

Brunnenmonitoring zur optimalen Brunnennutzung und – pflege

am Beispiel von Brunnenregenerierungen mit Ultraschall im
Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein

Dissertation

zur Erlangung des Grades

“Doktor der Naturwissenschaften”

am Fachbereich Chemie, Pharmazie und

Geowissenschaften

der Johannes Gutenberg-Universität

in Mainz

Hella Wiacek

geb. in Leipzig

Mainz 2005

1. Berichterstatter:

2. Berichterstatter:

Tag der mündlichen Prüfung: 13.12.2005

Vorwort

Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Ableitung der zu überwachenden Parameter eines Brunnens. Dies stellt den ersten und grundlegenden Schritt zur Entwicklung eines Leitfadens zur Entscheidungshilfe über Wartungs- und Regeneriermaßnahmen dar, der wiederum aus einem geeigneten Brunnenmonitoring abgeleitet werden kann.

Brunnenmonitoring heißt Brunnen beobachten, Daten aufzeichnen und aus den Beobachtungen lernen. Nur wer seine Brunnen kennt und die komplexen Vorgänge an der Schnittstelle Grundwasser – Wassernutzung versteht, kann die richtigen Entscheidungen zur Werterhaltung und für den optimalen Betrieb treffen. Dazu müssen ausgewählte Daten in sinnvoller Form aufgezeichnet und dokumentiert werden.

Die Erfahrungen in der Praxis aus einer Vielzahl von Projekten, u. a. über die Brunnenregenerierung mit dem Ultraschallverfahren, zeigten vor allem die Lückenhaftigkeit in der Dokumentation seitens der Betreiber und eine starke Fokussierung auf die Entwicklung immer neuer, besserer Regenerierverfahren seitens der Regenerierfirmen, Beratenden Ingenieure und Forschungsinstitute.

Rege Diskussionen auf Fachveranstaltungen zeigen jedoch auch das Interesse aller beteiligten Fachleute an der grundlegenden Werterhaltung und Optimierung des Brunnenbetriebes. Hierzu wurde ebenso der Brunnenbau optimiert und die Brunnenalterung untersucht.

Die Brunnenregenerierung selbst, mit den verschiedenen Verfahren, ist immer noch ein strittiges Thema und die Frage, welches Verfahren wann eingesetzt werden sollte, lässt sich nicht pauschalisieren. Für den Betreiber ist es jedoch von großer Bedeutung, Instrumente an die Hand zu bekommen, die die Auswahl geeigneter Maßnahmen erleichtern, um erfolglose Regenerierungen zu vermeiden und Kosten zu sparen.

Die vorliegende Arbeit soll daher eine noch fehlende Brücke bilden zwischen der Betrachtung eines einzelnen Regenerierverfahrens an einzelnen Brunnen und der zukünftigen Entwicklung eines allgemeingültigen Brunnenmanagement-Programms unter geologischen und hydrochemischen Aspekten aus den Erfahrungswerten vor allem der Brunnenbetreiber.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Stand der Forschung	7
2	Grundlagen	11
2.1	Brunnenbau	13
2.1.1	Hydrogeologische Grundlagen	13
2.1.2	Bauformen von Bohrbrunnen.....	20
2.1.3	Inbetriebnahme eines Bohrbrunnens.....	24
2.2	Brunnenalterung	26
2.2.1	Die Bedeutung von Eisen und Mangan	26
2.2.2	Arten der Brunnenalterung.....	32
2.3	Brunnenmonitoring.....	40
2.3.1	Grundlagen	40
2.3.2	Technische Regeln, Vorschriften und Verfahren	44
2.3.3	Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen	45
2.3.4	Monitoring hydrochemischer Veränderungen	50
2.3.5	Erstellen von Betriebsprogrammen.....	52
2.4	Brunnenregenerierung	54
2.4.1	Allgemeines	54
2.4.2	Das Ultraschall - Verfahren.....	59
2.4.3	Beurteilung des Regenerier-Erfolges und Nachhaltigkeit	68
2.4.4	Wahl des Regenerierverfahrens	69

3	Das Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein	73
3.1	Das Einzugsgebiet	75
3.1.1	Geologischer Überblick.....	75
3.1.2	Hydrogeologie im Einzugsgebiet	82
3.2	Wassergewinnung und –aufbereitung.....	85
3.2.1	Allgemeines	85
3.2.2	Die Entnahmebrunnen	92
3.3	Entwicklung der Brunnenregenerierung im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein	98
4	Methodik.....	103
4.1	Datenerhebung und Brunnenauswahl.....	103
4.1.1	Wasseranalysen	104
4.1.2	Daten aus Regenerierungen.....	105
4.1.3	Wahl der fünf zu regenerierenden Brunnen.....	108
4.2	Regenerierung ausgewählter Brunnen im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein	112
4.2.1	Voruntersuchungen.....	112
4.2.2	Ablauf der Regenerierungen.....	115
4.2.3	Begleituntersuchungen	119
4.3	Probenahme und -aufbereitung	127
4.3.1	Wasserproben.....	128
4.3.2	Sedimentproben.....	129
4.4	Analytik	131
4.4.1	ICP-OES	132
4.4.2	IR-Spektroskopie	136
4.4.3	RFA.....	139
4.4.4	RDA	144
5	Überblick über die Eigenschaften der ausgewählten Brunnen.....	149

6	Ergebnisse der Regenerierungen	171
6.1	Begleituntersuchungen und Regeneriererfolg an den einzelnen Brunnen	172
6.2	Zusammenfassung der Ergebnisse der Begleituntersuchungen.....	199
6.3	Ergebnisse der Analytik	206
6.4	Bewertung des Regeneriererfolges und Schlussfolgerungen ..	225
7	Diskussion.....	235
7.1	Interpretation der Ergebnisse.....	235
7.2	Exkurs: Anwendung anderer Regenerierverfahren im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein	249
7.3	Wirtschaftliche Aspekte am Beispiel Wiesbaden-Schierstein ..	250
8	Forschungsempfehlungen.....	253
9	Zusammenfassung.....	255
10	Literatur	259
11	Anhang.....	277

1 Einleitung

Wasser ist Leben. Der Mensch benötigt in unseren Breiten allein zwei bis drei Liter Trinkwasser täglich, um zu überleben. Der durchschnittliche Wasserverbrauch liegt heute in Deutschland bei ca. 130 L/ pro Tag und Einwohner. Die öffentliche Wasserversorgung erfolgt zu ca. 65 % aus dem Grundwasser. Zur Wassergewinnung dienen Trinkwasserbrunnen. Bundesweit betreiben ca. 3750 Wasserversorgungsunternehmen eigene Grundwassergewinnungsanlagen [statistisches Bundesamt, 2003] in Form von Vertikalfilterbrunnen, Brunnengalerien und Horizontalfilterbrunnen. Hinzu kommen zahlreiche weitere Brunnen zur Uferfiltratgewinnung und von Mineral- und Heilwasserabfüllern und Brauereien.

