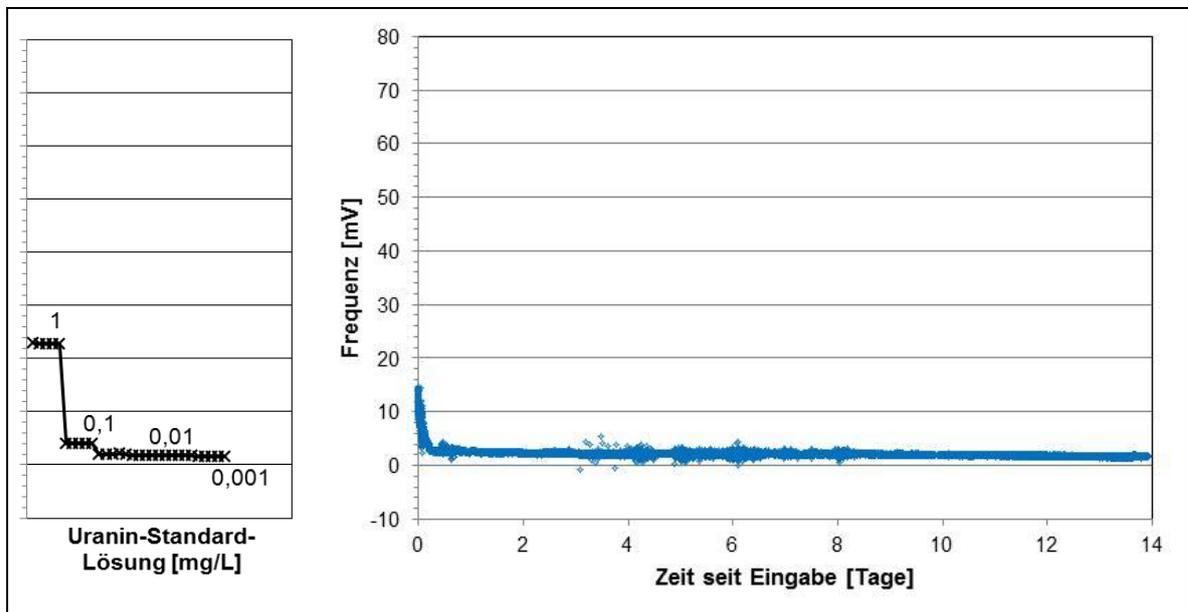


Abbildung 13: Ergebnisse der Fluoreszenz-Messungen im Brunnen-Rohwasser (Durchfluss-Fluorometer) nach Eingabe des Markierungsstoffes im direkten Umfeld des Brunnes JUNost-06 (rechts) und zur Einordnung der Messungen die den Frequenzen zugeordneten Konzentrationen der Kalibrierlösungen (links). [Vgl. auch die Ergebnisse der Messungen an Brunnen JUNost-12 in Abbildung 6.]

Die Uranin-Konzentration im dem Brunnen zuströmenden Grundwasser, gemessen im Filterbereich des Außenpegels (20,5 m u OKS), zeigte einen anderen zeitlichen Verlauf (Abbildung 14, rote Kurve). Innerhalb der ersten vier Tage nach Tracer-Zugabe blieb die Uranin-Konzentration konstant bei etwa 0,001 mg/L. Danach stieg die Konzentration kontinuierlich an auf 0,0016 mg/L nach 10 Tagen.

Dies kann durch einen kontinuierlichen Eintrag des Markierungsstoffes ins Grundwasser und im Folgenden dem Transport entlang der Fließpfade zum Brunnen erklärt werden. Die Verdünnung des Markierungsstoffes liegt bei etwa 1:3.000.000 (Tabelle 3).

Tabelle 3: Konzentrationen des Markierungsstoffes Uranin während des Versuchs an Brunnen JUNost-06. Die Tracereingabemenge betrug 5000 mg Uranin.

Messpunkte des Markierungsstoffes Uranin	Konzentration [mg/L]	Verdünnungsfaktor
Hintergrundwert Grundwasser	0,0005	-
Außenpegel	0,0023	2,8E+06
Grundwasser	0,0015	5,0E+06
Einlaufsieb	0,002	3,3E+06
Rohwasser	0,0005	-

Anschließend kam es durch ein Herausnehmen und Wiedereinbringen des Tauch-Fluorometers in den Außenpegel beim geplanten Versuchsende nach 10 Tagen zu Signalstörungen. Aufgrund der dabei gemessenen auffälligen Werte wurden daraufhin weitere Tiefenprofile der Tracerkonzentration im Außenpegel mit dem Tauch-Fluorometer realisiert.

Die Messung der Uranin-Konzentration 14 Tage nach Tracer-Eingabe zeigte einen weiteren Anstieg auf nahezu 0.002 mg/L (vgl. Abbildung 14). Nach einem erneuten Herausnehmen und Wiedereinbringen der Tauchsonde ging die Uranin-Konzentration auf ihren ursprünglichen, zu Beginn des Versuches gemessenen, Wert (0,001 mg/L) zurück. Dies ist möglicherweise auf eine Veränderung der Sondenposition im Außenpegel nach Wiedereinbringen zurückzuführen.

Die Validierung der Daten anhand der gemessenen Tiefenprofile im Außenpegel ergab, dass eine vertikale Schichtung unterschiedlicher Uranin-Konzentrationen im Außenpegel des Brunnens vorlag (Abbildung 15). Im oberen Bereich des Außenpegels (bis ca. 15 m u. OKS) lagen die Uranin-Konzentrationen unter 0.001 mg/L. Darunter kam es innerhalb von 2 Metern zu einem deutlichen Anstieg der Konzentrationen auf über 0.002 mg/L. Im Filterbereich des Außenpegels unterhalb von 20 m u. OKS, gingen die Konzentrationen innerhalb von 0,5 Metern wieder auf Werte um 0.0015 mg/L zurück.

