

Datenanalyse, Risiko- und Potentialabschätzung zur Vermeidung von Verblockungen und Verockerungen bei Grundwassersanierungs- anlagen zur Aufbereitung altlastenrelevanter Grundwasserschäden

Dipl.-Ing. Natascha Kirfel, Aachen
Dipl.-Geologe Michael Altenbockum, Aachen

Inhaltübersicht

	Rdnr.
Abbildungsverzeichnis	
Tabellenverzeichnis	
Abstract	1 – 8
1 Verockerung und Verblockung	9 – 12
1.1 Grundlagen	9 – 12
2 Fallbeispiel A	13 – 71
2.1 Einführung	13, 14
2.2 Brunnenausbau	15 – 19
2.3 Förderraten der Sanierungsbrunnen	20 – 26
2.4 Darstellung der Chemie- und Biologiedaten	27 – 71
2.4.1 Grundwasserdaten aus den Sanierungsbrunnen	27 – 48
2.4.1.1 Untersuchungsparameter	27, 28
2.4.1.2 Vor-Ort-Parameter	29
2.4.1.3 Eisenvorkommnisse im Grundwasser	30 – 42
2.4.1.4 Ermittlung von biologischen Aktivitäten anhand der Koloniezahl	43 – 48
2.4.2 Auswertung der Analysedaten	49 – 71
3 Fallbeispiel B	72 – 109
3.1 Einführung	72
3.2 Anlagenaufbau und Probenahmestellen	73 – 76
3.3 Auswertung der Chemiedaten	77 – 102
3.3.1 Daten der Sanierungsanlage	77 – 102
3.3.1.1 Untersuchungsparameter	77, 78
3.3.1.2 Veränderung der Eisenkonzentration	79 – 85
3.3.1.3 Veränderung der Mangankonzentration	86 – 92
3.3.1.4 Veränderung der Calcium- und Hydrogencarbonatkonzentration	93 – 102
3.3 Auswertungen der Analysedaten	103 – 109
4 Risikoabschätzung zur Gefahr der Verockerung	110 – 131
4.1 Erkundung der hydrochemischen Verhältnisse im Untersuchungs- gebiet im Rahmen der Sanierungsplanung	110 – 117
4.1.1 Hohes Risiko zur chemischen Verockerung	112, 113

		Rdnr.
4.1.2	Hohes Risiko zur biologischen Verockerung	114, 115
4.1.3	Geringes Risiko zur Verockerung	116
4.1.4	Kein Risiko zur Verockerung	117
4.2	Monitoring zur Risikoabschätzung der Verockerung während des Anlagenbetriebs	118 – 127
4.2.1	Risiko zur Verockerung im Sanierungsbrunnen	122 – 124
4.2.2	Risiko zur Verockerung einzelner Anlagenkomponenten	125 – 127
4.3	Empfehlungen zur Vermeidung bzw. zur Minimierung von Verockerungen	128 – 131
5	Fazit	132 – 136
	Danksagung	
	Literatur	

Schlagwortübersicht nach Rdnr.

Betriebsstörungen 7a	Risiko zur Verockerung und
chemische, biologische und	Verblockung 110–127
physikalische Prozesse 4	Verblockung 2–4, 6–8,
Probleme im Anlagenbereich 2, 7a	Verockerung 2–4, 6–8

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Übersicht über den Ausbau der Sanierungsbrunnen	16
Abbildung 2.2:	Förderstrom der Sanierungsbrunnen in m ³ /h	21
Abbildung 2.3:	Verteilung von Sauerstoff und Eisen in den Sanierungsbrunnen	31
Abbildung 2.5:	Verteilung von Sauerstoff und Eisen bei unterschiedlichen Förderraten in den Sanierungsbrunnen SB 3 und SB 4	38
Abbildung 2.6:	Zeitlicher Verlauf der Förderrate und der Konzentration von gelöstem Eisen Fe (II)	42
Abbildung 2.7:	Zeitlicher Verlauf der Koloniezahl und der Förderrate im Brunnen SB 4	48
Abbildung 3.1:	Anlagenaufbau und Probennahmestellen	76
Abbildung 3.2:	Veränderung der Eisenkonzentration in der Aufbereitungsanlage vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2)	80
Abbildung 3.3:	Veränderung der Mangankonzentration in der Aufbereitungsanlage vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2)	87
Abbildung 3.4:	Veränderung der Hydrogencarbonatkonzentration HCO ₃ ⁻ in der Aufbereitungsanlage vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2)	94
Abbildung 3.5:	Veränderung der Calciumkonzentration Ca ²⁺ in der Aufbereitungsanlage vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2)	97
Abbildung 4.1:	Fließbild zur Erkundung der hydrochemischen Verhältnisse vor Errichtung von Förderbrunnen und Sanierungsanlagen zur Einschätzung des Verockerungsrisikos	111
Abbildung 4.2:	Fließbild zum Verockerungs- und Verblockungsrisiko während des Anlagenbetriebs	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Brunnenbetrieb des Sanierungsbrunnens SB 4	26
Tabelle 2.2:	mittlere Koloniezahl der Sanierungsbrunnen seit 2008	44
Tabelle 2.3:	Veränderung durch biologische Aktivitäten der Eisen Fe (II)- und Mangan Mn (II)- Konzentrationen vom Aquifer zum Brunnen SB 3	58
Tabelle 2.4:	Veränderung durch biologische Aktivitäten der Eisen Fe (II)- und Mangan Mn (II)- Konzentrationen vom Aquifer zum Brunnen SB 4	66
Tabelle 3.1:	Stöchiometrische Berechnung zur Ausfällung von Eisen	84
Tabelle 3.2:	Stöchiometrische Berechnung zur Ausfällung von Mangan	96
Tabelle 3.3:	Stöchiometrische Berechnung zur Ausfällung von Calciumcarbonat	101

Abstract

- 1 Im Rahmen meiner Diplomarbeit, die ich in Zusammenarbeit mit dem Büro Altenbockum & Partner, Geologen und dem Lehrstuhl für Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen geschrieben habe, wurden die **Ursachen für Verblockung und Verockerung** von Komponenten von Grundwassersanierungsanlagen für ausgewählte Sanierungsprojekte analysiert sowie eine Risiko- und Potentialabschätzung zur Vermeidung dieser Vorgänge gegeben.
- 2 **Verockerung** sowie **Verblockung** sind gravierende **Probleme** für Betreiber von Wasseraufbereitungsanlagen. Diese Prozesse stören den Anlagenbetrieb. Für den Betreiber solcher Anlage ist ein Unterbinden dieser Prozesse von großer Bedeutung, um zum einen den Ausfall der Anlage zu verhindern und zum anderen die Betriebskosten möglichst gering zu halten.
- 3 **Verockerungen** und **Verblockungen** treten bei vertikalen sowie horizontalen Förder- und Infiltrationsbrunnen, in verbindenden Leitungen, in Wasseraufbereitungsanlagen und in Oberflächengewässern auf.
- 4 Bei der **Verockerung** und auch bei der **Verblockung** wird zwischen **chemischen, biologischen und physikalischen Prozessen** unterschieden. In vielen Fällen kommt es zu einer Kombination dieser Prozesse.
- 5 Eine umfangreiche Literaturrecherche ergab, dass eine Verockerung durch bestimmte Voraussetzungen begünstigt wird. Es wird eine Mindestkonzentration

tration an im Wasser gelöstem Eisen bzw. Mangan vorausgesetzt, das Vorhandensein von Sauerstoff und ein diesen Prozess fördernder pH-Bereich sowie ein bestimmtes Redoxpotential.

Die in der Theorie erarbeiteten Voraussetzungen wurden anhand von ausgewählten Sanierungsanlagen und deren Förderbrunnen in der Praxis überprüft. Hierzu wurden Anlagen ausgewählt, bei denen es bereits häufiger zu Betriebsausfällen einzelner Anlagenkomponenten bzw. der gesamten Anlage aufgrund von **Verockerung** und **Verblockung**, gekommen ist. 6

Die Auswertungen ergaben, dass in vielen Fällen die in der Literatur beschriebenen Voraussetzungen zur **Verockerung** gegeben sind. Diese Voraussetzungen alleine fördern die **Verockerung** und **Verblockung**, aber sie sind nicht der maßgebliche Auslöser. Verockerungen und Verblockungen können schon durch geringe Veränderungen des Milieus ausgelöst werden. Die Veränderungen sind häufig auf einfache Ursachen zurückzuführen. Bereits kleine Änderungen des Anlagenbetriebs können eine **Verockerung** bzw. **Verblockung** verursachen. 7

Das **Risiko**, dass **Verockerungen** und **Verblockungen** während des Anlagenbetriebs auftreten, kann durch gezielte Untersuchungen im Vorfeld bestimmt werden. Besteht das **Risiko**, dass es zu **Verockerung** oder **Verblockung** kommen kann, können bereits einfache Maßnahmen im Anlagenbetrieb helfen, um die Gefahr von **Betriebsstörungen** zu minimieren bzw. zu verhindern. Hierdurch können die Betriebskosten aufgrund geringer Wartungskosten gesenkt werden. 7a

Mit Hilfe der in dieser Arbeit genannten Voraussetzungen sollen Risiken für **Verockerungen** und **Verblockungen** frühzeitig erkennbar gemacht und unter Anwendung der aufgeführten Maßnahmen reduziert bzw. behoben werden. 8

1 Verockerung und Verblockung

1.1 Grundlagen

Bei Anlagen, die zur Wasseraufbereitung genutzt werden, kann es mit der Zeit zum Leistungsrückgang kommen. Dies kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Der Leistungsrückgang tritt in verschiedenen Bereichen einer Wasseraufbereitungslage in unterschiedlicher Intensität auf. Bei der Ursachensuche sollte nicht nur die Anlage selbst, sondern auch die Wasser fördernden Brunnen sowie die verbindenden Rohrleitungen untersucht werden. Der Leistungsrückgang in Brunnen ist auf eine Verdichtung 9

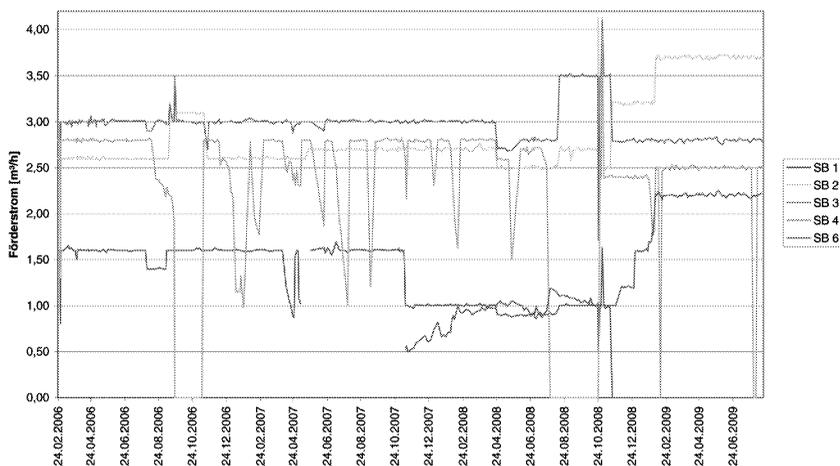
der Wassereintrittsfläche aufgrund von Verstopfungen der Hohlräume im Filterkies, der Filterrohrschlitze und des nahe liegenden Aquifers zurückzuführen. Ein Grund dieser Verstopfungen ist die Inkrustation von Brunnen. Als Inkrustationen werden Ablagerungen von im Wasser gelösten Substanzen bezeichnet. Diese Ablagerungsprozesse können durch chemische, biologische und physikalische Prozesse hervorgebracht werden. Inkrustation ist eine Form der Brunnenalterung. Im DVGW Merkblatt W 130 (2007) werden Inkrustationen in Versinterung, Versandung, Verschleimung, Aluminiumausfällung und Verockerung unterschieden, wobei Verockerungen am häufigsten auftreten.

