

REPORT

Contract: Number

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

ERWEITERTE KURZFASSUNG Projekt: WELLMA1

von
Project Team WELLMA
Verantwortlicher Autor: Hella Schwarzmüller

Department "Sustainable Use und Conservation of Groundwater Resources"
KompetenzZentrum Wasser Berlin, Cicerostraße 24, 10709 Berlin, Germany
Email: hella.schwarzmueller@kompetenz-wasser.de, Tel. ++49 (0)30-536-53814

für das
KompetenzZentrum Wasser Berlin gGmbH

Die Erstellung dieses Berichts wurde finanziell gefördert durch



Berlin, Germany

2011

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 It is expressly pointed out that the information and results given in this publication may be out of date due to subsequent modifications.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

Erweiterte Kurzfassung der Ergebnisse und abgeleiteten Empfehlungen aus der vorbereitenden Phase des Projektes WELLMA [WELLMA1: Nov. 07 - Dez. 08]

Autoren

Kompetenzzentrum Wasser Berlin (KWB)

Ingeborg Graeber, Researcher

Dagmar Orlikowski, Researcher

Dr. Hella Schwarzmüller, Researcher

Freie Universität Berlin (FUB), FB Geowissenschaften, Abt. Hydrogeologie

Prof. Asaf Pekdeger

Dr. Thomas Taute, Researcher

Ulrike Maiwald, Researcher

Christian Menz, PhD

Technische Universität Berlin (TUB), FB Technischer Umweltschutz, Abt.

Umweltmikrobiologie

Prof. Ulrich Szewzyk,

Oliver Thronicker, PhD, TUB

Kiwa Wasserforschung, Abt. Geohydrologie (KWR)

Dr. Klaasjan Raat, Researcher

Umwelttechnik Dr. Bartetzko GmbH (UWT)

Dr. Andreas Bartetzko, CEO

Qualitätssicherung

Dr. Gesche Grützmacher, Dept. leader KWB

Freigabe durch das Technische Komitee

Katia Besnard, Veolia Environnement

Marc Alary, Veolia Eau

Andreas Wicklein, Pigadi

Regina Gnirss, BWB, F+E

Elke Wittstock, BWB-WV

Heidi Dlubek, BWB-WV

Yann Moreau-Le Golvan, KWB

Gesche Grützmacher, KWB

Deliverable Nummer

D [WELLMA1 - 2nd TCM]

Danksagung

Das Projektteam dankt *BWB* und *Veolia* für die finanzielle Unterstützung des *WELLMA-Projektes*.

Wir danken allen involvierten Personen der technischen Abteilungen und der Abteilungen Forschung und Entwicklung sowie den Mitgliedern des Technischen Komitees für die wertvollen Diskussionen und bereitgestellten Informationen und ihr Engagement.

Vielen Dank!

Inhalt

| | | |
|-----------|---|----|
| Kapitel 1 | Einleitung | 1 |
| Kapitel 2 | Stand von Forschung und Technik | 2 |
| 2.1 | Brunnenalterung und Brunnenmanagement (WP1 - WP3)..... | 2 |
| 2.2 | Mikrobielle Kontamination (WP4)..... | 6 |
| Kapitel 3 | Erweiterte statistische Analyse von Brunnen­daten (D 1.2) | 8 |
| 3.1 | Methode..... | 8 |
| 3.2 | Schlussfolgerungen | 9 |
| 3.3 | Deskriptive Analyse der französischen Brunnen­daten | 10 |
| Kapitel 4 | Vergleich von Methoden und Verfahren (D 1.3)..... | 11 |
| 4.1 | Methoden..... | 11 |
| 4.2 | Schlussfolgerungen und Bewertung..... | 21 |
| Kapitel 5 | Erste Feldversuche in Berliner Brunnen zur Einschätzung des Einflusses des Schaltens (Option O ₂) und der H ₂ O ₂ -Behandlung (Option H ₂ O ₂) auf Alterungsprozesse | 25 |
| 5.1 | Methoden..... | 25 |
| 5.2 | Schlussfolgerungen und Bewertung..... | 29 |
| Kapitel 6 | Empfehlungen | 32 |
| 6.1 | Brunnenüberwachung..... | 32 |
| 6.2 | Brunnenbetrieb | 34 |
| 6.3 | Brunnenbau | 34 |
| 6.4 | F+E Transfer..... | 35 |

Kapitel 1

Einleitung

Die Optimierung des Brunnenmanagements umfasst alle Entscheidungen für den Betrieb, die Überwachung und die Instandhaltung der Brunnen, um die Leistung und die Wasserqualität so hoch wie möglich zu erhalten.

Da viele Mechanismen mitwirken und ihre Wechselwirkung komplex und von Brunnen zu Brunnen verschieden ist, wird ein gutes Verständnis der Hauptprozesse und Schlüsselparameter benötigt, um Wissen in die Entwicklung von Richtlinien und Empfehlungen umzusetzen.

Ziel des WELLMA-Projektes ist die Entwicklung solcher Richtlinien für die BWB und Veolia, um Brunnenalterungsprozesse zu verlangsamen und eine Verschlechterung der Wasserqualität zu verhindern.

WELLMA1 war die vorbereitende Phase mit dem Ziel, Methoden (einschließlich Überwachung, Diagnose, Regenerierung usw.) für weitere Untersuchungen zu empfehlen und geeignete Standorte für Feldversuche zu finden. Dazu dienten

- Literaturstudien zur Ermittlung des aktuellen Wissensstandes,
- erweiterte statistische Analysen von Brunnendaten, um Indikatoren der Brunnenalterung und Parameter zur Beschreibung von Prozessen zu finden sowie betroffene Brunnen einzugruppieren, und
- Feldversuche, um Methoden und Instrumente zur Diagnose und Überwachung der Brunnenalterung zu vergleichen.

Kapitel 2 Stand von Forschung und Technik

2.1 Brunnenalterung und Brunnenmanagement (WP1 - WP3)

Die Instandhaltung und Werterhaltung bestehender Brunnen gewinnt zunehmend an Bedeutung.

2.1.1 Faktoren und Prozesse

Da Brunnen in das natürliche System von Grundwasserleitern und Grundwasser eingreifen, sind Auswirkungen auf das System Wasser-Boden sehr wahrscheinlich, Sie führen zu so genannten physikalischen, chemischen oder mikrobiologischen Brunnenalterungsprozessen.

Die Geologie des genutzten Grundwasserleiters, die qualitative Beschaffenheit des Grundwassers, die Konstruktion des Brunnens (Maße und Materialien), die Bauweise (Bohrverfahren) und der Betrieb sind die dominanten Faktoren, die Art, Ausdehnung und Ort der Ablagerungen bestimmen (Fig. 1).

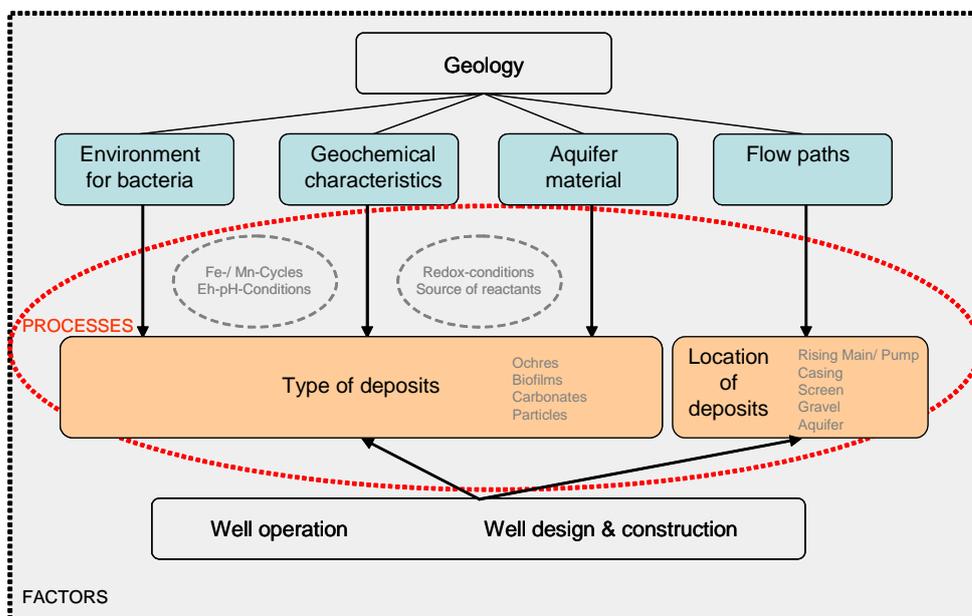


Fig. 1: Wechselwirkung der Faktoren und Prozesse, die zu verschiedenen Alterungsarten und deren Ausdehnung führen

Geologie

Brunnenalterungsprozesse sind geprägt durch die Art des Grundwasserleiters und seine hydrologischen Kennwerte, da diese Komponenten die anwesenden Materialien, den Porenraum und die Fließwege bestimmen. Folglich ist die Geologie der entscheidende Faktor, und die Verteilung der verschiedenen Brunnenalterungsarten folgt grundsätzlich der Verteilung der Grundwasserleiter (siehe Tab. 2-1 des vollständigen Berichtes über den aktuellen Wissensstand).

Sowohl der Boden als auch das Wasser enthalten verschiedene Mengen chemischer (Eisen, Kalzium usw.) und organischer Bestandteile sowie Partikel und Kolloide.

Ihre Zusammensetzungen und Konzentrationen bilden die Ausgangsstoffe für jede Niederschlagsreaktion (chemische Verockerung) und jeden Kolmationsprozess (physikalische Verockerung) sowie die Umweltbedingungen für Bakterien (biologische Verockerung).

Zusammen mit Einflüssen aus dem Brunnenbetrieb kann es so zu Verockerungsprozessen kommen. Diese können verlangsamt, aber nicht vollständig vermieden werden.

Brunnenkonstruktion und -bauweise

Auch bei einwandfreier Dimensionierung (Durchmesser, Filterlänge, Lage und Länge der Filterabschnitte, maximale Absenkung usw.) und Installation ergeben sich aus der Brunnenkonstruktion und der Bauweise noch weitere Faktoren, die sich auf Alterungsprozesse auswirken, z.B.:

- die Auswahl der Materialien und deren physikochemischen und biochemischen Oberflächenmerkmale (z.B. die Korrosionsempfindlichkeit von Stahlfiltern, die mögliche Abgabe von Nährstoffen durch PVC-Filter und Bohrflüssigkeiten)
- die Korngröße der Kiesfilterschüttung (z.B. zu kleine Korngrößen, die Partikel abfangen, oder zu große Korngrößen, die das Eindringen von Sand ermöglichen)
- unzureichende Brunnenentwicklung nach dem Bau (unvollständige Entfernung von Bohrflüssigkeiten, Filterkuchen und Feinstoffen)

Zusammen mit den Kenndaten des Grundwasserleiters bestimmen sie die Art und den Ort der Ablagerungen. Neben ihrem Einfluss auf Brunnenalterungsprozesse müssen die Dimensionierung und Bauart des Brunnens auch als mögliche Ursache von Einschränkungen der Anwendbarkeit von Regeneriermethoden bedacht werden. Beispielsweise weisen PVC-Brunnen eine geringere Festigkeit auf und können deshalb nicht mit Methoden behandelt werden, die hohe mechanische Kräfte implizieren z.B. Sprengungen oder Hochdruckspülungen.

Folglich bieten Brunnenkonstruktion und Brunnenbauweise Raum für Verbesserungen. Die Verfahren müssen von Zeit zu Zeit überprüft und im Hinblick auf andauernde Überwachungs-, Diagnose- und Instandhaltungserfordernisse sowie neue technologische Entwicklungen angepasst werden.

Brunnenbetrieb

Da der Brunnenbetrieb ständig die hydraulischen Bedingungen ändert, hat er starke Auswirkungen auf die geochemischen Kennwerte. Hauptfaktoren sind die erhöhte Fließgeschwindigkeit, das Auftreten von Mischprozessen und die Möglichkeit der Sauerstoffaufnahme, die zu einer Störung des thermodynamischen Gleichgewichts führen. Für biologische Verockerung und für Versinterung wird auch der Temperaturanstieg durch den Pumpenbetrieb als mögliche Ursache erwogen.

Parameter, die beeinflusst werden können, sind

- die Pumpenkapazität und
- die Betriebsweise (kontinuierlich oder diskontinuierlich).

Generell gilt, dass durch die Brunnenkonstruktion oder durch die Betriebsweise

- die Fließgeschwindigkeit zur Vermeidung turbulenter Strömungen möglichst niedrig gehalten werden sollte,
- der Betriebswasserspiegel zur Vermeidung des Zutritts von Sauerstoff immer über dem Filterabschnitt bleiben sollte und
- plötzliche Wasserspiegeländerungen, z.B. durch häufiges Schalten, vermieden werden sollten.

2.1.2 Überwachung und Instandhaltung von Brunnen

GROSSMANN (2000: Regeneration von Trinkwasserbrunnen, GWF 141) kam in einer Literaturstudie zu dem Schluss, dass trotz einer Vielzahl von verschiedenen Einzelbetrachtungen von Regenerierverfahren oder Brunnenstandorten die Fragen zu den auslösenden Prozessen und den Randbedingungen für den Ablauf der verschiedenen Alterungsprozesse noch nicht ausreichend untersucht wurden. Drei Hauptbereiche wurden als „offene Fragen“ ermittelt und sind dies tatsächlich seitdem geblieben:

- (1) Die Dokumentation, die Verarbeitung und die Nutzung von Betriebsdaten sind in den meisten Fällen unzureichend. Allein aus der Analyse der verfügbaren Daten könnten mehr Ergebnisse erzielt werden.
- (2) Typ und Zusammensetzung der Ablagerungen müssen untersucht werden, um Regenerierungsstrategien auszuwählen und anschließend zu bewerten.
- (3) Eine standardisierte Bezugsbasis (z.B. Qs-Ermittlung vor und nach der Regenerierung, ausgeführt unter konstanten Bedingungen im Hinblick auf Entnahmemengen und Entnahmedauer) wird benötigt, um den Erfolg einer Instandsetzungs- oder Regenerierungsmaßnahme bewerten und verschiedene Methoden und Technologien vergleichen zu können.

Folglich sind richtig durchgeführte Überwachung und Dokumentation unverzichtbare Bestandteile eines Brunnenmanagements, das Brunnenkonstruktion, Alterungsprozesse, Betrieb und Instandhaltung miteinander verbindet (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

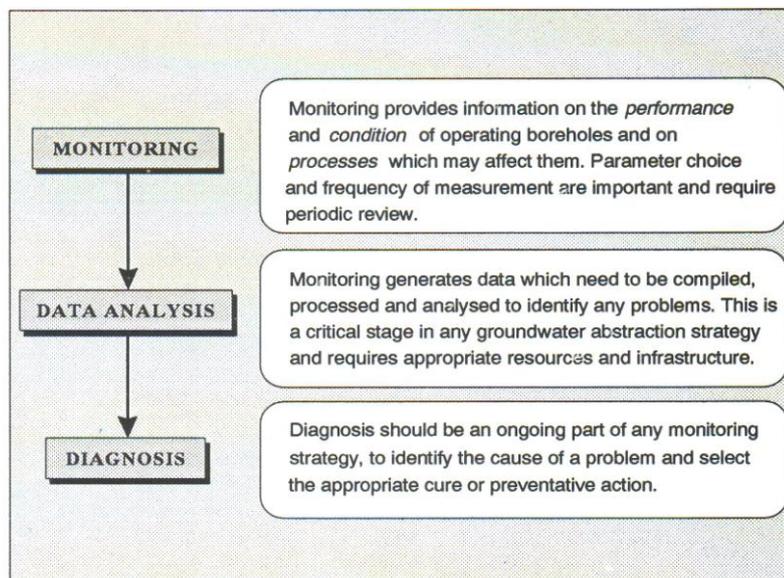


Fig. 2: Zweck und Prinzip der Brunnenüberwachung zur Diagnose der Brunnenalterung [aus HOWSAM, MISSTEAR et al. 1995:85]

Die Brunnenüberwachung kann unterteilt werden in

- (1) kontinuierliche Datenaufzeichnung von Betriebsparametern zur Bestimmung der Brunnenleistung (Wasserstände, Energieaufnahme und Betriebsstunden der Pumpe usw.) und
- (2) ergänzende Untersuchungen in regelmäßigen Abständen oder immer dann, wenn die kontinuierliche Überwachung eine Leistungsabnahme zeigt, um zusätzliche Informationen über Ursachen und Ort zu erhalten (Brunnenzustand und Diagnose der Alterungsart und ihrer Ausdehnung).