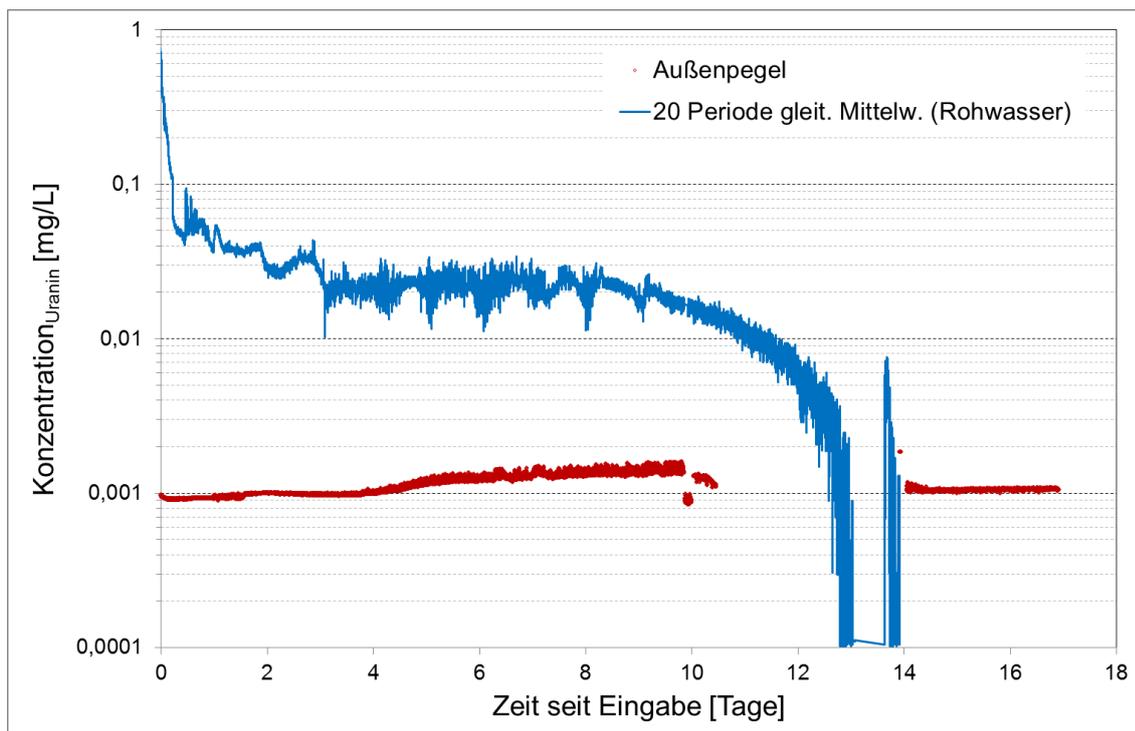


Abbildung 14: Zeitlicher Verlauf der Uranin-Konzentration im Rohwasser (blau) und im Filterbereich des Außenpegels (rot) nach Zugabe des Markierungsstoffes außerhalb des Brunnens.

Offensichtlich kam es mit zunehmender Versuchsdauer zu einer Erhöhung der Uranin-Konzentration im Rohwasser oberhalb des Filters des Außenpegels, während sich direkt im Filterbereich die Konzentrationen nach 10 sowie nach 17 Tagen konstant zeigten.

Es ist möglich, dass dieser Anstieg der Konzentrationen im Zusammenhang mit einer Undichtigkeit des Aufsatzrohres des Außenpegels in einer Tiefe von 17 m u. OKS steht. Über diese potentielle Undichtigkeit konnte der Markierungsstoff in den Außenpegel gelangen und sich dort diffusiv nach oben und unten ausbreiten. Vibrationen durch den Betrieb der Pumpe und Vermischungseffekte beim Durchteufen des Außenpegels mit der Tauchsonde erklären vermutlich auch den kontinuierlichen Übergang zu den geringeren Konzentrationen im oberen Bereich des Pegels. Der deutliche Konzentrationsunterschied am Übergang von Aufsatz- zu Filterrohr ergibt sich durch eine weitere Verdünnung mit dem den Filter durchströmenden Grundwasser.

Durch die Undichtigkeit kommt es außerdem zu einer partiellen hydraulischen Anbindung des Außenpegels an das Grundwasser, die eine Durchströmung des betroffenen Bereiches von 17 m u. OKS bis zur Oberkante des Filterrohres (FOK) in 20,5 m u. OKS zur Folge hat. 24 Tage nach der Tracer-Eingabe war die Konzentration im auffälligen Bereich von 17 bis 20 m u. OKS auf 0.0015 mg/L zurückgegangen, lag jedoch nach wie vor deutlich über dem Hintergrundwert von 0.001 mg/L. 7 Tage später war die Konzentration in diesem Bereich weiter gesunken, jedoch nur geringfügig im Vergleich zum zuvor beobachteten Zeitraum.

Die Konzentrationen im obersten Bereich des Außenpegels, nahe der Wasseroberfläche, stiegen kontinuierlich über den beobachteten Zeitraum an. Dies weist ebenfalls auf eine Undichtigkeit des Pegelvollrohres innerhalb der ungesättigten Bodenzone hin. Durch die anhaltende Aufleitung von Rohwasser und der daraus resultierenden Aufsättigung der ungesättigten Zone, ist es vermutlich zu einer Migration des Markierungsstoffes in die Filterpackung und von dort in den Außenpegel gekommen. Der verzögerte Durchbruch wird auf das Vorhandensein einer geringleitenden schluffigen Sedimentlage (2 m u. GOK, siehe Anhang) zurückgeführt.