- 10 Unter der Verockerung wird die Ablagerung von Eisen- bzw. Manganoxidhydraten und Hydroxidverbindungen verstanden, d. h. im Wasser gelöstes zweiwertiges Eisen oder Mangan werden zu unlöslichen dreiwertigen Eisenverbindungen oder drei- bzw. vierwertigen Manganverbindungen überführt.
- 11 In den einzelnen Komponenten der Wasseraufbereitungsanlagen kann es auch neben Verockerungen auch zu Verstopfungen bzw. zu Verblockungen kommen. Diese Verblockungen können genau wie Verockerungen durch chemische, physikalische und biologische Prozesse verursacht werden. Durch chemische Prozesse kann es zur Umwandlung von einzelnen im Wasser gelöster Substanzen kommen, die später ausfallen und die Poren beispielsweise eines Aktivkohlefilters verstopfen. Bei physikalischen Prozessen kann der Austrag einzelner Materialien aus dem Filter in andere Anlagenkomponenten ein Verblocken dieser mit sich führen. Biologische Prozesse finden nur dann statt, wenn eine ausreichende Anzahl an Bakterien und Mikroorganismen vorhanden sind. Diese wandeln im Wasser befindliche Substanzen um und scheiden diese als feste Partikel wieder aus. Weiterhin kann es zu einer Entwicklung eines Biofilms kommen, der ebenfalls ein Verblocken einzelner Anlagenteile verursachen kann.
- 11 Das Risiko zur Verockerung und Verblockung kann bereits bei der Planung einer Sanierungsmaßnahme abgeschätzt und durch entsprechende Maßnahmen können Verockerungen und Verblockungen minimiert werden.
- 12 Anhand von Praxisbeispielen wurden mögliche Maßnahmen zur Vorbeugung und zur frühzeitigen Erkennung von Verblockungen und Verockerungen erarbeitet.

- 18 Als Filter- und Stützmaterial wurde Quarzkies verwendet. Dieser wurde in einer Tiefe von 3,5 m unter GOK bis zur Endteufe eingebaut. Die Filterkies-schüttung liegt im Bereich der ungesättigten Bodenzone. Oberhalb des Filterkieses wurde eine Tonabdichtung eingebaut.
- 19 Der Grundwasserstand im Quartär beträgt im Mittel 3,55 m unter GOK. Dieser unterliegt natürlichen Schwankungen. Der bislang höchste Wasserstand betrug 3,0 m unter GOK und der niedrigste Stand wurde bei 3,6 m unter GOK gemessen. Der Grundwasserschwankungsbereich liegt außerhalb der Filterstrecke und der Filterkiesschüttung.

2.3 Förderraten der Sanierungsbrunnen

- 20 In Abbildung 2.2 ist die Entwicklung des Förderstroms der Sanierungsbrunnen in m^3/h dargestellt. Der Förderstrom wird in regelmäßigen Abständen erfasst.
- 21 **Abbildung 2.2:** Förderstrom der Sanierungsbrunnen in m^3/h



- 22 Bislang wurden nicht alle Sanierungsbrunnen regelmäßig betrieben. Der Sanierungsplan sieht vor, dass zuerst die Brunnen im östlichen Teil des ehemaligen Fabrikgeländes betrieben werden, da in diesem Bereich die Hauptkontamination vorliegt. Mit der Abnahme der Kontamination wird die Sanierung weiter in den Westen verlagert. Aus diesem Grund wurde der Sanierungsbrunnen SB 1 im November 2008 außer Betrieb genommen und

der Sanierungsbrunnen SB 6 ist seit November 2007 in Betrieb. Die Sanierungsbrunnen SB 5 und SB 7 waren bislang nicht in Betrieb.

Die Förderraten der Sanierungsbrunnen SB 1, SB 2 und SB 6 sind ungestört und konstant. Leichte Zu- oder Abnahmen der Förderraten sind auf kurzfristige anlagenbedingte Eingriffe zurückzuführen. Bei diesen Brunnen sind bislang keine Verockerungen aufgetreten. 23

Der Sanierungsbrunnen SB 3 weist auch konstante Förderraten auf. Zu Beginn wird dieser mit einer Förderrate von 3,0 m³/h betrieben. Nachdem die Förderrate im August 2008 auf 3,5 m³/h erhöht wird, treten Verschlämmungen in der Steigleitung auf. Diese werden durch die Reduzierung der Förderrate auf 2,8 m³/h im November 2008 minimiert. 24

Der Brunnen SB 4, der stark verockert, zeigte in den ersten Betriebsmonaten ebenfalls konstante Förderraten von 2,8 m³/h. Nach einem halben Betriebsjahr kommt es zum Leistungsrückgang des Brunnens. Der Brunnen wird außer Betrieb genommen. Die Brunnenpumpe wird erneuert und die Steigleitung wird gemolcht. Sowohl die Brunnenpumpe als auch die Steigleitungen weisen starke Verschlämmungen auf. Nach Inbetriebnahme mit der gleichen Sollförderleistung kommt es weiterhin zu monatlichen Leistungsrückgängen und Ausfällen der Förderpumpe. Die Pumpe wird in regelmäßigen Abständen erneuert und die Leitungen werden gemolcht. Im Frühjahr 2008 wird die Sollförderleistung des Brunnens von 2,8 m³/h auf 2,6 m³/h reduziert. Es kommt weiterhin zu Ausfällen der Pumpe. Nachdem eine mechanische Regeneration des Brunnens SB 4 im Oktober 2008 stattgefunden hat und die Sollförderleistung auf 2,5 m³/h reduziert wurde, werden die Intervalle zwischen einzelnen Ausfällen der Brunnenpumpe größer. In Tabelle 2.1 sind der zeitliche Verlauf, die Änderungen der Förderraten und die Ausfälle des Brunnens SB 4 aufgeführt. 25

Tabelle 2.1: Brunnenbetrieb des Sanierungsbrunnens SB 4

26

Datum	Förderrate	Bemerkung
Feb. 2006 – Sep. 2006	2,8 m ³ /h	konstante Förderleistung
Sep. 2006 – Nov. 2006	0,0 m ³ /h	Ausfall des Brunnens
Nov. 2006 – Apr. 2008	2,8 m ³ /h	monatlicher Ausfall des Brunnens
Apr. 2008 – Jul. 2008	2,6 m ³ /h	einmaliger Ausfall des Brunnens

Datum	Förderrate	Bemerkung
Jul. 2008 – Okt. 2008	0,0 m ³ /h	Ausfall des Brunnens
Okt. 2008	0,0 m ³ /h	mechan. Regenerierung
Nov. 2008 – Sep. 2009	2,5 m ³ /h	zweimaliger Ausfall des Brunnens

2.4 Darstellung der Chemie- und Biologiedaten

2.4.1 Grundwasserdaten aus den Sanierungsbrunnen

2.4.1.1 Untersuchungsparameter

- 27 In den Sanierungsbrunnen werden in regelmäßigen Abständen die Schadstoffgehalte, die Konzentration von Eisen- und Mangan, die Vor-Ort-Parameter und die Koloniezahl bestimmt.
- 28 Für die Problematik der Verockerung sind die Konzentrationen von Eisen und Mangan, die Vor-Ort-Parameter (Sauerstoff, pH-Wert und Redoxpotential) sowie die Koloniezahlen wichtig. Aus diesem Grund wird im Weiteren nicht auf die für die Beschreibung von Verockerung unwesentliche Entwicklung der Schadstoffverteilung eingegangen.

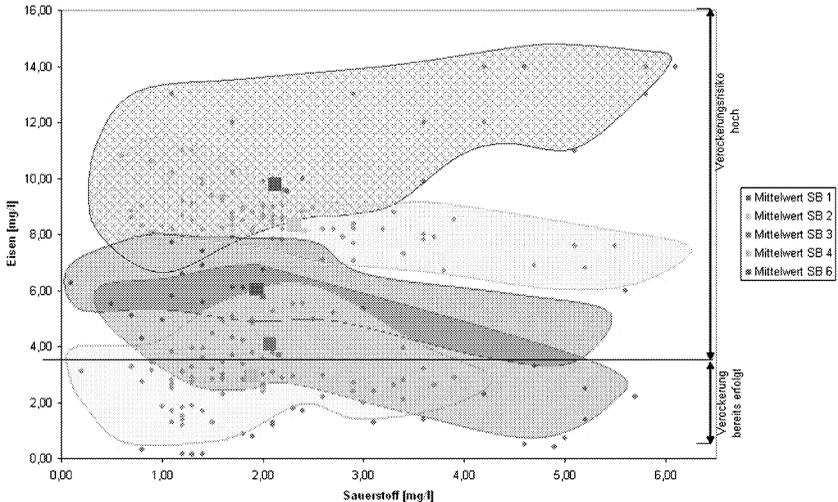
2.4.1.2 Vor-Ort-Parameter

- 29 Der pH-Wert liegt bei allen Sanierungsbrunnen im neutralen bis leicht basischen Bereich zwischen 6,8 und 8,0. Das Redoxpotential schwankt bei den Brunnen SB 1, SB 2 und SB 6 zwischen 100 und 300 mV. In den Brunnen SB 3 und SB 4 beträgt das Redoxpotential zwischen 0 und 300 mV.

2.4.1.3 Eisenvorkommnisse im Grundwasser

- 30 Abbildung 2.3 zeigt die Verteilung von Sauerstoff und Eisen in den Sanierungsbrunnen und den Bereich, in dem es zur Verockerung gekommen ist.

Abbildung 2.3: Verteilung von Sauerstoff und Eisen in den Sanierungsbrunnen 31



Die gelösten Eisenkonzentrationen sind in den Brunnen sehr unterschiedlich. Sie betragen zwischen 0,5 bis 14,0 mg/l. Die Konzentrationen von Sauerstoff liegen zwischen 0,5 bis 6,2 mg/l. 32

Die gelösten Eisenkonzentrationen der Sanierungsbrunnen SB 1, SB 2 und SB 6 liegen über 6 mg/l. Bei diesen Brunnen sind keine Verockerungen aufgetreten. 33

Im Brunnen SB 3 beträgt die Konzentration von gelöstem Eisen zwischen 1,5 und 5,0 mg/l. In diesem Brunnen sind leichte Verockerungen anhand von Verschlämungen in der Steigleitung zu erkennen.