Die Erfordernisse in Bezug auf Parameter und Zeitpläne müssen spezifisch für den Standort und die Merkmale des Brunnens entwickelt werden und immer eine Kombination von Methoden berücksichtigen. Eine allgemeine Strategie wird von HOWSAM (1995: Monitoring, maintenance und rehabilitation of water supply boreholes) zusammengefasst. Empfehlungen für die untersuchten Brunnen von BWB und Veolia werden in Kapitel 6.1 dieser erweiterten Kurzfassung gegeben.

Um Alterungsprozesse zu verlangsamen (vorbeugende Maßnahmen) oder die Leistung nach einer Verschlechterung wiederherzustellen (Regenerierung), werden Instandhaltungsmethoden angewendet. Die Methoden für vorbeugende Behandlung und Regenerierung sind mehr oder weniger gleich. Der Unterschied liegt im Zeitpunkt und der Intensität der Anwendung.

Für die richtige Auswahl der Methoden muss berücksichtigt werden:

- (1) die Ursachen
- (2) der Ort und das Ausmaß der Ablagerungen
- (3) Restriktionen und Einschränkungen, die sich aus der Brunnenkonstruktion oder dem Bauzustand des Brunnens ergeben.

Eine Vielzahl von Technologien steht zur Verfügung und wird in Fachbüchern (z.B. HOWSAM, 1995; HOUBEN & TRESKATIS 2007), oder dem Internet (z.B. www.groundwaterscience.com/free-article-library) beschrieben.

Allgemein hat die vorbeugende Behandlung das Ziel, mikrobiologische und chemische Prozesse zu verlangsamen. Folglich müssen die Technologien in der Lage sein, dem Bakterienwachstum und der Verhärtung von Verkrustungen vorzubeugen. Am weitesten verbreitet sind Desinfektionsmethoden, die starke Oxidationsmittel wie H_2O_2 einsetzen (u. a. in Berlin und anderen Veolia-Standorten). Regenerierungen sind auf die Entfernung der Ablagerungen aus dem gesamten Brunnen gerichtet. Deshalb müssen sie in der Lage sein, alle Teile der Kiesschüttung zu erreichen und die Ablagerungen abzutrennen (mechanische Maßnahmen) oder zu lösen (chemische Maßnahmen).

Grundlage für eine erfolgreiche und nachhaltige Regenerierung ist:

- (1) die Berücksichtigung praktischer Erfahrungen: Dokumentation der vergangenen Instandhaltungsmaßnahmen
- (2) eine möglichst rechtzeitige Durchführung: Festlegung eines Referenzwertes (ein regelmäßig überwachter Betriebsparameter), z.B. 20% Leistungsverlust (Abnahme der spezifischen Kapazität Q_s , verglichen mit dem Anfangswert gleich nach dem Bau des Brunnens)
- (3) die Entfernung aller abgelösten Feststoffe, die sonst als Ausgangsmaterial für eine rasche Wiederverockerung dienen können: umfassendes Abpumpen und Brunnensanierung

2.2 Mikrobielle Kontamination (WP4)

Aus einer Literaturrecherche über eine Gefährdung von Trinkwasserbrunnen durch gesundheitsrelevante mikrobielle Verunreinigung sollten veröffentlichte Fälle mit der Situation in Berlin verglichen werden, um mögliche Ursachen mikrobieller Kontamination zu analysieren.

Schwerpunkt lag auf:

- der Identifizierung relevanter Bakterien
- der Bewertung von Quellen
- der Einschätzung von Wegen in einen Brunnen
- der Ermittlung von Parametern aus der Brunnenkonstruktion oder dem Brunnenbetrieb, die das Kontaminationsrisiko erhöhen
- der Zusammenfassung von Verfahren und Analysemethoden, die für das Ermitteln von Kontaminationsquellen und –wegen benutzt werden können

Weltweit findet man Veröffentlichungen, die sich mit Mikroorganismen im Grundwasser befassen. Es ist also keineswegs eine feindliche Umwelt, ganz im Gegenteil: manche Bakterien haben sich an die speziellen Bedingungen des Lebens im Untergrund angepasst.

Die folgenden Feststellungen fassen die Ergebnisse der Literaturstudie zusammen:

- Das Vorkommen von Mikroben und die Zusammensetzung von Bakteriengemeinschaften im Grundwasser hängen von den heterogenen Eigenschaften des Bodens und des Grundwasserleiters ab.
- Hauptfaktoren für die Häufigkeit und die Aktivität von Bakterien im Grundwasser sind die Nährstoffzufuhr und die Verfügbarkeit von gelöstem Sauerstoff und Energiequellen. Umweltfaktoren wie die Temperatur, der pH-Wert, der hydrostatische Druck und gelöste Salze beeinflussen die Persistenz der Bakterien.
- Diejenigen Prozesse und Faktoren, die sich auf die Qualität des Grundwassers auswirken, sollten auch für das Brunnenwasser relevant sein. Brunnen bilden außerdem ein spezifisches Habitat für Mikroorganismen mit verschiedenen Anhaftungsflächen, verstärkter Wasserströmung und Nährstoffzufuhr.
- Unter den oft im Grundwasser und in Brunnen vorliegenden oligotrophen Bedingungen haften die Mikroorganismen i. d. R. an Oberflächen.
- Es ist nicht möglich, eine fäkale Kontamination durch die Bestimmung der Vielzahl unterschiedlicher Pathogene mit vielfältigen Merkmalen zurückzuverfolgen. Stattdessen werden Bakterien (z.B. *E. coli*) verfolgt, die allgemein als meistens in Fäkalien vorkommend angesehen werden und so fäkale Kontamination anzeigen (Indikatorbakterien).

Man ist sich einig, dass das Vorkommen fäkaler Indikatorbakterien nicht immer mit der Anwesenheit oder Abwesenheit pathogener Bakterien zusammenfällt. Dies gilt auch für pathogene Viren und Protozoen.

Normalerweise gilt die Häufigkeit von Indikatoren als Maß der Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Pathogenen. Debattiert wird noch über die Nutzung von Bakteriophagen als Indikatoren für die Anwesenheit von pathogenen Viren. Die Korrelation von Indikator und Pathogen sollte wegen ihrer unterschiedlichen Transport- und Überlebenseigenschaften für die jeweilige spezifische Umwelt bestimmt werden.

- Das Eindringen von Mikroorganismen in den Untergrund erfolgt mit dem Sickerwasser, das typischerweise aus Niederschlägen oder aus Oberflächengewässern stammt. Die Literaturstudie hat gezeigt, dass Lecks in Abwasseranlagen, Abfälle der Tierhaltung und fäkale Kontamination von Oberflächenböden und -gewässern (durch Menschen, Nutztiere und Wildtiere) die Hauptquellen mikrobieller Verschmutzung des Grundwassers sind. Brunnen sind zusätzlich gefährdet. Sie können bei Arbeiten am offenen Brunnen (Wasserstandsmessungen, Instandhaltungsarbeiten) kontaminiert werden.
- In Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Untergrunds, z.B. von Porengrößen, dem Vorhandensein von Kanälen und den hydrophoben Eigenschaften, kann die Wanderungsgeschwindigkeit sehr verschieden sein. Die vertikale Bewegung lässt nach, wenn das Wasser unter den Grundwasserspiegel gelangt ist. Die weitere Ausbreitung wird dann durch die Richtung und die Geschwindigkeit des Grundwasserleiters bestimmt. Die maximale Ausdehnung der mikrobiellen Wanderung hängt von verschiedenen Prozessen ab, z.B. von der Filtration, der Dispersion, der Haftung an Oberflächen und dem Absterben.
- Zur Beurteilung der Ausbreitungspfade und -geschwindigkeit ist ein detailliertes Wissen über die strukturelle Beschaffenheit des Grundwasserleiters und die Überlebenszeiten der beteiligten Mikroorganismen nötig.
- Für die Bestimmung der Arten, der Häufigkeit und der Stoffwechselaktivitäten von Bakteriengemeinschaften sind verschiedene mikrobiologische und molekulare Methoden entwickelt worden. Sie werden für das Zurückverfolgen fäkaler Verschmutzung mithilfe von Indikatormikroorganismen und für die Ermittlung der Verschmutzungsquellen genutzt.
- Die Empfindlichkeit von Brunnen gegenüber Kontaminationen ist hauptsächlich eine Funktion der hydrogeologischen und geochemischen Eigenschaften des jeweiligen Brunnenstandorts, d.h. der ungesättigten Zone und des Aquifers, sowie der Entfernung zu potentiellen Verschmutzungsquellen und des einwandfreien Zustands des Brunnenbauwerks, welcher durch das richtige Brunnenmanagement während des Betriebes und von Instandhaltungsmaßnahmen sichergestellt werden muss.

Kapitel 3 Erweiterte statistische Analyse von Brunnendaten (D 1.2)

3.1 Methode

Ein Teil des Arbeitspaketes „*Diagnosemethoden*“ war die statistische Analyse vorhandener Datensätze von Brunnenstandorten in Berlin und Frankreich. Entsprechend des Projektantrages wurde die Datenanalyse in drei Schritte unterteilt:

- (1) Identifikation eines zuverlässigen Verockerungsindikators,
- (2) Kopplung von auf Verockerungsprozesse bezogenen Parametern, um Trends aufzufinden, und
- (3) Schlussfolgerungen für das Gruppieren von Brunnen zwecks weiterer Untersuchungen.

Da die Mehrheit der zugrunde liegenden Daten von Berliner Brunnen stammt, die zu 80% als von biologischer Verockerung betroffen gelten, beziehen sich die folgenden Ausführungen auf eiseninduzierte Verockerungsprozesse.

Die französischen Standorte wurden ohne eine ausführliche statistische Auswertung in die deskriptive Datenanalyse integriert, da die Stichprobenzahl zu klein und zu inhomogen war. Es wurde jedoch eine standortspezifische Betrachtung durchgeführt, die sich im Anhang des vollständigen Berichts findet.

Um einen zuverlässigen Verockerungsindikator zur weiteren statistischen Analyse ausfindig zu machen, wurden i) Kamerabefahrungen, ii) Veränderungen in der spezifischen Ergiebigkeit Q_s und iii) die Anzahl der H_2O_2 -Behandlungen in Bezug zu den konstruktiven, hydrochemischen und Betriebsparametern der Berliner Brunnen gesetzt. Ein reduzierter Datensatz von Brunnen mit guter Differenzierung im Hinblick auf die Kriterien *Verockerung* oder *keine Verockerung* wurde genutzt, um erste Trends zu erhalten. Die nach Verockerungsgraden klassifizierten Ergebnisse der Kamerabefahrungen zeigten die signifikanteste Unterscheidung zwischen *stark verockerten* und nicht *verockerten* Brunnen, wobei die folgenden Annahmen über eiseninduzierte Verockerungsprozesse bestätigt werden konnten: Der Verockerungsstatus zeigt signifikante Trends in Abhängigkeit von der Entfernung zum nächstgelegenen Oberflächengewässer, den Eisen-, Mangan- und Nitratkonzentrationen, den monatlichen Betriebsstunden und der durchschnittlichen Fördermenge. Eine wesentliche Einschränkung besteht jedoch darin, dass Kamerabefahrungen nur die Verockerung im Brunneninneren anzeigen, nicht aber die in der Kiesschüttung.

Danach wurde der Prozentsatz des mittleren jährlichen Rückgangs der spezifischen Ergiebigkeit (Q_s) berechnet, um Unterschiede im Brunnenzustand zu vergleichen. Der Parameter Q_s hat einerseits den Vorteil, dass er eine metrische Quantifizierung der Brunnenleistung liefert. Andererseits besteht aber die Einschränkung, dass Q_s nur in gespannten Grundwasserleitern oder bei einer Durchführung aller Pumpversuche an einem Brunnen mit einer konstanten Fördermenge ein vergleichbarer Wert ist, da nur in diesen Fällen eine lineare Beziehung zwischen der Fördermenge (Q) und der Grundwasserabsenkung (s) gilt. Pumptests mit unterschiedlichen Fördermengen, wie sie bei den BWB und Veolia übliche Praxis sind, sind daher nicht voll vergleichbar. Dies könnte einer der Gründe dafür sein, dass die Beziehungen zwischen Verockerungsprozessen und Q_s -Veränderungen weniger deutliche Ergebnisse bringen als die Ergebnisse der Kamerabefahrungen, obgleich der Indikator Q_s theoretisch sehr gut geeignet wäre, die Auswirkungen verschiedener Verockerungsprozesse zu zeigen.

Schließlich wurde die Anzahl vorbeugender H₂O₂-Behandlungen auf ihre Eignung als Verockerungsindikator für die Berliner Brunnen geprüft (wie von BWB vorgeschlagen). Dabei zeigte sich jedoch, dass die Unterscheidung zwischen Ursache und Wirkung nicht eindeutig ist und die Ergebnisse für diesen Indikator nicht der Theorie der Verockerungsprozesse entsprechen. Deshalb scheint die Durchführung von H₂O₂-Behandlungen kein geeigneter Verockerungsindikator für die statistische Datenanalyse zu sein.

3.2 Schlussfolgerungen

Nachdem die in Klassen unterteilten Ergebnisse der Kamerabefahrungen sich als zuverlässigster Verockerungsindikator bei der statistischen Analyse erwiesen hatten, wurden die vier festgelegten Klassen, die von keiner Verockerung (0) bis zu intensiver Verockerung (3) reichen, mit den verfügbaren Parametern des Brunnenausbaus, der Hydrochemie und des Brunnenbetriebs gekoppelt. Auf diese Weise wurden allgemeine Trends der mit Verockerungsprozessen verbundenen Parameter angezeigt. Daraus konnten drei Hauptaussagen abgeleitet werden:

- (1) Die meisten Brunnen zeigen zunehmende Verockerung mit zunehmendem Brunnenalter und abnehmender Tiefe des ersten Filters.
- (2) Verockerte Brunnen zeigen im Vergleich zu nicht verockerten Brunnen niedrigere Eisen- und höhere Mangan- und Nitratkonzentrationen.
- (3) Brunnen mit einer höheren mittleren Fördermenge und mehr Betriebsstunden neigen in höherem Maße zur Verockerung.

Eine abschließend vorgenommene Quantifizierung zwischen dem Verockerungszustand und den dazu in Beziehung gesetzten Parametern durch eine multiple lineare Regression führte jedoch nur zu schwachen Abhängigkeiten. Nur 20% der Streuung der abhängigen Variable *Verockerung* konnten durch die unabhängigen Variablen erklärt werden, während 80% der Streuung unerklärt bleiben. Es gibt also noch einen zu geringen Kenntnisstand.

Mögliche Erklärungen sind (1) das Fehlen relevanter Parameter oder (2) eine zu hohe Variabilität bei den Messungen der bekannten Parameter. Beispielsweise ändern sich die hydrochemischen Daten nicht nur mit der Zeit, sondern auch in Abhängigkeit von der Hydraulik des Brunnens sowie mit der Tiefe. Deshalb kann ein einzelner, im gemischten Rohwasser gemessener Wert nicht die durch den Brunnenbetrieb bedingten tiefenabhängigen Veränderungen der Hydrochemie wiedergeben.