Brunnen stellen die unmittelbare Schnittstelle zwischen dem Grundwasserdargebot als Ressource und der Nutzung durch den Menschen dar. Da aus verschiedenen Gründen zunehmend weniger neue Wassergewinnungsanlagen gebaut werden, steht die Werterhaltung und Pflege der bestehenden Brunnen immer mehr im Mittelpunkt einer optimierten Wasserwirtschaft. Dies zeigt auch die Vielzahl der in den letzten zehn Jahren erschienenen Literatur, die Überarbeitung des Regelwerks des Deutschen Verbandes des Gas- und Wasserfachs e.V. (DVGW) und das große Interesse und der Diskussionsbedarf bei Tagungen und Foren zu diesem Thema. Der Brunnenbetrieb steht dabei an zentraler Stelle und bildet die Verknüpfung verschiedenster Fachgebiete. Hierzu zählen grundlegende Fragestellungen der Hydrogeologie und Hydrologie, technische Aspekte bei Brunnenbau und Brunnenrehabilitierung und für den Betreiber relevante Schwerpunkte beim Brunnenmonitoring sowie der wirtschaftlichen Analyse der Kosten (Abb. 1-1).

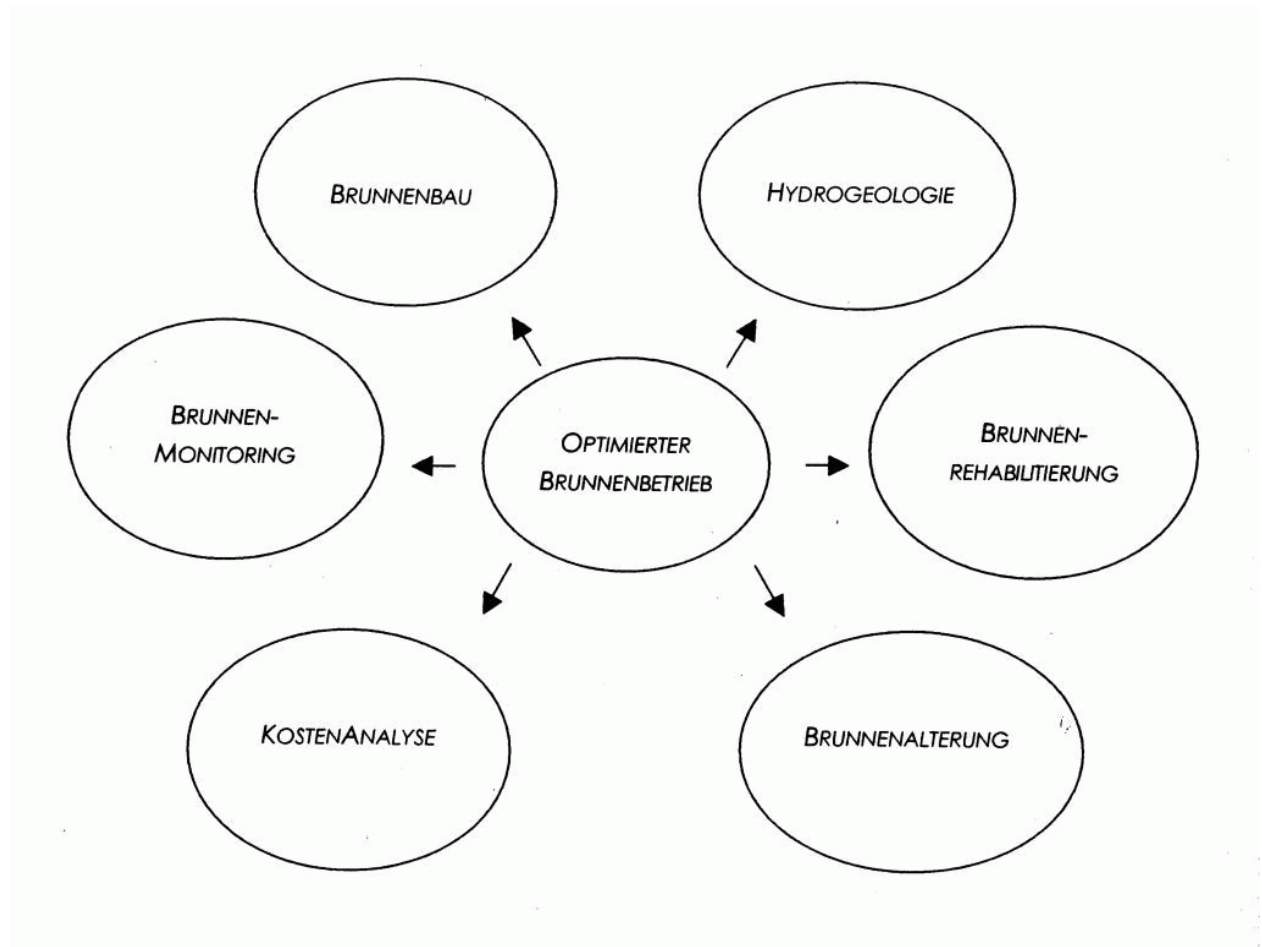


Abb. 1-1: Verknüpfung der für den optimalen Brunnenbetrieb relevanten Fachgebiete der Wasserwirtschaft [aus WICKLEIN & STEUSSLOFF, 2002:2]

1.1 Problemstellung

Jedes Brunnenbauwerk stellt einen Eingriff in das natürliche System des Bodens und des Grundwasserleiters dar. Veränderungen des Wasserchemismus sind nicht auszuschließen. Wasserinhaltsstoffe wie beispielsweise Eisen und Mangan sowie Mikroorganismen können einen natürlichen Alterungsprozess der Brunnenrohre und des Filterkieses verursachen. Dieser äußert sich in einer immer weiter nachlassenden Leistung des Brunnens im Laufe seines Betriebes, d. h. in zunehmender Absenkung bei konstanter Fördermenge oder abnehmender Fördermenge bei gleich bleibendem Betriebswasserspiegel.

- Einleitung -

Die wesentlichen Alterungsprozesse sind:

- das Versanden oder Verschlammten aufgrund von Sandführung des geförderten Wassers
- die Bildung von Inkrustationen durch Verockerung, Versinterung oder die Ablagerung von Aluminiumverbindungen
- das Verschleimen durch Massenentwicklung schleimbildender Bakterien
- die Zerstörung der Filterrohre durch Korrosion u. a.

Nur die regelmäßige Beobachtung des Brunnens sowie die Aufzeichnung, Auswertung und Dokumentation der Leistungsdaten und durchgeführter Wartungsmaßnahmen ermöglichen einen optimalen Brunnenbetrieb. Noch ist es jedoch weit verbreitet, dem Brunnen erst dann ausreichend Aufmerksamkeit zu widmen, wenn seine Leistung ein für den Betreiber erträgliches Maß unterschritten hat. Dann wird oftmals festgestellt, dass auf Grundlage vorhandener Daten keine verlässliche Beurteilung des Brunnenzustandes erfolgen kann, denn die Bewertung der Betriebsleistung und Ermittlung der Regenerierbedürftigkeit eines Brunnens erfordert eine umfassende Dokumentation aller Brunnendaten. Eine scheinbare Kostenminderung durch Einsparungen bei der Betriebsüberwachung hat daher zumeist stark erhöhte Kosten bei der Brunnenwartung zur Folge.