Verockerungen treten vor allem im Brunnen SB 4 auf. Die Konzentrationen des gelösten Eisens liegen hier zwischen 0,5 und 3,0 mg/l. 34

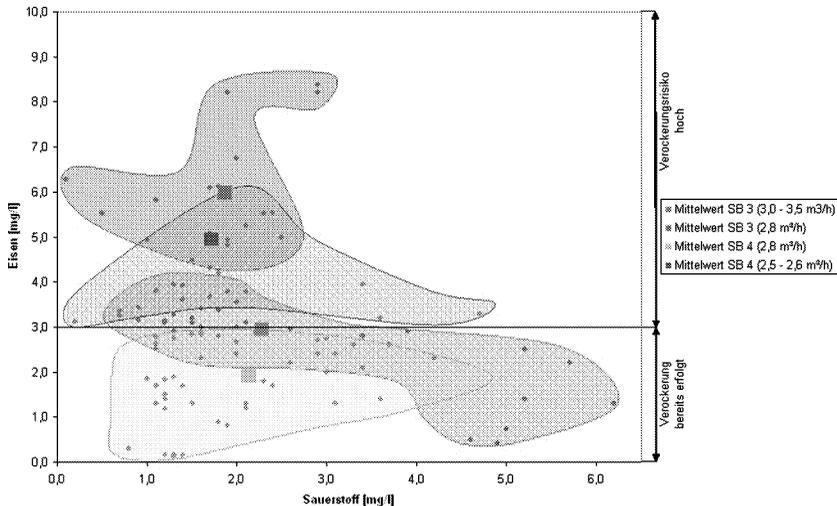
Nach den vorliegenden Beobachtungen sind Verockerungen bereits bei gelösten Eisenkonzentrationen unterhalb von 3,0 mg/l aufgetreten. Bei Eisenkonzentrationen um die 3,0 mg/l sind leichte Verockerungen zu erkennen. Bei Konzentrationen, die deutlich über 3,0 mg/l liegen, sind keine Verockerungen aufgetreten. 35

Ein Vergleich der Konzentration von gelöstem Eisen vor und nach Beginn der Sanierungsmaßnahme zeigt, dass die erhöhten Eisengehalte von 8,0 mg/l im Aquifer bis zu den Sanierungsbrunnen SB 3 und SB 4 deutlich 36

reduziert werden. Die niedrigen Eisenkonzentrationen von zum Teil weniger als 3,0 mg/l im Förderwasser können Hinweise auf Verockerungen geben.

37 Abbildung 2.5 zeigt eine detaillierte Verteilung von Eisen und Sauerstoff bei unterschiedlichen Förderraten des zur Verockerung neigenden Sanierungsbrunnens SB 3 und des verockerten Brunnens SB 4.

38 **Abbildung 2.5:** Verteilung von Sauerstoff und Eisen bei unterschiedlichen Förderraten in den Sanierungsbrunnen SB 3 und SB 4

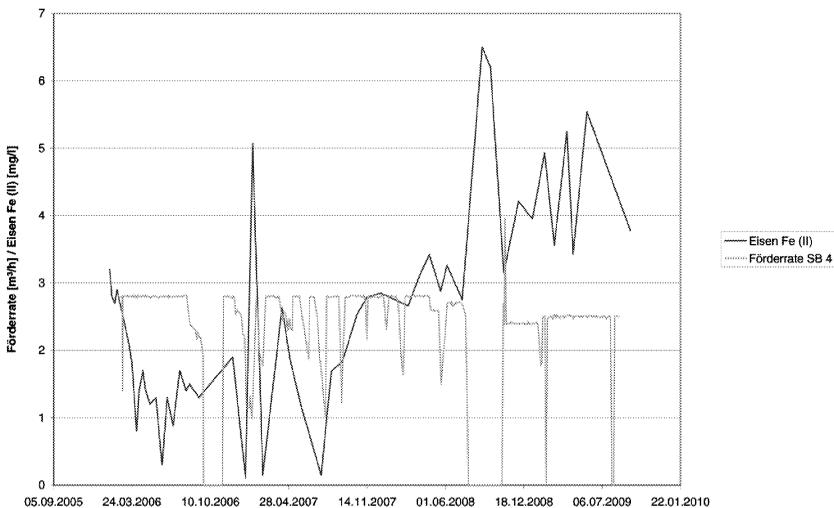


39 Der Brunnen SB 3 wird während der Sanierungsmaßnahme mit unterschiedlichen Förderraten betrieben. Bei einer Förderleistung von 3,0 bis 3,5 m³/h liegt der Anteil an gelöstem Eisen zum großen Teil unterhalb von 3,0 mg/l. Der Anteil an gelöstem Eisen nimmt mit sinkender Förderrate zu. So beträgt die Eisenkonzentration bei einer Förderrate von 2,8 m³/h zwischen 4,0 bis 6,0 mg/l. Die durchschnittliche Sauerstoffkonzentration von 2,2 mg/l nimmt bei Reduzierung der Förderrate um durchschnittlich 0,5 mg/l ab. Bei einer reduzierten Förderrate von 2,8 m³/h beträgt die Sauerstoffkonzentration durchschnittlich 1,7 mg/l. Die beobachteten Verschlämungen der Steigleitung, die vor allem bei der erhöhten Förderrate von 3,5 m³/h aufgetreten sind, wurden durch die Reduzierung der Brunnenleistung minimiert.

Der Brunnen SB 4 wird ebenfalls mit unterschiedlichen Förderraten betrieben. Die Konzentration des im Wasser gelösten Eisens nimmt auch in diesem Fall mit Reduzierung der Förderrate zu und gleichzeitig werden die nötigen Reinigungsintervalle der Brunnenpumpe sowie der Rohrleitungen größer. Zu Beginn lagen bei einer Förderrate von 2,8 m³/h Eisenkonzentrationen unterhalb von 3,0 mg/l vor. Durch Reduktion der Förderrate über zunächst 2,6 m³/h auf aktuell 2,5 m³/h nahm der Anteil des im Wasser gelösten Eisens zu. Es liegen nun Eisenwerte zwischen 3,0 bis 6,0 mg/l vor. Die durchschnittliche Sauerstoffkonzentration von 2,1 mg/l nimmt bei Reduzierung der Förderrate um durchschnittlich 0,3 mg/l ab. Bei einer reduzierten Förderrate von 2,5 m³/h beträgt die Sauerstoffkonzentration durchschnittlich 1,8 mg/l. Durch die Reduktion der Förderleistung nimmt die Verockerung ab. Dies ist anhand der geringeren Ausfälle der Brunnenpumpen zu erkennen.

Die Änderungen des im Wasser gelösten Eisens durch Veränderung der Förderrate sind beim Sanierungsbrunnen SB 4 gut zu erkennen. Bei Abnahme der Förderrate nimmt der Anteil an gelöstem Eisen zu. Dies ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

Abbildung 2.6: Zeitlicher Verlauf der Förderrate und der Konzentration von gelöstem Eisen Fe (II)



2.4.1.4 Ermittlung von biologischen Aktivitäten anhand der Koloniezahl

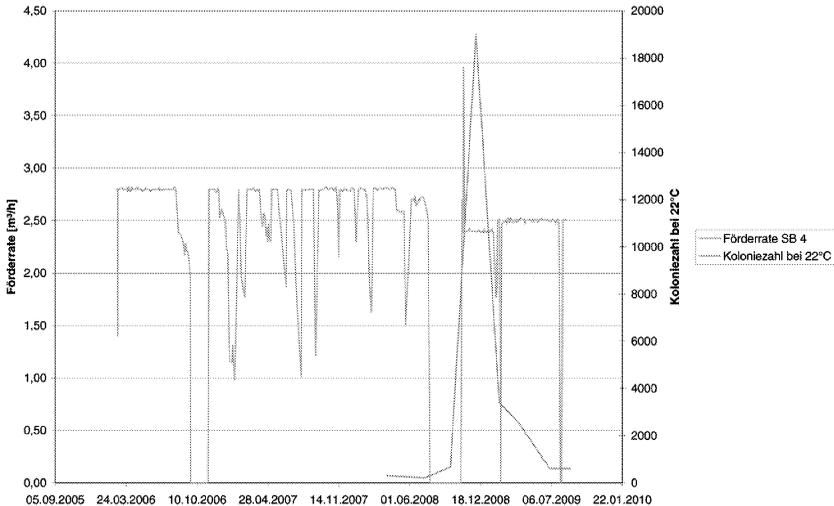
- 43 Untersuchungen der Koloniezahlen geben Hinweise auf biologische Aktivitäten in den Sanierungsbrunnen. Seit April 2007 werden die Koloniezahlen bei 22 °C und 36 °C untersucht. Im Grundwasser liegen durchschnittliche Temperaturen von 13 bis 15 °C vor. Aus diesem Grund werden zur Beurteilung der kolonie-bildenden Einheiten im Wasser nur die Ergebnisse der Koloniezahluntersuchungen bei 22 °C herangezogen. Tabelle 2.2 zeigt die mittleren Koloniezahlen in den einzelnen Sanierungsbrunnen.
- 44 **Tabelle 2.2:** *mittlere Koloniezahl der Sanierungsbrunnen seit 2008*

Sanierungsbrunnen	Koloniezahl bei 22 °C pro ml
SB 1	85
SB 2	20
SB 3	400
SB 4	800
SB 6	20

- 45 In den Brunnen SB 3 und SB 4 sind die Keimzahlen bei 22 °C deutlich erhöht. Diese betragen im Brunnen SB 3 durchschnittlich 400 KBE pro ml und im Brunnen SB 4 800 KBE pro ml. In den anderen Sanierungsbrunnen liegen die Koloniezahlen unter 100 KBE pro ml.
- 46 In Abbildung 2.7 ist die Änderung der Koloniezahl bei Veränderung der Förderrate für den Brunnen SB 4 dargestellt.
- 47 Die Koloniezahlen betragen bei der ersten Untersuchung im April 2007 7.200 KBE pro ml. Zu diesem Zeitpunkt wird der Brunnen SB 4 mit einer Förderrate von 2,8 m³/h betrieben. Im April 2008 wird die Förderrate auf 2,6 m³/h gesenkt. Die Messung der KBE ergab eine Reduzierung der Koloniezahlen auf 3.000 KBE pro ml. Während des dreimonatigen Brunnenausfalls 2008 änderte sich die Koloniezahl nicht. Bei Inbetriebnahme des Brunnens mit einer Förderrate von 2,5 m³/h steigt die Koloniezahl einmalig auf 19.000 KBE an. Nach dieser Erhöhung sinkt die Koloniezahl jedoch stetig. Zurzeit liegt diese bei 600 KBE pro ml.

Abbildung 2.7: Zeitlicher Verlauf der Koloniezahl und der Förderrate im Brunnen SB 4

48



2.4.2 Auswertung der Analysedaten

Bei den Brunnen SB 1, SB 2 und SB 6 sind bislang keine Verockerungen aufgetreten. 49

Die Förderrate liegt in diesen Brunnen mit Ausnahme des Brunnen SB 2 unter $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Im Brunnen SB 2 wurde die Förderrate in den letzten Monaten bis auf $3,7 \text{ m}^3/\text{h}$ erhöht. Trotz der Erhöhung der Förderrate sind bislang keine Verockerungen aufgetreten. 50

Die Konzentrationen von gelöstem Eisen und Mangan haben sich bei den Sanierungsbrunnen SB 1 und SB 6 im Vergleich zu den Werten vor der Sanierungsmaßnahme nicht geändert. Beim Brunnen SB 2 ist es trotz der Erhöhung der Förderrate in den letzten Monaten bislang auch zu keiner Veränderung der gelösten Eisen- und Mangankonzentration gekommen. Es liegen Werte zwischen $5,0$ bis $14,0 \text{ mg}/\text{l}$ vor. Da keine Reduktion dieser Werte stattgefunden hat, kann daraus geschlossen werden, dass es zu keiner Ausfällung von Eisen und Mangan im Brunnen bzw. im Aquifer gekommen ist. 51

Untersuchungen der Koloniezahlen zeigen, dass die Anzahl der keimbildenden Bakterien unter 100 KBE pro ml liegen. Die im Vergleich zu den ve- 52

rockerten Brunnen geringe Koloniezahl kann hier als unbedenklich eingestuft werden.