Zusätzlich können die Messungen der Betriebsstunden und der Fördermengen hohe Fehler aufweisen, abhängig davon, ob sie mittels direkter oder indirekter Methoden gemessen wurden. Bei den BWB werden beispielsweise die Betriebsstunden in einigen Wasserwerken aus dem Energieverbrauch der Pumpe berechnet. In anderen Wasserwerken wird aber die exakte Betriebszeit gemessen. Gleiches gilt für die Fördermengen. Einige Wasserwerke haben Durchflussmessgeräte, die wiederum selbst zur Verockerung neigen. Andere verwenden induktive Messungen oder messen nur den Energieverbrauch. Deshalb weisen die meisten Daten eine eingeschränkte Vergleichbarkeit im Sinne der Statistik auf, da sie unterschiedlichen Messfehlern unterliegen.

Vor kurzem haben Rubbert & Treskatis (2008: Brunnenalterung: Systematisierung eines Individualproblems, bbr07-08/08) vergleichbare Untersuchungen durchgeführt und kamen zu dem Schluss, dass Trends angezeigt, nicht aber auf den Einzelfall übertragen werden können, da viele Einflussfaktoren, darunter natürliche, betriebliche und ökonomische Ursachen zu einer starken Datenvariabilität führen.

Deshalb besteht grundsätzlich der Bedarf

- (1) standardisierter Messungen zur Verringerung der Variabilität in den Daten und
- (2) der Entwicklung einer einheitlichen Bewertungsmatrix mit einer individuellen Gewichtung der eingehenden Faktoren und der Bewertung der gemessenen Zeitreihen.

Die Umsetzung in die tägliche Betriebspraxis wird, basierend auf den Empfehlungen in Kapitel 7, mit den Mitarbeitern der technischen Abteilungen von BWB und Veolia diskutiert werden.

3.3

Deskriptive Analyse der französischen Brunnendaten

Um die französischen Daten in die statistischen Untersuchungen mit einbeziehen zu können, müssen sie jedoch zunächst vervollständigt und verifiziert werden. Empfohlen wird der Aufbau einer Datenbank für alle von Veolia betriebenen Brunnen, z. B. in Anlehnung an die WELLMA-Datenbank.

Vergleicht man die französischen Daten mit den Trends der statistischen Analyse der Berliner Brunnendatenbank, so bestätigt sich die Aussage, dass Brunnenalterungsprozesse einen Zusammenhang zu den Parametern Eisen- und Mangankonzentration, Sauerstoffgehalt des Rohwassers, mittlere Entnahmemenge und Betriebsstunden zeigen.

Für alle ausgewerteten französischen Brunnenstandorte wurden in den vorliegenden Diagnoseberichten Eisenhydroxide, Versinterung und biologisch induzierte Verockerung als beobachtete Alterungsprozesse genannt. Es kann bereits jetzt gesagt werden, dass die grundsätzlichen Empfehlungen für die französischen Brunnen für eine Verbesserung der Brunnenüberwachung und Diagnose von Alterungsprozessen dieselben wie für die Brunnen der BWB sind.

Kamerabefahrungen dienen als ein Indikator für das Auftreten von Brunnenalterungsprozessen, sind jedoch auf die Bewertung des Brunnenninneren beschränkt. Daher muss immer auch die Brunnenleistung anhand regelmäßiger Kurzpumpversuche überwacht werden. Besonders wenn ein Verdacht auf Kolmationsprozesse besteht, sollten die Brunnen zusätzlich mit einer Flowmeter-Messung untersucht werden.

Als Mindestumfang für chemische Untersuchungen werden daher die Parameter pH- und Eh-Wert, Ca, HCO₃, O₂ (zusammen mit NO₃) und Fe empfohlen. Mindestens einmal sollte die Beprobung tiefenorientiert durchgeführt werden. Zusammen mit Flowmeter-Messungen können so Mischungsprozesse erfasst werden.

Das Probenahme- und Messintervall hängt dabei von der Schnelligkeit, Typ und Ausdehnung auftretender Alterungserscheinungen ab und muss für jeden Standort angepasst werden. Auf Grundlage dieser angepassten Brunnenüberwachung können dann Instandhaltungsmaßnahmen geplant werden.

In der anschließenden Projektphase WELLMA2 sollen französische Brunnen in die Untersuchungen der Alterungsarten und -prozesse einbezogen werden. Tabelle B-2 im Anhang des vollständigen Berichts gibt eine Übersicht über den Geologischen Kontext und mögliche alterungsrelevante Faktoren für die Planung der Untersuchungen für WELLMA2. Die Festlegung der Versuchsstandorte wird in Absprache mit den Beteiligten der technischen Abteilungen bei Veolia und Pigadi erfolgen.

Kapitel 4

Vergleich von Methoden und Verfahren (D 1.3)

4.1 Methoden

Eines der Ziele der vorbereitenden Phase WELLMA-1 bestand darin, für die Brunnenüberwachung und Diagnose der Verockerungsprozesse verfügbare Methoden im Hinblick auf ihren Informationswert und ihre Anwendbarkeit zu bewerten. Dafür wurde eine Vielzahl von Methoden an drei ausgewählten Brunnen getestet. Sie können unterteilt werden in:

- A) Überwachung der Brunnenleistung (Standardüberwachung)
 - (1) Stufenpumpversuch
- B) Überwachung des Brunnenzustands (Standardüberwachung)
 - (1) Kamerabefahrung
 - (2) Gamma-Gamma Dichtescan (GG.D) und Neutron-Neutron-Logging (NN)
 - (3) Durchflussmessung (Strömung)
 - (4) Packer-Durchflussmessung (Packer-Strömung)
- C) Diagnose von Alterungsarten und der Ausdehnung
 - (1) Wasserprobenentnahme und hydrochemische Analysen
 - (2) Mikrobiologische Probenentnahme und anschließende molekularbiologische Untersuchungen
 - (3) BART (Reaktionstest auf biologische Aktivität)
 - (4) Partikelzählung

Da alle diese Methoden nur eine indirekte Beurteilung des Zustandes der Kiesschüttung erlauben, war ursprünglich geplant, aus den ausgewählten Brunnen horizontale Kerne zu entnehmen und so direkten Zugang zu den Ablagerungen in der Kiesschüttung zu erhalten, um die Signifikanz der ausgewählten Methoden bewerten zu können. Das Kernentnahmegerät konnte jedoch während WELLMA1 nicht funktionsfähig fertig gestellt werden.

Während die Überwachung der Brunnenleistung und die des Brunnenzustands als Standardmethoden angesehen werden können, die in Fachbüchern und technischen Merkblättern ausführlich beschrieben sind (*Literaturhinweise hierzu enthält der vollständige Bericht über den Stand der Forschung*), musste die Methodik der geochemischen und mikrobiologischen Untersuchungen z. T. erst entwickelt werden.

Ausgehend von der Annahme, dass bei den Berliner Brunnen die Verockerung vor allem durch Eisenhydroxide verursacht wird, die durch Eisenbakterien erzeugt werden, liegt der Schwerpunkt auf der Einschätzung der Redox-Bedingungen, der Umweltbedingungen und der Zusammensetzung von Bakteriengemeinschaften in Biofilmen. Zusätzlich zu den drei o. g. Brunnen wurden 17 weitere Brunnen in die von den Universitäten durchgeführten hydrochemischen und mikrobiologischen Untersuchungen einbezogen, um die Signifikanz der Bewertung zu erhöhen.

Tab. 1 fasst den Umfang der Untersuchungen zusammen:

Tab. 1: Ausgewählte Brunnenstandorte und Untersuchungsmethoden

| METHODE | 3 stillgelegte Brunnen | 1 Brunnen mit Transekte | 17 weitere Brunnen in Betrieb |
|---|------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Hydrochemische Analysen | x | x | x |
| Objektträger | x | x | x |
| BART | x | x | |
| Partikelzählung | x | | |
| Standardüberwachung der Brunnenleistung und des -zustands | x | x | |
| H ₂ O ₂ -Behandlung | | x | |

4.1.1 Ergebnisse der hydrochemischen Analysen [FUB]

Methodik

Diese Untersuchungen umfassten die Bestimmung der physikochemischen Parameter (pH, Redoxpotential, O₂-Gehalt, Leitfähigkeit und Temperatur) und der Konzentrationen der Hauptkationen und -anionen in Wasserproben aller 21 untersuchten Brunnen der BWB.

Um Informationen über die ersten Minuten direkt nach dem Einschalten der Betriebspumpe zu erhalten, wurden die Mess- und Probenahmeintervalle auf eine Minute während der ersten zehn Minuten nach dem Einschalten der Pumpe festgelegt, worauf dann größere Intervalle folgten. Die Gesamtdauer der Beprobung der einzelnen Brunnen war abhängig von der Stabilität der Feldparameter. Die Werte mussten für eine Stunde stabil sein.

Die hydrochemischen Feldparameter wurden quasi-kontinuierlich in einer Durchflusskammer gemessen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Kritische Parameter wie HS⁻, NH₄⁺, NO₂⁻, Farbe, Trübung und HCO₃³⁻ wurden vor Ort bestimmt. Proben für Anionen- und Kationenanalysen wurden mit Zelluloseazetatfiltern mit 0,45 µm Porengröße gefiltert. Kationenproben wurden mit konzentrierter HNO₃ angesäuert, um die Ausfällung von Oxiden und Hydroxiden zu vermeiden.

Neben der gefilterten Kationenprobe wurde eine ungefilterte angesäuerte Probe für die Untersuchung auf Eisen- und Manganpartikel im Wasser entnommen.

Die Absenkung im Brunnen wurde jeweils zu den Probenahmezeiten mit einem Lichtlot gemessen.



Fig. 3: Messungen und Probenahme während des Kurzzeitmonitorings der mikrobiologischen und hydrochemischen Parameter [FUB 2008]

Um den Analysenumfang in einem vertretbaren Rahmen zu halten, wurden folgende repräsentative Probenahmezeiten ausgewählt, die die Entwicklung der Feldparameter berücksichtigen:

- Die erste Probe wurde direkt nach dem Einschalten der Pumpe gezogen, um den Zustand im abgeschalteten Brunnen zu ermitteln.
- Die zweite Probe nach 1 Minute repräsentiert die Anlaufphase.
- Die Probe nach neun Minuten wurde gezogen, nachdem die ersten schnell ablaufenden Veränderungen vorbei waren.
- Die letzte Probe repräsentiert den konstanten Zustand mit stabilen Feldparametern.

Die Anionen- und Kationenanalysen wurden im Laboratorium der FU Berlin durchgeführt.

Ergebnisse

Aus den hydrochemischen Analysen konnte abgeleitet werden, dass sich das entnommene Brunnenwasser bei Betrieb des Brunnens nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. So konnten Sauerstoff (bis 10 mg/l) und Nitrat (bis 14 mg/l) unter Redox-Bedingungen nachgewiesen werden, unter denen sie in einem Gleichgewichtszustand nicht vorhanden sein sollten (siehe Fig. 4). Auch Eisen und Mangan sind sowohl in Zonen vorhanden, in denen sie im Gleichgewicht oxidiert (und somit nicht gelöst) sein sollten, als auch in einigen Fällen abgereichert in Zonen mit niedrigen Redoxpotentialen (siehe Fig. 5).

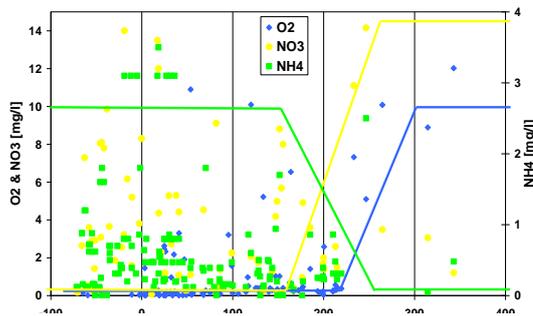


Fig. 4: Darstellung der gemessenen Konzentrationen für O₂, NO₃ und NH₄ gegen das Redoxpotential.

Die Linien repräsentieren das stabile thermodynamische Gleichgewicht [FUB 2009]

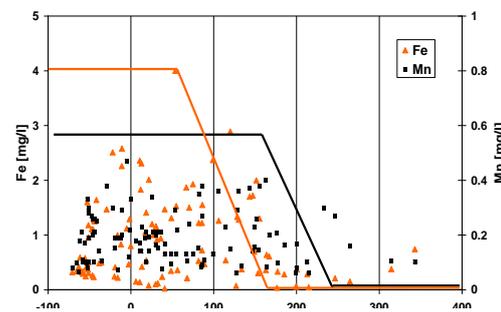


Fig. 5: Darstellung der gemessenen Konzentrationen für Fe und Mn gegen das Redoxpotential.

Die Linien repräsentieren das stabile thermodynamische Gleichgewicht [FUB 2009]

Verursacht werden diese Bedingungen wahrscheinlich durch das Mischen von anaerobem eisenhaltigen Grundwasser und sauerstoffhaltigem oberflächennahem Wasser. Damit sind gleichzeitig die Bedingungen für eine chemische Verockerung gegeben.

Da das geförderte Rohwasser der Brunnen jedoch das Mischwasser repräsentiert, können die Redoxzonen und Gleichgewichtszustände im Brunnen nur bewertet werden, wenn die Probenahme tiefenorientiert erfolgt.

Das würde gleichzeitig die Bestimmung der bevorzugten Tiefenbereiche für das Ausfällen chemischer Verockerungen und damit die Bestimmung der Ausdehnung der Ablagerungen erlauben.

4.1.2 Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen [TUB]

Die mikrobiologischen Untersuchungen umfassten die Probenahme von Wasser und Ablagerungen sowie das Wachstum von Biofilmen. Die Methodenentwicklung war Teil des Teilprojekts *WELLMADNA*, erfolgte aber auch im Rahmen der Aufgabe 1.3 von *WELLMMA1*.

Probenahme

Um ungestörte Biofilmproben aus dem Brunneninneren zu erhalten, musste eine Probenahmeverrichtung entwickelt werden.

Um den Betrieb der Brunnen so wenig wie möglich zu stören, sollten die Innen- und Außenpegel als Zugang genutzt werden. An einem Stahlseil wurden mehrere perforierte Behälter (15 ml Falcon Tubes) mit Simplex-Klammern befestigt. Diese aus autoklavierbarem Polypropylen gefertigten Behälter wurden mit Glasperlen oder mit Objektträgern ausgestattet, die der Größe der Standrohre angepasst wurden (Abb.1).

Ergebnisse

- Die Probenahmeverrichtung ermöglichte die Entnahme von ungestörten Biofilmproben, ohne dass ein Öffnen des Brunnenkopfes erforderlich wurde. Sie erwies sich als leicht handhabbar und für die Aufgabe geeignet.
- Die Expositionsdauer hat Einfluss auf die an den Objektträgern haftende Biofilmgemeinschaft. Die ersten Tests zeigen, dass eine Exposition von sieben Wochen ausreicht, um Eisenbakterien auf den Objektträgern zu sehen.
- Die Pumpe sollte immer abgeschaltet sein, bevor mit der Probenahmeverrichtung hantiert wird, damit diese nicht in die Pumpe (z. T. ohne Sicherheitsgitter) hineingezogen werden kann.