Das im Brunnen gemessene Uranin-Profil zeigte dem Außenpegel gegenüber eine deutlich abweichende Tiefenverteilung (vgl. Abbildung 15 "IP"). Während im Bereich des Aufsatzrohres, oberhalb der Pumpe, die Konzentrationen zwar leicht erhöht waren, jedoch ebenfalls unter 0,001 mg/L lagen, stiegen sie im Bereich des Pumpen-Einlaufsiebels auf bis zu 0,002 mg/L an. Unterhalb der Pumpe kam es wiederum zu einer deutlichen Abnahme der Konzentrationen auf unter 0,001 mg/L. In der Tiefe (17 bis 20 m u. OKS), in der im Außenpegel die höchsten Werte gemessen wurden, schwankten die Werte im Innenpegel zwischen 0,0005 und 0,001 mg/L. Die Konzentrationsverteilung im Brunnen zeigte sich, verglichen mit der Verteilung im Außenpegel, zeitlich weitestgehend unverändert.

Im Falle eines Eintrages des Markierungsstoffes in den Brunnen kann davon ausgegangen werden, dass dieser, entsprechend der Eingabe nah am Brunnen, im obersten Filterbereich stattfand. Im Brunnen strömt das am oberen Ende des Filters zugetretene Wasser vermutlich im äußersten Randbereich des Brunnen-Aufsatzrohres in Richtung Pumpe. Erst in der Nähe der Pumpe vermischen sich die Strompfade der in unterschiedlichen Tiefen dem Brunnen zugetretenen Wässer. Da die Tauchsonde nur eine punktuelle Messung des im Brunnen aufsteigenden Wassers vornimmt und sich die Position der Sonde (entsprechend der Einlassöffnung am Brunnenkopf) nicht direkt an der Wand des Aufsatzrohres befand, konnte der Markierungsstoff vermutlich erst im Nahbereich der Pumpe erfasst werden. Mit zunehmender Mischung der Strompfade kam es dementsprechend zur Messung steigender Konzentrationen.

Während des Versuchszeitraums kam es zu keiner Unterbrechung des Brunnenbetriebes, die die Konzentrationsverteilung des Tracers im und außerhalb des Brunnens hätte beeinflussen können.

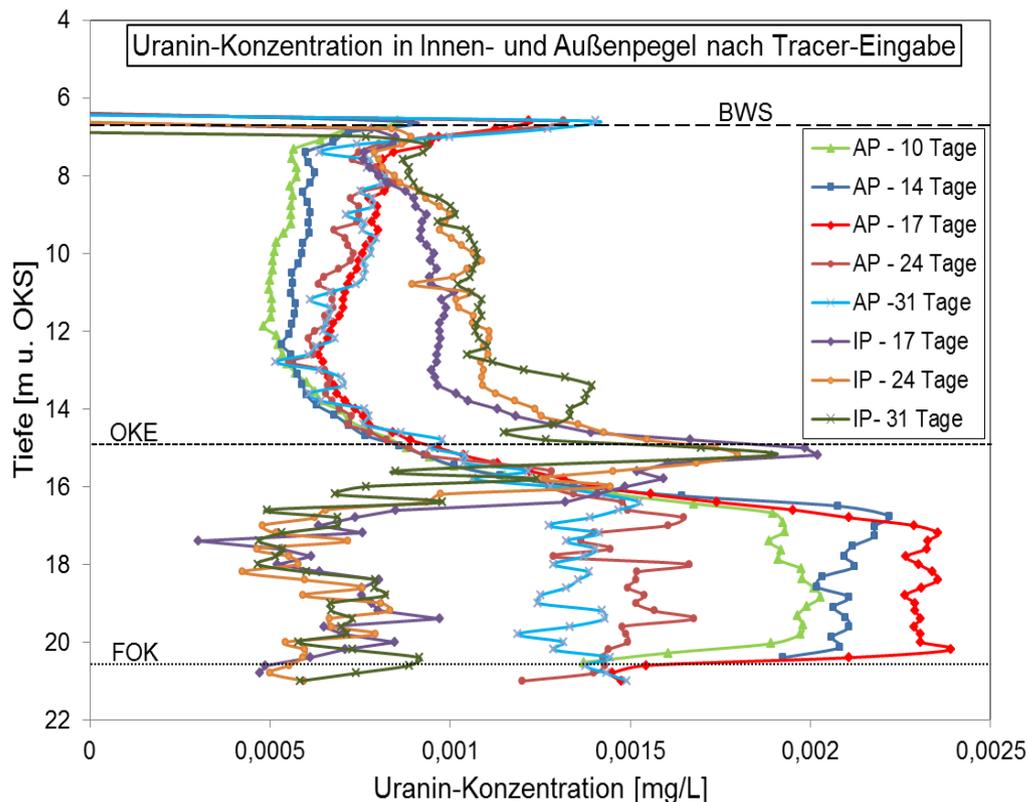


Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der Uranin-Tiefenprofile in Innen- und Außenpegel des Brunnens JUNost-06. (AP= Außenpegel; IP=Innenpegel; BWS= Betriebswasserspiegel; OKE=Oberkante Einlaufsieb; FOK= Filteroberkante)

Neben Verdünnungseffekten können sich auch Umwelteinflüsse auf die Konzentration und damit die Nachweisbarkeit des Uranins auswirken. Unter anderem kann die Wassertemperatur das Fluoreszenzvermögen des Uranins beeinflussen. Generell nimmt die Fluoreszenz mit steigender Temperatur ab und mit sinkender Temperatur zu. Jedoch beträgt der Temperatur-Koeffizient von Uranin nur  $-0,0036$  pro Grad Celsius und kann daher die starken Konzentrationsunterschiede im Außenpegel nicht verursacht haben.

