

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Treskatis, Christoph

Mikrobiologische Befunde im Brunnenwasser - Hygienische Aspekte bei Bau, Regenerierung und Sanierung von Brunnen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101833>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Treskatis, Christoph (2014): Mikrobiologische Befunde im Brunnenwasser - Hygienische Aspekte bei Bau, Regenerierung und Sanierung von Brunnen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Bohrungen und Baugrund. Herausforderungen bei der Ausführung. Horizontale und vertikale Bohrtechnik. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 105-114.

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.





Mikrobiologische Befunde im Brunnenwasser - Hygienische Aspekte bei Bau, Regenerierung und Sanierung von Brunnen

Prof. Dr. habil. Christoph Treskatis
Bieske und Partner Beratende Ingenieure GmbH
Im Pesch 79
D-53797 Lohmar
0049-(0)-2246 9212-22; Fax: -99
c.treskatis@bup-gup.de

Abstract

Groundwater is the most important source for human water supply. Shallow groundwater is assumed to be at the highest probability of contamination with pathogens in respect of input and transport of contaminated surface and recharge water. The presence of preferential flow paths near the water well or the borehole increases the vulnerability of groundwater to contamination from the surface. Drinking water extraction by drilled water wells changes the natural hydraulic and chemical conditions for microorganisms. In this context flow into wells induced by drilling fluids or surface water is the main reason for high numbers of pathogens in drinking water. Thus an unsealed borehole or leaky casings are assumed to be the vertical short-circuits for recharge water and storm water. For sustainable attenuation of pathogens in boreholes the flow of surface water from surface into the well must be completely restricted by tight annular sealing, clay layers around the shaft building and tight casings.

Kurzfassung

Normalerweise haben Grund- bzw. Quellwässer im Vergleich zum Oberflächenwasser eine geringe bis gar keine Belastung mit Mikroorganismen. Die Ursache dieses für die Trinkwassergewinnung wichtigen Unterschieds liegt im Rückhalte- und Reinigungsvermögen der Böden und der ungesättigten Zone gegenüber Mikroorganismen und insbesondere gegenüber pathogenen Keimen. Jeder bauliche Eingriff in den Untergrund sorgt aber für eine Störung dieses Zustandes. Daher werden in Brunnen immer wieder nach Arbeiten im oder am Bauwerk mikrobiologische Befunde im Rohwasser festgestellt. Ursachen sind ein rascher vertikaler Transport der pathogenen Keime über die vertikalen Klüfte und das Vorhandensein bevorzugter, präferenzierter Fließwege von der Bohrung oder dem Schachtbauwerk in die gesättigte Zone. In diesem Zusammenhang stehen oft erhöhte Keimbelastungen im Brunnenrohwasser, die durch unkontrollierbare Fremdwasserzuflüsse das Bauwerk ausgelöst werden. Ungeeignete Bohrspülungen, undichte Ringräume, korrodierte Sperrrohre und undichte Verbindungen im Ringraum sind die wesentlichen Transportwege zwischen dem eindringenden Oberflächenwasser und dem Grundwasser. Der Zufluss dieser Wässer muss durch geeignete Abdichtungen im Ringraum sowie im Bereich des Schachtbauwerkes und der Stichelungen nachhaltig unterbunden werden. Hierzu sind entsprechende Planungs- und Prüfkriterien für jedes Fassungsbauwerk individuell zu definieren.

1 Einleitung

Grundwasser ist die wichtigste Ressource für die Trinkwasserversorgung in Deutschland. Mehr als drei Viertel des Wasserbedarfs wird aus dem Grundwasser über Brunnen und Quellen gewonnen. Uferfiltrat und Oberflächenwasser decken den Wasserbedarf in den Regionen, in denen nur wenig oder kein echtes Grundwasser im Sinne der DIN 4049 gewinnbar ist. Strömendes Grundwasser transportiert wie Oberflächenwasser neben gelösten auch suspendierte Stoffe (Partikel). Mikroorganismen stellen im Grund- und Oberflächenwasser partikuläre Substanzen dar, die im Gegensatz zu gelösten Stoffen mit dem Wasser in Funktion der Durchlässigkeit und der Hohlraumgeometrie der Poren- und Kluftkanäle transportiert werden und sich je nach Lebensraum und Nährstoffangebot vermehren können. Für die Trinkwasserversorgung gelten strenge Grenzwerte für Indikatorkeime wie z.B. *Escherichia coli*, *coliforme* Keime und *Enterokokken*. Indikatorkeime sind für die Beurteilung von negativen Einflüssen mikrobiologischer Art auf das Roh- und Trinkwasser von

großer Bedeutung und erfüllen eine Vorwarnfunktion in der hygienischen Überwachung der Trinkwasserversorgung.

Grundwasser ist im Gegensatz zu Oberflächenwasser von Natur aus unbelastet mit krankheitserregenden Keimen und Mikroorganismen. Diese werden unter natürlichen Randbedingungen bei der zurückgehalten, da sie entweder in den Porenhälsen des Sedimentes hängen bleiben, sich an Bodenpartikeln ansiedeln, adsorbieren oder aufgrund von Nährstoffmangel im Verlauf der Bodenpassage absterben bzw. zumindest inaktiviert werden. Die Lage der Grundwasseroberfläche (Flurabstand), das Vorhandensein von bindigen Grundwassergingleitern, die Fließgeschwindigkeit, die Nähe zu einem Eintragungsbereich und dessen Quellstärke sowie die Art der Mikroorganismen (Viren, Bakterien, Protozoen etc.) und die Nährstoffe im Grundwasser beeinflussen das Abbaupotenzial von Mikroorganismen (MCDO- WEL-BOYER ET AL. 1986). Große Quellstärken mikrobiologischer Belastungen gefährden die Grundwasserbeschaffenheit nicht nur in Ländern mit einem geringen



Anschlussgrad der Haushalte an die öffentliche Kanalisation sondern auch in unseren Grundwasserleitern, wenn „schlecht“ gebaute und ungenügend unterhaltene Brunnen in vulnerablen, von Natur aus nur ungenügend geschützten Grundwasserleitern ohne zusätzliche Desinfektions- oder Aufbereitungsmaßnahmen betrieben werden (MCKAY 2011).

2 Brunnenanströmung

Grundwasserleiter werden nicht einheitlich durchströmt (Bild 1). Der Hauptumsatz im Grundwasserraum findet in geringen Tiefen < 20 m unter Gelände statt (SEILER & LINDNER 1995). Oberflächennahe Grundwasserleiter weisen meist das ganze Jahr über konstante Temperaturen und aufgrund geringer Fließgeschwindigkeiten relativ stabile chemische Lebensbedingungen für Mikroorganismen auf. Dies ändert sich jedoch drastisch durch die Errichtung eines Brunnens. Neben dem möglichen Eintrag von Sauerstoff verändern sich vor allem die Strömungsrichtungen und Fließgeschwindigkeiten im Brunnenumfeld (Bild 2).