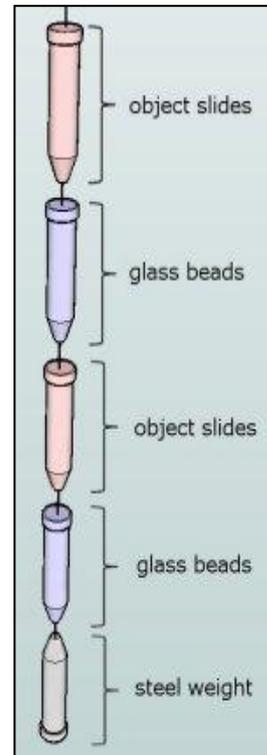


Fig. 4: Probenahme-Equipment [TUB 2009]

Kultivierung und Isolierung

Mit verschiedenen Proben aus den Brunnen (Wasser, Pumpenbeschichtung und Biofilme auf Glasperlen) wurden Isolationsversuche auf Eisenbakterien durchgeführt. Dezimalverdünnungen (bis zu 10^{-4} in Abhängigkeit vom Inokulum) von Biofilmsuspensionen wurden mit phosphatgepufferten Salinen (PBS) zubereitet. Die beiden letzten Verdünnungsstufen wurden auf Agar-Platten aufgebracht (Medien: modifiziertes *Leptothrix*-Medium und Grundwasser). Die Primärplatte (PP) wurde mit Parafilm verschlossen und bei Zimmertemperatur bis zu zwei Monate inkubiert. Das Wachstum der Kolonien wurde regelmäßig überprüft.



Fig. 5: Kultivierung und Isolierung [TUB 2009]

Braune oder schwarze Kolonien wurden als Ergebnisse von Eisen- oder Manganoxidation interpretiert. Solche Kolonien wurden zum Teil mit sterilen Zahnstochern aufgenommen und zur Subkultivierung auf neuen Agar-Platten ausgestrichen.

Die PP wurde inkubiert, und langsamer wachsende Kolonien, die sich entwickelt hatten, wurden anschließend über einen weiteren Zeitraum subkultiviert.

Ergebnisse

- Die Methode gab uns die Möglichkeit, Referenzkulturen für die denaturierende Gradientengelelektrophorese (DGGE, d.h. Auftrennung unterschiedlicher DNA-Basensequenzen in Bandenmustern), Primer- und Sondengestaltung zu erhalten.
- Pumpenschlamm und Glasperlen erwiesen sich als die aussichtsreichsten Inokula.
- Auf der Grundlage des Rohwassers der jeweiligen Brunnen wurden neue Kulturmedien entwickelt, um die Eisenbakterien der verschiedenen Brunnen erfolgreich zu kultivieren.
- Die Tatsache, dass die besten Kultivierungsergebnisse mit auf Brunnenwasser basierenden Medien erzielt wurden, weist auf eine Korrelation zwischen der Ockerbildung und der chemischen Zusammensetzung des Brunnenwassers hin.

Mikroskopische Analysen

Um eine erste mikroskopische Bewertung der ausgewählten Probenahmeorte zu ermöglichen und erste Unterschiede in der dominanten Spezies der Eisenbakterien festzustellen, wurden in 19 verschiedenen Berliner Brunnen für mehrere Wochen Objektträger exponiert. Dabei konnten vier Hauptmorphotypen der Eisenbakterien ermittelt werden. Typ A: mantelbildend (z.B. *Leptothrix spec.*, *Sphaerotilus spec.*), Typ B: stielbildend (*Gallionella spec.*, *Toxothrix spec.*), Typ C: kranzbildend (*Siderocapsa spec.*) und Typ D: Zellagglomerate (z.B. *Actinomyces*).

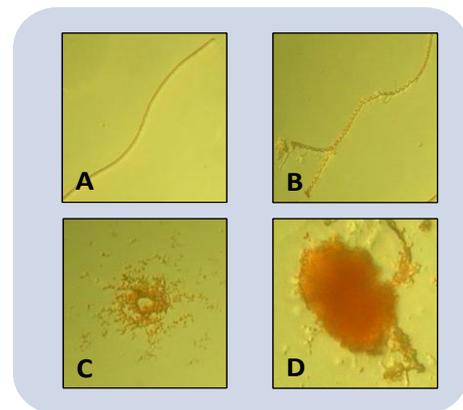


Fig. 6: Morphotypen [TUB 2009]

Ergebnisse

- Es wurde gezeigt, dass jeder Brunnen eine unterschiedliche Zusammensetzung der Morphotypen von Eisenbakterien aufweist.
- Während einige Brunnen überwiegend mantelbildende Bakterien enthalten, enthalten andere kranzbildende Bakterien und Zellagglomerate. Das könnte starke Auswirkungen auf die Art der Ockerablagerungen haben, die sich auf der Filterfläche und in der Kiesschüttung bilden.
- Die Art der Ockerablagerung hängt stark vom dominanten Typ der Eisenbakterien im Brunnen ab. Erste Ergebnisse der Korrelationen mit chemischen Daten zeigen, dass die morphologische Struktur der Biofilme mit den chemischen Bedingungen im Brunnen korreliert. Anpassungen im Brunnenbetrieb könnten eine Methode zur Beeinflussung dieser Bedingungen und der Struktur der Bakteriengemeinschaften sein. Dies muss weiter untersucht werden.

Entwicklung DNA-spezifischer Sonden

Viele Eisenbakterien gehören zur Gruppe der Beta-Proteobakterien, einer Klasse im phylogenetischen System der Bakterien, die Bakterien nach Basensequenzen der ribosomalen 16S-Ribonukleinsäure (16S-rRNA) gruppiert. Wichtige Vertreter der Beta-Proteobakterien findet man in den Gattungen *Sphaerotilus*, *Nitrosomonas*, *Spirillum*, *Thiobacillus* und *Gallionella*.

Durch Einsatz der Methode FISH (Fluoreszenz In Situ Hybridisierung) ist es möglich, Zielorganismen auf einem Objektträger spezifisch sichtbar zu machen. Die Methode nutzt die Tatsache, dass Bakterienzellen eine Vielzahl von Ribosomen enthalten, die zum Teil aus Ribonukleinsäure (RNA) bestehen. Da ribosomale RNA sehr spezifische Regionen enthält, können mit Farbstoffen markierte genetische Sonden selektiv an Bakterien binden, die die Zielsequenz enthalten. Mit Hilfe geeigneter Lichtquellen können diese Signale sichtbar gemacht werden.

Ergebnisse

- Die Methode erlaubt das Korrelieren spezifischer Sondersignale mit Eisenverockerungen. Damit kann dann das Potential für die Bildung von Ockerablagerungen durch die jeweiligen Organismen bewertet werden.
- Erste Ergebnisse zeigen eine Korrelation zwischen dem Brunnenbetrieb und der Anzahl der Beta-Proteobakterien auf den Objektträgern.
- Daraus ergibt sich ein Ansatz, durch die Änderung der Bedingungen im Brunnen z. B. dadurch, dass die Pumpe für längere Zeitspannen aktiviert oder deaktiviert wird, die Bakteriengemeinschaft und damit die Art und Dicke der Ockerablagerungen zu beeinflussen. Dies sollte weiter untersucht werden.

Molekularbiologische Untersuchungen

Im Verlaufe des Projekts wurden mehr als einhundertfünfzig Wasser- und Biofilmproben aus den verschiedenen Brunnen entnommen.

Daraus wurde die bakterielle DNA extrahiert, um Material für Folgeanalysen zu gewinnen. DNA-Vervielfältigung mithilfe der Polymerase-Kettenreaktion (PCR, Polymerase Chain Reaction), Klonierung und DGGE-Versuche haben begonnen.

Ergebnisse

- Die Ergebnisse der ersten DGGE-Versuche zeigen Ähnlichkeiten, aber auch Unterschiede zwischen Populationen verschiedener Brunnen. Erste Muster in der Zusammensetzung der Bakteriengemeinschaften wurden erkennbar.
- In Kombination mit anderen Methoden hat die DGGE-Methode das Potential, die Ermittlung von Indikatororganismen zu ermöglichen, die mit den jeweiligen Ockerablagerungen korrelieren.
- Es wurde beobachtet, dass aus den Biofilmproben (Glasperlen) im Vergleich zu den Wasserproben geringere Mengen DNA extrahiert werden konnten. Die Expositionszeit der Glasperlen wird in zukünftigen Versuchen ausgedehnt werden.
- Außerdem sammelten sich in den Biofilmen bestimmte Substanzen an, die die PCR zu behindern scheinen. Die PCR-Bedingungen konnten zwar soweit optimiert werden, dass dieses Problem ausreichend gelöst wurde, hier besteht jedoch im Verlauf des Projekts weiterhin Optimierungsbedarf.

4.1.3 BART [UWT]

Methode

Diese Methode wurde von kanadischen Wissenschaftlern entwickelt, die das Biofouling von Brunnen untersuchten. Es handelt sich um eine auf Kultivierung aufbauende Screening-Methode, die Informationen über die Anwesenheit und die Aktivität von Bakteriengruppen liefert, von denen bekannt ist, dass sie für das Biofouling in Brunnen relevant sind.

Der Test selbst besteht aus neun Sampling-Kits (einer davon zur Kontrolle) mit selektiven Nährstoffen, ausgerichtet auf:

- Eisenbakterien (IRB)
- Sulfatreduzierende Bakterien (SRB)
- Schleimbildende Bakterien (SLYM)
- Nitrifizierende (N) und denitrifizierende (DN) Bakterien
- Heterotrophe Aerobe Bakterien (HAB)
- Fluoreszierende Pseudomonas (FLOR)
- Mikro-Algen (ALG)

Wir wählten IRB, SRB und SLYM zur Anwendung an Wasser- und Ablagerungsproben aus den drei stillgelegten Brunnen (vgl. Tab. 1), um das Potential für die biologisch induzierte Ablagerung von Eisenhydroxiden zu ermitteln.

Ergebnisse

Die BARTests zeigten das Vorhandensein von Eisenbakterien und schleimbildenden Bakterien in allen untersuchten Wasser- und Belagsproben. Die Bakterien konnten jedoch nicht weiter klassifiziert werden.

Um zu einer endgültigen Einschätzung der BART-Ergebnisse zu kommen, wurden jeweils eine Wasser- und eine Belagsprobe aus den verwendeten Test-Kits in die Kultivierungsversuche und die DGGE-Untersuchungen an der Technischen Universität einbezogen. Hierbei konnte eine schwache Korrelation zwischen den DGGE-Mustern gefunden werden.

Es bleibt unklar, ob BART wirklich in der Lage ist, die Aktivität von den Eisenbakterien abzubilden, die als nicht kultivierbar bekannt sind. Die fortschreitende Identifizierung und Klassifizierung mit den molekularbiologischen Methoden wird die Spezifikation der durch BART repräsentierten Bakterien erkennen lassen. Damit kann dann die Relevanz der BARTests als Methode zur Identifizierung verockerungsrelevanter Eisenbakterien bewertet werden.

4.1.4 Partikelmessungen [KWR]

Die Anwendung der Partikelzählung wurde durch KWR (früher Kiwa) vorgeschlagen, die diese Methode erfolgreich bei der Bestimmung der physikalischen Verockerung von Brunnen einsetzen.

In den Niederlanden leidet ungefähr ein Drittel der Wassergewinnungsbrunnen an Verockerung an der Bohrlochwand oder in deren Nähe (Kolmation). Für diese Art der Verockerung sind saubere Filterrohre und ein hoher Eintrittswiderstand zwischen Grundwasserleiter (Messstelle im Brunnumfeld) und der Kiesschüttung (Außenpegel) kennzeichnend (Fig. 8A).

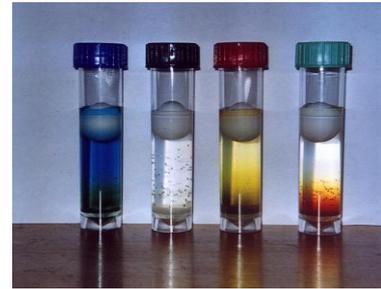


Fig. 7: IRB BART test kits

Im Gegensatz hierzu ist für von chemischer und/oder biologischer Verockerung betroffene Brunnen (ein weiteres Drittel der niederländischen Brunnen) ein hoher Eintrittswiderstand zwischen der Kiesschüttung (Außenpegel) und dem mit sichtbaren Ablagerungen verschmutzten Filterrohren (Innenpegel) charakteristisch (Fig. 8B).

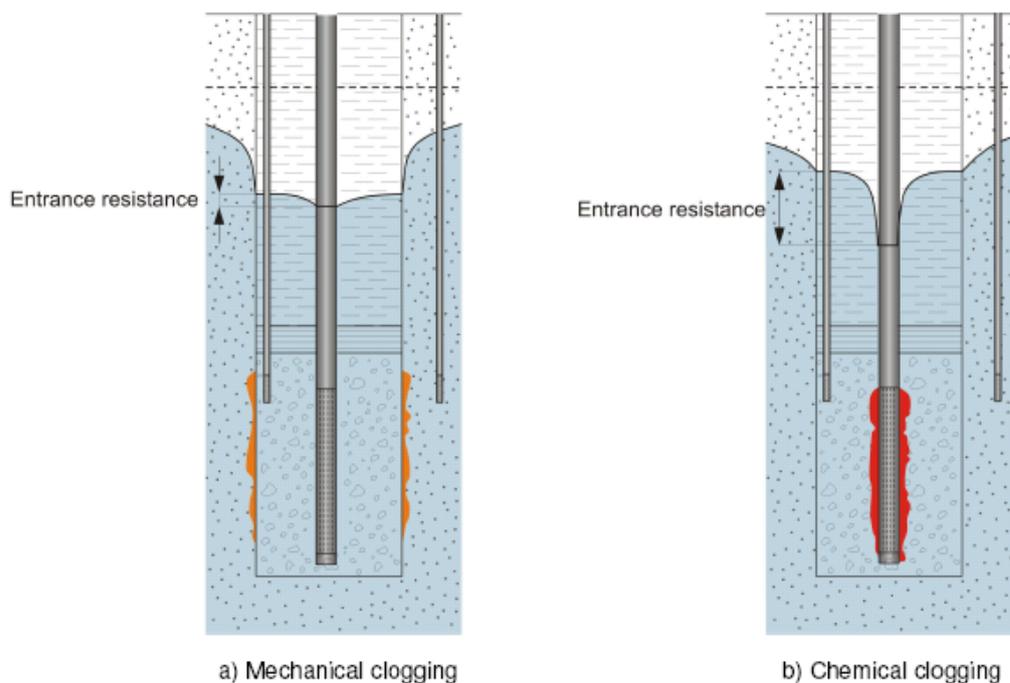


Fig. 8: Alterungsarten; A. Kolmation (Versandung); [KWR 2009]

B. Chemische Verockerung

Untersuchungen haben gezeigt, dass die mechanische Filtration von Partikeln der dominante Prozess ist. Deshalb wird diese Verockerungsart oft als mechanische Verockerung bezeichnet (De Zwart, 2007).

Partikelzählungen im entnommenen Wasser haben gezeigt, dass dann, wenn ein Brunnen eingeschaltet wird, ein Teil der filtrierte Partikel mobilisiert und durch Kiesschüttung und Filter gezogen wird. Dadurch kann regelmäßiges Ab- und Einschalten der Brunnen die mechanische Verockerung stark reduzieren oder sogar verhindern. Dieses ‚Schalten‘ ist jetzt eine übliche Betriebsweise in vielen Brunnenfeldern in den Niederlanden (z.B. Van Beek et al., 2007).

Andererseits ist es bei unter chemischer Verockerung leidenden Brunnen gängige Praxis, den Brunnen möglichst konstant (kontinuierlich) zu betreiben (Makkink et al., 2000; Van den Berg et al., 2007), um das Risiko der Vermischung von sauerstoffhaltigen und sauerstofffreien Wasserarten so gering wie möglich zu halten. Oft wird auch angenommen, dass die Verstopfung durch Partikel in diesen Brunnen keine wichtige Rolle spielt. Daher wurden Partikelzählungen zuvor meist nicht eingesetzt.