Der pH-Wert des untersuchten Wassers wirkt sich ebenfalls auf die Fluoreszenz aus. Unterhalb von pH 7 kommt es zu einer deutlichen Abnahme des Fluoreszenz-Signals. Oberhalb von pH 7 ist das Fluoreszenzniveau konstant. Da der pH-Wert im Rohwasser des Brunnens JUNost-06 im langjährigen Mittel (2002-2009) bei 7,24 liegt und der geringste gemessene pH-Wert im entsprechenden Zeitraum bei 7,12, ist nicht von einer Beeinflussung der Messwerte durch Veränderungen des pH-Wertes innerhalb des Versuchszeitraumes auszugehen. Tiefenorientierte Untersuchungen im Rahmen des Projektes WELLMA ergaben zudem, dass es nicht oder nur zu geringen zeitlichen Schwankungen des pH-Wertes mit der Tiefe in Grundwasser und Brunnen kommt. Diese Schwankungen können im Hinblick auf die Beeinflussung des Fluoreszenz-Signals durch pH-Wert-Änderungen klar vernachlässigt werden.

## Kapitel 3 Diskussion

Zur qualitativen Abschätzung von unerwünschten Wasserzutritten entlang der Ausbaumaterialien in die Brunnen und das Rohwasser wurden im Projekt RIKO-1 Infiltrations- und Markierungsversuche an zwei Brunnen des WW Jungfernheide durchgeführt. Dabei standen die Funktionalität und die Dichtigkeit der Brunnenaufsatzrohre, Außenpegel und Ringraumverfüllungen im Fokus der Untersuchungen.

Zur Bewertung der Schutzfunktion der Ringraumabdichtungen (Tonsperre) gegen potentielle hydraulische Kurzschlüsse zwischen infiltrierendem Regenwasser und Rohwasser wurde jeweils ein Brunnen mit und ein Brunnen ohne Tonsperre betrachtet. Dabei ist zu beachten, dass der Ausbau der untersuchten Brunnen nicht den heutigen Standards wie sie beim Neubau von Brunnen von den BWB umgesetzt werden, entspricht. Aufgrund ihrer Nutzung zur Wasserstandsregulierung unterliegen die Brunnen auch nicht den regelmäßigen an Trinkwasserbrunnen praktizierten Qualitätskontrollen und Instandhaltungsmaßnahmen.

### 3.1 Dichtigkeit des Schachtbauwerks

Die Dichtigkeitsüberprüfung der Schachtbauwerke und Brunneninstallationen durch Flutung der Brunnenschächte mit Wasser deutet auf ein eher geringfügiges Kontaminationspotential hin. Die Schachtbauwerke beider Brunnen weisen im unteren Bereich keinerlei Undichtigkeiten auf. Jedoch kam es an Brunnen JUNost-06 im Bereich des Brunnenkopfes zu einer Absenkung der Überstauhöhe und somit zu einem Wasseraustritt aus dem Brunnenschacht, solange der Wasserspiegel oberhalb des Brunnenkopfes lag.

Eine mögliche Ursache stellen undichte Verbindungen am Brunnenkopf oder am Aufsatzrohr des Außenpegels dar. Im untersuchten Brunnen wurde die Durchführung des Innenpegels am Brunnenkopf als undichte Stelle vermutet.

Das Gefährdungspotential wird jedoch als gering eingestuft, da solche Undichtigkeiten nur im Falle einer Flutung des Brunnenschachtes von Relevanz sind. Darüber hinaus wurden seit Ende 2011 an den zur Trinkwassergewinnung genutzten Brunnen alle Abdichtungen zwischen Brunnenschacht und Aufsatzrohr sowie die Dichtheit der Vollrohrverbindungen systematisch geprüft, so dass das Ergebnis der beiden untersuchten Jungfernheider Brunnen nicht auf die Gesamtheit der Betriebsbrunnen der BWB übertragbar ist.

### 3.2 Infiltrationsrate

Die anhand der Infiltrationsversuche ermittelten Versickerungsraten im Bereich weniger Stunden lassen den kurzfristigen Zutritt von infiltrierendem Regenwasser ins Grundwasser möglich erscheinen, insbesondere wenn Tiergänge im direkten Brunnenumfeld vorhanden sind. Jedoch ist davon auszugehen, dass die reale Infiltrationszeit die berechnete entsprechend der Durchlässigkeitsanisotropie des Grundwasserleiters um mindestens eine Größenordnung übersteigt. Dies zeigt sich auch in den vergleichbaren Infiltrationszeiten an beiden Brunnen, ungeachtet der Unterschiede in der lokalen Durchlässigkeitsverteilung.

Unter Einbezug dieser Faktoren ergeben sich minimale Infiltrationszeiten in der Größenordnung von Tagen, die einen Zutritt von potentiell mit pathogenen Keimen belastetem Regenwasser im relevanten Zeitraum nicht ausschließen können.

Dies gilt jedoch unter der Annahme einer Aufsättigung des Bodens oberhalb des Grundwasserspiegels, wie sie z.B. durch lang anhaltende Starkregenereignisse verursacht werden kann. Unter normalen klimatischen Bedingungen erscheint ein Zutritt als wenig plausibel.

Die für die Markierungsversuche simulierten Niederschläge durch die Aufleitung von Rohwasser überschritten potentielle Niederschlagsmengen durch Starkregenereignisse um das Vielfache. Trotz dieser Extrembedingungen konnten in den beobachteten Zeiträumen von 14 Tagen an JUNost-06 beziehungsweise 50 Tagen an JUNost-12 mit dem verwendeten Messaufbau im Durchfluss keine Durchbrüche im Rohwasser der beiden untersuchten Brunnen festgestellt werden.

### **3.3 Dichtigkeit des Brunnenausbaus**

Mit Hilfe eines Tauch-Fluorometers, das beim Markierungsversuch an Brunnen JUNost-06 zusätzlich im Filterbereich des Außenpegels eingesetzt wurde, konnten geringfügige, aber belastbare Erhöhungen der Uranin-Konzentration nachgewiesen werden. Zeitpunkt und Verlauf des Auftretens werden als Durchbruch des Uranins im dem Brunnen zuströmenden Grundwasser vier Tage (entspricht der max. Abstandsgeschwindigkeit) nach der Aufgabe des Markierungsstoffes interpretiert.