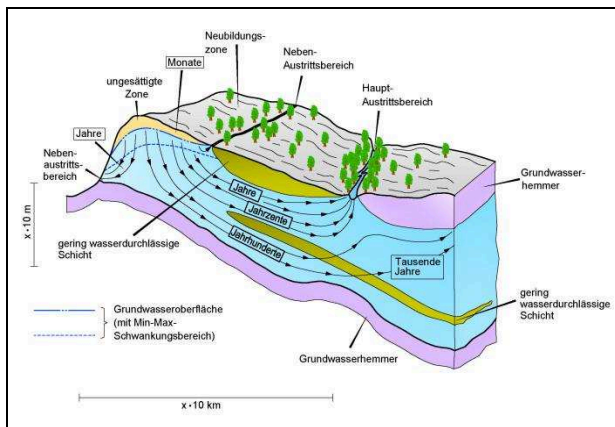


Bild 1: Schema der Grundwasserbewegung im natürlichen Fließsystem. Die Fließzeiten des Grundwassers nehmen mit der Tiefe und der Entfernung vom Neubildungsgebiet zu. Verändert nach FOSTER ET AL. (2000).

Beträgt die Fließgeschwindigkeit im Grundwasser meist nur wenige hundert Meter im Jahr, kann sie im Nahfeld eines Brunnens je nach Betriebsweise um ein Vielfaches ansteigen. Bewegt sich z.B. ein Bakterium mit gleicher Geschwindigkeit wie das umgebende Medium, werden Nährstoffe nur diffusiv an seine äußere Membran transportiert. Verankert es sich jedoch an einer Oberfläche, strömen stetig frische Nährstoffmoleküle an ihm vorbei. Dies hat zur Folge, dass z.B. Bakterien, die sich an Bodenpartikel anheften („sessil“), einen deutlichen Vorteil gegenüber planktischen, d.h. in der Freiwasserphase schwimmenden Bakterien erhalten.

Aus diesen Gründen finden vor allem sessile Bakterien im Brunnen sehr gute Lebensbedingungen vor, da hier

große Wassermengen mit einem kumulativ hohen Nährstoffangebot auf engem Raum an ihnen vorbeiströmen. Sie können sich also leicht vermehren und den Brunnen durch die Abscheidung von Stoffwechselprodukten zusetzen (HOUBEN & TRESKATIS 2012).

Vereinfacht erfolgt die Anströmung eines Brunnens gleichmäßig von allen Seiten. Ein quasi rotationssymmetrischer Absenkungstrichter bildet sich aus, und der horizontale Grundwasserzufluss wird in Brunnennähe in Richtung Filterstrecke vertikal abgelenkt. Damit geht eine Zunahme der radialen Fließgeschwindigkeit zum Brunnen einher, die in Funktion der Entnahmemenge, der Brunnenmantelfläche und der Korngröße der Ringraumschüttung in Brunnennähe allmählich vom laminaren in turbulentes Fließen übergeht.

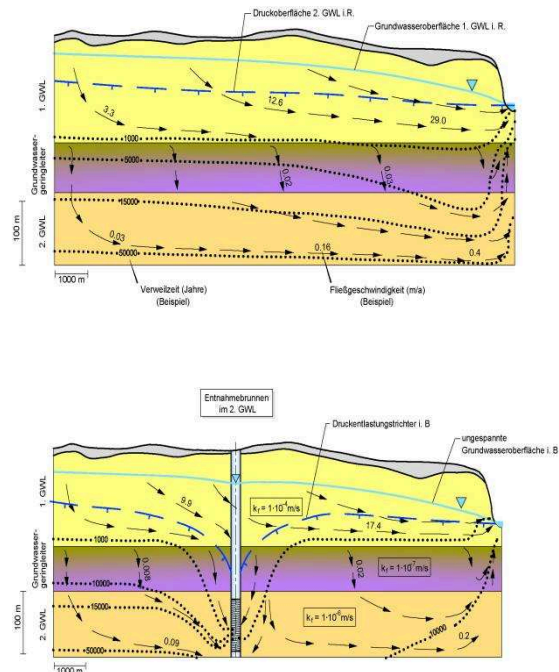


Bild 2: Veränderung der Fließgeschwindigkeiten und der Grundwasserströmung durch einen Brunnen. Oben: ungestörte Strömungssituation; unten: der ursprünglich horizontale Grundwasserfluss geht in Brunnennähe in eine vertikale Zuströmung über, so dass oberflächennahes Grundwasser über vertikale Sickerströmungen (Leakage) in tiefere Grundwasserleiterbereiche und in den Brunnen gelangt.

Turbulenz fördert Entgasungsprozesse, z.B. bei der Kohlensäure und befördert die Mischung von unterschiedlich zusammengesetzten Wässern aus verschiedenen hydrochemischen Zonen des Grundwasserleiters und kann so die Brunnenalterung aber auch den Eintrag mikrobiologisch belasteter Wässern aus dem oberflächennahen Teil des Grundwasserraums beschleunigen (Bild 2). Diesen Umstand haben schon zahlreiche Brunnenbetreiber erfahren müssen, bei denen Tiefbrunnen

von steigenden Nitratbelastungen oder von periodischen Keimbelastungen betroffen waren.

Im realen Brunnenbetrieb und aufgrund der Heterogenitäten des Grundwasserleiters ist der Absenkungstrichter um einen Brunnen selten rotationssymmetrisch, und die Filterstrecke wird nicht gleichmäßig angeströmt. Numerische Berechnungen von HOUBEN & HAUSCHILD (2006) zeigten, dass das Grundwasser bevorzugt nahe der Filteroberkante, d.h. dort mit höheren Fließgeschwindigkeiten in einen Brunnen eintritt im Vergleich zur Mitte oder zum unteren Teil der Filterstrecke (Bild 3). Besonderes Augenmerk ist aber auch der Strömung im Ringraum zu widmen. Bei vielen älteren Brunnen wurde dieser oberhalb des Filterkieses nicht mit undurchlässigem Material (Tonsperre) verfüllt sondern mit Bohrgut.