- 53 Eine Verockerung der Brunnen SB 1 und SB 6 kann unter den zurzeit vorliegenden Bedingungen ausgeschlossen werden. Aufgrund der Erhöhung der Förderrate des Brunnens SB 2 sind eine Beobachtung der Koloniezahlen und der Veränderung des gelösten Eisens empfehlenswert. Eine Reduktion des gelösten Eisen- und Mangangehaltes in diesem Brunnen können auf eine mögliche Verockerung hinweisen. Die Zunahme der Koloniezahl kann auf mögliche biologische Aktivitäten, durch die eine Verockerung im Brunnen ausgelöst werden kann, hinweisen.
- 54 Im Brunnen SB 3 sind Verschlämungen der Steigleitung aufgetreten. Diese sind verstärkt bei einer Förderrate von $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ aufgetreten. Nach Reduzierung der Förderrate auf $2,8 \text{ m}^3/\text{h}$ hat die Verschlämung abgenommen.
- 55 Die Konzentrationen von im Wasser gelöstem Eisen ändern sich je nach Förderrate. Bei hohen Förderraten liegen niedrigere Eisen- und Manganwerte im Brunnen vor als bei reduzierten Förderraten. Eine Reduktion des im Wasser gelösten Eisens kann auf eine Ausfällung von Eisen und Mangan im Wasser hinweisen. Die ausgefallenen Partikel verbleiben im Aquifer oder im Brunnen und sind somit in der Wasseranalyse nicht nachweisbar. Durch die Ausfällung dieser Stoffe kann es zur Verockerung kommen.
- 56 Untersuchungen der Koloniezahl können auf eine mögliche biologische Verockerungen hinweisen. Die Anzahl der keimbildenden Einheiten sind beim Fallbeispiel A bei Förderraten über $3,0 \text{ m}^3/\text{h}$ deutlich größer als bei Förderate von $2,8 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Aktivität und die Vermehrung der Mikroorganismen steigen bei Erhöhung der Förderrate. Dies kann auf ein erhöhtes Nährstoffangebot, welches durch die größere Förderrate ermöglicht wird, zurückgeführt werden. Bei Reduktion der Förderrate nehmen die Aktivität der Mikroorganismen und die Massenentwicklung wieder ab.
- 57 Der Zusammenhang der Aktivität der Mikroorganismen mit der Veränderung der Förderrate für den Brunnen SB 3 zeigt Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3: Veränderung durch biologische Aktivitäten der Eisen Fe (II)- und Mangan Mn (II)- Konzentrationen vom Aquifer zum Brunnen SB 3

58

	Konzentration im Aquifer [% und mg/l]		Veränderung durch biol. Aktivität [% und mg/l]		Konzentration im Brunnen [% und mg/l]		Förderrate [m ³ /h]
Fe (II)	100 %	7,0 mg/l	57 %	4,0 mg/l	43 %	3 mg/l	3,0–3,5 m ³ /h
	100 %	7,0 mg/l	15 %	1,0 mg/l	85 %	6 mg/l	2,8 m ³ /h
Mn (II)	100 %	1,4 mg/l	43 %	0,6 mg/l	57 %	0,8 mg/l	3,0–3,5 m ³ /h
	100 %	1,4 mg/l	21 %	0,3 mg/l	79 %	1,1 mg/l	2,8 m ³ /h

Die Konzentrationen vom im Aquifer gelöstem Eisen und Mangan betragen 7,0 mg/l Fe (II) und 1,4 mg/l Mn (II). Bei Förderraten von 3,0 bis 3,5 m³/h reduzieren sich die Eisenkonzentrationen um 57 % auf 3,0 mg/l und die Mangankonzentrationen um 43 % auf 0,8 mg/l. Die Reduzierung der Eisen- und Mangankonzentrationen kann auf biologische Aktivitäten zurückgeführt werden. Das im Aquifer gelöste Eisen und Mangan ist durch die Mikroorganismen in unlösliche Verbindungen überführt worden und ausgefallen. Je niedriger die Förderrate ist desto geringer ist die Aktivität der Mikroorganismen. Dies ist anhand der zunehmenden gelösten Eisen- und Mangankonzentrationen zu erkennen, die im Brunnen gemessen werden.

59

Verockerungen bzw. Verschlämmungen wurden im Brunnen SB 3 durch reduzierte Förderraten minimiert. Um Verockerungen weiterhin zu minimieren bzw. auszuschließen, sollte die Förderrate unter Beachtung der Erfassung der Schadstofffahne nicht über 2,8 m³/h erhöht werden. Des Weiteren kann geprüft werden, ob eine weitere Reduktion der Förderrate unter Berücksichtigung der Erfassung der Schadstoffe im Aquifer die Verockerung noch weiter minimieren kann.

60

Die Verockerungen im Brunnen SB 4 können wie im Brunnen SB 3 aus chemischen und biologischen Untersuchungen abgeleitet werden. Aufgrund der Veränderung des im Wasser gelösten Eisen und Mangan kann auf eine Verockerung geschlossen werden. Der Anteil von gelöstem Eisen und Mangan nimmt mit Reduzierung der Förderrate zu. Dies bedingt eine geringere Ausfällung dieser Produkte im Aquifer und im Brunnen. Umso mehr Eisen und Mangan im Wasser gelöst sind desto geringer ist das Verockerungsrisiko im Aquifer, im Brunnen und in den verbindenden Rohrleitungen.

61

Untersuchungen der Koloniezahlen zeigen, dass auch in diesem Brunnen biologische Aktivitäten vorliegen. Durch die Reduktion der Förderrate sinkt die Zahl der KBE. Dies ist auf ein geringer werdendes Nährstoffangebot zu-

62

rückzuführen. Der einmalige Anstieg der Koloniezahlen nach erneuter Inbetriebnahme des Brunnens SB 4 Ende 2008 kann auf die plötzliche Erhöhung des Nährstoffangebots nach der beginnenden Förderung zurückgeführt werden.

- 63 Während des ersten halben Betriebsjahres ist es zu keinen Brunnenausfällen des SB 4 gekommen. Durch die Förderung wird die Wasserbeschaffenheit verändert. Es kann mit der Zeit zu Verockerungen kommen. Die Auswirkungen dieser sind nicht sofort zu erkennen. Das Ausfallen einzelner Eisenpartikel wirkt sich noch nicht störend auf den Anlagenbetrieb aus. Erst durch die Entstehung eines autokatalytischen Effekts werden die Auswirkungen der Verockerung erkennbar. Das gelöste Eisen sorbiert an der Oberfläche der Eisenoxide und kann dann leichter oxidiert werden als im Wasser frei befindliches Eisen. Dies bedeutet, je mehr Eisenoxide vorhanden sind, desto mehr Eisen kann an der Oberfläche der Eisenoxide sorbieren und desto mehr Eisen wird oxidiert, wodurch die Verockerung verstärkt werden kann.
- 64 Bei der biologischen Verockerung muss erst einmal ein Stamm von Mikroorganismen heranwachsen, der das im Wasser gelöste Eisen und Mangan in unlösliche Verbindungen oxidiert. Das Vorhandensein einzelner Bakterien kann keine Verockerung verursachen, erst die Massenentwicklung der Bakterien bewirkt die Bildung eines Biofilms und damit die Verockerung.
- 65 Beim Brunnen SB 4 sind ähnliche Zusammenhänge zwischen der Förderrate und der biologischen Aktivität der Mikroorganismen wie beim Brunnen SB 3 zu beobachten. Diese sind in Tabelle 2.4 dargestellt.
- 66 **Tabelle 2.4:** *Veränderung durch biologische Aktivitäten der Eisen Fe (II)- und Mangan Mn (II)-Konzentrationen vom Aquifer zum Brunnen SB 4*

	Konzentration im Aquifer [% und mg/l]		Veränderung durch biol. Aktivität [% und mg/l]		Konzentration im Brunnen [% und mg/l]		Förderrate [m ³ /h]
Fe (II)	100 %	8,0 mg/l	76 %	6,1 mg/l	24 %	1,9 mg/l	2,8 m ³ /h
	100 %	8,0 mg/l	39 %	3,1 mg/l	61 %	4,9 mg/l	2,5–2,6 m ³ /h
Mn (II)	100 %	1,4 mg/l	51 %	0,72 mg/l	49 %	0,68 mg/l	2,8 m ³ /h
	100 %	1,4 mg/l	31 %	0,43 mg/l	69 %	0,97 mg/l	2,5–2,6 m ³ /h

- Die Konzentrationen vom im Aquifer gelöstem Eisen und Mangan betragen 8,0 mg/l Fe (II) und 1,4 mg/l Mn (II). Bei einer Förderrate von 2,8 m³/h reduzieren sich die Eisenkonzentrationen um 76 % auf 1,9 mg/l und die Mangankonzentrationen um 51 % auf 0,68 mg/l. Die Reduzierung der Eisen- und Mangankonzentrationen kann auf biologische Aktivitäten zurückgeführt werden. Das im Aquifer gelöste Eisen und Mangan ist durch die Mikroorganismen in unlösliche Verbindungen überführt worden und ausgefallen. Je niedriger die Förderrate ist desto geringer ist die Aktivität der Mikroorganismen. Dies ist anhand der zunehmenden gelösten Eisen- und Mangankonzentrationen zu erkennen, die im Brunnen gemessen werden. 67
- Die Brunnenausfälle sind nach der Reduzierung der Brunnenleistung auf 2,5 m³/h zurückgegangen. Die Verockerung hat abgenommen. Innerhalb des letzten Jahres, in dem der Brunnen mit dieser Förderrate betrieben wird, ist es nur zweimal zu einem Ausfall der Brunnenpumpe gekommen. Die selteneren Brunnenausfälle sind auf die Verminderung der biologischen Aktivitäten im Brunnen SB 4 zurückzuführen, wodurch weniger gelöstes Eisen und Mangan in unlösliche Form umgesetzt wird. 68
- Nach Reduktion der Förderrate hat die Verockerung abgenommen. Aus diesem Grund sollte geprüft werden, ob durch eine weitere Reduktion der Förderrate unter Berücksichtigung der Erfassung der Schadstofffahne die Verockerung weiter minimiert bzw. ausgeschlossen werden kann. 69
- Anhand dieses Sanierungsbeispiels wird deutlich, dass eine Verockerung nicht nur von einem optimalen pH-Wert und Redoxpotential abhängt. Verockerungen sind bei gleichen pH-Werten und Redoxpotentialen in nur zwei Brunnen aufgetreten. Bei diesen Brunnen konnte die Intensität der Verockerung anhand der Veränderung der Förderrate beeinflusst werden. 70
- Ein Vergleich des im Wasser gelösten Eisen und Mangan vor der Sanierung und während der Sanierung kann Auskunft darüber geben, ob es zur Ausfällung dieser Stoffe im Aquifer, im Brunnen oder in verbindenden Rohrleitungen kommen kann. Ein Vergleich dieser Änderung mit der Förderrate gibt Auskunft darüber, ob eine Ausfällung von Eisen und Mangan durch die Veränderung der Förderrate ausgelöst wird. Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung der Verockerung in einem Brunnen bietet die Untersuchung der Koloniezahl. 71

3 Fallbeispiel B

3.1 Einführung

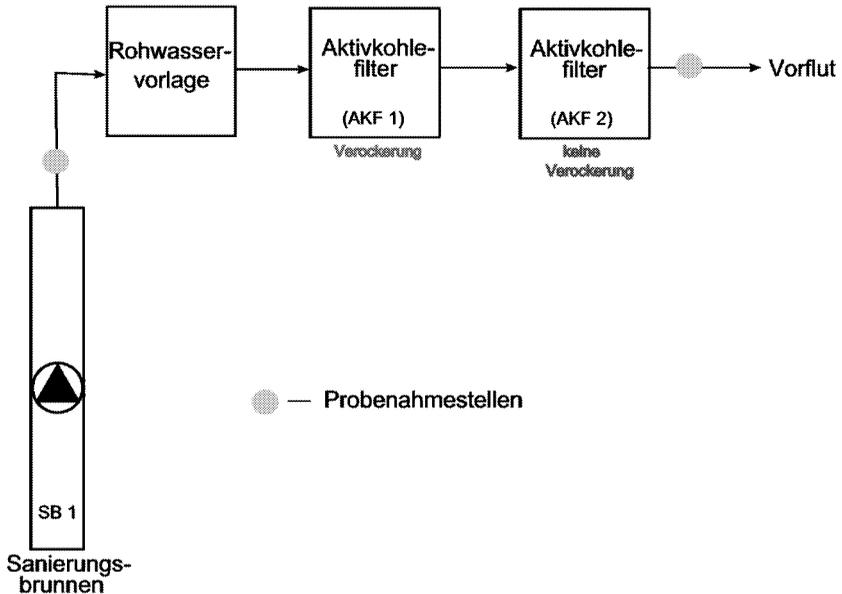
- 72 Bei diesem Fallbeispiel liegt eine Verunreinigung des quartären Grundwasserleiters durch Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) vor. Während des Anlagenbetriebs ist es zu Problemen in der Sanierungsanlage gekommen. In den Aktivkohlefiltern sind Verockerungen aufgetreten. Eine Verockerung des Grundwassersanierungsbrunnens ist bislang nicht aufgetreten.