Ein abrupter Rückgang der Konzentrationen nach weiteren 10 Tagen stellt diese Interpretation in Frage, da es bei Markierungsversuchen in porösen Medien in der Regel zu einer dispersionsbedingt verlangsamten Abnahme der Markierungsstoff-Konzentration kommt. Des Weiteren konnten aus dem Konzentrationsverlauf weder eine Wiederfindungsrate, noch die mittlere Abstandsgeschwindigkeit ermittelt werden.

Die zur Klärung des Befundes durchgeführten tiefenbezogenen Fluoreszenzmessungen in Außen- und Innenpegel unterstützen jedoch die Interpretation, dass ein Durchbruch des Markierungsstoffes stattgefunden hat. Anhand der nach Versuchsende im Abstand von 1 Woche gemessenen Tiefenprofile lassen sich zwei Tiefenbereiche identifizieren, in denen auffällige Konzentrationsunterschiede auf ein Eindringen von Sicker- und Grundwasser in den Außenpegel hindeuten. Zwar zeigen die Konzentrationsverläufe unterschiedliche Dynamiken, diese können jedoch in einer unterschiedlichen hydraulischen Anbindung des Außenpegels an das Grund- bzw. Sickerwasser begründet sein.

Gegenüber dem Filterbereich des Brunnens konstant erhöhte Uranin-Konzentrationen im Filterbereich des Außenpegels lassen ebenfalls auf einen Durchbruch der Markierungsstoffes schließen. Mögliche Beeinträchtigungen des Fluoreszenz-Signals aufgrund veränderlicher physiko-chemischer Bedingungen im Grund- und Rohwasser dürften trotz der sehr geringen Konzentrationen und Konzentrationsunterschiede nicht relevant sein.

Konstant erhöhte Uraningehalte im Bereich der Förderpumpe weisen zudem auf einen Durchbruch infiltrierten Wassers in den Brunnen und ins Rohwasser hin. Die Tatsache, dass dieser Durchbruch nicht im, im Durchfluss gemessenen, Rohwasser des Brunnens JUNost-06 festgestellt wurde, resultiert vermutlich aus dem zu geringen Auflösungsvermögen des verwendeten Fluorometers bzw. der zu hohen Verdünnung im Förderstrom des Brunnens. Dies limitiert entsprechend auch die Aussagekraft der zur Überwachung des Markierungsversuches an Brunnen JUNost-12 durchgeführten Fluoreszenz-Messungen und der daraus abgeleiteten Ergebnissen.

Es bleibt jedoch zu bezweifeln, dass die Erhöhung der Tracerkonzentrationen im Brunnen in Höhe der Förderpumpe von einem Sickerwassereintrag über einen undichten Außenpegel verursacht wurde. Ähnliche Konzentrationen in Außenpegel und Brunnen, ungeachtet einer tatsächlich vorhandenen zusätzlichen Verdünnung durch das Grundwasser im Brunnen, widersprechen diesem Zusammenhang.

Demzufolge müsste der Tracer über einen weiteren Eintragspfad in den Brunnen gelangt sein. Hierzu gibt es jedoch keine belastbaren Erkenntnisse. Durch die Abwesenheit der Ringraumabdichtung in Verbindung mit den hohen Infiltrationsraten erscheint ein Eintrag des Tracers über die ungeschützte Kiesschüttung plausibel.

### **3.4 Funktionalität der Tonsperre**

Inwieweit das Vorhandensein einer Tonsperre den Brunnen gegenüber Fremdwasserzutritten schützt, konnte auf Basis der durchgeführten Messungen nicht bewertet werden. Verglichen werden konnten hierzu nur die Messungen mit dem Durchfluss-Fluorometer. Dieses zeigte für keinen der beiden Brunnen einen Durchbruch.

Wenn für Brunnen JUNost-06 (ohne Tonsperre) auf Basis der Messungen mit dem Tauch-Fluorometer jedoch von einem Zutritt des Markierungsstoffes in den Brunnen ausgegangen wird, heißt dies, dass die Durchflussmessungen aufgrund der geringeren Auflösung und hohen Verdünnung im Förderstrom des Brunnens nicht geeignet waren, einen Fremdwasserzutritt zum Rohwasser zu detektieren. Zusätzlich war an Brunnen JUNost-12 (mit Tonsperre) die Ausgangskonzentration Uranin 1000-fach geringer.

## **Kapitel 4 Schlussfolgerungen**

### **4.1 Maßnahmen zur Risikominimierung**

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Abwesenheit von Tonsperren im Ringraum oberhalb des Brunnenfilters ein wesentliches Gefährdungspotential darstellt. Eine Undichtigkeit des Vollrohrs oder Außenpegels oberhalb der Tonsperre würde diese außerdem unwirksam machen. Außerdem können Undichtigkeiten des Außenpegels sowohl innerhalb, wie auch außerhalb des Brunnenschachtes zusätzliche Wegsamkeiten für infiltrierendes Regen- oder Oberflächenwasser bieten, und damit als Eintragspfad für bakteriologische Kontaminationen dienen. Die Art und Bauweise der verbauten Pegelrohre stellt somit ein erhöhtes Risiko für die Sicherung der Trinkwasserqualität dar. Daher kann der Beschluss zum Rückbau, respektive zur Verfüllung bestehender Außenpegel aus Sicht der Qualitätssicherung befürwortet werden.

Für den Neubau von Trinkwasserbrunnen könnten jedoch kombinierte Maßnahmen zur Risikominimierung überdacht werden. Mögliche Maßnahmen beinhalten eine bessere Abdichtung der Übergänge von Pegelvollrohren und durchgezogene Tonsperren, wie sie bereits Standard beim Neubau von Brunnen der BWB sind. Ein Vergleichsversuch an Brunnen mit durchgezogener Tonsperre könnte zur Verifizierung der unterschiedlichen Parameter dienen. Zudem würden Unsicherheiten bei der Interpretation der bisherigen Ergebnisse ausgeräumt werden.