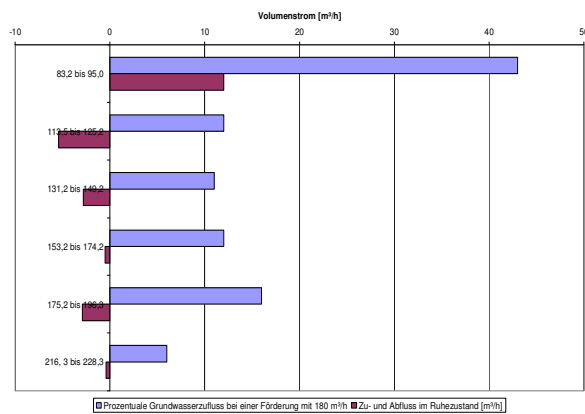


Bild 3: Zuflussmengen im Ruhezustand und Förderzustand innerhalb der Filterstrecke in einem Tiefbrunnen in der Oberen Süßwassermolasse. Die Hauptzuflusszone liegt nahe der Filteroberkante.

Dadurch bildet sich dort eine zwar schmale, aber gut durchlässige Zone aus, durch die aufgrund der brunnen-nah herrschenden hohen vertikalen Gradienten eine große Menge Wasser von oben in die Filterstrecke zuströmt (RUBBERT & TRESKATIS 2008). Dies kann zu trinkwasserhygienischen Problemen führen, wenn das oberflächennahe Grundwasser mit Mikroorganismen belastet ist. Eine Vielzahl der in der Praxis beobachteten mikrobiologischen Belastungen geht auf ungenügend dichte und defekte Ringraumsperren (z.B. Tonsperren oberhalb des Wasserspiegels oder ungeeignete Tonmaterialien) oder undichte Rohrverbindungen in den Aufsatzrohren zurück (TRESKATIS 2012).

3 Natürliche und brunnenbedingte Eintragspfade und Zurückhaltung von Mikroorganismen

Der Nachweis von Mikroorganismen im Rohwasser wird in der Praxis aufgrund der relativ seltenen Direktbeprobungen von Brunnen meist „zufällig“ im Rahmen

der gesetzlich vorgesehenen Rohwasser- oder Trinkwasserbeprobungen erbracht. Parallel mit mikrobiologischen Positivbefunden werden vor allem in Festgesteinsbrunnen und Quelfassungen oft Trübungseinbrüche festgestellt. Der Eintrag der Mikroorganismen erfolgt in Abhängigkeit vielfältiger geologischer oder brunnenbautechnischer Faktoren. Dabei sind nicht nur der Bau des Brunnens sondern auch Regenerier- und Sanierungsarbeiten Auslöser für positive mikrobiologische Befunde im Brunnenwasser.

Die Ursachenforschung zur Herkunft von mikrobiologischen Belastungen wird durch die besonderen Transporteigenschaften und das Verhalten der Mikroorganismen in der ungesättigten und gesättigten Zone erschwert. Oft fehlen hierzu konsistente Beprobungen unter definierten und reproduzierbaren Randbedingungen, bei denen über längere Zeiträume das Eintragsmuster und die Abhängigkeiten der Befunde von externen und internen Faktoren des Brunnens und seines Umfeldes abgeleitet werden können.

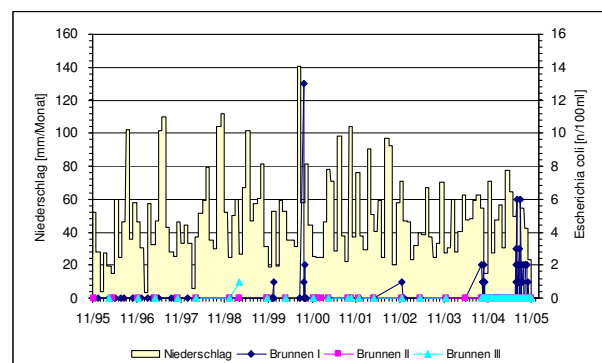


Bild 4: Zeitreihe mikrobiologischer Positivbefunde in drei Brunnen im Karst der Nordeifel in Funktion des Niederschlages. In der Gesamtzeitreihe wurden bis 10/2004 nur die gesetzlich vorgeschriebenen Beprobungen 2mal pro Jahr durchgeführt. Vereinzelt Befunde stehen für Signale von immer wiederkehrenden Einträgen in einen der drei Brunnen.

Daher ist bei der Messung erhöhter Trübungswerte nicht automatisch der Rückschluss auf eine mikrobiologische Belastung zulässig.

Bilder 4 und 5 zeigen beispielhaft, dass in der Zeitreihe mikrobiologischer Beprobungen in drei Brunnen eines Wasserwerkes im Karst der nördlichen Eifel erst bei einer Verdichtung der Probennahmen der externe Einfluss der Niederschläge auf die Belastungen erkannt werden konnte.

Externe Faktoren auf die Einträge und das Überleben von Mikroorganismen im Grundwasser sind z.B. der Bodenaufbau in der ungesättigten Zone, die Temperatur im Boden und Wasser, die mikrobiologische Aktivität bis hin zur hydraulischen Durchlässigkeit und Verweil-



zeit des Wassers im Untergrund. Die externen Faktoren sind in den meisten Grundwasserleitern vor allem für sporadische, oft geringe Belastungen des Rohwassers mit *coliformen* Keimen und Keimzahlen verantwortlich. Starke Keimbelastungen sind aber oft aufgrund der bekannten Quellstärken, z.B. von undichten Abwasser-sammlern oder von Sickerwässern von Mistplatten nur dann zu erwarten, wenn im Untergrund erhöhte Fließgeschwindigkeiten für eine zu kurze Aufenthaltszeit und erhöhte Nährstoffeinträge ein Überleben der Mikroorganismen auch über längere Fließstrecken erlauben. In der Literatur ist bekannt, dass z.B. Bakterien und Viren in Sanden und Kiesen bis zu 400 m und *Coliphagen* in Karstsystemen bis zu 1.600 m transportiert wurden und überlebten (YATES & YATES 1988).

Interne Einflussfaktoren auf mikrobiologische Befunde sind vor allem die baulichen Randbedingungen sowie sanierungsbedingte Eingriffe in die Bauwerksstruktur eines Brunnens. Über Bohrungen vielfach vertikale Substanzsituationen geschaffen, über die partikuläre Substanzen in den Ringraum oder die Rohre und von dort direkt in den Fördervolumenstrom gelangen können (TRESKATIS 2012). Oft sind unsachgemäße Regenerierarbeiten Auslöser von Verkeimungen, wenn mikrobiologisch verfügbare Regenerate verdriften und in unerreichbare Hohlräume am Brunnen, z.B. in der Unterschüttung des Sumpffrohres, verlagert werden.