Um dem in Zukunft besser vorzubeugen, kommt der Überwachung des Brunnens, d. h. dem Brunnenmonitoring, ganz entscheidende Bedeutung zu. Als Grundlage für eine lange Lebensdauer des Brunnens und als stetig aktualisierte Entscheidungshilfe für erforderliche Maßnahmen muss das Monitoring bereits beim Neubau des Brunnens begonnen und regelmäßig fortgeführt werden. Hier setzt u. a. das neue DVGW Merkblatt W 125 Brunnenbewirtschaftung – Betriebsführung von Wasserfassungen (April 2004) an und auch diese Arbeit soll beispielhaft dazu beitragen, vor allem den Betreibern eine anwendungsbezogene Hilfestellung an die Hand zu geben, wie eine Brunnenüberwachung zu gestalten ist, um eine optimale Nutzung und Pflege und eine lange Betriebsdauer zu gewährleisten.

Das neue DVGW Merkblatt W 125 und auch Fachpublikationen z.B. in der *bbr – Fachmagazin für Brunnen und Leitungsbau* geben hierzu Übersichtstabellen für Betriebsüberwachungspläne. Darin aufgeführt ist auch die regelmäßige Kontrolle verockerungsrelevanter Parameter.

Welche das sind und in welchem Zusammenhang sie mit den Brunnen- und Grundwasserleitereigenschaften stehen, wird an dieser Stelle jedoch nicht näher bezeichnet und ist daher ein Schwerpunkt dieser Arbeit, d. h. es sollen diejenigen Brunnenparameter bestimmt werden, die den Betrieb, die Alterung und die Regenerierung beeinflussen.

Als besonders wichtig soll bereits an dieser Stelle der enge Zusammenhang zwischen Brunnenalterung und Brunnenbetrieb betont werden. Die Brunnenalterung wiederum hängt maßgeblich von den hydrogeologischen Bedingungen und dem Brunnenbau ab, so dass ihr ebenfalls eine zentrale Rolle zukommt. Dem wird Rechnung getragen durch

- die auf hydrogeologischen Grundlagen aufbauende Brunnenplanung, von der Ausschreibung über den Bau bis hin zum Betrieb,
- die wissenschaftliche Erforschung der Entstehung und des Aufbaus der Alterungserscheinungen,
- die ständige Entwicklung von Verfahren und Technologien, selbige zu entfernen und den Brunnen instand zu halten.

Ein auf die individuellen Erfordernisse abgestimmtes brunnen- oder problemspezifisches Überwachungsprogramm gibt dann sowohl dem Brunnenbetreiber als auch der Auftrag nehmenden Regenerierfirma ein Werkzeug zur Auswahl geeigneter Methoden zur Wiederherstellung der Brunnenleistung und zur Bewertung des Regeneriererfolges an die Hand. Daraus kann ebenso der Vergleich verschiedener Verfahren abgeleitet werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, anhand von Brunnenregenerierungen mit dem Ultraschallverfahren ein Beispiel für eine begleitende Brunnenüberwachung, Auswertung und Dokumentation darzustellen. Hauptanliegen ist es dabei, die Mechanismen der Belagsbildung und deren räumliche und zeitliche Entwicklung in einen Zusammenhang zu den hydrochemischen Gegebenheiten des Brunnens zu setzen und allgemeingültige Zusammenhänge und Analyse- bzw. Überwachungsmethoden zu entwickeln. Sie ging hervor aus dem Projekt "Ultraschall – ein umweltfreundliches Verfahren zur Brunnenregenerierung" des ESWE-Institutes für Wasserforschung und Wassertechnologie GmbH, jetzt Rhine-Main Water Research gGmbH, Wiesbaden, das vom ESWE Innovations- und Klimaschutzfonds gefördert wurde.

- Einleitung -

In den bisherigen Arbeiten zum Schwerpunkt Brunnenregenerierung am ESWE-Institut wurden immer wieder drei grundsätzliche Aspekte herausgearbeitet:

- die z. T. mangelhafte Dokumentation und Aufbereitung vorhandener Brunnendaten seitens der Wasserwerksbetreiber
- die Frage nach der Art und Zusammensetzung der typischen Verockerungserscheinungen und ihres Einflusses auf den Regeneriererfolg sowie
- das Fehlen einer einheitlichen Bezugsbasis zur Bewertung des Regeneriererfolges und zum Vergleich verschiedener Regenerierverfahren.

Grundlage dieser Arbeit sind daher vor allem Daten aus Regenerierungen von Brunnen. Sie umfassen z. T. neben den normalen Brunnenbetriebsdaten auch Analyseergebnisse des abgepumpten Wassers sowie von Brunnenbelägen, die bei früheren Regeneriermaßnahmen gewonnen wurden. Mithilfe dieser Grundlagendaten soll die Belagsentstehung nachvollzogen werden, um daraus die hydrochemischen Parameter festzulegen, die von Brunnen bekannt sein müssen und anhand derer die Verockerungsneigung und deren Geschwindigkeit sowie die Art und Zusammensetzung der Beläge abgeschätzt werden kann.

Die Aufarbeitung der vorhandenen Altdaten hilft gleichzeitig, Lücken in der Dokumentation zu finden, im Zuge der anstehenden Maßnahme zu füllen und die Richtung für ein zukünftiges, brunnenspezifisches Monitoring-Programm vorzugeben sowie verschiedene Verfahren miteinander zu vergleichen und daraus die Entscheidungen bezüglich später durchzuführender Regenerierungen zu unterstützen.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein. Hier werden insgesamt 42 Entnahmebrunnen betrieben. Sie sind durchschnittlich 15 m tief und haben zwischen 5 und 6 m Filterstrecke. Alle Brunnen wurden und werden mehr oder weniger regelmäßig gereinigt und regeneriert. Sie weisen Verockerungserscheinungen unterschiedlicher Zusammensetzung und Stärke auf. Typischerweise handelt es sich vor allem um eisen- oder manganhaltige Beläge, die zum größten Teil unter der Mitbeteiligung von Mikroorganismen gebildet wurden. Die ähnlichen Eigenschaften der Brunnen hinsichtlich des Ausbaus erlauben eine Konzentration auf die Beläge und schränken andere, Einfluss nehmende Faktoren, die sich aus brunnenspezifischen Größen ergeben, ein.

Ausgewertet werden Analysendaten der in Schierstein seit 1992 durchgeführten chemischen Regenerierungen und Belagsentnahmen. Anhand der Ergebnisse werden fünf Brunnen für die genaue Untersuchung und wissenschaftlich begleitete Regenerierung ausgewählt. Die Regenerierungen werden im Rahmen des o. g. Projektes mit dem Ultraschall-Verfahren durchgeführt, das am ESWE-Institut seit 1997 wissenschaftlich erarbeitet wird. Die Maßnahmen werden von Probenahmen und der Analyse des Wassers und der entfernten Feststoffe begleitet und die Ergebnisse mit den Altdaten der Brunnen verglichen, um die folgenden Fragen beantworten zu können:

- Was muss ich von einem Brunnen wissen, um ihn für eine geeignete Pflege charakterisieren zu können?
- Wie wirken sich die geologischen Gegebenheiten auf die chemischen Parameter im Grundwasserleiter, im Grundwasser und im Brunnenwasser aus?
- Welche hydrochemischen Parameter sind von Bedeutung?
- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen der Hydrochemie und
 - der Schnelligkeit der Brunnenalterung
 - der Zusammensetzung der Beläge
 - der Aushärtung der Beläge
- Wo im Ringraum entstehen die Beläge bevorzugt?
- Besteht eine Abhängigkeit zwischen der Art der Beläge und dem Regeneriererfolg einer Ultraschallregenerierung und wie lässt sie sich zeitlich oder räumlich beschreiben?