Die Verweilzeit von infiltrierendem Niederschlagswasser in der ungesättigten Bodenzone kann wesentlich durch das Vorhandensein von Tiergängen verkürzt werden. Insbesondere wenn die Bauten in tiefere Schichten des Bodens vordringen und die geologischen Bedingungen erhöhte Durchlässigkeiten in Form von gröberen Sand- oder Kieslagen aufweisen, besteht ein erhöhtes Risiko für die schnelle Infiltration von bakteriologisch kontaminierten Wässern ins Grundwasser. Jedoch ist unter den derzeitigen klimatischen Verhältnissen und selbst bei verstärktem Auftreten von Starkregenereignissen eine Kontamination des Grundwassers durch Sickerwasser über die natürliche Bodenpassage unwahrscheinlich.

Auch kann es durch die Störung der natürlichen Ablagerungsbedingungen durch Entfernung und Wiederverfüllung der Sedimente beim Schachtbau zu erhöhten Durchlässigkeiten im direkten Schachtumfeld kommen. Diese erhöhte Wegsamkeit ließe sich durch eine zusätzliche Tonsperre um den Brunnenschacht herum verhindern. Dies wird vor allem für diejenigen Brunnen als sinnvoll erachtet, deren Grundwasserleiter nicht durch stauende Schichten im Hangenden geschützt sind.

### **4.2 Eignung von Infiltrations- und Markierungsversuchen zum Nachweis von Umläufigkeiten**

Generell ist die Ermittlung des Gefährdungspotentials durch hydraulische Kurzschlüsse im und um den Brunnen anhand von Felduntersuchungen Neuland und es bestehen weder weitreichende Erfahrungen über die Eignung der verwendeten Methoden noch bestehen gängige Standards zur Überprüfung von Undichtigkeiten.

Eine Bewertung des Brunnens auf Grundlage von Infiltrations- und Markierungsversuchen ist aufgrund der komplexen Anströmung im Nahbereich mit Unsicherheiten belegt. Zudem sind die Simulation von gesättigten Bedingungen durch die Aufleitung von Wasser und die abgeleiteten Infiltrationsraten nur bedingt dazu geeignet tatsächliche Fließzeiten zu berechnen. Allerdings lassen sich anhand dieser Versuche Brunnen mit unterschiedlichen Ausbauten und hydrogeologischen Bedingungen gut vergleichen und bewerten.

Die durchgeführten Markierungsversuche haben gezeigt, dass sie grundsätzlich als Methode zur Feststellung von Undichtigkeiten dienen können. Auch konnte die Ursache auf "Undichte Rohrverbindungen im Außenpegel" und "Fehlende Ringraumabdichtung" eingegrenzt werden. Strömungspfade und der potentielle Übertritt vom Außenpegel in den Brunnen konnten jedoch nicht weiter spezifiziert werden. Markierungsversuche sind daher nur bedingt geeignet, die Ursachen von Fremdwasserzutritten zu Brunnen zu untersuchen.

Dabei können Fluoreszenzmessungen direkt im Filterbereich von Messstellen und Brunnen mittels Tauchsonden das Auftreten von Markierungsstoffen wesentlich genauer nachweisen als Messungen im Rohwasserdurchfluss. Solche potentiellen Wasserzutritte in oder aus Pegel- und Brunnenvollrohren sollten sich allerdings auch über Messungen von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit über die Tiefe mit hochauflösenden Messgeräten verlässlich detektieren lassen.

Sowohl das Vorhandensein der Tonsperre, als auch die Dichtigkeit des Schachtbauwerkes können zuverlässig mit den klassischen geophysikalischen Verfahren, wie sie bereits zum Einsatz kommen, geprüft und bewertet werden. Nicht zu prüfen ist damit jedoch die vollständige Anbindung der Tonsperre an die Ausbaumaterialien. Hier sollte ein Markierungsversuch, bei Vorliegen dichter Rohrverbindungen und Verwendung einer ausreichenden Menge Markierungsmittel sowie einer hochauflösenden Tauchsonde, zur Bestätigung der Wirksamkeit der Tonsperre dienen können.