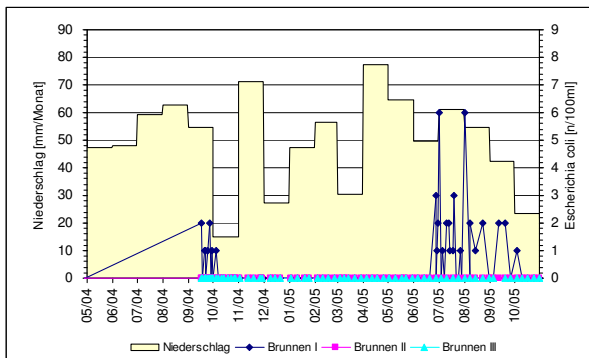


Bild 5: Ausschnitt aus der Zeitreihe in Bild 4. Ab 10/2004 wurden die Beprobungen nach dem Auftreten von erheblichen *E.coli*-Befunden verdichtet, so dass die Eintragsfunktion ermittelt werden konnte.

Undichtigkeiten im Bereich des Abschlussbauwerkes und des Brunnenkopfes sowie versickernde Oberflächenwässer in Brunnennähe (z.B. aus Stehgewässern wie Blänken nach Starkregen) gelten ebenfalls als interne Einflussfaktoren auf den Eintrag von Mikroorganismen in den Grundwasserraum.

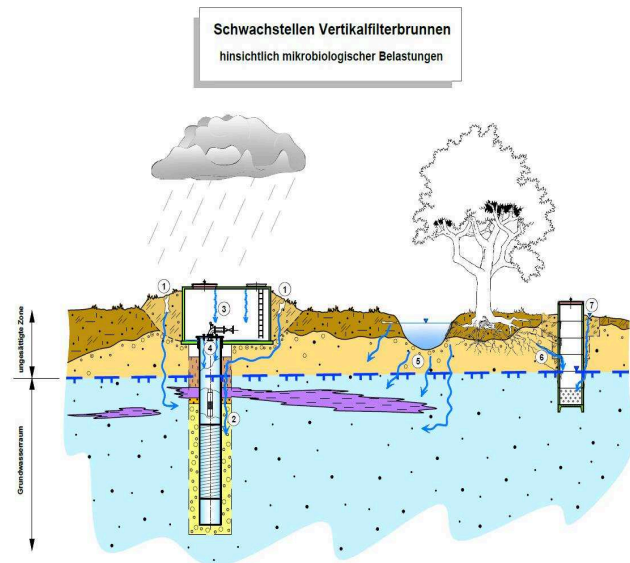


Bild 6: Schematische Darstellung der Eintragswege und möglichen Quellen von mikrobiologischen Belastungen in Bohr- und Schachtbrunnen. Die Quellstärke der Belastungen und die Wegsamkeit der Brunnenbauten steuern den Eintrag der trinkwasserrelevanten Indikatorkeime.

Indizes in Bild 6:

- 1: Sickerwassereintritte über Grabbauten von Tieren in der Böschung; 2: undichte Ringraumsperren; 3: undichte Schachtabdeckungen; 4: undichte Brunnenkopfverschlüsse; 5: Sickerwässer abwasserbelasteter Stehgewässer; 6: Wurzeleinwuchs; 7: Sickerwässer in undichte Baugrubenverfüllungen**

Letztgenannte werden in der Praxis häufig unterschätzt, sind aber nach Erkenntnissen des Autors häufigste Ursache für massive mikrobiologische Beeinträchtigungen des Rohwassers. Das Bild 6 zeigt schematisch die Eintragspfade für Mikroorganismen im Brunnenumfeld.

| Einflussfaktor | Überlebensszenario für das Bakterium | Einfluss auf die Verlagerung von sessilen Bakterien |
|---|---|--|
| Temperatur | Längere Lebenserwartung bei geringen Temperaturen | |
| Mikrobiologische Aktivität im Oberboden | Erhöhte Lebenserwartung in sterilen Böden | |
| Feuchtigkeitsgehalt im Oberboden | Höhere Überlebensrate in feuchten Böden und in Zeiten hoher Niederschläge | Die Verlagerung der Bakterien wird durch die Zunahme der Wassersättigung im Oberboden beschleunigt |
| pH-Wert der Bodenwasserlösung | - | Niedrige pH-Werte erhöhen die Retention der Bakterien im Oberboden |
| Salzgehalt und Art der Salze | - | Hoher Salzgehalt und die Anwesenheit ionischer Salze mit hoher Kationenladung erhöhen die Adsorption von Bakterien |
| Bodenstruktur und - | - | Es besteht eine |



| Einflussfaktor | Überlebensszenario für das Bakterium | Einfluss auf die Verlagerung von sessilen Bakterien |
|--|--|--|
| textur | | hohe Verlagerungsgefahr bei texturreichen Böden; ein Rückhaltevermögen gegenüber Bakterien besitzen Tonmineralien im Boden |
| Bakterientyp | Verschiedene Bakterien variieren in ihrer (Überlebens-) Empfindlichkeit gegenüber physikalischen, chemischen und biologischen Faktoren | Filtration und Adsorption ist durch die spezifischen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Bakterien vorgegeben |
| Organische Substanzen im Boden und Grundwasserleiter | Erhöhte Überlebensraten der Bakterien und Nachwachsen bei ausreichend verwertbarer organischer Substanz im Boden bzw. im Grundwasserleiter | Akkumulation organischer Substanzen kann die Filtration der Bakterien verbessern (Anlagerung an polare Substanzen) |
| Hydraulische Situation im Grundwasserleiter | - | Verlagerungsgefahr wächst mit dem hydraulischen Gradient, der Fließrate und der Porenkanalgröße |

Tab. 1: Einflussfaktoren auf die Bakteriologie und Mikrobiologie im Oberboden. Nach YATES & YATES (1988). Aus ZHANG ET AL. (2004).

In der Tab. 1 sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Mikrobiologie im Oberboden und deren Verlagerungsmöglichkeiten in das Grundwasser über die ungesättigte Zone zusammengestellt worden. Aus dieser Tabelle kann abgeleitet werden, dass vor allem gut durchfeuchtete Böden und texturierte B-Horizonte, wie sie in den Deckschichten über Karst-, Sandstein- oder kiesigen Porengrundwasserleitern vorkommen können, die Verlagerung der Mikroorganismen beschleunigen können. Der Rückhalt bzw. die „Abbaurate“ für eine Bakterienbelastung ist in leichten, d.h. kiesigen Böden geringer als in bindigen Böden, da die Mikroorganismen als suspendierte Partikel dort in der Lösung gehalten oder an Bodenpartikeln angelagert werden und somit retardiert werden können.