Die vorliegende Arbeit ist gegliedert in einen Grundlagenteil mit einem Abriss zu den hydrogeologischen Parametern, zum Brunnenbau und Brunnenbetrieb sowie zur Alterung und Regenerierung. Es folgt eine Beschreibung des Untersuchungsgebietes und der angewendeten Methoden. Die Eigenschaften der, im Zuge der Arbeit, regenerierten Brunnen werden in Kapitel 5 gesondert beschrieben und schließlich in die Auswertung der Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen miteinbezogen und diskutiert.

1.2 Stand der Forschung

GROSSMANN (2000) kam in einer Literaturstudie zur Regeneration von Trinkwasserbrunnen 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.

Er schreibt: „Von vielen Autoren wird die Bedeutung einer frühzeitigen Regenerierung für den nachhaltigen Regenerierungserfolg betont. Es besteht allerdings wenig Klarheit darüber, welche Verfahren bei welchen Randbedingungen für einen nachhaltigen Regenerierungserfolg garantieren.“ (gwf 141, S.592)

Seitens der Brunnenbetreiber werden jedoch zunehmend und verstärkt Lösungsansätze gefordert, die den Vergleich der verschiedenen Verfahren und die Auswahl des jeweils am besten geeigneten Verfahrens ermöglichen. Dem wurde und wird vor allem dadurch Rechnung getragen, dass einzelne Verfahren umfangreich untersucht und deren Wirkung belegt wurde. Die Wahl geeigneter Verfahren muss jedoch immer die speziellen Gegebenheiten des einzelnen Brunnens berücksichtigen und diese wiederum können nur durch die Überwachung der richtigen Parameter ermittelt werden.

Heute ist es unumstritten, dass ein Brunnen nicht nur gebaut und betrieben, sondern auch unterhalten, beobachtet und gewartet werden muss. Dies drückt sich auch in der Zahl der neu erschienenen Lehrbücher, Neuauflagen und Beiträge in der bbr – Fachmagazin für Brunnen und Leitungsbau sowie in dem großen Interesse und der stetigen Überarbeitung des Regelwerks seitens des DVGW aus.

Besonders die Projekt- und Forschungsarbeiten seitens der Betreiber, oftmals zusammen mit Beratenden Ingenieuren oder Universitäten, haben in den letzten fünf bis zehn Jahren neue Schwerpunkte geöffnet. Die Entwicklung ging dabei weg von der reinen Betrachtung des Bauwerkes Brunnen aus der Konstruktions- und Kostenperspektive und hin zu einem wirklichen „Brunnenmanagement“. Hierzu zählen schwerpunktmäßig die Erforschung der Brunnenalterung und die Entwicklung moderner Regeneriertechniken.

Für den Bereich der Brunnenalterung, Regenerierung und Sanierung sind die aktuellen Erkenntnisse und technologischen Fortschritte aufgeführt und zusammengefasst bei HOUBEN & TRESKATIS (2003): Regenerierung und Sanierung von Brunnen.

Die optimale Brunnenbewirtschaftung steht im Mittelpunkt bei WICKLEIN & STEUSSLOFF (2002): Brunnen – ein komplexes System.

Das neue DVGW Merkblatt W125 „Brunnenbewirtschaftung – Betriebsführung von Wasserfassungen“ aus dem Jahr 2004 schließt die Lücke zwischen Brunnenbau und Brunnenregenerierung.

Im Bereich der Brunnenregenerierung existieren heute zahlreiche Patente. Interessant sind vor allem die mechanischen und hydromechanischen Verfahren. Durch den völligen Verzicht auf den Einsatz von Chemikalien sind sie einfacher, schneller und meist kostengünstiger, dabei aber i. d. R. genauso effektiv wie chemische Regenerierungen. Ein Vergleich verschiedener mechanischer und hydromechanischer Verfahren erfolgte in einem Modellversuch des DVGW (DVGW-Forschungsvorhaben W 55/99 – Brunnenregenerierung). Daraus und aus den Projekten im ESWE-Institut stehen in Deutschland mittlerweile zwei Modellanlagen im halbtechnischen Maßstab zur Simulation der Bedingungen und Abläufe in Vertikalfilterbrunnen bei der Brunnenregenerierung zur Verfügung.

Das Modell aus dem DVGW-Forschungsvorhaben W 55/99 im Grundwasserforschungszentrum Dresden stellt dabei besonders die strömungsmechanischen Effekte der verschiedenen Verfahren im Ringraum eines Brunnens und am Übergang zum anstehenden Untergrund in den Mittelpunkt. Die Modellanlage am ESWE-Institut in Wiesbaden dient der Simulation echter Brunnenbedingungen bezüglich des Ausbaus und des Ringraumes im Labormaßstab. Hier können Filterausbaumaterialien und Regenerierverfahren unter Druckbedingungen getestet werden, wie sie auch in Brunnen durch den hydrostatischen Druck der Wassersäule herrschen. Die Messausrüstung umfasst derzeit Hydrophone für Schalldruckmessungen unter Wasser und die Möglichkeit zur Entnahme von Wasserproben im laufenden Betrieb der Anlage, z. B. für Partikel- oder Trübungsmessungen. Sie kann im Rahmen des technisch machbaren jederzeit um- oder aufgerüstet werden.

In der Fachliteratur, z. B. der bbr – Fachmagazin für Brunnen und Leitungsbau, finden sich zahlreiche Veröffentlichungen zur Bewertung einzelner Regeneriermaßnahmen oder dem Verfahrensvergleich an einzelnen Brunnen. Wünschenswert ist nun die Entwicklung eines Systems, das Brunnenbetreibern aus allen vorliegenden Erfahrungswerten einen Leitfaden zur Auswahl geeigneter, Erfolg versprechender Regenerierverfahren anhand bestimmter Brunnenparameter zur Hand gibt. Diese Parameter werden im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft für die Brunnen im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein ermittelt.

- Einleitung -

HOUBEN & TRESKATIS (2003) geben zur Planung, Durchführung und Bewertung von Regeneriermaßnahmen ein Fließdiagramm auf der Basis eines brunnenspezifischen Monitorings an. Hierbei steht die festgestellte Ursache des Leistungsabfalls im Mittelpunkt und bestimmt die Wahl des geeigneten Verfahrens. Der Erfolg der gewählten Maßnahme bestimmt dann das weitere Vorgehen.

Die zwei Ebenen dieses Schemas sind:

1. die Ursachenforschung und daraus die Ableitung des geeigneten Verfahrens und
2. die Beurteilung des Erfolges und daraus die Ableitung des weiteren Vorgehens.

Im Gegensatz dazu soll im Rahmen dieser Arbeit das Brunnenmonitoring selbst betrachtet und am Beispiel Wiesbaden-Schierstein die zu überwachenden hydrochemischen Parameter bestimmt werden, die den Regenerierbedarf frühzeitig anzeigen und damit zur effektiven Brunnenbewirtschaftung beitragen (Abb. 1-2).

Die Übertragung der Ergebnisse auf andere Standorte und Verfahren erfordert dann die gemeinsame Diskussion und die Zusammenarbeit von Betreibern und Regenerierfirmen. Hierzu müssen die einzelnen Forschungs- und Entwicklungsergebnisse gemeinsam diskutiert und die vielfältig vorhandenen Erfahrungen strukturiert bearbeitet werden.