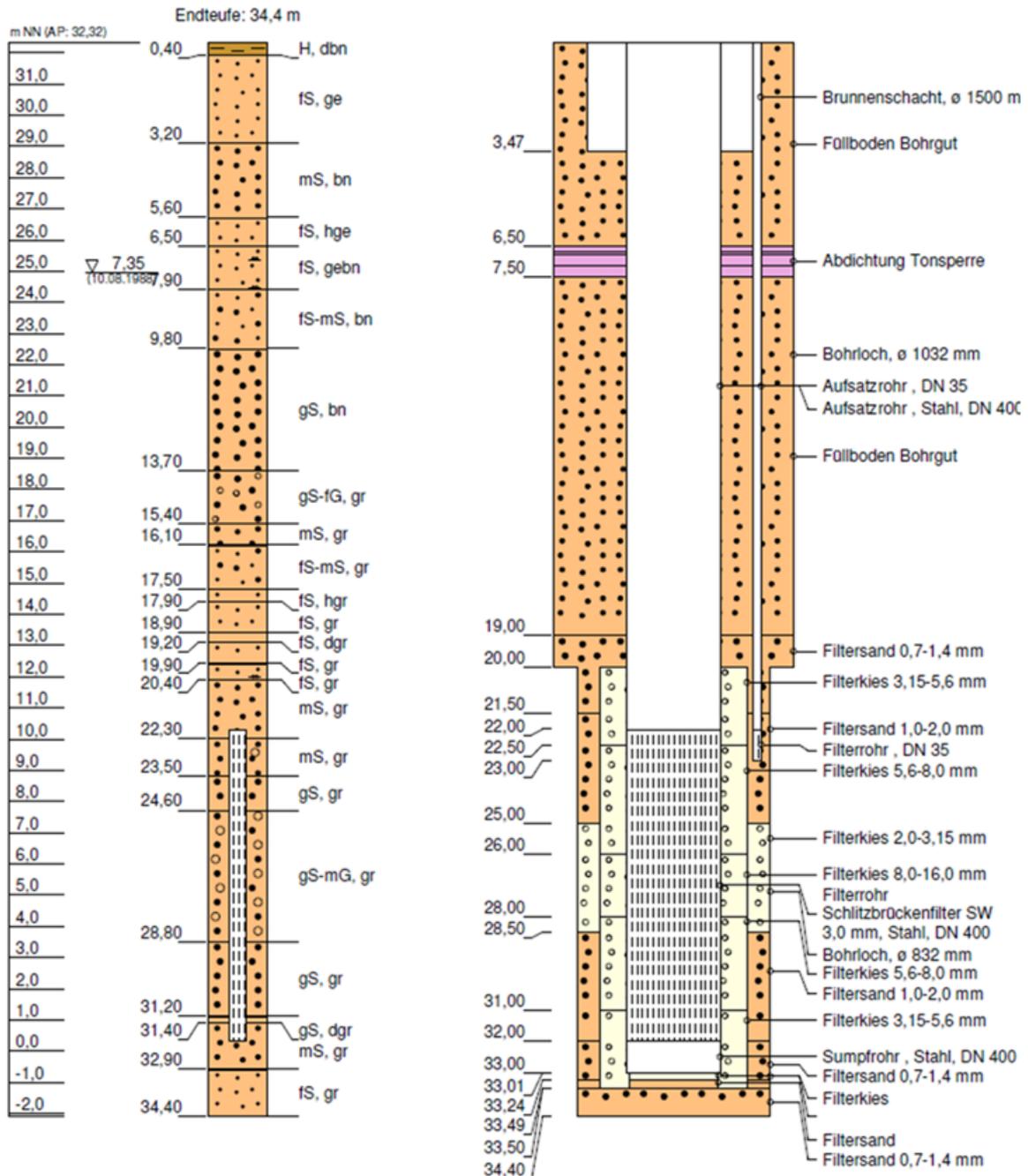
## Referenzen

- DVGW (1998). Kontrollen und Abnahmen beim Bau von Vertikalfilterbrunnen. Merkblatt W 124.
- DVGW (2005). Geophysikalische Untersuchung in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen - Zusammenstellung von Methoden und Anwendungen. Arbeitsblatt W 110.
- DVGW (2011). Abschlussbauwerke für Brunnen der Wassergewinnung. Arbeitsblatt W 122.
- Hötzl, H. & Göppert, N. (2007). Entwicklung einer optimierten Tracertechnik unter Verwendung von fluoreszierenden Mikrokügelchen zur Bewertung der hygienischen Gefährdung von Grundwässern.
- Ullsperger, I., et al. (1988). Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchung in der ungesättigten Zone eines Kiesgrundwasserleiters; Ergebnisse langjähriger bodenhydrologischer Messungen. Z. Wasser-Abwasser-Forsch. 21. Weinheim, Verlagsgesellschaft mbH: 10.

# Anhang 1

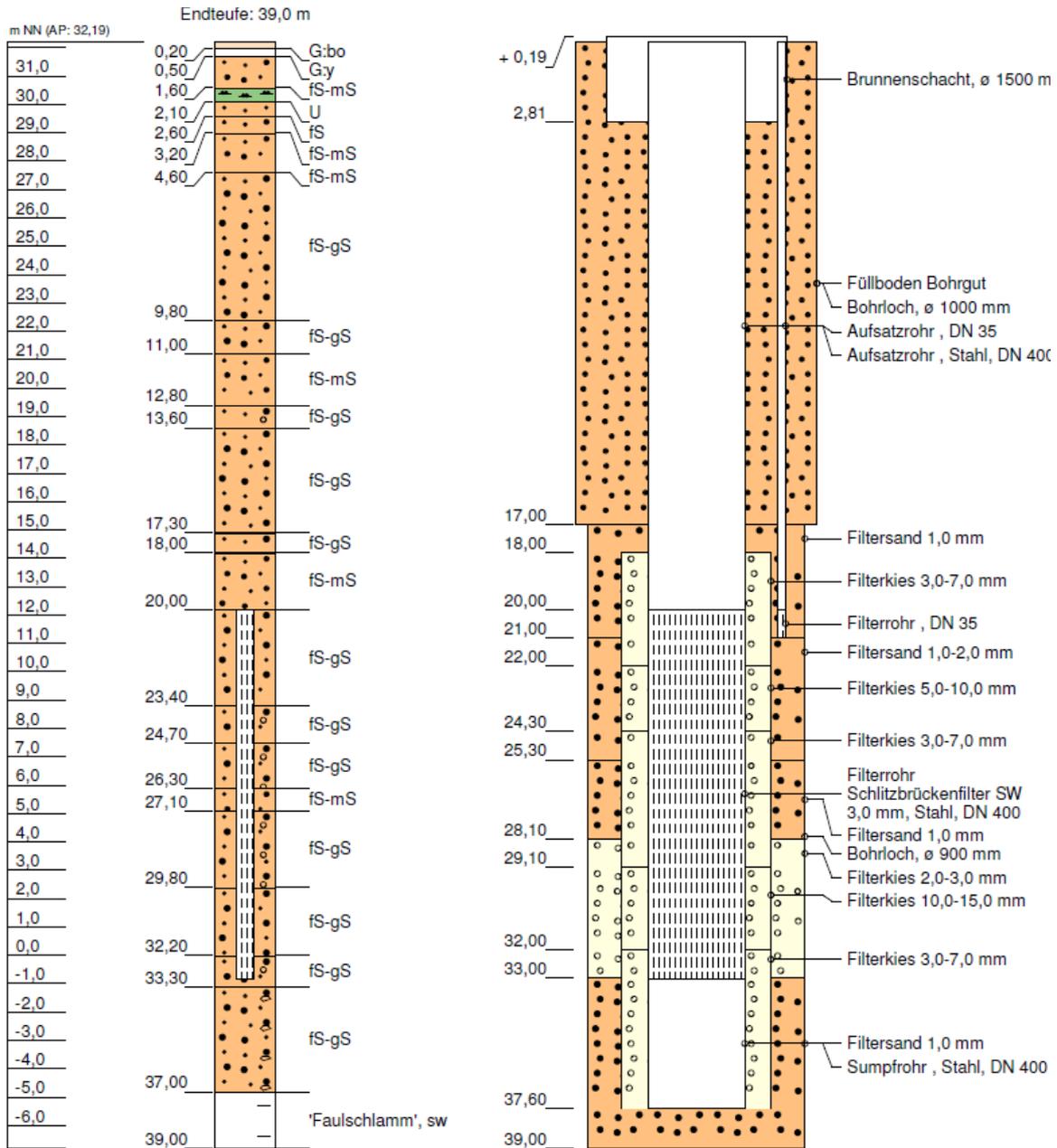
## Ausbauzeichnung der Brunnen und Hydrogeologisches Profil der Galerie Jungfernheide-Ost