Die Retardationsleistung anthropogen unveränderter Böden nimmt qualitativ gesehen in folgender Reihenfolge ab (TRESKATIS & TAUCHMANN 2013):

- Tonböden (höchste Retardationsleistung)
- Lehmböden
- Feinsande, lehmige Sande, Lösslehme
- Verwitterte Sandsteine, verwitterte Konglomerate mit hohem Feinkornanteil, wenig verfestigt, locker gelagert
- Mittelsande
- Grobsande und Kies-Steinböden
- geklüftete oder verkarstete Festgesteine (geringste Retardationsleistung)

Für die Retardation von Mikroorganismen ungünstige Bodenstrukturen werden auch im unmittelbaren Umfeld von Brunnen- oder Quellsbauwerken angetroffen, da bei der Rückverfüllung der Baugruben oft der Aushub wiederverwendet wurde (TRESKATIS & TAUCHMANN 2013). In Zeiten erhöhter Grundwasserneubildung oder nach Starkregen werden die ansonsten mit Luft und Haftwasser gefüllten intergranularen Porenräume der Baugrubenverfüllung mit Sickerwasser ausgefüllt und stellen dann eine bevorzugte Wegsamkeit für den Transport der mobilisierten Mikroorganismen und Nährstoffe dar.

In texturreichen Böden (Kies- und Karstböden) werden Bakterien mit dem Sickerwasser rasch zu den wassergesättigten Hohlräumen im Untergrund weitergeleitet. Die Retardationsraten sind vor allem abhängig von der Länge des Fließweges und dem Porenkanalgefüge im ungesättigten und gesättigten Untergrund.

Da mikrobiologische Befunde im Gegensatz zu gelösten Inhaltsstoffen, wie z.B. Nitrat oder Chlorid, als Fracht zu betrachten sind, kann zum Beispiel bei einem Befund von 1 *E.coli* / 100 ml nach einer Brunnenregenerierung folgende Betrachtung das „Problem“ beleuchten:

- 1 *E.coli* / 100 ml = 10 *E.coli* / 1.000 ml bzw. in 1 Liter Wasser
- 1 *E.coli* / 100 ml = 1.000 *E.coli* in einem Kubikmeter Wasser

Wenn z.B. 4 *E.coli* oder Enterokokken in 100 ml Rohwasser gemessen werden, so sind auch mindestens 4 KBE/100ml in das Trinkwassersystem eingespeist worden, bis dieser positive Keimbefund amtlich ist. Da nur wenige Keime an den Leitungsoberflächen und Biofilmen angelagert werden, können pathogene Keime in der fluiden Phase bis zum Verbraucher überleben. Da in den Trinkwasseranalysen nur wenige Indikatorkeime analysiert werden, werden auch nur wenige Bakterien und Keime aus dem Gesamtsystem des Grundwassers bei der routinemäßigen Trinkwasseruntersuchung herausgegriffen. Je nach pH-Wert, Sauerstoffgehalt und Umweltbedingungen können so bei einem Positivbefund am Brunnen, z.B. Enterokokken, auch bei wenig Sauerstoff und andere Keime bei höheren Sauerstoffgehalten bis zum Verbraucher überleben, wenn keine weitere Barriere in der Trinkwasserversorgung eingebaut wurde (z.B. Desinfektionsanlage oder Aufbereitungsanlage) (TRESKATIS & TAUCHMANN 2013)

TRESKATIS ET AL. (2011) konnten anhand von Säulenversuchen mit Sanden der tertiären Oberen Süßwassermolasse des Alpenvorlandes nachweisen, dass bezogen auf die in den Versuchen eingesetzten Quellstärken bzw. Ausgangskonzentrationen der eingegebenen Mikroorganismen sich eine Eliminierungseffektivität von neun bzw. zehn Zehnerpotenzen durch die im Modell verbauten Sande ergab. Auf diese Weise übertraf die Reduktion der vertikalen Fließwegpassage durch die Mittelsande die für Bewertungen von Desinfektionsver-



fahren angelegten Maßstäbe um mehrere Zehnerpotenzen. Eine ausreichende Grundwasserüberdeckung und geringe Durchlässigkeiten reduzieren somit mikrobiologische Belastungen deutlich. Diese vereinfachte Modellvorstellung muss auch auf den Brunnenbau und das Brunnendesign übertragen werden. Die „Abbauraten“ bzw. Retardationsrate liegt z.B. beim Indikator *E.coli* bei ca. 3 bis 4 Tagen pro log-Stufe. Viren benötigen dagegen mehr als 30 Tage zum Abbau einer log-Stufe (DILLON 1997).

Sind z.B. pathogene Keime in einer Größenordnung von z.B. 10.000 Stück pro Liter vorhanden, so beträgt die Gesamtabbaurate viermal die genannte Abbauraten pro Log-Stufe, also zwischen 12 und 16 Tagen bei *E.coli* oder mehr als 120 Tage bei Viren, um später noch 1 *E.coli* in einem Liter Grundwasser anzutreffen (ohne Berücksichtigung von Verdünnung!). Diese Literaturangabe bei ZHANG ET AL. (2004) belegt, dass z.B. für eine sehr hohe Keimbelastung im Brunnenwasser von mehr als >100 *E.coli* unter Berücksichtigung der möglichen Verdünnung und der natürlichen Abbauraten in der vadosen Zone entweder eine erhebliche Eintragsquelle mit hoher Belastungsintensität, eine geringe Retardation im Porenraum oder eine Leckstelle im Brunnenbauwerk zur Verfügung stehen muss.

| Ort | <i>E.coli</i> Anzahl/100 ml | Enterokokken Anzahl/100 ml |
|--|--------------------------------|-------------------------------|
| Kehlener Plateau bei Schaar | $8,9 \cdot 10^7$ | $2,8 \cdot 10^6$ |
| Bioabfalldepot auf Steinseler Plateau | $4,4 \cdot 10^5$ | $5,6 \cdot 10^5$ |
| Bioabfall und Mistdepot auf Steinseler Plateau | $7,8 \cdot 10^3$ | $4,4 \cdot 10^8$ |
| Kehlener Plateau Mistplatte Bauernhof | $8,9 \cdot 10^5$ | $1,3 \cdot 10^6$ |
| Kehlener Plateau Mistlager bei Meispelt | $1,9 \cdot 10^4$ | $2,0 \cdot 10^6$ |

Tab. 2: Mikrobiologische Befunde von Sickersäften von Mistmieten und Mistplatten in Luxemburg (Probennahmen der Ville de Luxembourg, Service des Eaux im Februar 2005 im Quelleinzugsgebiet Kopstal, Gemeinden Steinsel und Kehlen). Aus TRESKATIS (2012).