3.2 Anlagenaufbau und Probenahmestellen

- 73 Zur Anlagenüberwachung werden in regelmäßigen Abständen Proben genommen und im Labor analysiert. Die Wasserproben werden zu Beginn der Aufbereitung, d. h. nach der Brunnenförderung und im Ablauf der Anlage gezogen. Es wird keine Analytik vor und nach den einzelnen Anlagenkomponenten durchgeführt. Die Beprobung enthält neben der Schadstoffuntersuchung die Bestimmung der Vor-Ort-Parameter und die Bestimmung von Metallen und Nichtmetallen.
- 74 Während des Anlagenbetriebs ist es laut Anlagenbetreiber zur Verblockung des Aktivkohlefilters (AKF 1) gekommen. Beim Aktivkohlefilter (AKF 2), der nach dem AKF 1 durchströmt wird, sind bislang keine Verblockungen festgestellt worden.
- 75 Abbildung 3.1 zeigt den Anlagenaufbau und die einzelnen Probenahmestellen sowie die Anlagenkomponenten bei denen es zur Verblockung kommt.

Abbildung 3.1: Anlagenaufbau und Probenahmestellen

76



3.3 Auswertung der Chemiedaten

3.3.1 Daten der Sanierungsanlage

3.3.1.1 Untersuchungsparameter

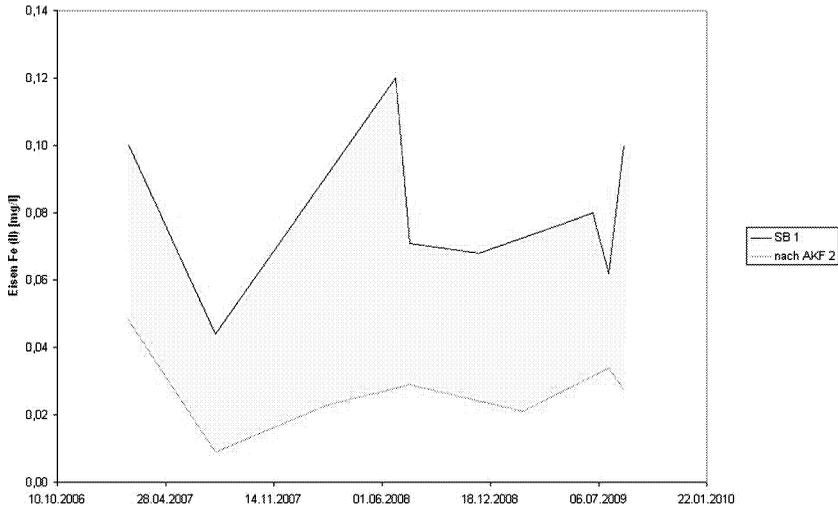
In der Sanierungsanlage werden der Schadstoffgehalt, Metalle, Nichtmetalle und die Vor-Ort-Parameter regelmäßig zu Beginn der Aufbereitung und im Anlagenablauf bestimmt. Es findet keine Analytik vor und nach den einzelnen Anlagenkomponenten statt. 77

Es ist während des Anlagenbetriebs zur Verockerung des Aktivkohlefilters AKF 1 gekommen. Im Aktivkohlefilter AKF 2 sind keine Probleme aufgetreten. 78

3.3.1.2 Veränderung der Eisenkonzentration

Abbildung 3.2 zeigt die Veränderung der gelösten Eisen- und Sauerstoffkonzentration vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2). 79

80 **Abbildung 3.2:** Veränderung der Eisenkonzentration in der Aufbereitungsanlage vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2)



- 81 Die Konzentrationen von gelöstem Eisen betragen im Förderwasser des Brunnens SB 1 0,05 bis 0,12 mg/l. Die Eisenkonzentration nimmt während der Wasseraufbereitung ab. Nach den Aktivkohlefiltern beträgt die Eisenkonzentration 0,01 bis 0,04 mg/l.
- 82 Die Ausfällung von Eisen lässt sich in folgender Bruttoreaktion darstellen:
- $$4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 10\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow + 8\text{H}^+$$
- 83 In Tabelle 3.1 ist die Berechnung zur Bestimmung der ausgefallenen Menge $\text{Fe}(\text{OH})_3$ aufgeführt.

Tabelle 3.1: Stöchiometrische Berechnung zur Ausfällung von Eisen

84

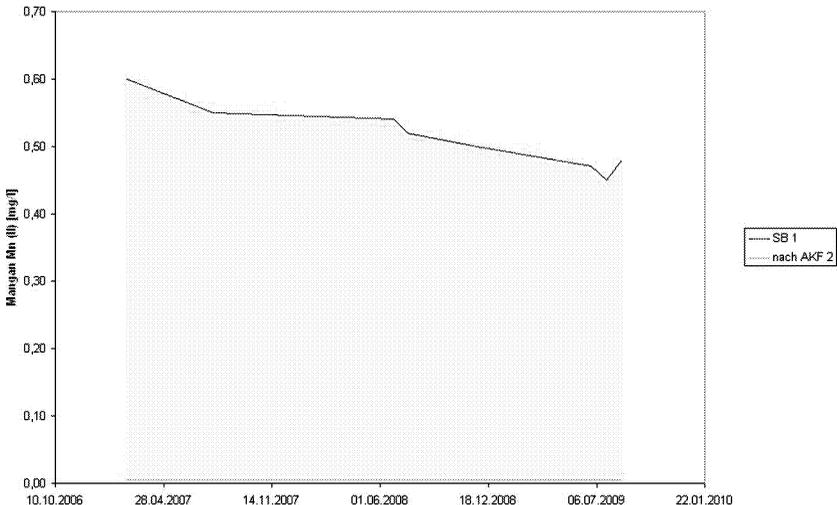
	Molare Masse [g/mol]	Differenz der durchschnittlichen Konzentration [g/l] im Brunnen und nach der Aktivkohle (vgl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.)	Konzentration in mol/l = Differenz der Konzentration [g/l] * molare Masse [g/mol]
4 Fe ²⁺	224,0 g/mol	3,0*10 ⁻⁵ g/l	$\frac{3,0 * 10^{-5} \text{ g/l}}{224 \text{ g/mol}} = 1,4 * 10^{-7} \text{ mol/l}$
O ₂	32,0 g/mol	3,0*10 ⁻⁴ g/l	$\frac{3,0 * 10^{-4} \text{ g/l}}{32,0 \text{ g/mol}} = 9,4 * 10^{-6} \text{ mol/l}$
4Fe(OH) ₃	428,0 g/mol	428 g/mol * 1,4*10 ⁻⁷ mol/l = 6,0*10 ⁻⁵ g/l	1,4*10 ⁻⁷ mol/l ergibt sich aus der Molkonzentration zu Fe ²⁺ als limitierender Faktor bei der Reaktion zu Fe(OH) ₃
Förderrate Q=15,0 m ³ /h bzw. 15.000 l/h Wie viel Fe(OH) ₃ fällt aus? 6,0*10 ⁻⁵ g/l Fe(OH) ₃ * 15.000 l/h = 0,9 g/h ≅ 0,02 kg/d Fe (OH) ₃ Filterwechsel nach 6 Monaten: 0,02 kg/d * 180 d = 4 kg Fe(OH) ₃ in 6 Monaten			

85

Zur Berechnung wie viel Fe(OH)₃ vom Förderwasser im Brunnen bis nach der Aktivkohle ausfällt, ist die molare Masse von Eisen (Fe²⁺) und Sauerstoff (O₂) zu bestimmen. Die zur Reaktion zur Verfügung stehende Konzentration von Eisen und Sauerstoff setzt sich aus der Differenz der Eisen- und Sauerstoffkonzentration vom Förderwasser im Brunnen und der noch vorhandenen Eisen- und Sauerstoffkonzentrationen nach der Aktivkohle zusammen. Die Differenz ist in Abbildung 3.2 zu erkennen. Die durchschnittliche Eisenkonzentration beträgt 3*10⁻⁵ g/l und die durchschnittliche Sauerstoffkonzentration beträgt 3*10⁻⁴ g/l. Die Differenz der durchschnittlichen Konzentration geteilt durch die molare Masse ergibt die Molkonzentration, die pro Liter für die Reaktion zu Fe(OH)₃ zur Verfügung steht. Für Eisen beträgt diese 1,4*10⁻⁷ mol/l und für Sauerstoff 9,4*10⁻⁶ mol/l. Da weniger Eisen als Sauerstoff zur Reaktion zur Verfügung steht, wird zur Berechnung der Fe(OH)₃-Konzentration mit einer Molkonzentration von 1,4*10⁻⁷ mol/l gerechnet. Die molare Masse von Fe(OH)₃ beträgt 428 g/mol. Die molare Masse von 428 g/mol multipliziert mit 1,4*10⁻⁷ mol/l ergibt 6,0*10⁻⁵ g/l Fe(OH)₃, welches bis nach der Aktivkohle ausfällt. Bei einem Durchfluss von 15,0 m³/h fallen 0,02 kg/d Fe(OH)₃ aus. Nach ca. sechs Monaten wird die Aktivkohle gewechselt. Innerhalb dieser sechs Monate fallen ca. 4,0 kg Fe(OH)₃ aus.

3.3.1.3 Veränderung der Mangankonzentration

- 86 Abbildung 3.3 zeigt die Veränderung der gelösten Mangan- und Sauerstoffkonzentration vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2).
- 87 **Abbildung 3.3:** Veränderung der Mangankonzentration in der Aufbereitungsanlage vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2)



- 88 Die Konzentrationen von gelöstem Mangan betragen im Förderwasser des Brunnens SB 1 0,5 bis 0,6 mg/l. Die Mangankonzentration nimmt während der Wasseraufbereitung ab. Nach den Aktivkohlefiltern befindet sich kein gelöstes Mangan mehr im Wasser.
- 89 Die Ausfällung von Mangan lässt sich in folgender Bruttoreaktion darstellen:
- $$4Mn^{2+} + O_2 + 6H_2O \Leftrightarrow 4MnOOH \downarrow + 8H^+$$
- 90 In Tabelle 3.2 ist die Berechnung zur Bestimmung der ausgefallenen Menge MnOOH aufgeführt.