Die drei ausgewählten Brunnen wurden drei Tage nach einem festgelegten Schema mit 24 Stunden Betrieb und 3 Stunden Ruhe betrieben. Die Nachbarbrunnen sollten während dieser Zeit nicht geschaltet werden, mit einer Ausnahme, um die Auswirkung des Schaltens zu untersuchen. Aufgezeichnet wurden neben der Partikelkonzentration und deren Größenverteilung im Rohwasser die Wasserstände und Entnahmemengen. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden analysiert und mit den Ergebnissen an (holländischen) mechanisch verstopften Brunnen verglichen.

Ergebnisse

Die ersten Versuche, die Rolle von Partikeln im Rohwasser aus biologisch/chemisch verockernden Brunnen besser zu verstehen, führten zu den folgenden Schlussfolgerungen:

- Partikelkonzentrationen in chemisch verstopften Brunnen reagieren sofort und stark auf das Einschalten der Brunnen (Pumpen). Eine Stunde nach dem Einschalten haben sich die Konzentrationen auf niedrigem Niveau stabilisiert;
- Bei einem Brunnen reagierten die Partikelkonzentrationen auch auf das Abschalten der Pumpe. Eine ähnliche Reaktion ist in den beiden anderen Brunnen möglich, konnte aber wegen technischer Beschränkungen nicht aufgezeichnet werden;
- Die nach dem Einschalten aufgezeichneten Spitzenkonzentrationen sind viel höher als die Konzentrationen in den holländischen mechanisch verstopften Brunnen. Die Spitzenkonzentrationen lagen zwischen 2400 und 4000 ml⁻¹ bei den Tegeler Brunnen und zwischen 16000 und 36000 in Stolpe (Holländische Brunnen liegen zwischen 200 und 2000 ml⁻¹);
- Das Schalten von benachbarten Brunnen hat keinen oder nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Partikelkonzentrationen im betrachteten Brunnen;
- Die Herkunft der Partikel ist unbekannt. Wahrscheinlich sind die aufgezeichneten ‚Partikel‘ Bakterien und/oder Eisenausfällungen, die aus der Pumpe und/oder dem Brunnenfilter freigesetzt werden.

Eines der Ziele dieses Versuchs bestand darin, zu prüfen, ob wiederholtes An- und Abschalten genutzt werden kann, um biologische und/oder chemische Verockerung zu verhindern. Klar ist, dass beim Einschalten Material entfernt wird. Dies zeigten die erhöhten Partikelkonzentrationen.

Inwieweit dadurch der Aufbau der Bakterienpopulation und/oder von Eisenausfällungen behindert wird, kann derzeit nicht bewertet werden. Hierfür sind noch bessere Informationen über die Herkunft der Partikel, über die entfernte Menge und über die Bildungsgeschwindigkeit von Bakterien- und/oder Eisenausfällungen erforderlich.

4.1.5 Analyse des Brunnenzustandes

Methoden

Die folgenden Methoden wurden an den drei stillgelegten Brunnen und dem in Betrieb befindlichen Brunnen der Transekte vor und nach H₂O₂-Behandlung angewendet:

- dreistufiger Pumpversuch
- Kamerabefahrung
- Gamma-Gamma-Dichtescan und Neutron-Neutron Log zur Einschätzung des Zustands der Kiesschüttung
- Flowmeter- und Packer-Flowmetermessung zur Ermittlung der hydraulischen Bedingungen

Ergebnisse

Die Ermittlung der Brunnenleistung mit einem **dreistufigen Pumpversuch** mit Erreichen quasistationärer Bedingungen auf jeder Stufe führte zur Bestimmung:

- der spezifischen Kapazität Q_s , für den Vergleich mit der anfänglichen Kapazität und der Entwicklung über die Zeit in Betrieb sowie vor/nach Regenerierungsmaßnahmen
- der Komponenten der Grundwasserspiegelabsenkung aus dem Grundwasserleiter (Aquiferverlust) und dem Brunnen (Brunnenverlust, nach Jacob)
- der Signifikanz des Δh -Wertes für das Anzeigen des Ortes und der Ausdehnung der Verockerung in der Kiesschüttung.

Die ermittelten **spezifischen Kapazitäten (Q_s)** zeigen eine signifikante Verschlechterung für alle vier untersuchten Brunnen. Verglichen mit ihrer Kapazität bei Inbetriebnahme liegen sie zwischen 25 und 74%. Die Gesamtabenkung setzt sich aus einem Aquifer- (linear, laminare Anströmung im Bereich des Entnahmetrichters) und einem Brunnenteil (nicht-linear, turbulente Anströmung im Filterbereich des Brunnens) zusammen. Der Brunnenvverlust konnte jedoch nur für einen Brunnen berechnet werden.

Die Berechnung der **Δh -Werte** zeigte bei drei der vier Brunnen keine Unterschiede zwischen den Wasserpegeln in den Innen- und Außenpegeln. Daraus lässt sich ableiten, dass keine oder nur wenige Ablagerungen im Bereich des Filters und der ersten Zentimeter der Kiesschüttung vorhanden sind (vgl. Fig. 8). Nur der Brunnen STOborg19-/90V zeigte eine Differenz der Wasserstände Δh von 12 cm. Dies ist gleichzeitig der Brunnen mit dem höchsten Leistungsverlust.

Die Pumptests und Bewertung des Brunnenzustands (Kamerabefahrungen und Bohrlochgeophysik) weisen unterschiedliche Korrelationen für die vier untersuchten Brunnen auf. In allen vier Brunnen zeigten die **Kamerabefahrungen** freie Filterrohre. Die Ablagerungen befanden sich zwischen dem Betriebswasserspiegel und der Filteroberkante und waren nahe den Pumpeneinlässen am stärksten. Die Farbe und die Struktur der Ablagerungen im Vollrohrbereich unterschieden sich jedoch für die Stahlbrunnen im Vergleich zu den PVC-Brunnen. Fig. 9 zeigt Bilder aus der Kamera-Inspektion eines Stahlbrunnens (Bilder A bis C) und zum Vergleich diejenigen eines PVC-Brunnens (Bilder D bis F).

Während der Stahlbrunnen, der 2003 regeneriert worden war, nur schwache Verkrustungen an der Oberkante des Filters aufwies, zeigte der 2007 regenerierte PVC-Brunnen deutlich mehr Ablagerungen. Bemerkenswert ist die partielle Verockerung im Filterrohrabschnitt, während das Vollrohr Ablagerungen in allen Richtungen aufweist.

Die Schlussfolgerung, dass es einen Einfluss des Ausbaumaterials auf die Brunnenalterung gibt, wird durch praktische Erfahrungen der BWB gestützt, die besagen, dass aus Kupfer hergestellte Brunnen weniger Alterung zeigen. Solche Korrelationen konnten in der bisherigen statistischen Analyse nicht gefunden werden, sollten aber in zukünftige Untersuchungen einbezogen werden.

Neben den sichtbaren Ablagerungen im Vollrohr zeigten die **Gamma-Gamma Messungen (GG.D)** die Ansammlung von Material in den oberen zwei Metern der Kiesschüttung bei allen vier Brunnen, also im Bereich zwischen der Filteroberkante und der Tonabdichtung. Folglich scheint der Bereich zwischen dem Betriebswasserspiegel und der Filteroberkante von Alterungsprozessen betroffen zu sein, die vom Brunneninneren in die Kiesschüttung reichen.

Eine Korrelation zur geologischen Situation im Grundwasserleiter konnte in der Flowmeter-Messung (FLOW) gefunden werden. Die **Verteilung des Wasserzuflusses** repräsentierte die Schichtung des Grundwasserleiters mit den verschiedenen Korngrößen. Die Messprofile zeigten einen höheren Zufluss in Bereichen mit gröberen Sedimenten.

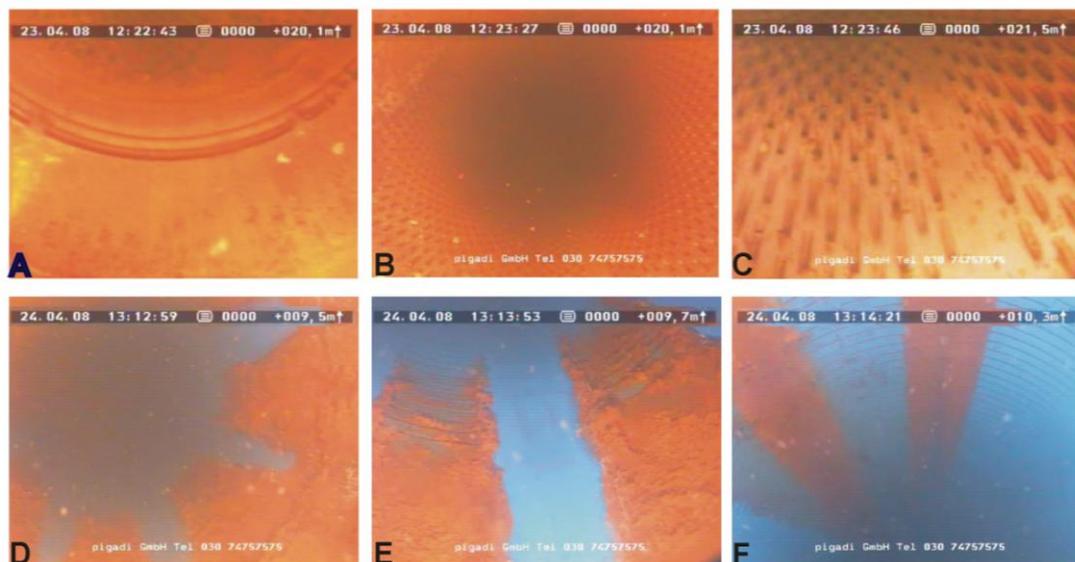


Fig. 9: Kamerabefahrung der Brunnen TEGhzk22 (Stahlschlitzbrückenfilter, Bilder A-C) und STOborg15 (PVC-Filter, Bilder D-F) [KWB 2009 aus den Pigadi-Kurzberichten]

Die Prüfung der **Durchlässigkeit der Kiesschüttung** durch Messungen mit dem Packer-Flowmeter zeigte Korrelation entweder mit der GG.D oder mit dem Flow. Folglich lieferte es einen Hinweis auf das Vorhandensein von Ablagerungen im Filterkies, wenn es mit der GG.D korrelierte. Eine Korrelation mit der Flowmeter-Messung, aber nicht mit der GG.D, bestätigte den Einfluss der Sedimentschichtung im Grundwasserleiter. In allen anderen Fällen wird eine Anfangsmessung nach dem Brunnenbau oder zumindest vor einer Brunnenbehandlung als Vergleichswert benötigt.

4.2 Schlussfolgerungen und Bewertung

4.2.1 Vergleich der eingesetzten Methoden

Generell haben **mehrstufige Pumpversuche** das Potential, früh einen Hinweis auf Brunnenalterung zu liefern. Für die Signifikanz der Pumptests für die Bewertung der Brunnenleistung ist jedoch die Konstanz der Förderrate Q der entscheidende Faktor, wofür auch die statistischen Analysen sprechen.

Auch mithilfe der zusätzlich angewendeten **bohrlochgeophysikalischen Methoden** zur Einschätzung der Porosität und Permeabilität der Kiesschüttung sowie der Verteilung des Wasserzuflusses (Flowmeter und Packer-Flowmeter) konnten Brunnenalterungsprozesse nicht klar identifiziert werden. Für diese indirekten Methoden können Aussagen nur durch Vergleich mit dem Anfangszustand gemacht werden.

Für eine endgültige Beurteilung dieser Standardmethoden müssen erfolgreich Kernproben entnommen werden, um den Ort und die Ausdehnung von Ablagerungen in der Kiesschüttung mit den Anzeichen zu vergleichen, die sich aus Δh -Werten, dem Rückgang der spezifischen Kapazität, Kamera-Inspektionen, geophysikalischer Bohrlochmessung und Partikelzählung ergeben.

Im Vergleich zu Routineanalysen der Wasserqualität erbrachten die an den 21 Brunnen durchgeführten **hydrochemischen Untersuchungen** keine zusätzlichen Vorteile für die Diagnose von Alterungsprozessen.

Generell ermöglicht die Analyse der physikochemischen Wasserparameter (pH, Redoxpotential, O₂-Gehalt, Leitfähigkeit und Temperatur), der wichtigsten Kationen (Kalzium, Magnesium, Kalium, Natrium, Eisen, Mangan), der Anionen (Chlorid, Bromid, Fluorid, Sulfat, Phosphat, Nitrat) und der Nährstoffe (DOC) Aussagen über

- (1) das Vorhandensein von Ausgangsstoffen für chemische Verockerung und
- (2) die Lebensbedingungen für Bakterien, die für biologisch induzierte Verockerung verantwortlich sind.

Da die Probenahme jedoch in dem schon vermischten Rohwasser erfolgte, ermöglicht sie weder die Identifizierung von Redox-Prozessen noch die Bewertung des Potentials zur Ausfällung von Ablagerungen. Hier wäre eine tiefenorientierte Probenahme erforderlich, aus der Auswertung von

- (1) Sättigungsindizes (z.B. für Eisen oder Karbonate) und
- (2) Redox-Klinen

auf den bevorzugten Ort von Ablagerungen schließen zu können.

Die verschiedenen durchgeführten **molekularbiologischen Untersuchungen** haben sich als zuverlässig und geeignet erwiesen, Bakterien zu finden und anzuzeigen, die Ockerablagerungen verursachen. Die Vielfalt dieser Bakterien ist jedoch größer, als nach den Arbeiten anderer Gruppen seit Beginn des letzten Jahrhunderts zu erwarten war. Bakterien, die nach mikroskopischen Merkmalen identifiziert und nur morphologisch klassifiziert worden sind, können mit den nun entwickelten Methoden genauer bestimmt werden. Diese neuen Methoden werden die Möglichkeit geben, spezifische Gruppen von ockerbildenden Bakterien mit den Umweltbedingungen in den jeweiligen Brunnen sowie den Betriebsweisen der Brunnen zu korrelieren.

Die Beurteilung der Signifikanz der **BARTests** ist derzeit noch Gegenstand molekularbiologischer Untersuchungen, bei denen DGGE genutzt wird, um herauszufinden, ob die in den BART-Testkits kultivierten Bakterien den für Verockerung relevanten Eisenbakterien entsprechen. Der weitere Einsatz der BARTests in den Feldversuchen in WELLMA2 wird deshalb zurzeit nicht empfohlen.

Die Vorteile und die Signifikanz der **Partikelmessungen** können nicht endgültig beurteilt werden, da keine horizontalen Kerne entnommen werden konnten. Partikelmessungen wurden in den Niederlanden erfolgreich für die Identifizierung von Kolmationsprozessen in der Kiesschüttung von Brunnen benutzt und könnten daher in Frankreich bei Brunnen angewendet werden, von denen vermutet wird, dass sie von Kolmation betroffen sind.

Dies sollte mit einer Charakterisierung der entnommenen Partikel verbunden werden, um zwischen Bakterien, Ausfällungen auf Grund chemischer Verockerungsprozesse und feinen Sedimenten mit einem Potential für Versandungs- und Kolmationsprozesse zu unterscheiden.

4.2.2 Biochemische Prozesse bei der Brunnenalterung

Die Verockerung von Brunnen führt je nach den zugrunde liegenden Prozessen zu unterschiedlichen Ablagerungen. Nicht nur die Menge ist verschieden, sondern auch Zusammensetzung, Struktur und Ort.

Auf Grund der **Ergebnisse der mikrobiologischen und molekularbiologischen Untersuchungen** im Rahmen von *WELLMA1/ WELLMADNA* kann gefolgert werden, dass Bakterien mit dem Potential zur Ablagerung von Eisen und/oder Mangan in allen untersuchten Brunnen vorhanden waren.