Diese Belastungsintensität (Quellstärke) wird in der Regel durch Abwassersysteme oder mikrobiologisch hoch belastete Sickerwässer, z.B. aus Mistmieten erzeugt.

Ein Vergleich mikrobiologischen Befunde im Grundwasser in Luxemburg (Quellen im Sandstein) mit Messungen der mikrobiologischen Ausgangsbelastungen im Sickerwasser von Mistmieten belegt, dass die Mikroorganismen bei einer Partikelmenge von bis zu 1 Mio. *E.coli* einer Abbauraten von mindestens 21 Tagen bis zu 140 Tagen unterliegen müssen (Tab. 2).

4 Schwachstellen und Konsequenzen für den Brunnenbau

Während die Qualitätsbeeinträchtigungen durch das Brunnenbauwerk bzw. das unmittelbare bauliche Umfeld mit Hilfe von Sanierungs- und Neufassungstechniken minimierbar sind, kann langfristigen Beeinträchtigungen der Rohwasserqualität durch Mikroorganismen nur durch Erfassung, Beurteilung und Beobachtung der Flächennutzungen und Eintragspotenziale im maßgeblichen Brunneneinzugsgebiet oder Wasserschutzgebiet begegnet werden. Diese Maßnahmen sind Aufgaben des Ressourcenmanagements und der Überwachung des Wasserschutzgebietes durch die Behörden.

Bei brunnenbürtigen Einflüssen auf die mikrobiologische Beschaffenheit des Rohwassers muss der Brunnenbetreiber eine Ursachenforschung durchführen, die Ursachen und Eintragspfade ermitteln und nach Möglichkeit abstellen. Dazu sind oft kostenintensive Sanierungsmaßnahmen, wie z.B. das Nachdichten von Ringräumen (Bild 7) oder der Einbau von zusätzlichen Abdichtungen durch Überbohrtechniken erforderlich. Bei Einträgen, die nicht durch bauliche Maßnahmen abgestellt werden können, muss das Rohwasser aufbereitet werden.

Die Eintragspotenziale von Keimen können aber schon beim Bau des Brunnens geschaffen worden sein und können sich im Betrieb und bei der Instandhaltung (Regenerierung) je nach Umfeld des Brunnens verstärken.



Bild 7: Nachverpressung eines undichten Ringraums in einem Brunnen im Buntsandstein der Nordifel

Unsauberes Arbeiten auf der Baustelle (keine geschlossenen Container zum Anmischen und Absetzen der Spülung oder Regenerierlösungen, Eintrag von Laub oder anderem organischen Material auf der Baustelle in den Absetzteich oder in das Bohrloch etc.) fördert bereits beim Herstellen des Brunnens den Eintrag von



Nährstoffen und Mikroorganismen in den Förderhorizont. Die Verwendung von organischen Polymeren in Spülbohrungen oder beim Schachtabteufen im Horizontalfilterbrunnenbau führt oft zu Verkeimungen beim anfänglichen Brunnenbetrieb, da Kontaminationen bei der Verwendung biologisch aktiver Medien kaum auszuschließen sind. Dies gilt sowohl für organische Bohrspülungen und Regeneriermittel mit organischen Komponenten. Bei einer Nichteindickung der Polymerspülung durch bakteriologischen Befall (z.B. durch Laubeintrag in den Spülcontainer) kann diese z.B. einen Viskositätsverlust und somit auch einen Funktionsverlust erleiden (biologischer Abbau der Spülung findet schon beim Einsatz statt). Die Spülung geht bei einem Spülungsverlust mit samt ihrem mikrobiologischen Nährstoffpotenzial in den Grundwasserleiter über. Die Rückholbarkeit dieser Spülungsverluste ist in hoch permeablen Aquiferen praktisch unmöglich.

Ein möglichst exaktes Dosieren, sauberes Arbeiten mit geschlossenen Containern, der Zusatz von Bakteriziden und ein kompletter Spülungsaustausch und Spülen der Bohrung vor Erreichen des Grundwasserhorizontes sind z.B. als vorbereitende Maßnahme beim Brunnenneubau oder bei Sanierungsarbeiten zwingend erforderlich. Die Verwendung von mikrobiologisch aktiven Bohrradditiven, wie z.B. Polymeren ist daher in der Trinkwassererschließung möglichst zu vermeiden. Mikrobiologische Verunreinigungen lassen sich in solchen Fällen nur durch langes und zeit- und kostenintensives Abpumpen entfernen (HOUBEN & TRESKATIS 2012).

Neben den herstellungstechnischen Schwachstellen sind in Brunnen auch häufige, konstruktiv bedingte Schwachstellen für den Eintrag von mikrobiologisch belasteten Wässern verantwortlich (s. Bild 6). Dazu gehören z.B.

- bevorzugte, vertikale Wasserwegsamkeiten (Klüfte, Wurzelgänge, Grabbauten) in der ungesättigten Zone am Brunnenstandort
- ungenügende oder unsachgemäße Abdichtungen gegenüber Fremdwasserzutritten im Ringraum (auch bei fehlenden oder nicht funktionierenden Abdichtungen gegenüber der Erdoberfläche bei ungespannten Grundwasserleitern)
- Fehlende Abdichtungsringe in Vollrohrverbindern (Fremdwasserzutritte aus hangenden Stockwerken über Muffen oder Flanschverbindungen)
- Bohrspülungsreste in der Filterstrecke (Verkeimungspotenziale z.B. durch Nährstoffe aus hangenden Schichten oder durch biologisch nur unvollständig abgebaute Polymerspülungsreste)
- Fehlpositionierung der Filter- und Verkiesungsstrecken gegenüber den Wasserzutritten (vertikale Zutritte aus hangenden Stockwerken mit einem vom Förderhorizont unterschiedlichen Nährstoffpotenzial)
- keine wirksame Abdichtung des Schachtauffeldes (Eintritt von Oberflächenwasser über den gestörten

Boden im Bereich der ehemaligen Schachtgrube, Überflutungsgefahr)

- Grabbauten von Nagern und Hasen in den Böschung oberirdischer Abschlussbauwerken
- Brunnenschachtteile und -fugen undicht bzw. ohne Schutz vor Kleintieren
- undichte und hygienisch nicht einwandfreie Schachtdeckelkonstruktionen
- Fehlende Insektensiebe bei Be- und Entlüftungsrohren
- Brunnenkopf nicht dicht (fehlende oder unpassende PG-Verschraubungen bei den Kabeldurchführungen oder ungenügende Abdichtung gegenüber dem Brunnenkopfrohr)
- undichte Schachtwanddurchführungen für die Strom- und Wasserleitung (Eindringen von Oberflächenwasser oder Kleintieren)
- Brunnenabschlussbauwerk wurde erdgleich ohne Aufkantung ausgeführt oder Brunnen liegt in einer morphologischen Senke (Einschwemmung von Mikroorganismen und Nährstoffen über das Oberflächenwasser)