Tabelle 3.2: Stöchiometrische Berechnung zur Ausfällung von Mangan

91

	Molare Masse [g/mol]	Differenz der durchschnittlichen Konzentration [g/l] im Brunnen und nach der Aktivkohle	Konzentration [mol/l] = Differenz der Konzentration [g/l] * molare Masse [g/mol]
4 Mn ²⁺	220,0 g/mol	5,0*10 ⁻⁴ g/l	$\frac{5,0 * 10^{-4} \text{ g/l}}{220 \text{ g/mol}} = 2,27 * 10^{-6} \text{ mol/l}$
O ₂	32,0 g/mol	3,0*10 ⁻⁴ g/l	$\frac{3,0 * 10^{-4} \text{ g/l}}{32,0 \text{ g/mol}} = 9,4 * 10^{-6} \text{ mol/l}$
4MnOOH	352,0 g/mol	352g / mol * 2,27*10 ⁻⁷ mol / = 8,0*10 ⁻⁴ g / l	2,27*10 ⁻⁷ mol/l entspricht der Molkonzentration von Mn ²⁺ als limitierender Faktor bei der Reaktion zu MnOOH
Förderrate Q=15,0 m ³ /h bzw. 15.000 l/h Wie viel MnOOH fällt aus? 8,0*10 ⁻⁴ g/l MnOOH * 15.000 l/h = 12,0 g/h ≙ 0,288 kg/d MnOOH Filterwechsel nach 6 Monaten: 0,288 kg/d * 180 d = 52,0 kg MnOOH in 6 Monaten			

Zur Berechnung wie viel MnOOH vom Förderwasser im Brunnen bis nach der Aktivkohle ausfällt, ist die molare Masse von Mangan (Mn²⁺) und Sauerstoff (O₂) zu bestimmen. Die zur Reaktion zur Verfügung stehende Konzentration von Mangan und Sauerstoff setzt sich aus der Differenz der Mangan- und Sauerstoffkonzentration vom Förderwasser im Brunnen und der noch vorhandenen Mangan- und Sauerstoffkonzentrationen nach der Aktivkohle zusammen. Die Differenz ist in Abbildung.3 zu erkennen. Bei Mangan beträgt die durchschnittliche Konzentration 5,0*10⁻⁴ g/l und bei Sauerstoff beträgt die durchschnittliche Konzentration 3*10⁻⁴ g/l. Die Differenz der durchschnittlichen Konzentration geteilt durch die molare Masse ergibt die Molkonzentration, die pro Liter für die Reaktion zu MnOOH zur Verfügung steht. Für Mangan beträgt diese 2,27*10⁻⁶ mol/l und für Sauerstoff 9,4*10⁻⁶ mol/l. Da weniger Mangan als Sauerstoff zur Reaktion zur Verfügung steht, wird zur Berechnung der MnOOH-Konzentration mit einer Molkonzentration von 2,27*10⁻⁶ mol/l gerechnet. Die molare Masse von MnOOH beträgt 352 g/mol. Die molare Masse von 352 g/mol MnOOH multipliziert mit 2,27*10⁻⁶ mol/l MnOOH ergibt 8,0*10⁻⁴ g/l MnOOH die bis nach der Aktivkohle ausfallen. Bei einem Durchfluss von 15,0 m³/h fallen 0,288 kg/d MnOOH aus. Nach ca. sechs Monaten wird die Aktivkohle gewechselt. Innerhalb dieser sechs Monate fallen ca. 52,0 kg MnOOH aus.

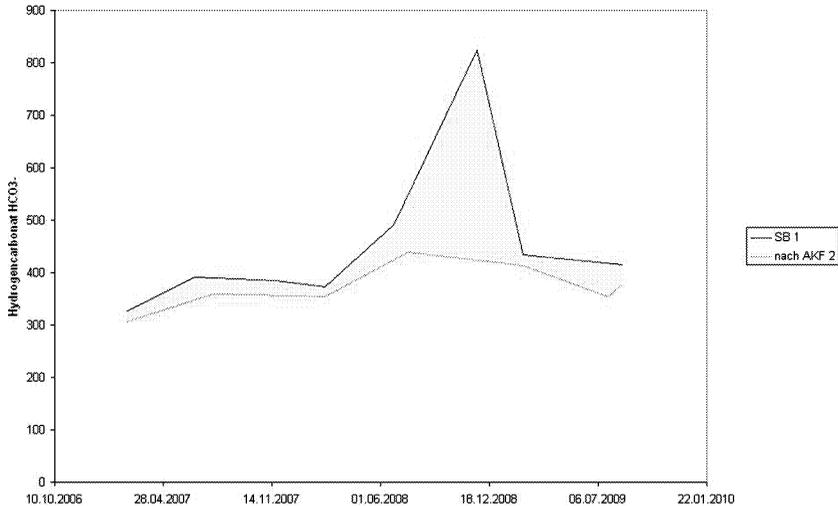
92

3.3.1.4 Veränderung der Calcium- und Hydrogencarbonatkonzentration

Abbildung 3.4 zeigt die Veränderung der Konzentration von Hydrogencarbonat vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2).

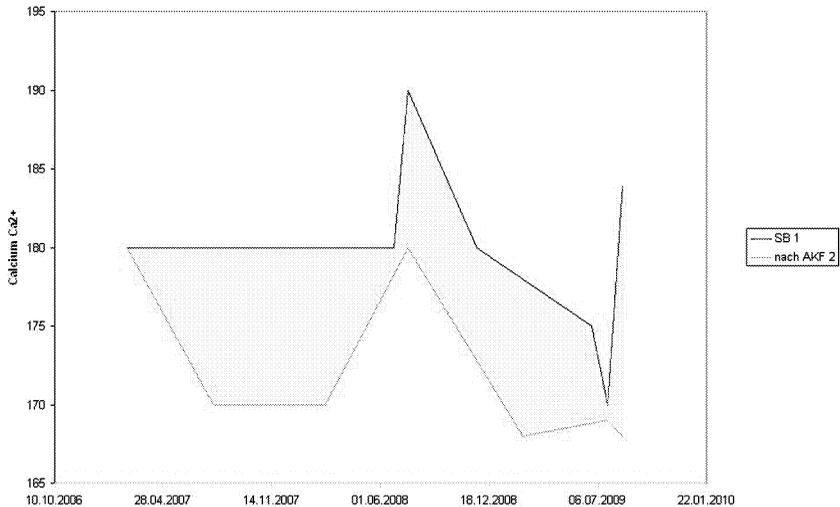
93

- 94 **Abbildung 3.4:** *Veränderung der Hydrogencarbonatkonzentration HCO_3^- in der Aufbereitungsanlage vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2)*



- 95 Die Konzentrationen von Hydrogencarbonat betragen im Förderwasser des Brunnens SB 1 330 bis 800 mg/l. Die Konzentration von HCO_3^- nimmt während der Wasseraufbereitung ab. Nach den Aktivkohlefiltern beträgt die Hydrogencarbonatkonzentration zwischen 300 und 400 mg/l.
- 96 *Abbildung 3.5 zeigt die Veränderung der Calciumkonzentration vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2).*

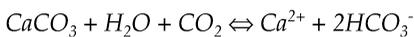
Abbildung 3.5: Veränderung der Calciumkonzentration Ca^{2+} in der Aufbereitungsanlage vom Sanierungsbrunnen SB 1 bis nach der Aktivkohle (AKF 2) 97



Die Konzentrationen von Calcium betragen im Förderwasser des Brunnens SB 1 180 bis 190 mg/l. Die Konzentration von Calcium nimmt während der Wasseraufbereitung ab. Nach den Aktivkohlefiltern beträgt die Calciumkonzentration zwischen 165 und 180 mg/l. 98

Die Abnahme der Calcium- und der Hydrogencarbonatkonzentration ist auf eine Reaktion dieser beiden Stoffe zu Calciumcarbonat zurückzuführen. 99

Die Ausfällung von Calciumcarbonat CaCO_3 lässt sich in folgender Brutto-reaktion darstellen:



In Tabelle 3.3 ist die Berechnung zur Bestimmung der ausgefallenen Menge Calciumcarbonat (CaCO_3) aufgeführt. 100

101 **Tabelle 3.3:** Stöchiometrische Berechnung zur Ausfällung von Calciumcarbonat

	Molare Masse [g/mol]	Differenz der durchschnittlichen Konzentration [g/l] im Brunnen und nach der Aktivkohle	Konzentration [mol/l] = Differenz der Konzentration [g/l] * molare Masse [g/mol]
Ca ²⁺	40,1 g/mol	5,0*10 ⁻³ g/l	$\frac{5,0 * 10^{-3} \text{ g/l}}{40,1 \text{ g/mol}} = 1,25 * 10^{-4} \text{ g/mol}$
2HCO ₃ ⁻	122 g/mol	0,03 g/l	$\frac{0,03 \text{ g/l}}{122 \text{ g/mol}} = 2,5 * 10^{-4} \text{ mol/l}$
CaCO ₃	100,1 g/mol	100,1 g/mol * 1,25 * 10 ⁻⁴ mol/l = 0,013 g/l	1,25*10 ⁻⁴ mol/l entspricht der Molkonzentration von Ca ²⁺ als limitierender Faktor bei der Reaktion zu CaCO ₃
Förderrate Q=15,0 m ³ /h bzw. 15.000 l/h Wie viel CaCO ₃ fällt aus? 0,013 g/l CaCO ₃ * 15.000 l/h = 187,5 g/h ≙ 4,5 kg/d CaCO ₃ Filterwechsel nach 6 Monaten: 4,5 kg/d * 180 d = 810,0 kg CaCO ₃ in 6 Monaten			

- 102 Zur Berechnung wie viel Calciumcarbonat (CaCO₃) vom Förderwasser im Brunnen bis nach der Aktivkohle ausfällt, ist die molare Masse von Hydrogencarbonat (HCO₃⁻) und Calcium (Ca²⁺) zu bestimmen. Die zur Reaktion zur Verfügung stehenden Konzentrationen von Hydrogencarbonat und Calcium setzen sich aus der Differenz der Hydrogencarbonat- und Calciumkonzentration vom Förderwasser im Brunnen und der Konzentrationen nach der Aktivkohle zusammen. Die Differenz von Hydrogencarbonat ist in Abbildung 3.4 und die Differenz von Calcium ist in Abbildung 3.5 zu erkennen. Bei Hydrogencarbonat beträgt die durchschnittliche Konzentration 0,03 g/l und bei Calcium beträgt die durchschnittliche Konzentration 5,0*10⁻³ g/l. Die Differenz der durchschnittlichen Konzentrationen geteilt durch die molaren Massen ergeben die Molkonzentrationen, die pro Liter für die Reaktion zu CaCO₃ zur Verfügung stehen. Für Hydrogencarbonat beträgt diese 2,5*10⁻⁴ mol/l und für Calcium 1,25*10⁻⁴ mol/l. Da weniger Calcium als Hydrogencarbonat zur Reaktion zur Verfügung stehen, wird zur Berechnung der CaCO₃-Konzentration mit einer molaren Konzentration von 1,25*10⁻⁴ mol/l gerechnet. Die molare Masse von CaCO₃ beträgt 100,1 g/mol. Diese wird mit der Molkonzentration von 1,25*10⁻⁴ mol/l CaCO₃ multipliziert und ergibt 0,013 g/l CaCO₃, das bis nach der Aktivkohle ausfällt. Bei einem Durchfluss von 15,0 m³/h fallen 4,5 kg/d CaCO₃ aus. Nach ca. sechs Monaten wird die Aktivkohle gewechselt. Innerhalb dieser sechs Monate fallen ca. 810 kg CaCO₃ aus.