Erste Versuche, physikochemische Parameter eines Brunnens mit den vorhandenen Bakterien durch eine Clusteranalyse der chemischen Daten zusammen mit den Bandmustern der DGGE-Versuche zu korrelieren, erbrachten viel versprechende Ergebnisse, da sie eine **Korrelation des vorherrschenden Morphotyps der Eisenbakterien und der chemischen Bedingungen** im Brunnen zeigen (Fig. 10).

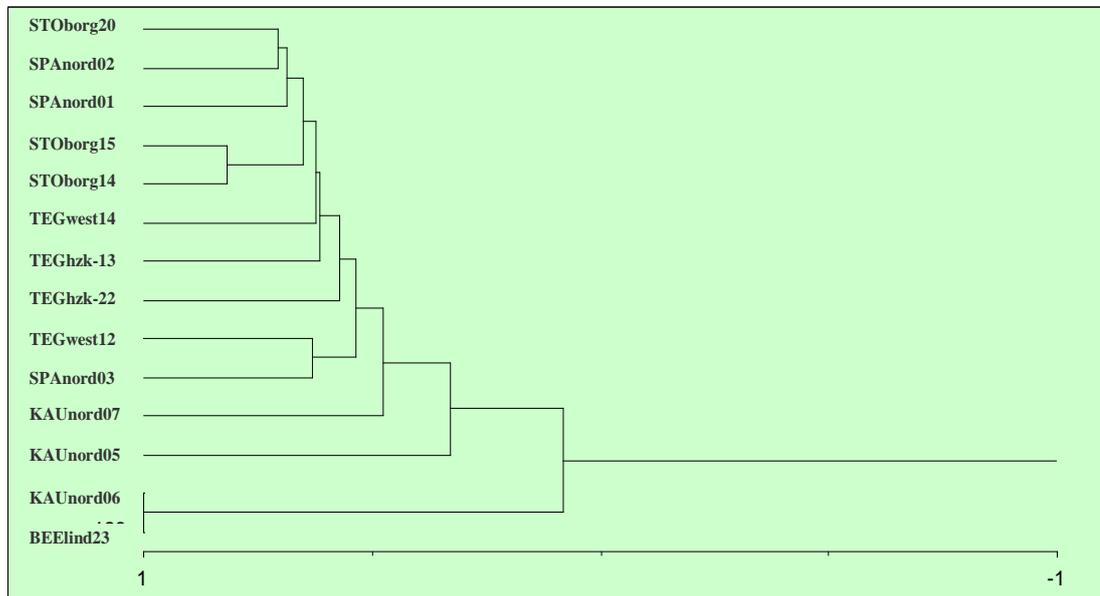


Fig. 10: Clusteranalyse auf der Basis von hydrochemischen Parametern und DGGE-Banden [TUB 2009]

Zusätzlich zeigte das Verhältnis der Beta-Proteobakterien (Eisenbakterien) zur Gesamtzahl der Zellen eine Korrelation mit dem Eisen-/Manganverhältnis. Wie Fig. 11 zeigt, ist der Anteil der Beta-Proteobakterien hoch bei niedrigen Eisen-/Mangan-Verhältnissen.

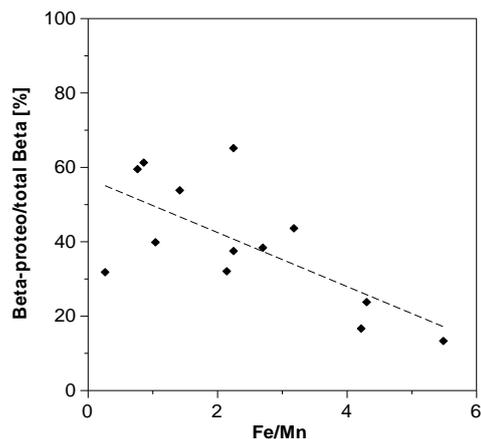


Fig. 11: Korrelation der Beta-Proteobakterien und des Eisen-Mangan-Verhältnisses [TUB 2009]

Dies unterstützt die Arbeitshypothese, dass die **Bakterienpopulation** des jeweiligen Brunnens **mit der chemischen Beschaffenheit korreliert** und das **Vorhandensein biologischer Verockerungsprozesse** anzeigt.

Während die Anwesenheit von Eisenbakterien im Wasser, in den Ablagerungen und in Biofilmen und deren Korrelation mit den geochemischen Bedingungen am Standort bewiesen werden konnten, bleibt unklar,

- (1) ob biologische Verockerung wirklich der dominante Prozess im Hinblick auf die **Zusammensetzung der Beläge** ist, oder mit welchem Anteil chemische Ausfällung und physikalische Prozesse (Kolmation) zur Verockerung beitragen, und
- (2) in welchem Maße der beobachtete **Rückgang der Brunnenleistung auf die sichtbaren Ablagerungen** (Kamera-Inspektion) **zurückzuführen** ist oder durch in der Kiesschüttung verborgene Prozesse verursacht wird.

Deshalb sollten zukünftige Untersuchungen an ausgewählten Standorten einerseits die detaillierte Auswertung von Belagsproben von verschiedenen Stellen in einem Brunnen (Pumpe, Vollrohr, Rohr) einschließen, z.B. durch

- den Glühverlust, um den Anteil organischen Materials an der Gesamtmasse zu ermitteln und
- Röntgenfluoreszenzanalysen, um die Häufigkeit von Tonmineralen, Silikaten, Karbonaten usw. zu bestimmen.

Um den Einfluss der an unterschiedlichen Stellen befindlichen Ablagerungen auf die Brunnenleistung zu differenzieren, wird außerdem eine Kombination aus Pumptests und Reinigungsschritten empfohlen.

Zu den Untersuchungen an der Transekte gehörten eine Kamerabefahrung, ein Stufenpumpversuch und eine bohrlochgeophysikalische Untersuchung im Betriebsbrunnen vor und nach H₂O₂-Behandlung sowie hydrochemische und mikrobiologische Probenahmen sowie Sauerstoffmessungen an dem Brunnen und den Beobachtungspegeln.

5.1.2 Der Einfluss des Schaltens (Option O₂)

Kurzzeitmonitoring geochemischer Veränderungen

Der Einfluss des Anschaltens wurde durch die Messung der kurzfristigen Veränderungen hydrochemischer Parameter während der Anfangsphase des Pumpens untersucht. Die Parameter sowie die Messfrequenz waren die gleichen wie bei den zuvor beschriebenen hydrochemischen Analysen.

Alle 21 ausgewählten Brunnen wurden einbezogen. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurde die folgende festgelegte Probenahmeprozedur eingehalten:

- (1) Abschaltung des Brunnens und seiner beiden Nachbarbrunnen für mindestens eine Woche vor der Probenahme
- (2) Beginn der Probenahme gleichzeitig mit dem Einschalten des Brunnens
- (3) Während der ersten zehn Minuten ein Probenahmeintervall von einer Probe pro Minute, dann nach 15, 20, 30 Minuten und anschließend halbstündlich
- (4) Fortsetzung der Probenahme bis zum Erreichen stabiler physikochemischer Bedingungen für: pH ($\pm 0,05$), Redoxpotential (± 10), O₂ (=0), Leitfähigkeit (± 10), Temperatur ($\pm 0,5$), (Schwankungen innerhalb einer Stunde)

Entsprechend dieser Vorgehensweise repräsentieren die Proben:

- (1) den Zustand im Brunnen in Ruhe
- (2) die unmittelbare Anlaufphase
- (3) die Bedingungen nach den ersten raschen Veränderungen durch turbulente Strömung und Absenkung
- (4) den konstanten Zustand während des Normalbetriebs.

Ergebnisse

Zusammenfassend kann zu den Ergebnissen des Kurzzeitmonitorings gesagt werden, dass fast alle Brunnen direkt nach dem Einschalten des Brunnens starke Schwankungen verschiedener Parameter zeigten. Insbesondere der Gehalt an partikulärem und gelöstem Eisen sowie die Parameter pH, Redoxpotential, O₂-Gehalt, Leitfähigkeit und Temperatur scheinen durch das Einschalten signifikant beeinflusst zu werden.

Sauerstoffverteilung im Brunnenumfeld

Die ersten Untersuchungen an der Transekte konzentrierten sich auf die durch Grundwasserschwankungen infolge des Brunnenbetriebs verursachte Sauerstoffaufnahme. Deshalb wurde ein Kurzpumpversuch (eine Pumprate, 3,5 Stunden Dauer) an der Transekte durchgeführt, begleitet von Optoden-Messungen im Betriebsbrunnen und allen Multilevel-Messstellen.

Für die weitere Diskussion wurde eine Optode in 1,25 m Entfernung zum Brunnen und in 5 m Tiefe unter der Oberfläche (Optode C3 in Fig. 12) ausgewählt. Während der Brunnen ausgeschaltet ist, liegt die Optode in der grundwassergesättigten Zone. Während des Brunnenbetriebs fällt sie durch die resultierende Wasserspiegelabsenkung trocken.

Ergebnisse

Fig. 13 zeigt die Sauerstoffkonzentration und die Absenkung an der Optode C3. Während des Pumpens zeigt sie eine für den Bereich des Absenktrichters typische Sauerstoffsättigung von ca. 70 % (bezogen auf Luftsättigung). Mit Abschalten der Pumpe sinkt der Sauerstoffgehalt im Bereich der Optode auf ein Niveau von ca. 10 %. Das entspricht einer gelösten Sauerstoffmenge von ca. 1 mg/l im Grundwasser, welche auch noch drei Stunden nach Abschalten der Pumpe im Umfeld des Brunnens nachweisbar war.

Unter diesen hydrochemischen Bedingungen wird die Ausfällung von im Wasser gelöstem Eisen begünstigt. Damit ist zu vermuten, dass das häufige Schalten von Brunnen zu einem Sauerstoffeintrag führt und damit zur Verockerung beitragen kann.

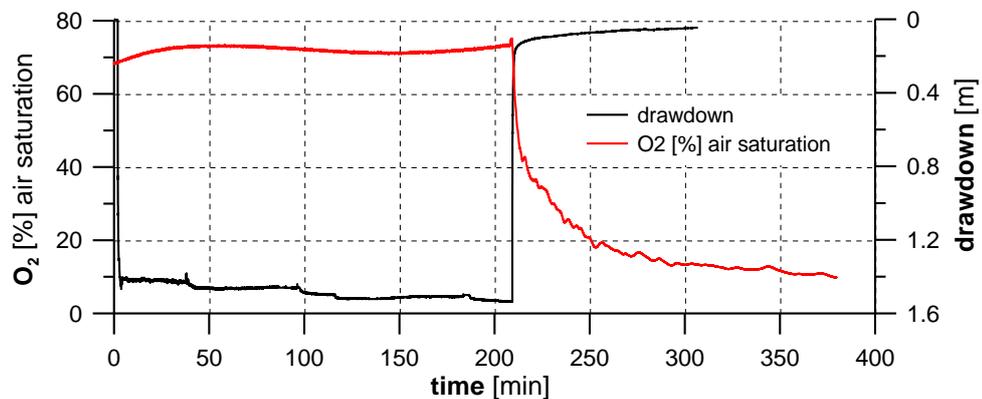


Fig. 13: Aufgezeichnete Sauerstoffsättigung (rote Kurve) und Absenkung (schwarze Kurve) während eines Kurzzeitpumptests am Brunnen STOborg15 [FUB 2009]

Theoretische Massenbilanzierung der Eisenkonzentrationen

Zur Bestimmung des Verockerungspotentials wurde die Ausfällung von Ocker quantifiziert, indem die Eisenkonzentrationen im Betriebsbrunnen mit denen der Messstellen auf der Basis einer theoretischen Bilanzierung verglichen wurden.

Die Eisenkonzentrationen für die zufließenden Uferfiltrat- und Grundwasseranteile wurden wie folgt berechnet: In einem ersten Schritt wurden basierend auf dem kf-Wert die Zustromanteile für jeden Teilbereich des Grundwasserleiterprofils bestimmt (vgl. Fig. 14 links). Dann wurde basierend auf der Analyse der elektrischen Leitfähigkeiten und stabiler Isotopendaten das Mischungsverhältnis der verschiedenen Wassertypen ermittelt.

Ergebnisse

Die Daten der Eisengehalte in dem Brunnen und in dessen Nachbarschaft werden in Fig. 14 gezeigt. Das Mischungsverhältnis von Uferfiltrat und Grundwasser ist 2:1. Die gemessenen Fe-Konzentrationen des entnommenen Wassers betragen ungefähr 1,6 mg/l, während die berechneten Fe-Konzentrationen des zum Brunnen fließenden Wassers ungefähr bei 1,75 mg/l liegen.

Die Bilanzrechnung zeigt folglich einen Verlust von ungefähr 10% Fe. Das entspricht bei einer Fördermenge von 50m³/h ungefähr 7 g Eisen pro Stunde.

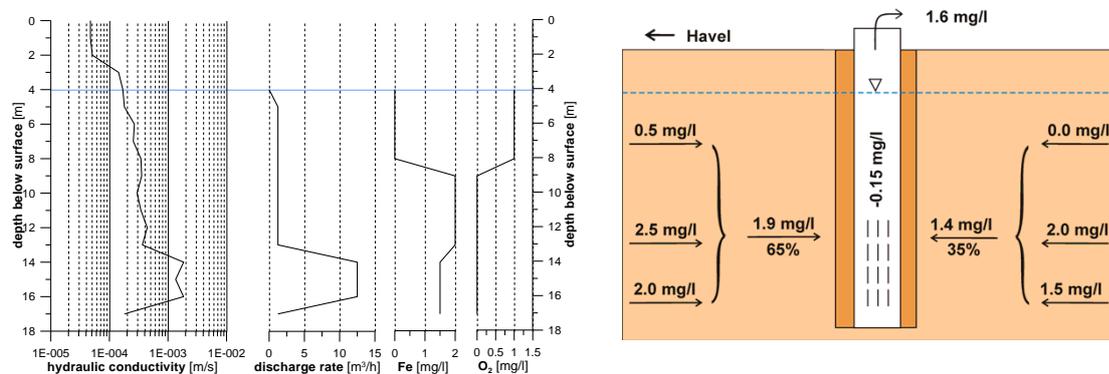
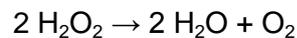


Fig. 14: theoretische Ermittlung der Eisengehalte verschiedener Grundwasseranteile und -schichten, die in Brunnen STOborg15 vermischt werden [FUB 2009]

5.1.3 Einfluss der H₂O₂-Behandlung

Methode

Wasserstoffperoxyd ist unter normalen Bedingungen stabil. Wegen der Anwesenheit der Katalysatoren Fe³⁺, Mn⁴⁺ oder Cu²⁺ im Grundwasser steigt dort die Reaktionsgeschwindigkeit stark an. Im Brunnen zerfällt das eingebrachte Wasserstoffperoxyd in einer katalytischen Reaktion in Sauerstoff und Wasser.



Der Einfluss von H₂O₂ wurde im Betriebsbrunnen und in den Messstellen der Transekte während und nach der Behandlung beobachtet. Die Menge des freigesetzten Sauerstoffs aus der H₂O₂-Zersetzung in der gesättigten Zone wurde mit den installierten Sauerstoffoptoden gemessen.

Ergebnisse

Die Untersuchungen zeigten einen starken Einfluss der H₂O₂-Behandlung auf die physikochemischen Bedingungen im Umfeld des behandelten Brunnen.

Alle Optoden in der gesättigten Zone zeigten einen steilen Anstieg der Sauerstoffkonzentration kurz nach der Anwendung. Im Betriebsbrunnen wurden wenige Minuten nach der H₂O₂-Zugabe bis zu 100% Sauerstoffsättigung erreicht, gefolgt von einem langsamen Rückgang hin zu einem partiell stabilen Zustand.