Fehlende, ungenügende oder unsachgemäße Abdichtungen sind in Brunnen die Hauptursache für viele erhöhte mikrobiologische Positivbefunde. Mikrobiologisch wirksame Abdichtungen müssen daher sowohl in der Bohrung und in der Verrohrung als auch im Bereich des Schachtbauwerkes eingebaut und regelmäßig hinsichtlich ihrer Funktion überprüft werden. Dazu ergeben sich hinsichtlich der Abdichtungen folgende mikrobiologisch relevanten Prüfpunkte für das Brunnendesign (TRESKATIS 2012):

- Ringraum zwischen Bohrlochwand und Brunnenrohr mindestens 15 cm mächtig (allseitig, zentrischer Einbau des Ausbaustranges vorausgesetzt)
- Einbau von Dichtungsringen in Rohrverbindungen (Brunnenrohre)
- Einbau von Dichtungen im Brunnenkopf gegenüber den Brunnenrohren (z. B. Rollgummidichtungen, Gliederkettendichtungen)
- Abdichtung aller Öffnungen im Brunnenkopf (Bild 8)
- Einbau von Ringraumsperren aus Tonpellets (mindestens 5 m Schüttungshöhe; Quellverhalten und Stabilität müssen durch das gewählte Produkt gewährleistet sein)
- Sperrrohre sind bis zur Felsoberkante oder in den ersten Stauer nach Durchteufen der Deckschichten abzusetzen und im Kontraktorverfahren zu zementieren (Mengen- und Dichtekontrolle erforderlich!)
- Nach Schüttung des Filterkieses mit einer ausreichenden Überschüttung der Filteroberkante ist dieser mittels Kolben zu verdichten, Nachsackungen sind auszugleichen (Nachfüllen); das Einbringen des Gegenfilters und der Abdichtungen oberhalb



der Kiesschüttungsstrecke darf erst nach Stabilisierung der Kiesschüttung erfolgen.

- Der Gegenfilter besteht aus Filtersand 1 bis 2 mm Körnung und ist mindestens 1 m mächtig und wird mindestens 2 m über der Filteroberkante eingebaut
- Über dem Gegenfilter wird bei klüftigem Gebirge eine Tonsperre von mindestens 1 m Mächtigkeit eingebaut (Stützung der hangenden Zementierung)
- Die Zementierung muss aus einem plastischen Ton-Zementgemisch bestehen (empfohlen wird das Verhältnis Ton zu Zement von 70:30), welches über ein Verpressgestänge eingebaut wird
- Bei tief zu verpressenden Brunnen ist ein Ringraumdurchmesser von mindestens 20 cm sinnvoll (Einbau des Verpressgestänges muss gewährleistet sein)
- Das Wasser/Feststoffverhältnis und die Dichte sind nach Herstellerangaben einzuhalten und zu überprüfen
- Für den Aufschluss der Ton-Zementsuspension ist ein Zwangsmischer erforderlich; die Wirksamkeit der Abdichtung ist nicht gegeben, wenn die Tonminerale nicht zum Quellen angeregt werden können
- Tonsperren aus quellfähigen Tonmaterialien (Pellets, Formlinge etc.) in der ungesättigten Zone sind nicht hydraulisch dicht; hier ist eine Abdichtung mittels Sperrrohren oder dichtenden Suspensionen erforderlich



Bild 8: Brunnenkopf mit ungenügend abgedichteten bzw. verschlossenen Öffnungen (Eindringpfade für Tiere)

Der Brunnenkopf muss druckwasserdicht in eine Bodenplatte aus Ortbeton eingegossen werden. Zwischen dem Brunnenkopf und dem Brunnenrohr ist eine dauerelastische Abdichtung einzubringen, um Setzungen auszugleichen und Totwasserräume zu vermeiden. Aus hygienischen Gründen sollten vor Ort anpassungsfähige Dichtungen verwendet werden, wie sie auch für die Schachtwanddurchführungen verwendet werden. Eine Abdichtung mit Quellton oder anderen Vergussmassen ist hier aus hygienischen Gründen nicht zu empfehlen.

Im Brunnenkopf sind mindestens zwei Öffnungen und zusätzlich eine Belüftung (mit Insektensieb) vorzusehen, von denen eine Öffnung als Peilöffnung für Wasserstandsmessungen (mindestens 1 Zoll Durchmesser) vorzusehen ist. Alle Öffnungen, auch die Kabeldurchführungen, sind aus hygienischen Gründen dauerhaft zu verschließen, so dass keine Tiere oder Tagwasser eindringen können. Der Schachtkorpus und die Schachtdeckel sind (druck-)wasserdicht auszuführen und müssen ca. 20 bis 30 cm über Gelände angeordnet werden.

Die Verfüllung der Baugrube um das Schachtgebäude ist grundsätzlich z.B. mit einem ausreichend mächtigen Lettenschlag oder einer Betontitmatte weitläufig über den Baugrubenrand hinaus abzudichten, wobei das Gefälle der Anböschung vom Brunnenschacht weg gestaltet werden muss. Zur Vermeidung von Grabbauten von Hasen, Mäusen oder anderen Nagern (s. Bild 6, Index 1) kann ein Gittergeflecht mit Graseinsaat das Bauwerk schützen (TRESKATIS 2012).

Beim Anschluss des Brunnens an die Transportrohrleitung sollte die brunnennahe Baugrube der Anschlussleitung mit einem Lettenschlag abgedeckt und die Leitung mit Lettenriegel gegenüber Sickerwasserzutritten geschützt werden.

5 Zusammenfassung und Maßnahmenbeispiel

Erhöhte mikrobiologische Befunde im Brunnenwasser sind in ansonsten geschützten und sandig-kiesigen Aquiferen meist auf einen Eintrag aus dem unmittelbaren Brunnenumfeld zurückzuführen. Im natürlichen Umfeld ist der Grundwasserraum frei von mikrobiologischen Belastungen. Meist fördert die Konstruktion von Brunnen den vertikalen Wassertransport in den Grundwasserleiter im Betrieb und bei Regenerierungen sowie Sanierungsarbeiten. Eine Abdichtung aller künstlich geschaffenen Wegsamkeiten ist somit Pflicht bei jeder Brunnenbaumaßnahme.

Im ungestörten Boden und Grundwasserraum ist selbst bei großen Mächtigkeiten der ungesättigten Zone eine Retardierung oder Eliminierung je nach Umweltbedingungen und Keimart nicht immer möglich. Die Verweilzeit der Mikroorganismen, deren Umwelтанforderungen und die Quellstärke sowie die Entfernung bis zum Brunnen steuern deren Elimination oder Retardation, bevor sie im Rohwasser wirksam werden können.