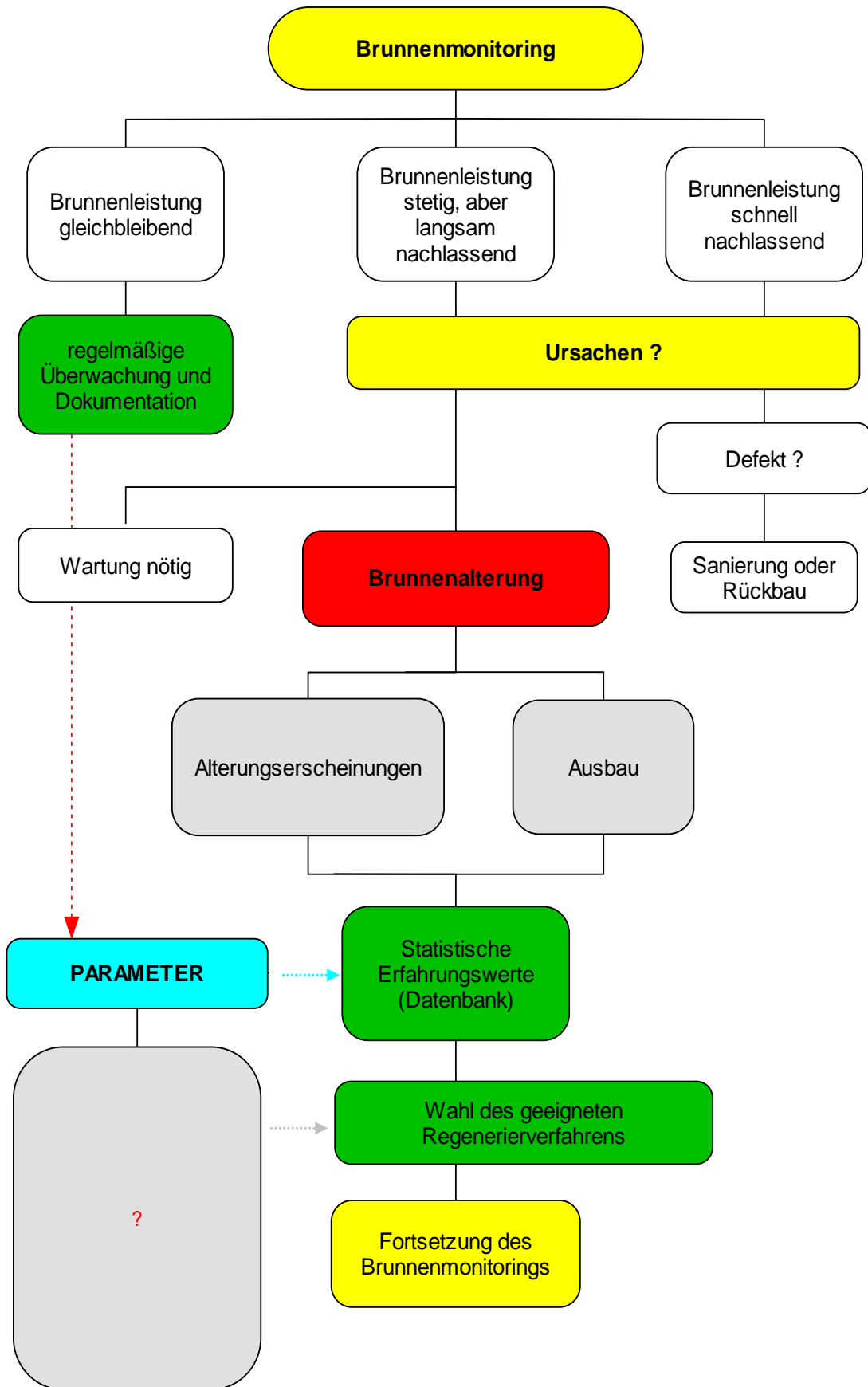


Abb. 1-2: Schema eines möglichen Leitfadens zur Wahl geeigneter Regenerierverfahren. (Wiacek, 2005)

2 Grundlagen

Zur Entnahme von Grundwasser dienen Brunnen. Mit ihnen wird der Grundwasserleiter erschlossen, das Wasser gesammelt und zur Nutzung befördert. Die älteste und einfachste Form stellen Schachtbrunnen dar. Sie dienten meist gleichzeitig als Wassersammel- und Speicherbehälter und wurden nur wenige Meter tief ausgeschachtet, um einen nahe der Erdoberfläche liegenden Grundwasserleiter anzuschneiden und zu nutzen. Wegen der geringen Liefermengen und der Gefahr leichter Verunreinigung haben sie heute keine Bedeutung mehr. Die Grundwassererschließung erfolgt heutzutage fast ausschließlich über Bohrbrunnen. Der Begriff wurde 1943 vom Fachnormenausschuss Brunnenbau festgelegt und ersetzte den Begriff „Rohrbrunnen“. Damit sollte die Art der Abteufung im Namen enthalten sein. Dem Bohrbrunnen gegenüber dadurch abgegrenzt sind der „Rammbrunnen“ (auch Abessinierbrunnen) und der o. g. Schachtbrunnen [BIESKE et al. 1998, S.16].

Bohrbrunnen werden durch den Ausbau von Bohrungen hergestellt. Unterschieden werden nach BIESKE et al. senkrechte Fassungen, die Grundwasserleiter in beliebiger Tiefe erschließen, und waagerechte Fassungen, die flach liegende Grundwasservorkommen nutzen. Am weitesten verbreitet sind die senkrechten Grundwasserfassungen, die so genannten Vertikalfilterbrunnen. Auf diesen soll der Schwerpunkt der Darstellung liegen, da nach bisherigem Stand der Kenntnisse und Technik herkömmliche Regenerierverfahren auf die Behandlung von Vertikalfilterbrunnen ausgelegt sind. Für waagerechte Grundwasserfassungen, wie Sickerstollen und Horizontalfilterbrunnen, gelten viele Besonderheiten hinsichtlich der Planung, dem Bau und dem Betrieb, die in der entsprechenden Fachliteratur, z. B. bei CONRAD (2002), BIESKE (1959), BLASCHE (1969) oder HÜPFER (1997), detailliert dargelegt sind. Ebenso verzichtet wird auf die Darstellung von Großfilterbrunnen nach INGERLE, die einen Sonderfall der Vertikalfilterbrunnen darstellen. Hinweise hierzu gibt CONRAD (2002).

Die Wahl des geeigneten Bauwerkes bzw. der optimalen Betriebsform richtet sich in erster Linie nach dem Flurabstand und der Mächtigkeit der grundwasserführenden Schicht sowie den Vorgaben aus der Nutzungsplanung hinsichtlich des Bedarfes. Einschränkend können bohr- und bautechnische Vorgaben hinzukommen [CONRAD, 2002].

Im Folgenden sollen die Grundzüge des Brunnenbaus und des Betriebes nach heutigem Stand der Technik für Vertikalbrunnen, die als Einzelbrunnen oder als Mehrbrunnenanlage betrieben werden können,

beschrieben werden. Da der optimale Brunnenbetrieb ein Schwerpunktthema für alle Wasserversorger darstellt, kann an dieser Stelle nur versucht werden, einen möglichst vollständigen Überblick als Auszug aus den umfangreichen Veröffentlichungen, Tagungsbeiträgen und Forschungsarbeiten zu geben. Die Grundlagen des Brunnenbaus werden kurz ausgeführt, da sich Fehler beim Bau negativ auf die Alterung und die Regenerierfähigkeit eines Brunnens auswirken.