3.3 Auswertungen der Analysedaten

In der Sanierungsanlage kommt es zu Verblockungen der Aktivkohle, wodurch die Reinigungsleistung der Aktivkohle beeinflusst wird. Die Kohle haftet aneinander, so dass sich Kanäle bilden, in denen das Wasser ungefiltert durchfließen kann. Der Aktivkohlewechsel ist bei einer verblockten Kohle aufwendiger. Die Kohle kann nicht abgesaugt werden, sondern sie muss bergmännisch herausgemeißelt werden. Die verblockte Aktivkohle kann nicht regeneriert werden. Ein erneuter Einbau der verblockten Aktivkohle ist somit nicht möglich. Es muss neue Aktivkohle eingebaut werden. Der Einbau neuer Aktivkohle ist erheblich teurer als der Einbau regenerierter Kohle. 103

Die Verblockung der Kohle kann auf das Ausfällen unterschiedlicher im Wasser gelöster Stoffe zurückgeführt werden. Obwohl die Eisen- und Mangankonzentrationen im Förderwasser sehr gering sind, fallen pro Tag 0,02 kg $\text{Fe}(\text{OH})_3$ und 0,288 kg MnOOH aus. Die Aktivkohle wird je nach Schadstoffbelastung jedes halbe Jahr gewechselt. Innerhalb eines halben Jahres fallen 4,0 kg $\text{Fe}(\text{OH})_3$ und 52,0 kg MnOOH aus. 104

Neben der Ausfällung von Eisen und Mangan kommt es auch zur Ausfällung von Calciumcarbonat. Das ausgefallene Eisen und Mangan bindet sich in die kristalline Struktur des Calciumcarbonats ein. Es fallen pro Tag ungefähr 4,5 kg CaCO_3 aus. Innerhalb eines halben Jahres, bis dass die Aktivkohle gewechselt wird, fallen ca. 810 kg CaCO_3 aus. 105

Nach Auskunft des Anlagenbetreibers ist es bislang nur zur Verblockung des ersten Aktivkohlefilters gekommen. Es werden jedoch nur Analysen zu Beginn der Aufbereitung und im Ablauf der Sanierungsanlage durchgeführt, d. h. es liegen keine Analysedaten vor und nach den einzelnen Anlagenkomponenten vor. Aus diesem Grund kann nicht ausgeschlossen werden, dass nicht ein Teil des ausgefallenen Eisens, Mangans und Calciumcarbonats erst in dem zweiten Aktivkohlefilter zurückgehalten wird und in diesem ebenfalls verblockend wirkt. Aus diesem Grund ist es wichtig, Analysen vor und nach einzelnen Anlagenkomponenten durchzuführen, um eine mögliche Verockerung der Aktivkohle genau eingrenzen zu können. 106

Angenommen der größte Teil der gelösten Substanzen würde bereits im ersten Aktivkohlefilter ausfallen, bedeutet dies, dass ca. 800 kg CaCO_3 zuzüglich 4,0 kg $\text{Fe}(\text{OH})_3$ und 52,0 kg MnOOH innerhalb von 6 Monaten in der Aktivkohle zurückbleiben. Es befinden sich ca. 3.500 kg Aktivkohle in einem Behälter. Im Vergleich zur Menge Aktivkohle, die in einem Behälter ist, 107

ist der Ausfall von 810 kg CaCO_3 zuzüglich 4,0 kg $\text{Fe}(\text{OH})_3$ und 52,0 kg MnOOH innerhalb von 6 Monaten sehr hoch, so dass hierdurch eine Verblockung der Aktivkohle verursacht werden kann.

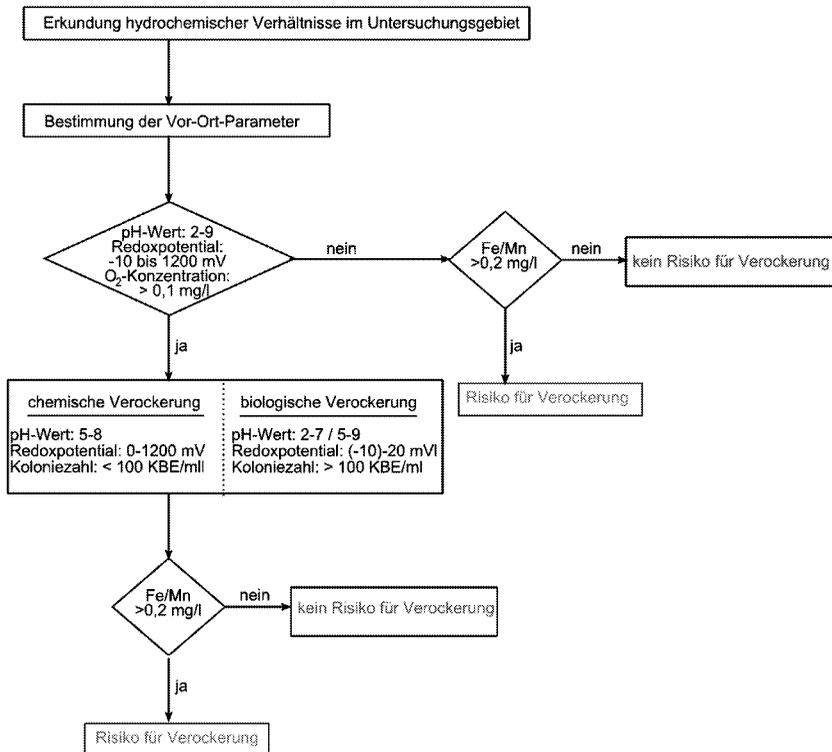
- 108 Eine Verblockung der Aktivkohle könnte durch einen reduzierten Sauerstoffeintrag vermindert werden. In diesem Fallbeispiel kommt es durch die offene Vorlage und den diskontinuierlichen Anlagenbetrieb zum Eintrag von Sauerstoff. Aus diesem Grund kann geprüft werden, bzw. ob der Eintrag von Sauerstoff nicht durch ein Abdichten der Vorlage reduziert werden kann bzw. ob eine Vorlage für den Anlagenbetrieb erforderlich ist.
- 109 Weiterhin kann geprüft werden, ob die Errichtung von Kiesfiltern vor der Aktivkohle zweckmäßig ist, um die ausgefallene Eisen- und Manganpartikeln zurückzuhalten. Durch das Ausfallen von Mangan kommt es zur Braunsteinbildung (MnO_2). Braunstein wirkt verblockend und ist nur schwer aus der Aktivkohle zu entfernen.

4 Risikoabschätzung zur Gefahr der Verockerung

4.1 Erkundung der hydrochemischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet im Rahmen der Sanierungsplanung

- 110 Das Risiko zur Verockerung kann durch einen geringen analytischen Aufwand bereits bei der Planung einer Sanierungsanlage berücksichtigt werden. Hierzu gehören die Bestimmung der Vor-Ort-Parameter und die Bestimmung der Eisen- und Mangankonzentration im Wasser. Ein Vergleich der Analytikergebnisse mit den in Abbildung 4.1 definierten Bandbreiten hydrochemischer Kenngrößen zur Verockerung gibt Auskunft, ob ein Risiko zur Verockerung besteht.

Abbildung 4.1: Fließbild zur Erkundung der hydrochemischen Verhältnisse vor Errichtung von Förderbrunnen und Sanierungsanlagen zur Einschätzung des Verockerungsrisikos 111



4.1.1 Hohes Risiko zur chemischen Verockerung

Eine chemische Verockerung kann auf das Ausfallen von Eisen oder Mangan zurückgeführt werden. In nur seltenen Fällen kommt es sowohl zu einer Eisenverockerung als auch zu einer Manganverockerung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Eisen und Mangan unterschiedliche pH-Werte und Redoxpotentiale zur Oxidation benötigen. 112

Zur Risikoabschätzung der chemischen Verockerung sind die Bestimmung des pH-Werts, des Redoxpotentials, der Sauerstoffkonzentration und der Eisen- und Mangankonzentration von Bedeutung. Beträgt der pH-Wert zwischen 5 und 8, ist die Sauerstoffkonzentration > 0,1 mg/l, liegt das Redox- 113

potential zwischen 0 und 500 mV und sind Eisenkonzentrationen $> 0,2$ mg/l vorhanden, besteht das Risiko einer chemischen Eisenverockerung. Eine chemische Manganverockerung findet bei pH-Werten zwischen 2 und 7, bei Redoxpotentialen zwischen 600 und 1200 mV, bei Sauerstoffkonzentrationen $> 0,1$ mg/l und bei Mangankonzentrationen $> 0,2$ mg/l statt.

4.1.2 Hohes Risiko zur biologischen Verockerung

- 114 Eine biologische Verockerung wird durch die mikrobiologische Aktivitäten von Bakterien ausgelöst. Die im Wasser befindlichen Bakterien nehmen das im Wasser gelöste Eisen oder Mangan auf und scheiden dieses als unlösliche Eisen- oder Manganverbindungen wieder aus.
- 115 Zur Risikoabschätzung der biologischen Verockerung sind die Bestimmung des pH-Werts, des Redoxpotentials, der Sauerstoffkonzentration und der Eisen- und Mangankonzentration von Bedeutung. Beträgt der pH-Wert zwischen 2 und 9, das Redoxpotential zwischen -10 und 20 mV, die Sauerstoffkonzentration $> 0,1$ mg/l und sind Eisen- und Mangankonzentration $> 0,2$ mg/l vorhanden, besteht das Risiko zur Verockerung. Einen weiteren Hinweis zu biologischen Aktivitäten gibt die Bestimmung der Koloniezahl. In der Regel erhöht sich die Koloniezahl erst während des Brunnenbetriebs. Aufgrund des größeren Nährstoffangebots in Brunnennähe steigt die Aktivität der Mikroorganismen. Als unbedenklich können Koloniezahlen unter 100 KBE pro ml eingestuft werden.

4.1.3 Geringes Risiko zur Verockerung

- 116 Liegen die Vor-Ort-Parameter außerhalb der für eine Verockerung als optimal definierten Bereich, sind die Eisen- und Mangankonzentrationen $> 0,2$ mg/l, sind Verockerungen in der Regel nicht zu erwarten. Aber schon geringfügige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit wie zum Beispiel die Erhöhung der O_2 -Konzentration können Verockerungen auslösen. Aus diesem Grund sollte in diesem Fall darauf geachtet werden, dass die vorliegenden hydrochemischen Bedingungen nicht verändert werden.

4.1.4 Kein Risiko zur Verockerung

- 117 Eine Verockerungsrisiko kann ausgeschlossen werden, wenn weder Eisen noch Mangan im Grundwasser vorhanden sind bzw. die Konzentrationen von Eisen- und Mangan deutlich unter $0,2$ mg/l liegen.