Bild 9: Abdichtung des Brunnenumfeldes (Beispiel einer Baumaßnahme in einem Grundwasserfeld mit hochpermeablen Schottern ohne mächtige Grundwasserüberdeckung) inkl. der Beobachtungsmessstellen. Aus TRESKATIS (2012).

Findet der Eintrag direkt am Brunnen, z.B. durch eine hoch permeable Schicht im Bereich des Abschlussbauwerkes oder eine präferenzielle Wasserwegsamkeit entlang der Brunnenbohrung statt, dann werden im Rohwasser oft sehr hohe Belastungen in Folge von rasch wirksamen Verlagerungsereignissen, wie z.B. bei Starkregen oder Überflutungen, messbar. Diese werden aber im normalen Rhythmus der gesetzlich geforderten Probenahmezyklen oft nicht ausreichend genau detektiert, so dass die Ursache der Positivbefunde oft im Dunklen bleibt.

Erst durch eine Verdichtung der Probenahmen und eine brunnenbautechnische Schwachstellenanalyse werden die Ursachen von diesen Befunden erkannt, so dass dann mittels Sanierungstechniken die Einträge abgestellt werden können.

In der Praxis konnte mit dieser Vorgehensweise bei einem Brunnen in einem oberflächennahen, hoch permeablen Schottergrundwasserleiter in Bayern die immer nach Starkregen oder Schmelzwasserereignissen auftretenden Keimbefunde abgestellt werden, indem die Geländeoberfläche um den Brunnenschacht großflächig gegen Versickerung von Regenwasser und Auswaschungen aus dem Boden geschützt wurde (Bilder 9 und 10).

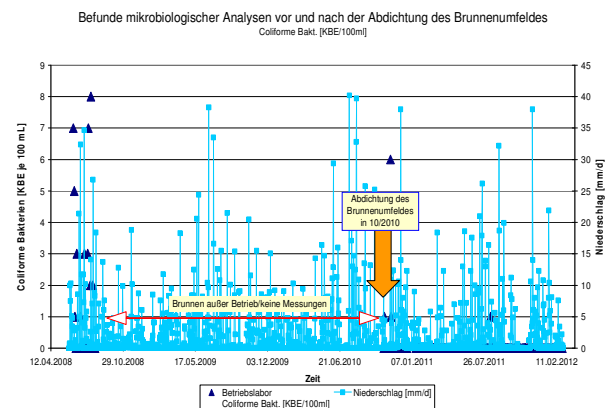


Bild 10: Entwicklung der mikrobiologischen Befunde nach der Abdichtung des Brunnenumfeldes in 10/2010. Aus TRESKATIS (2012).

Das unmittelbare Umfeld eines Brunnens ist nach diesen Praxiserfahrungen aus dem Lechtal ausreichend schützbar, sofern der Eintrag mikrobiologisch wirksamer Partikel schon beim Bau der Fassung vermieden wird und die entstehenden Wegsamkeiten zwischen der Erdoberfläche und dem Fassungsorgan wirksam abgedichtet werden. Dazu gehören nicht nur die Ringraumsperren sondern auch die Schachtbauten, deren Einbauten und der Bereich der Baugrube sowie eventuell angelegter Spülteiche aus der Bohrphase. Bei Sanierungsarbeiten an bestehenden Brunnen ist auf die Erhaltung bzw. Wiederherstellung der Abdichtungen zu achten.

Die natürliche Untergrundpassage im Zustrom zum Brunnen und deren Retardationswirkung auf Keime ist durch eine Risikoanalyse im Sinne des WHO Water Safety Planes und darauf abgestimmte Schutzmaßnahmen im Rahmen des Ressourcenmanagements zu betrachten (WHO 2004).

Literatur

DILLON, P. (1997): Groundwater Pollution by sanitation on tropical islands - IHP-V Project 6-1, UNESCO; Paris.

HOUBEN, G. & HAUSCHILD, S. (2011): Numerical modelling of the near-field hydraulics of water wells.- Ground Water 49 (4): 570-575.

HOUBEN, G. & TRESKATIS, C. (2012): Regenerierung und Sanierung von Brunnen.- 2. Auflage; München (Oldenbourg).

FOSTER, S.S.D., CHILTON, P.J., MOENCH, M., CARDY, F. & SCHIFFLER, M. (2000): Groundwater in Rural Development: facing the challenge of supply and resource sustainability.- World Bank Technical Paper Nr. 463; Washington, DC.



MCDOWELL-BOYER, L.M., HUNT, J.R. & SITAR, N. (1986): Particle transport through porous media.- Water Resources Research 22, Nr. 13: 1901 – 1921.

McKAY, L.D. (2011): Pathogens and Fecal Indicators in Groundwater.- GROUND WATER Vol. 49, Nr. 1: 1 -3

RUBBERT, T. & TRESKATIS, C. (2008): Anwendung numerischer Methoden bei der Brunnenbemessung und Bauwerksoptimierung. – GWF Wasser Abwasser 9/2008: 503-508.

SEILER, P. & LINDNER, W. (1995): Near surface and deep groundwater.- Journal of Hydrology, 165: 33 – 44.

TRESKATIS, C. (2012): Mikrobiologische Befunde im Brunnenwasser? Eine Analyse aus Sicht des Brunnenplaners.- in: ewp 7/8 2012: 28-35.

TRESKATIS, C., EXNER, M., KOCH, C. & GEBEL, J. (2011): Bewertung des Rückhaltevermögens von tertiären Sandschichten gegenüber mikrobiologischen Einträgen in Filterrohrsträngen eines Horizontalfilterbrunnens. – in: gwf Wasser Abwasser 11/2011: S. 1.058 – 1.068.

TRESKATIS, C. & TAUCHMANN, H. (2013): Quellfassungsanlagen zur Trinkwasserversorgung - Technische und naturwissenschaftliche Grundlagen für den Bau und Betrieb von Quellfassung für die Wasserversorgung – 673 S.; München.

WHO (2004): Guidelines for Drinking-Water Quality: Recommendations.- 3. Auflage, Vol. 1, WHO; Genf.

YATES, M.V. & YATES, S.R. (1988): Modelling microbial fate in subsurface environment.- CRC Critical Reviews in Environmental Control, 17(4): 307 – 344.

ZHANG ET AL. (2004): Sources, Types, Characteristics and Investigation of urban Groundwater Pollutants.- in: LERNER, D.N. (2004) Urban Groundwater: 54-107.