In den Messstellen (Fig. 15, A havelseitig, B landseitig) zeigten die Messungen steigende Sauerstoffkonzentrationen mit zunehmender Kontaktzeit. Der Beginn des Pumpens führte zu einer mit der Betriebsdauer fortschreitenden Abnahme des Sauerstoffgehalts.

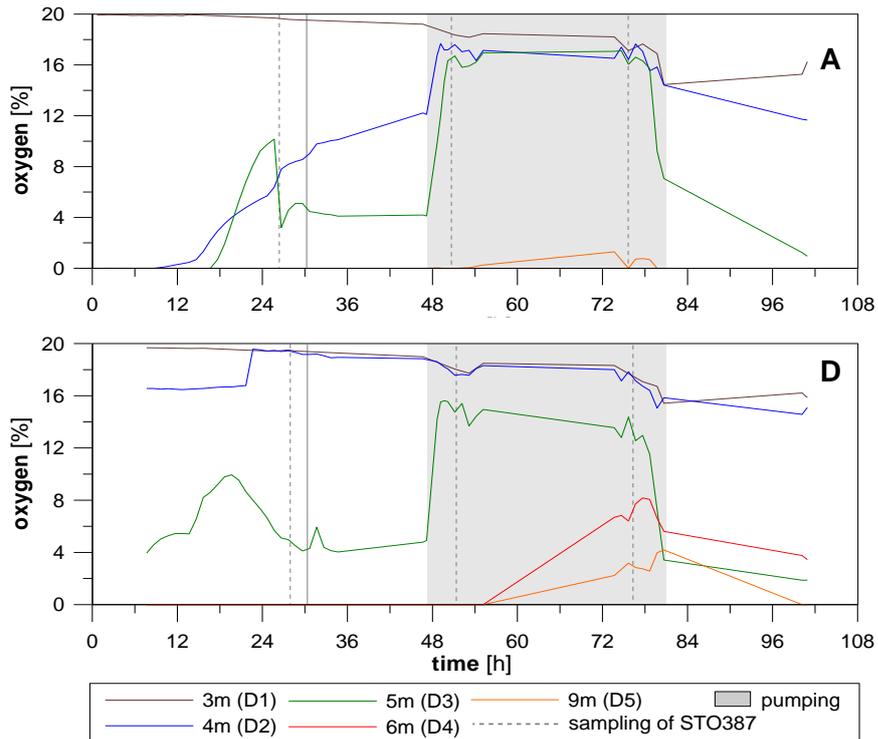


Fig. 15: Sauerstoffkonzentrationen in den Beobachtungsbrunnen A (2,25m in Richtung Havel) und D (2,25m landeinwärts) [FUB 2009]

5.2 Schlussfolgerungen und Bewertung

5.2.1 Einfluss des Einschaltens

Das **Kurzzeitmonitoring** hat gezeigt, dass stabile physikochemische Bedingungen in den Brunnen erst 120 Minuten nach Einschalten der Pumpe erreicht werden.

Zum Vergleich verschiedener Brunnenzustände und Brunnenstandorte wird daher je nach Zielstellung eine Probenahme in zwei Phasen empfohlen:

- Zur Beschreibung der ursprünglichen hydrochemischen Bedingungen unmittelbar nach dem Anlaufen der Pumpe sollte eine Probe innerhalb der ersten 5 Betriebsminuten gezogen werden.
- Zur Beschreibung des stabilen Zustands sollte eine zweite Probe erst nach 120 Minuten Betrieb gezogen werden.

Die Untersuchungen an der Transekte führten zu einem theoretischen Modell der **Sauerstoffaufnahme infolge des Betriebsbeginns**, dargestellt in Fig. 16:

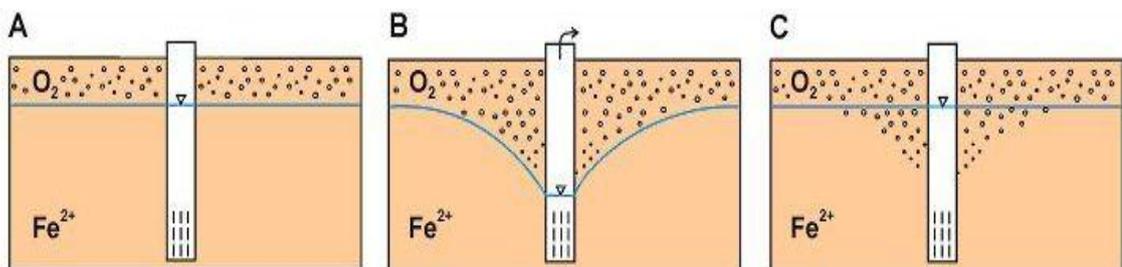


Fig. 16: Schematische Darstellung der Sauerstoffaufnahme durch das Einschließen von Luft infolge des Brunnenbetriebs [FUB 2009]

Während der aus dem Einschalten resultierenden Absenkung gelangt Luft in den Bereich des Absenktrichters (vormals gesättigte Zone) (Fig. 16B). Nach dem Abschalten der Betriebspumpe wird der Absenktrichter wieder aufgefüllt, wobei Luftblasen eingeschlossen werden können, die dann im Porenraum verbleiben (Fig. 16C). Die Gase aus diesen Blasen können nun im Grundwasser gelöst werden und gelangen während der nächsten Betriebsphase in den Brunnen.

Dieser Vorgang läuft immer dann ab, wenn der Brunnen in Betrieb genommen und wieder abgeschaltet wird. Folglich begünstigt das häufige Schalten von Brunnen unter den oben beschriebenen hydrochemischen Bedingungen die Ausfällung von gelöstem Eisen und damit die (bio-)chemische Brunnenalterung.

Die Ergebnisse der **Eisenmassenbilanzierung** liefern einen wertvollen Hinweis für die Quantifizierung der Dimension der Ausfällungsrate. Der berechnete Rückgang der Eisenkonzentration ist höchstwahrscheinlich auf die Ausfällung von Eisenhydroxiden im Brunnen und in dessen Nachbarschaft zurückzuführen.

5.2.2 Einfluss der H₂O₂-Behandlung

Die Sauerstoffmessungen zeigen eine pilzförmige Ausbreitung des Sauerstoffs aus dem dissoziierten H₂O₂, während der Brunnen außer Betrieb ist (Fig. 17).

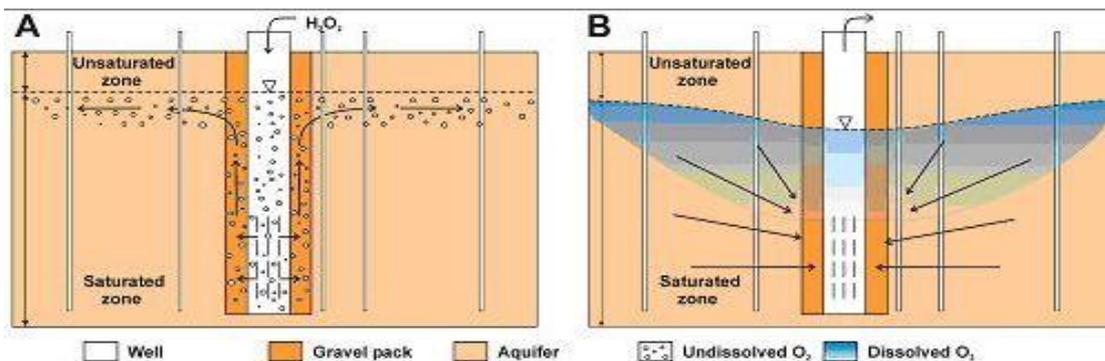


Fig. 17: Schematische Ansicht der Sauerstoffverteilung (A) während und (B) nach einer H₂O₂-Behandlung [FUB 2009]

Das Einschalten der Pumpe führt offensichtlich zu einer Verlagerung des Sauerstoffs in tiefere Schichten des Grundwasserleiters, was eine Änderung der physikochemischen Bedingungen zur Folge hat.

Die zusätzliche Einbringung von Sauerstoff könnte sowohl die biologische als auch die chemische Verockerung begünstigen und so dem durch die Desinfektion gegebenen Vorteil entgegenwirken. Weitere Untersuchungen, u. a. auch zur Dosierung und Häufigkeit der Anwendung sind erforderlich.

Das **Ein- und Ausschalten** scheint einer der entscheidenden Faktoren zu sein, die zu Mischprozessen, Sauerstoffaufnahme und erhöhtem Alterungspotential führen. Die BWB berücksichtigen diese Erkenntnis bereits und haben die Brunnen auf Grundlage des Vorhandenseins sichtbarer Ablagerungen (Kamerabefahrung) in Kurz-, Mittel- und Dauerläufer gruppiert.

Eine Quantifizierung der Schalteffekte z. B. durch die Quantifizierung der Sauerstoffaufnahme und der nachfolgenden Reaktionskinetik ist jedoch nie erfolgt. Deshalb sollten weitere Untersuchungen in WELLMA2 die folgenden Arbeiten einschließen:

- Tiefenorientierte Probenahmen zur Ermittlung der Redox-Schichtung
- Online-Messungen mit Optoden während des Abschaltens, um die Sauerstoffverteilung und den nachfolgenden Verbrauch zu ermitteln
- Berechnung der Sättigungsindizes und geochemische Modellierung, um die Ausfällungsraten zu quantifizieren
- Hydrochemische und mikrobiologische Untersuchungen, um regelmäßig geschaltete und kontinuierlich betriebene Brunnen zu vergleichen (vgl. Kapitel 3.3)

Dabei muss berücksichtigt werden, dass Änderungen im Betrieb einen Prozess behindern, andere aber fördern könnten. Deshalb sollten bei der Beurteilung der Auswirkungen auch mögliche Vorteile des Ein- und Ausschaltens berücksichtigt werden, z.B.:

- Modellierung von Spitzen der Strömungsgeschwindigkeit während des Einschaltens, um Scherkräfte zu ermitteln, die (1) die Haftung von Biofilmen auf Oberflächen beeinträchtigen und (2) sich auf die Mobilisierung von Partikeln auswirken.

Vorteile ergeben sich unter Umständen aus dem Einsatz von **frequenzgesteuerten Tauchpumpen**, deren Betrieb die Möglichkeit gibt, plötzliche Änderungen des Wasserspiegels zu verhindern. Mit solchen Pumpenarten können Änderungen der gesamten aus einer Brunnengalerie entnommenen Wassermenge auf alle Brunnen der Galerie verteilt werden, was in den einzelnen Brunnen nur zu geringen Änderungen des Wasserspiegels führt. Dies sollte weiter untersucht werden

Für eine zuverlässige **Analyse der Sauerstoffkonzentration** werden Sauerstoffsonden empfohlen, die auf optischen Messprinzipien beruhen (Optoden).

Hier könnten die in der Transekte installierten Optoden für vergleichende Messungen und die Bewertung eventueller Auswirkungen der langfristigen Exposition, z.B. Verockerung des optischen Sensors genutzt werden.

Insbesondere bezüglich der **vorbeugenden Behandlung mit H₂O₂** scheint es eine Diskrepanz zwischen der Theorie und den Beobachtungen in der Praxis zu geben.

Wie oben festgestellt wurde, wirkt H₂O₂ als Desinfektionsmittel, ist aber gleichzeitig eine Sauerstoffquelle. Um die Vorteile der vorbeugenden H₂O₂-Behandlung besser einschätzen zu können, werden die folgenden Untersuchungen empfohlen:

- Laboruntersuchungen mit Belagsproben und H₂O₂: Lösemitteltests
- Laborversuche zum Einfluss von H₂O₂ auf Mikroorganismen: Effektivität der Desinfektion
- Tank- und Feldversuche (Transekte) mit verschiedenen H₂O₂-Konzentrationen und –mengen: Reichweite der Sauerstoffverteilung in Abhängigkeit zur Dosis

Außerdem sollten weitere in Betrieb befindliche Brunnen der BWB einbezogen werden, beispielsweise für einen Vergleich von ansonsten identischen Brunnen, von denen der eine behandelt wird, der andere nicht und es sollte ermittelt werden, welchen Einfluss das Beenden der Behandlung (Vergleich von zwei in ihrer Konstruktion und ihren Betriebsparametern identischen Brunnen, von denen einer weiterbehandelt wird, einer nicht) hat.

Kapitel 6 Empfehlungen

6.1 Brunnenüberwachung

Aus den bisherigen Betrachtungen geht hervor, dass ein optimiertes Brunnenmanagement vor allem auf einer integrierten Überwachungs- und Diagnosestrategie beruht. Daher zielen die wichtigsten Empfehlungen auf eine Optimierung der **Überwachung und Diagnose** ab:

- regelmäßige Messungen nach standardisierten Verfahrensanweisungen (Überwachungsstrategie),
- Datenverarbeitung und -analyse und
- anschließende Anpassung der Überwachungsstrategie.

⇒ Nur eine gut geplante Überwachung mit anschließender Datenverarbeitung und Analyse ermöglicht es, Prozesse und Wechselwirkungen zu verstehen und herauszufinden, wo es Raum für Verbesserungen im Brunnenbetrieb gibt.

⇒ Eine solche Überwachungsstrategie muss zusammen mit weiteren statistischen Auswertungen und in engem Kontakt mit den Brunnenbetreibern entwickelt werden.

Die Ergebnisse der während WELLMA1 durchgeführten statistischen Analyse (Kapitel 3) unterstützen diese Erkenntnis:

Grundsätzlich sollte die Variabilität der Daten durch **genauere und vergleichbarere Messungen** verringert werden. Sicherlich wird es nicht möglich sein, die Messstrategien kurzfristig umzustellen. Langfristig wird es aber vorteilhaft sein, für alle Parameter jeweils gleiche Messverfahren zu verwenden. Ein Beispiel ist das automatische Aufzeichnen der Betriebsstunden und der Fördermenge.

Eine detaillierte **Validierung der Betriebsparameter** Δh , Betriebsstunden und Fördermenge wird die Vergleichbarkeit der Daten erhöhen und damit die Ableitung von Beziehungen zwischen den Parametern und der Verockerungsneigung erlauben.

Besonders empfehlenswert erscheint die Vorgabe einer detaillierten **Klassifikationsmatrix für die Bewertung des Brunnenzustands anhand der Bilder aus Kamerabefahrungen**, da man so zu einer systematischen Beschreibung des Brunnenzustands kommt, die ein wertvoller Parameter für eine weitere vergleichende Datenanalyse ist. In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Klassifizierung nur in vier Verockerungsstufen und unterscheidet nicht zwischen der Art und dem Ort der Beläge. Vermutlich würde eine genauere Unterteilung eine bessere Korrelation zu den Brunnenleistungsdaten sichtbar machen. Wir empfehlen eine Matrix mit einer Klassifizierung entsprechend der Intensität der sichtbaren Ablagerungen in Kombination mit einer Einordnung nach dem Ort der Ablagerungen, wobei zwischen den drei Möglichkeiten Filterstrecke, Pumpe/ Steigrohr und Vollrohr unterschieden werden sollte. Diese **Klassifizierung** sollte schon **vor Ort von dem die Kamerabefahrung durchführenden Sachbearbeiter** vorgenommen werden. Während in den Arbeitsbericht zusätzlich Einzelheiten zur Farbe und Struktur der Ablagerungen aufgenommen werden könnten, sollte die Datenbank nur einen Klassifikationsindex, gebildet aus der Stärke und Lage der Beläge aufgezeichnet werden. Die endgültige **Entwicklung einer Matrix** sollte in Zusammenarbeit mit Fachleuten aus den technischen Abteilungen erfolgen, also auch mit den Mitarbeitern, die für die Durchführung der Kamerabefahrungen zuständig sind.