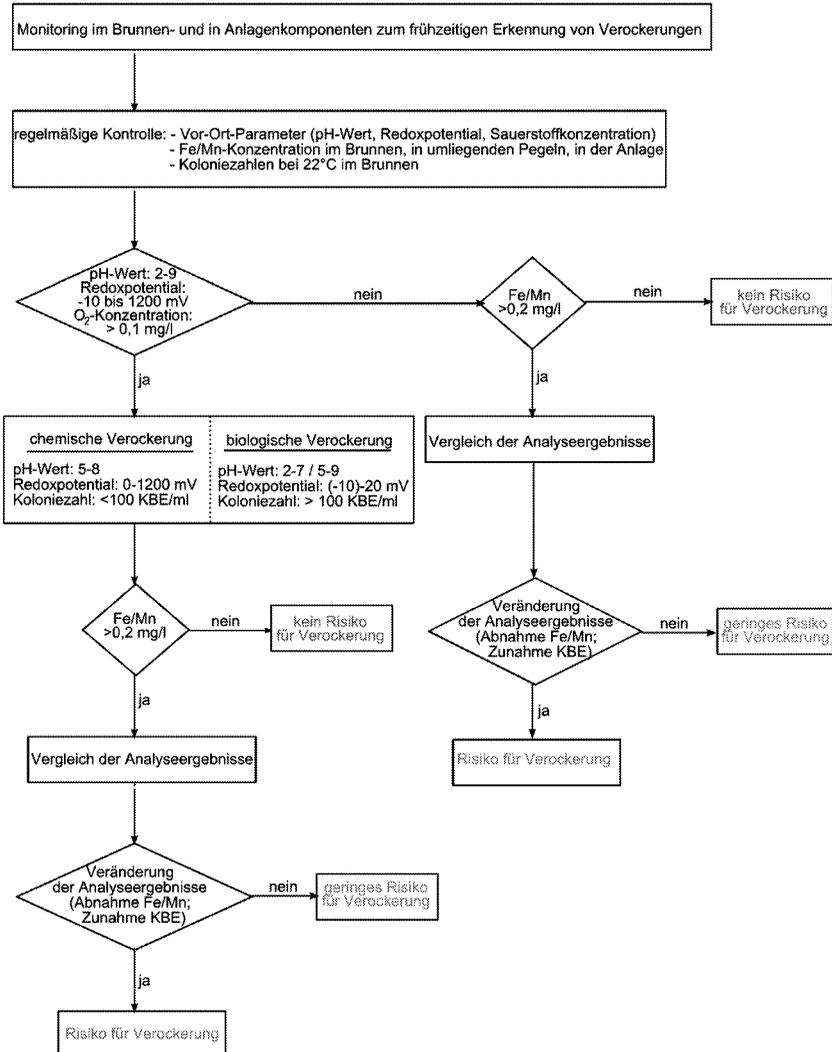
4.2 Monitoring zur Risikoabschätzung der Verockerung während des Anlagenbetriebs

Die Auswirkungen von Verockerungen sowohl im Sanierungsbrunnen als auch in der Sanierungsanlage sind in der Regel nicht sofort zu erkennen, weil das Ausfallen einzelner Eisen- und Manganpartikeln sich nicht unmittelbar störend auf den Anlagenbetrieb auswirkt. Erst durch die Entstehung eines autokatalytischen Effekts werden die Auswirkungen einer chemischen Verockerungen erkennbar. Das gelöste Eisen sorbiert an der Oberfläche der Eisenoxide und kann somit leichter oxidiert werden als im Wasser frei befindliches Eisen. Umso mehr Eisenoxide vorhanden sind, desto mehr Eisen kann an der Oberfläche der Eisenoxide oxidieren, wodurch die Auswirkungen der Verockerung erkennbar werden. Die Auswirkungen einer biologischen Verockerung werden erst durch die Massenentwicklung der Mikroorganismen erkennbar. Durch die Massenentwicklung der Mikroorganismen kommt es zur Bildung eines Biofilms, der verblockend wirken kann. 118

Das Risiko zur Verockerung kann durch ein regelmäßiges Monitoring während des Anlagenbetriebs im Rahmen der Sanierungsmaßnahme beobachtet werden. Zu diesem Monitoring müssen die Bestimmung der Vor-Ort-Parameter (pH-Wert, Redoxpotential, O₂-Konzentration) und der Eisen- und Mangankonzentration in den Sanierungs- und Infiltrationsbrunnen, in umliegenden Grundwasserpegeln sowie vor und nach den einzelnen Anlagenkomponenten und die Bestimmung der Koloniezahl bei 22 °C im Sanierungs- bzw. Infiltrationsbrunnen gehören. 119

Die Durchführung dieses Monitorings ist in einem Fließbild in Abbildung 4.2 dargestellt. 120

121 **Abbildung 4.2:** Fließbild zum Verockerungs- und Verblockungsrisiko während des Anlagenbetriebs



4.2.1 Risiko zur Verockerung im Sanierungsbrunnen

Zur Überprüfung, ob eine Verockerung im Brunnen stattgefunden hat, müssen regelmäßige Analysen des Brunnenwassers sowie Wasseranalysen der umliegenden Grundwasserpegel durchgeführt, ausgewertet und miteinander verglichen werden. Nimmt die Eisen- und Mangankonzentration in umliegenden Grundwasserpegeln bis zum Förderbrunnen ab, kann dies auf eine Verockerung hinweisen. Die zuvor im Wasser gelösten Eisen- und Manganpartikel sind im Aquifer, im Filterkies oder am Brunnenfilter ausgefallen. 122

Die Überprüfung der Koloniezahl im Brunnen in Abhängigkeit mit der Änderung der Förderrate kann Auskunft auf biologische Aktivitäten im Brunnen geben. Koloniezahlen unter 100 KBE pro ml können als unbedenklich eingestuft werden. Sind Koloniezahlen deutlich über 100 KBE pro ml vorhanden, kann eine biologische Aktivität nicht ausgeschlossen werden. Ein Vergleich der Entwicklung der Koloniezahlen mit der Förderrate zeigt, ob es zur Zu- oder Abnahme der Mikroorganismen bei Veränderung der Förderrate kommt. Durch die Erhöhung der Förderrate und dem damit verbundenen höheren Nährstoffangebot wird die Aktivität der Mikroorganismen begünstigt. Bei Reduzierung der Förderrate sollte die Aktivität der Mikroorganismen abnehmen. Die Abhängigkeit der Aktivität der Mikroorganismen von der Förderrate zeigt der verockerte Sanierungsbrunnen im Fallbeispiel A. 123

Sind weder Eisen noch Mangan im Förderwasser vorhanden bzw. betragen die Eisen- und Mangankonzentrationen deutlich unter 0,2 mg/l, kann das Risiko einer Verockerung ausgeschlossen werden. 124

4.2.2 Risiko zur Verockerung einzelner Anlagenkomponenten

Zur Überprüfung, ob eine Verockerung in einzelnen Anlagenkomponenten stattgefunden hat, müssen regelmäßige Wasseranalysen vor und nach den einzelnen Anlagenkomponenten durchgeführt, ausgewertet und miteinander verglichen werden. Nimmt die Eisen- und Mangankonzentration vom Eintritt in den Filter bis zum Austritt aus dem Filter ab, kann dies auf eine Verockerung hinweisen. Die zuvor im Wasser gelösten Eisen- und Manganpartikel sind ausgefallen. 125

Sind weder Eisen noch Mangan im Förderwasser vorhanden bzw. betragen die Eisen- und Mangankonzentrationen deutlich unter 0,2 mg/l, kann das Risiko einer Verockerung ausgeschlossen werden. 126

- 127 Zu beachten ist, dass nicht nur Eisen und Mangan verblockend auf Filter wirken können, sondern dass auch andere im Wasser gelöste Stoffe durch den Eintrag von Luftsauerstoff ausfallen können und ebenso verblockend auf einzelne Anlagenkomponenten wirken können. Im Fallbeispiel B wirken beispielsweise nicht nur Eisen- und Mangan, sondern vor allem Calciumcarbonat verblockend auf die Aktivkohle.

4.3 Empfehlungen zur Vermeidung bzw. zur Minimierung von Verockerungen

- 128 Das Risiko zur Verockerung kann bereits bei der Planung der Förderbrunnen und der Sanierungsanlage minimiert werden. Verockerungen können durch einen reduzierten Sauerstoffeintrag minimiert werden. Im Vorfeld kann geprüft werden, ob ein Ausbau des Brunnenfilters unter Berücksichtigung der vollständigen Erfassung der Schadstofffahne ausschließlich im Aquifer möglich ist. Verbindende Leitungen sollten dicht sein, um den Eintrag von Sauerstoff zu verhindern und offene Behälter sollten vermieden werden. Im Fallbeispiel B wird das geförderte Wasser in einer offenen Vorlag gespeichert und diskontinuierlich in den Aktivkohlefilter abgegeben. Hierdurch wird der Eintrag von Sauerstoff ermöglicht, wodurch es zur Reaktion der im Wasser gelösten Stoffen kommt. Die ausgefallenen Stoffe werden in der Aktivkohle zurückgehalten und wirken verblockend in der Aktivkohle. Ebenso sollte auf einen kontinuierlichen Anlagenbetrieb geachtet werden.
- 129 Sind Verockerungen während des Anlagenbetriebs aufgetreten, kann geprüft werden, ob eine Reduktion der Förderrate unter Berücksichtigung der Erfassung der Schadstofffahne die Verockerung minimieren kann.
- 130 Das Risiko zur Verblockung in einzelnen Anlagenkomponenten aufgrund von Eisen- und Manganausfällungen kann durch eine bestimmungsgemäß funktionierende Enteisung und Entmanganung im ersten Aufbereitungsschritt in der Sanierungsanlage ausgeschlossen werden.
- 131 Ist das Risiko zur Verockerungen nicht zu verhindern bzw. nicht zu minimieren, ist es wichtig, regelmäßige Untersuchungen des Brunnenzustands und der Anlage durchzuführen. Entsprechende Untersuchungsmethoden können in der Literatur nachgelesen werden.

5 Fazit

Bei der Sanierung von Grundwasserschäden kommt es sehr häufig zur Verockerung der Sanierungsbrunnen. Das Risiko einer Verockerung wird im Vorfeld einer Sanierungsmaßnahme meist nicht berücksichtigt oder ist nur schwer abzuschätzen. Durch die dann während des Betriebs auftretende Verockerung kann es zu einem erhöhten anlagentechnischen Aufwand kommen, der die Betriebskosten einer Sanierungsmaßnahme erhöht. 132

Geologische und hydrogeologische Untersuchungen des Bodens bzw. des Grundwassers geben im Vorfeld Auskunft über das Risiko zu Verockerung. 133

Wird das Risiko zur Verockerung durch im Vorfeld durchgeführte Untersuchungen bestätigt, ist zu prüfen, ob dieses Risiko durch entsprechende bauliche Maßnahmen einzugrenzen ist.

Ein regelmäßiges Monitoring während des Anlagenbetriebs hilft ebenso Verockerungen frühzeitig zu erkennen bzw. diese durch entsprechende Maßnahmen zu minimieren. 134

Das Risiko zur Verockerungen und Verblockungen kann bereits durch einen geringen analytischen Aufwand identifiziert und unter Beachtung entsprechende Maßnahmen im Anlagenbetrieb minimiert werden kann. 135

Die Betriebskosten können aufgrund nicht auftretender Verockerungen gering gehalten werden. Die Brunnen und die Sanierungsanlage können somit über einen langen Zeitraum nahezu störungsfrei betrieben werden. 136

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Prof. Doetsch, Lehr- und Forschungsgebiet Abfallwirtschaft der RWTH Aachen sowie bei Herrn Michael Altenbockum, Altenbockum & Partner, Geologen für die Vergabe und die Betreuung meiner Diplomarbeit bedanken.

Literatur

DVGW Regelwerk (2007), Technische Regeln Arbeitsblatt W 130, Brunnenregenerierung

Kirfel, Natascha; Diplomarbeit „Datenanalyse, Risiko- und Potentialabschätzung zur Vermeidung von Verblockungen und Verockerungen bei Grundwassersanierungsanlagen zur Aufbereitung altlastenrelevanter Grundwasserschäden; Oktober 2009