JUNost-12



Maßstab 1:185 / 1:25

# JUNost-06



Bohrung: JUN ost 06/74

Rechtswert: 33382424,088

Hochwert: 5821585,262

Maßstab 1:210 / 1:25

## Anhang 2 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

<u>Brunnen Ost-12 (mit Tonsperre)</u>				
Versuch	Zugabeort	Datum		Ergebnisse
		von	bis	
Infiltrationsrate	Brunnenstube innen	04.07.2012	05.07.2012	Brunnenstube innen dicht
Infiltrationsrate	Ringinfiltrometer um Brunnenstube	05.07.2012		Infiltrationsrate 17.4 l/min *entspricht einer theoretischen minimalen Fließzeit zur FOK von 4.3 h (Kolben-Fluss-Modell)
Markierungsversuch	Ringinfiltrometer um Brunnenstube Zugabe von 500 mg Uranin	16.08.2012	27.08.2012	*2 Stromausfälle während der Messungen leichte Schwankungen des Messwertes keine charakteristische Durchbruchskurve
Wiederholung Markierungsversuch	dto	10.09.2012	09.10.2012	leichte Schwankungen des Messwertes keine charakteristische Durchbruchskurve *Zulaufschläuche und Messküvette stark mit Eisenablagerungen zugesetzt

### Bewertung des Versuchs:

Ein Durchbruch des Uranins wurde innerhalb der zwei Messperioden nicht beobachtet. Die Messwert-Schwankungen sind vermutlich auf einen Einfluss der Außentemperatur auf das Messgerät und Schwankungen der Netzspannung in der Stromversorgung des Messgerätes zurückzuführen. Das Durchfluss-Messgerät arbeitet mit Durchlichtmessung und ist für eisenhaltiges Rohwasser nicht geeignet, da sich in der Messküvette Eisenoxide ablagerten. Die Zugabemenge von 5 mg Uranin bei einem Nachspülvolumen von 1 m<sup>3</sup> Rohwasser wurde als zu gering für eine zuverlässige Detektion im Durchfluss (bei 120 m<sup>3</sup>/h Förderstrom) bewertet und am zweiten Brunnen entsprechend erhöht.

<b>Brunnen Ost-06 (ohne Tonsperre)</b>				
<b>Versuch</b>	<b>Zugabeort</b>	<b>Datum</b>		<b>Ergebnisse</b>
		<b>von</b>	<b>bis</b>	
Infiltrationsrate	Brunnenstube innen	14.08.2012		Undichtigkeit im Bereich der Pegeldurchführung Brunnenstube gesamt dicht
Infiltrationsrate (Trockenwetter)	Ringinfiltrometer um Brunnenstube	14.08.2012		Infiltrationsrate 94.2 l/min *entspricht einer theoretischen minimalen Fließzeit zur FOK von 0.8 h (Kolben-Fluss-Modell) ** Tiergänge als bevorzugte Fließpfade
Wiederholung Infiltrationsrate (aufgesättigt)	dto.	19.11.2012		Nach kontinuierlicher Aufleitung während des Markierungsversuch verringert sich die Infiltrationsrate auf 31.4 l/ min (entspricht 2.5 h)
Markierungsversuch	Ringinfiltrometer um Brunnenstube Zugabe von 5 g Uranin	05.11.2012	19.11.2012	Durchfluss-Messgerät: Leichte Messwertschwankungen ab Tag 4 nach Tracereingabe In-situ-Logger Außenpegel: Anstieg der Messwerte ab Tag 4
Aufnahme von Tiefenprofilen	ohne erneute Zugabe	15.11.2012	06.12.2012	Vertikale Schichtung der Uraninkonzentration mit Maximum im Außenpegel zwischen 17 m unter OK Schacht und FOK; Konzentrationszunahme bis 17 Tage nach Tracerzugabe, danach Abnahme Maximum im Brunnen zwischen Pumpe und 17 m u OK Schacht, den Strompfaden folgend

Bewertung des Versuchs:

Mit Hilfe des Tauch-Fluorometers, dass beim Markierungsversuch an Brunnen JUNost-06 zusätzlich zur Durchfluss-Messung im Filterbereich des Außenpegels eingesetzt wurde, konnten geringfügige, aber belastbare Erhöhungen der Uranin-Konzentration nachgewiesen werden. Zeitpunkt und Verlauf des Auftretens werden als Durchbruch des Uranins im dem Brunnen zuströmenden Grundwasser vier Tage nach Zugabe des Markierungsstoffes interpretiert. Die vertikale Schichtung im Außenpegel und der zeitliche Verlauf der Konzentrationen in den Tiefenprofilen spricht für einen Zutritt des Tracers im Bereich einer undichten Rohrverbindung am Außenpegel bei ca. 17m unter Gelände.