In der Betriebspraxis gilt **Qs** noch immer als der beste Überwachungsparameter. Wie die statistische Bewertung gezeigt hat, könnte seine Messung aber verbessert werden, um ihn besser vergleichbar zu machen. In WELLMA-1 initiierten Projektmitarbeiter des KWB und der FU Berlin die **digitale Erfassung des Abnahmepumpversuchs** in der Datenbank der Berliner Brunnendaten. Diese Daten werden zukünftig für eine detailliertere Auswertung der spezifischen Ergiebigkeit **Qs** einzelner Brunnen zur Verfügung stehen. Damit kann zusätzlich nachgeprüft werden, ob die hydraulischen Bedingungen im Grundwasserleiter gespannt oder ungespannt sind. Die Untersuchung der französischen Daten zeigte den Nutzen einer solchen Beurteilung.

Im besten Fall sollten alle **Pumpversuche** an einem Brunnen **mit gleicher Dauer und bei gleicher Fördermenge** erfolgen, um vergleichbar zu sein. Außerdem wäre es günstig, wenn bei den Berliner Brunnen – wie in Frankreich – **Qs** regelmäßiger gemessen würde. Starke Schwankungen einzelner Werte können dann durch eine Trendanalyse für den jeweiligen Zeitraum kompensiert werden.

Ein Vorschlag ist, die **Qs-Messungen mit den Ergebnissen der Klassifikationsmatrix der Kamerabefahrungen zu kombinieren**, um in der Zukunft zu einer optimierten Bewertung des Brunnenzustands zu kommen.

Die Feldversuche im Rahmen von WELLMA1 haben gezeigt, dass nur eine Kombination von Methoden zu einer frühen Identifizierung und Diagnose von Alterungsprozessen führt. Die Anwendung der oben beschriebenen Methoden hat schon jetzt gezeigt, dass die folgenden Möglichkeiten einer Verbesserung des Vorgehens bei der Brunnenüberwachung bestehen:

- Die Anfangsbewertung eines Brunnens (bei Betriebsbeginn) sollte zusätzlich zu dem abgestuften Entnahmetest folgende Tests einschließen: eine GG.D, FLOW und Packer-FLOW zur Ermittlung des Anfangszustands der Kiesschüttung als Basis für die spätere Einschätzung von Hohlraumgehalt und Durchlässigkeit, um zwischen geologisch bewirkten Zustromverteilungen und dem Rückgang durch Brunnenalterungsprozesse (Ablagerungen in der Kiesschüttung) zu unterscheiden.
- Kurze Pumptests eignen sich zur Routineüberwachung der Brunnenleistung, wenn sie (am jeweiligen Brunnen) mit konstanter Pumprate und Dauer durchgeführt werden.
- Für eine Kontrolle von Regenerierungsmethoden liefern mehrstufige Pumpversuche die erforderlichen Informationen. Sie sollten, soweit möglich, mit konstanter Pumprate und Dauer durchgeführt werden. Die Pumpstufen sollten während des Abnahmepumpversuchs nach dem Bau des Brunnens festgelegt werden.

Nur kontinuierliche oder regelmäßige Messungen und eine gut geplante Datenverarbeitung liefern frühe Hinweise auf eine Verschlechterung.

Dazu sollten zunächst Schwellenwerte festgelegt werden, deren Überschreiten ein Eingreifen auslöst. Dies könnte entweder eine maximal zulässige Absenkung (bei einer bestimmten Entnahmegeschwindigkeit), die Wasserstandsdifferenz Δh oder ein Leistungsabfall (**Qs**) sein, oder einfach das Vorhandensein von Ablagerungen (oder von Korrosion usw.), die bei einer Kamerainspektion entdeckt worden sind.

Je früher Gegenmaßnahmen begonnen werden, desto größer sind der Erfolg und die Nachhaltigkeit. Ein detaillierter **Überwachungsplan** muss **Betriebsparameter** einschließen (wenn diese nicht kontinuierlich gemessen werden), um die **Brunnenleistung** zu ermitteln, sowie regelmäßige zusätzliche Untersuchungen, um den **Brunnenzustand** zu.

6.2 Brunnenbetrieb

Betrachtet man die Ergebnisse der statistischen Datenanalyse im Hinblick auf Brunnenausbau und Brunnenbetrieb, ergibt sich die Empfehlung, **den Bau von Brunnen mit Filtern zu vermeiden, die weniger als 20 m tief unter der Geländeoberkante liegen.**

Außerdem erscheint es günstig, **die Betriebsstunden und die mittlere Fördermenge zu verringern**, um für den einzelnen Brunnen die Fracht von Eisen, Mangan und Nährstoffen zu verringern. Außerdem wird so die Schwankungsbreite der Betriebsbedingungen geringer.

Die beobachteten Relationen machen jedoch detailliertere Untersuchungen erforderlich.

6.3 Brunnenbau

In Bezug auf den Brunnenbau ergab die statistische Analyse eine Empfehlung:

- Die Oberkante des Rohrabschnittes sollte 20 m unter der Oberfläche liegen.

Dies führt gleichzeitig zu einem verstärkten Schutz gegen Kontamination durch Pathogene, wie aus der Literaturstudie für das Arbeitspaket 4 gefolgert werden konnte, und ist daher schon in den Brunnenkonstruktionsstandard der BWB aufgenommen worden.

Im Verlauf der Literaturstudie wurden einige interessante neue Verfahren für (1) die Brunnenkonstruktion und (2) eine bessere Zugänglichkeit für Regenerierverfahren gefunden, die hier kurz genannt werden sollen:

1. Die Nutzung von Glasperlen anstelle von Filterkies (Ochs Bohr GmbH, Nürnberg): Vorteile sind die homogene Korngrößenverteilung, die eine bessere Durchlässigkeit bewirkt, eine höhere Abrieb- und Bruchfestigkeit, das Fehlen von Verunreinigungen sowie glattere Oberflächen, die das Anhaften von Biofilmen oder Ausfällungen verhindern.

Die Vorteile sollten weiter eingeschätzt werden, und zwar einschließlich der Bewertung der Verockerungseigenschaften und des Verhaltens während der Regenerierung.

Die mögliche Einbeziehung von Labor- oder Feldversuchen mit Glasperlen als Kiesersatz im Rahmen von WELLMA2 wird mit dem technischen Personal von BWB und Veolia erörtert werden.

2. Die Nutzung der "symmetrischen Doppelkolbenkammer" (GCI und Pigadi, Berlin): Auf Grund der Ergebnisse numerischer strömungsmechanischer Modellierung und von Feldversuchen wurde ein neues Gerät für die Brunnenentwicklung und -entsandung vorgestellt. Der Vorteil besteht in einer größeren Reichweite, die zu höheren Transportgeschwindigkeiten und zur Aktivierung der kompletten Kiesschüttung bis hin zum brunnennahen Grundwasserleiter führt.

Da dieses Gerät in Zusammenarbeit mit Pigadi entwickelt wird, ist es schon an Brunnen der BWB und Veolia geprüft worden. Die Übertragung von Ergebnissen und eine mögliche Begleitung weiterer Feldversuche durch wissenschaftliche Untersuchungen im Rahmen des Projekts WELLMA wird mit den Beteiligten erörtert werden.

3. Die Ausstattung neuer Brunnen mit "Satellitenbohrlöchern" im brunnennahen Grundwasserleiter zur Einbringung von Chemikalien von außerhalb des Brunnens (HOWSAM 1995). Der Vorteil liegt in dem größeren hydraulischen Gradienten zum Brunnen hin. Chemikalien würden so jüngere und deshalb weniger schwere Verockerungen zuerst angreifen und dann besser in Richtung Brunnen wirken und so den gesamten Kiesraum erfassen können.

Da die BWB keine chemischen Regenerierungsmethoden anwenden, muss das Verfahren im Hinblick auf die Entwicklung von Richtlinien für den Brunnenbau in Berlin und auf weitere Feldforschung nicht berücksichtigt werden. Der Vorschlag könnte jedoch beim Bau eines neuen Brunnens in Frankreich berücksichtigt werden.

6.4 F+E Transfer

Für ein besseres Verständnis der Brunnenverockerung scheint es nützlich zu sein, insbesondere die mit der Verockerung zusammenhängenden Parameter **Tiefe des ersten Filters, mittlere Gesamtentnahme, Eisenkonzentrationen und Brunnenalter** detailliert zu beobachten.

Für *WELLMA-2* wird daher vorgeschlagen, zu untersuchen:

- (1) ob flache Brunnen eine höhere Verockerungstendenz aufweisen. Deshalb sollen mindestens zwei Brunnen gleicher Bauart mit gleichen Betriebskennwerten analysiert werden, die **Unterschiede in der Tiefe des ersten Filters** aufweisen. Zusätzlich wird eine Datenanalyse für die ermittelten Ausreißer dieser Korrelation (d.h. Brunnen, die keine Verockerung zeigen, obwohl ihr Filter oberflächennah ist, und umgekehrt) empfohlen.
- (2) zwei Brunnen **mit einem signifikanten Unterschied in der mittleren Fördermenge**, aber mit ähnlicher Bauart und ähnlichem Schaltschema auszuwählen. Um die Hypothese zu prüfen, dass Brunnen mit einer höheren mittleren Fördermenge mehr zur Verockerung neigen, muss der Brunnen mit der geringeren mittleren Fördermenge nicht verockert sein. Der mit der höheren mittleren Entnahme sollte hingegen verockert sein. Auch hier wird die Datenanalyse der Ausreißer vorgeschlagen.
- (3) die Betriebsbelastung, der Brunnen durch **unterschiedliche Schalthäufigkeiten** unterliegen, zu untersuchen. Dafür werden zwei Brunnen mit gleicher Fördermenge ausgewählt. Der eine Brunnen wird sehr oft geschaltet, der andere so selten wie möglich. Der Brunnen mit den hohen Schalthäufigkeiten sollte intensive Verockerung aufweisen, während der andere keine Verockerung aufweisen sollte. Auch in diesem Fall erfolgt zusätzlich eine Datenanalyse von Ausreißern.
- (4) Die Belastung eines Brunnens wird auch durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten vor allem beim Einschalten verursacht. Diese hängt ihrerseits wiederum vom Verhältnis zwischen Fördermenge und Eintrittsfläche des Filters (Filterlänge) ab. Daher sollen zwei weitere Brunnen ausgewählt werden, um die Abhängigkeit der Verockerung von **unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten** zu ermitteln.

Hierfür werden entweder zwei Brunnen mit gleicher Anzahl von Schaltungen und gleicher mittlerer Fördermenge, aber unterschiedlicher Filterlänge ausgewählt, oder solche mit unterschiedlichen Pumpraten. Der Brunnen mit dem kurzen Filter (oder hohem Pumpendurchsatz bei gleicher Filterlänge) wird vermutlich wegen der höheren Strömungsgeschwindigkeit und der damit verbundenen stärkeren Belastung stärker verockern als derjenige mit dem langen Filter.

- (5) **eine tiefenorientierte Beprobung der Eisen-, Mangan-, Nitrat- und Sauerstoffgehalten** im Brunnen und seinem Einzugsgebiet: Dazu gehören oberstromige Messungen und solche im Brunnen selbst, um die Massenbilanzen der Hydrochemie berechnen zu können.
- (6) Insbesondere der **Faktor Brunnenalter** sollte bei der Ausreißer-Analyse betrachtet werden. Erwartet werden Zusammenhänge zum Ausbaumaterial und zur Betriebsweise.
- (7) Die klassifizierten Kamerabefahrungen erbringen derzeit nur statische Informationen vom letzten Inspektionsdatum. Für weitere Untersuchungen sollte die **Zeitreihe aller verfügbaren Kamerabefahrungen** in die Datenbank integriert werden. Aus der daraus resultierenden Verockerungsrate (aus dem Intervall zwischen den Messungen) sollen dann Trends und Parameter zur Differenzierung der Brunnen ermittelt werden.

Die derzeitige Analyse zeigt, dass es vorzuziehen ist, sich auf einen kleinen, aber definierten Datensatz mit reduzierter Datenvariabilität zu konzentrieren. Deshalb wird vorgeschlagen, zunächst nur Brunnen mit umfangreichen Informationen aus Kamerabefahrungen in diese Auswertung einzubeziehen. Anschließend kann die Stärke eines gefundenen Trends mit einem umfangreicheren Datenbestand erneut geprüft werden, wie in der vorliegenden Analyse geschehen.

Die anschließende Datenanalyse kann genutzt werden, um zu untersuchen, ob bestimmte Verockerungsmerkmale typischen Standortbedingungen, Brunnenausbauten oder Betriebsweisen entsprechen. Erst wenn solche detaillierten Informationen über die Entwicklung der Verockerung in Abhängigkeit von den Brunnenparametern zur Verfügung stehen, kann das Brunnenmanagement entsprechend optimiert werden.

Zusätzlich können die Aufzeichnungen über die sichtbaren Beläge mit Qs-Messungen verglichen werden, denn der Nachteil der Kamerabefahrung als Diagnosewerkzeug besteht darin, dass sie nur für sichtbare Ablagerungen im Brunnen nicht aber für die Verockerungen im Filterkies anwendbar ist.

Ein besseres Verständnis der Verockerung erfordert weniger multivariate Wechselwirkungen aller Einflussfaktoren. Dies könnte mit den technischen und ökonomischen Interessen des Brunnenbetriebs konkurrieren. Deshalb muss die Umsetzung aller Empfehlungen zur Brunnenüberwachung, Diagnose und weiteren Untersuchungen im intensiven Gespräch mit den Betreibern ausgewertet werden.

Weitere Felduntersuchungen sollten ausgerichtet sein auf:

- (1) Methodvalidierung
 - Die Auswertung des Nutzens des Δh -Wertes und der Kombination von Qs-Messung und Kamera-Inspektion, um den Grad der Alterung und den Ort der Ablagerungen zu bestimmen
 - Input-Output-Berechnungen für die Eisen- und Sauerstoffkonzentrationen im Brunnen und der Brunnenumgebung, um die Menge der Eisenablagerungen zu ermitteln

Die technische Entwicklung des Horizontalkern-Entnahmegertes sollte fortgesetzt werden, um mithilfe von ct-Scans der Kerne die geophysikalischen Methoden und Partikelmessungen zu validieren.

(2) Methodenentwicklung

- Tiefenorientierte Probenahme zur Ermittlung der Redox-Klinen im Brunnen vor der Vermischung des Wassers aus unterschiedlichen Tiefen
- Kombinierte Untersuchung von Belags- und Biofilmproben mittels Mikroskopie und molekularbiologischer Methoden (DGGE und PCR), um ein auf qPCR beruhendes leicht anzuwendendes Instrument zur Quantifizierung des Vorhandenseins von Eisenbakterien zu entwickeln
- Mineralogische und mikrobiologische Beschreibung von Belagsproben aus verschiedenen Tiefen im Brunnen (z.B. Pumpe, Vollrohr, Filteroberteil, Filterende)
- stufenweise Kombination aus Qs-Messungen und der Entfernung von Ablagerungen (Pumpe, Bürsten, Regenerierung), um den Anteil der einzelnen Komponenten am gesamten Leistungsrückgang zu bestimmen

Stufenpumpversuche oder mindestens Kurzpumpversuche mit fester Pumprate sollten zu den Routinemessungen bei allen Brunnen gehören, damit die Daten in den Brunnenunterlagen zur Verfügung stehen.

(3) Wissenstransfer

- Korrelationen zwischen Bakteriengemeinschaften und den Lebensbedingungen im Brunnen (geochemische Beschreibung)
- Korrelationen zwischen dem Auftreten und der Geschwindigkeit von Verockerung und Brunnenbaustoffen sowie zwischen Baustoffen und verschiedenen Bakteriengemeinschaften (biochemische Untersuchungen)