Vertikalfilterbrunnen (Abb. 2-1) werden durch den Ausbau senkrechter Bohrungen hergestellt. Die wesentlichen Bestandteile eines Vertikalfilterbrunnens sind nach BALKE et al. (2000) die Verrohrung, mit Aufsatz- und Filterrohrstrecken sowie dem Sumpfrohr, und die Filterkiesschüttung.

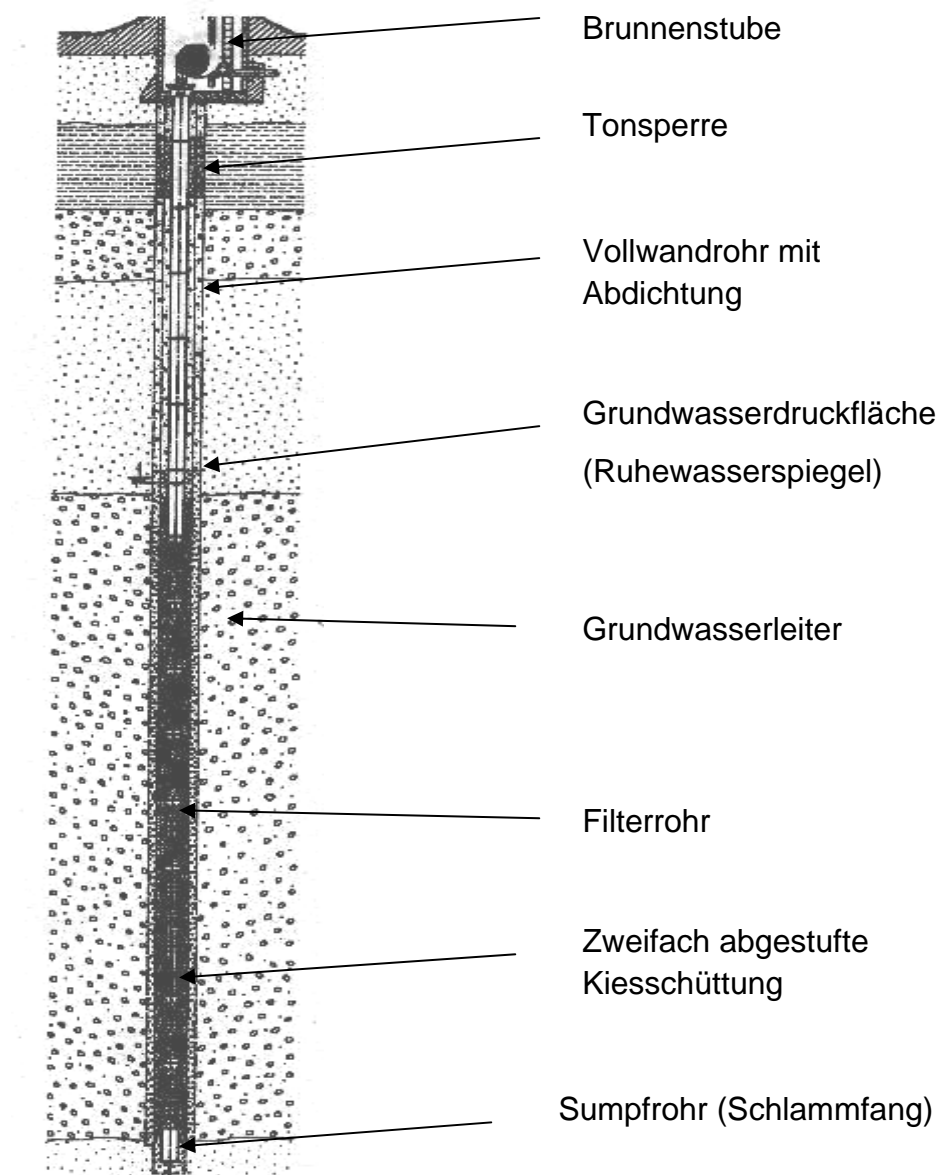


Abb. 2-1: Schnitt durch einen Vertikalfilterbrunnen [aus BIESKE, 1998:17]

Die wichtigsten Charakteristika sind der Filterrohrdurchmesser, der Bohrdurchmesser, die Tiefe des Brunnens sowie Lage und Länge der Filterstrecken. Sie werden bestimmt durch den Verwendungszweck, die geplante Förderleistung und die Eigenschaften des Grundwasserleiters.

2.1 Brunnenbau

2.1.1 Hydrogeologische Grundlagen

Als Grundwasserleiter bezeichnet man im Untergrund anstehende Gesteine, die Porenräume oder Klüfte aufweisen und in diesen unterirdisches Wasser speichern und weiterleiten. Die Wasserbewegung verläuft, der Schwerkraft folgend und je nach Neigung der wasserführenden Schicht, mehr oder weniger horizontal. Einzelne, nach oben und unten durch wasserstauende Bodenschichten voneinander getrennte Grundwasserleiter werden als Grundwasserstockwerke bezeichnet. HÖLTING (1996) gibt weiterhin die folgenden Definitionen zur Abgrenzung eines Grundwasservorkommens: „Die **Grundwasser-oberfläche** ist die obere Grenzfläche, die **Grundwassersohle** (oder -unterfläche) die untere Grenzfläche des Grundwasserkörpers. Als **Grundwassermächtigkeit** ist der lotrechte Abstand zwischen Grundwasserunter- und Grundwasseroberfläche definiert.“ (S. 93f, Hervorheb. im Orig.).

Der Begriff „Aquifer“ beinhaltet den Bereich der ungesättigten Zone, d. h. der durchlässigen Bodenschichten, in denen sich das Wasser der Schwerkraft folgend, von oben nach unten bewegt (Sickerwasserzone) und der Porenraum neben dem Wasser auch Bodenluft enthält, und den Bereich der gesättigten Zone, d. h. die grundwasserführende Schicht. Abb. 2-2 zeigt hierzu das Schema der Grundwasserneubildung:

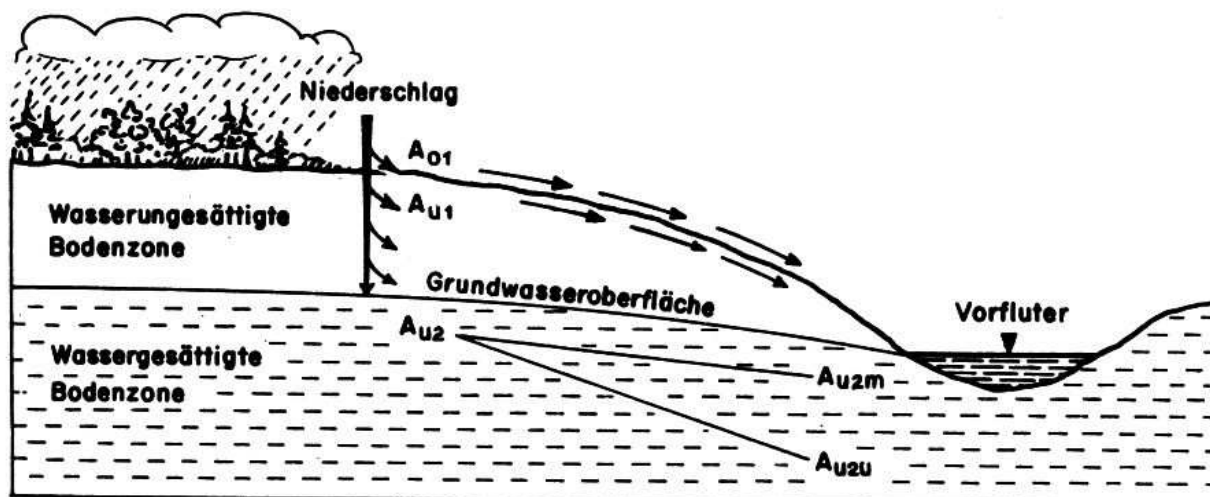


Abb. 2-2: gesättigte und ungesättigte Zone im Schema der Grundwasserneubildung. Die Pfeile zeigen den oberirdischen und unterirdischen Abfluss [aus HÖLTING, 1996:79]

Je nach Lage der Grundwasseroberfläche werden ungespannte und gespannte Grundwässer unterschieden. Abb. 2-3 zeigt links den ungespannten Grundwasserleiter. Hier liegt die Grundwasseroberfläche innerhalb des Grundwasserleiters. Grundwasseroberfläche und Grundwasserdruckfläche fallen zusammen. Man spricht auch von freiem Grundwasser. Im Gegensatz dazu wird beim gespannten Grundwasser (Abb. 2-3 rechts) die wasserführende Schicht von einer praktisch undurchlässigen Schicht überdeckt und die Grundwasseroberfläche kann nicht entsprechend ihrem Druck ansteigen. Die Grundwasserdruckfläche liegt dann im Bereich der überlagernden undurchlässigen Gesteinsschichten.

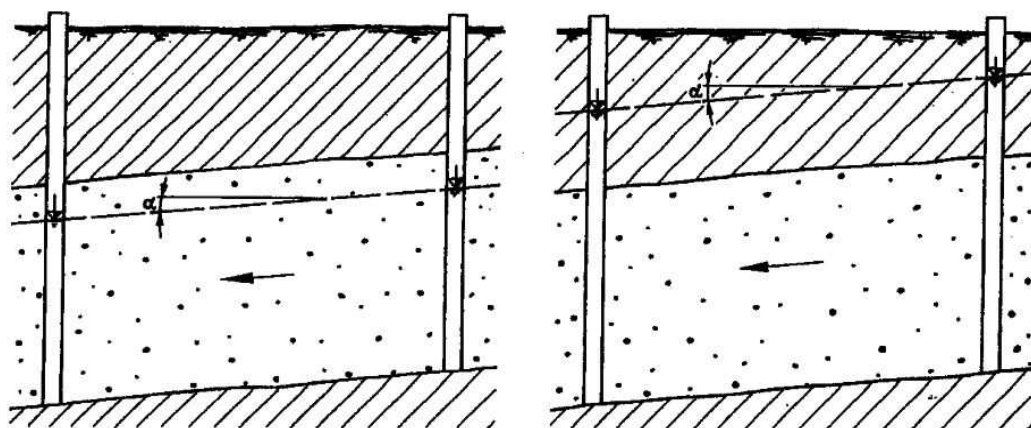


Abb. 2-3: links: ungespannter Grundwasserleiter mit freier Grundwasseroberfläche; rechts: gespannter Grundwasserleiter mit Grundwasserdruckfläche in der überdeckenden wasserstauenden Schicht [aus BIESKE, 1998:174]

Die Messung der Grundwasserstände ist eine der wichtigsten Maßnahmen zur Beurteilung der hydrogeologischen Gegebenheiten an einem geplanten Brunnenstandort. Von Bedeutung ist die Ermittlung der folgenden Eigenschaften eines Grundwasserleiters:

- Art des Grundwasserleiters: Poren- oder Kluftgrundwasserleiter
- Tiefenlage und Mächtigkeit der wasserführenden Schicht(en)
- Durchlässigkeit
- Wasserandrang

Art, Tiefenlage und Mächtigkeit des Grundwasserleiters werden über das Auswerten vorhandener oder das Niederbringen einer neuen Erkundungsbohrung mit Aufnahme eines geologischen Schichtenverzeichnisses gemäß DIN 4022, Teil 1 - 3 (1987) ermittelt.

Die Durchlässigkeit ist abhängig vom nutzbaren Hohlraumvolumen. Bei Porengrundwasserleitern ist dies das Volumen der Poren, bei Kluftgrundwasserleitern entsprechend das Volumen der Klüfte. Angegeben wird sie üblicherweise als Durchlässigkeitsbeiwert (kf-Wert).

Dieser kann rechnerisch ermittelt, aus der Korngrößenanalyse abgeleitet oder aus Pumpversuchen an einem Versuchsbrunnen bzw. einer Grundwassermessstelle bestimmt werden. Die Methoden sind in der Fachliteratur erschöpfend beschrieben und sollen hier nicht wiedergegeben werden. Es wird verwiesen auf BALKE et al. (2000), S.34ff und 152ff; BIESKE et al. (1998), S. 170ff und HÖLTING (1996), S.105ff.

Die im Folgenden beschriebenen Grundlagen und aufgeführten Gleichungen gelten, soweit nicht anders gekennzeichnet, nur für Porengrundwasserleiter. Für Kluftgrundwasserleiter sind Pumpversuche das am besten geeignete Verfahren zur Feststellung der möglichen Brunnenleistung.

Nach Ermittlung des kf-Wertes und Bestimmung der hydrogeologischen Verhältnisse kann der Wasserandrang Q_a [m^3/s] angegeben werden. Diese Größe beschreibt die Wassermenge, die dem Brunnen pro Zeiteinheit aus dem Grundwasserleiter zufließt [BIESKE et al., 1998].

Sie kann aus den Dupuit-Thiemschen Brunnengleichungen gemäß der folgenden Formeln berechnet werden:

<u>für ungespannte Grundwasserleiter:</u>	<u>für gespannte Grundwasserleiter:</u>
$Qa = \pi \cdot kf \cdot \frac{H^2 - h^2}{\ln \frac{R}{r}}$	$Qa = 2\pi \cdot kf \cdot M \cdot \frac{H - h}{\ln \frac{R}{r}}$
Mit	
kf - Durchlässigkeitsbeiwert des Grundwasserleiters [m/ s]	
H - Ruhewasserspiegel [m]	
h - Betriebswasserspiegel [m]	
R - Reichweite des Absenkungstrichters [m]	
r - Radius des Brunnens [m]	
M - Mächtigkeit des Grundwasserleiters [m]	[nach BIESKE, 1998]

Die Wasserentnahme an einem Brunnen führt immer zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels rund um den Brunnen. Es bildet sich ein Absenkungstrichter.

Die Differenz der Höhen des Ruhewasserspiegels und des Betriebswasserspiegels entspricht dem Absenkungsbetrag im Brunnen. Die Reichweite des Absenkungstrichters ist der Radius des Kreises, in dem der Absenkungstrichter um den Brunnen die Ebene der ruhenden Grundwasserfläche schneidet.

Die zur Berechnung verwendeten Größen zeigt auch noch einmal Abb. 2-4:

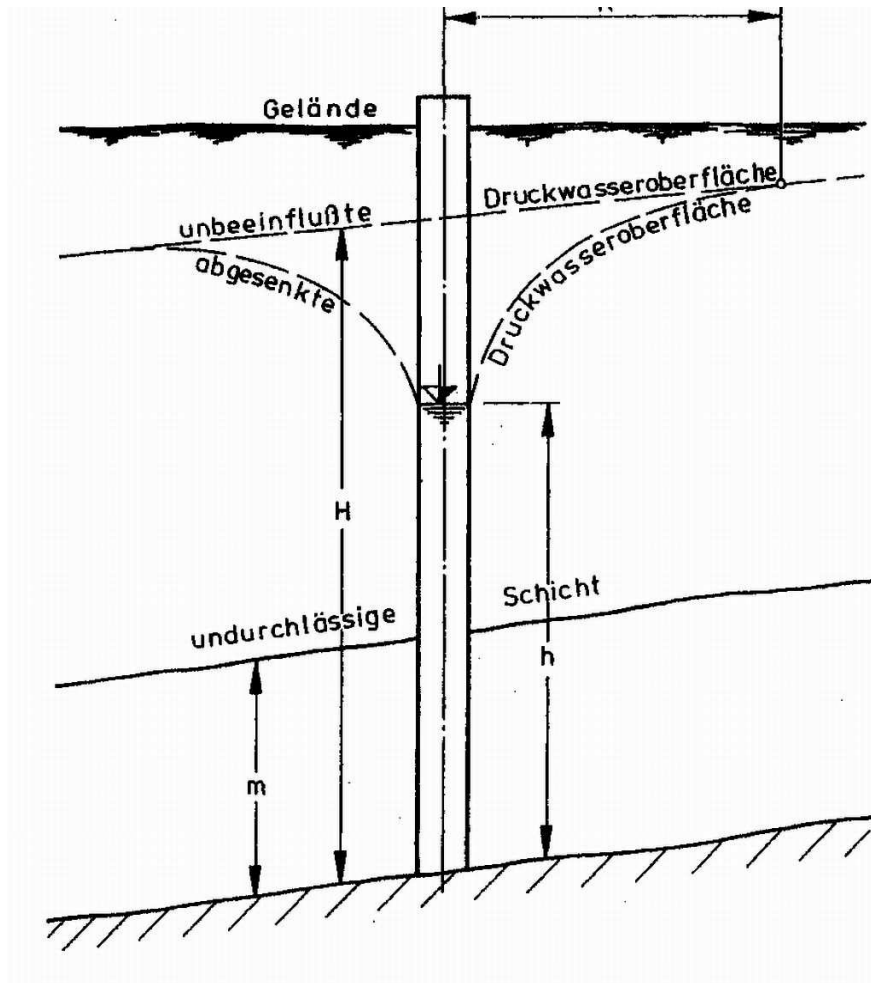
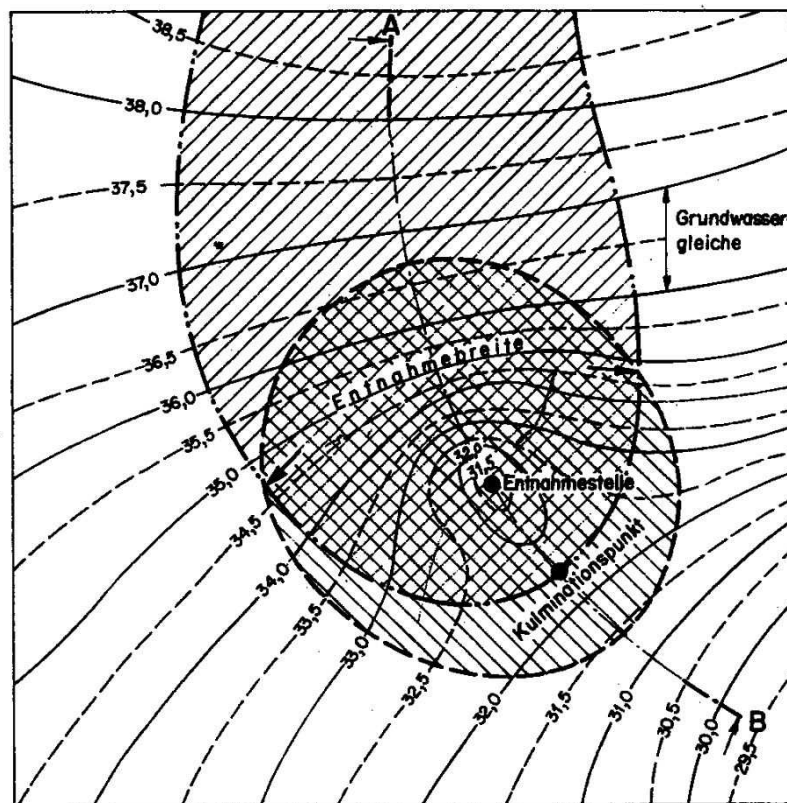


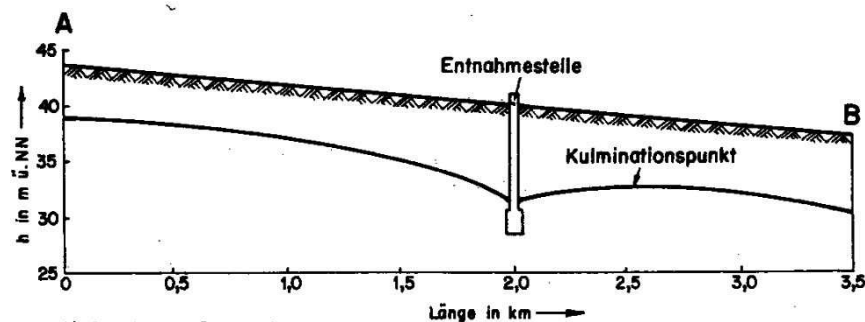
Abb. 2-4: Brunnen im gespannten Grundwasserleiter, Absenkung des Wasserspiegels proportional zum Wasserandrang [aus BIESKE, 1998:181]

Als Absenkungsbereich wird nach HÖLTING (1996) das Gebiet bezeichnet, in dem eine Absenkung des Grundwasserspiegels erkennbar ist. Dem Brunnen fließt daraus der Teil des Grundwassers zu, der im Entnahmebereich liegt, d. h. innerhalb des Einzugsgebietes und in der Zustromrichtung, begrenzt durch die Entnahmebreite. Die Entnahmebreite entspricht der Entfernung zwischen den Schnittpunkten des Einzugsgebietes mit dem Einzugsbereich.

Abb. 2-5 zeigt die beschriebenen Größen und Begriffe.



a) Plan der Grundwassergleichen



b) Grundwasserlängsschnitt



Abb. 2-5: Absenkungs- und Entnahmebereich um einen Brunnen im natürlichen Grundwasserstrom [aus DIN 4049, Ausgabe 1979, zitiert in HÖLTING, 1996:107]

Aus der Fließrichtung des Grundwassers ergibt sich eine elliptische Ausprägung des Entnahmetrichters. Dieser bezeichnet die Eintiefung der Grundwasserdruckfläche in direkter Umgebung des Brunnen. Daraus folgt auch, dass die Wassereintrittsfläche eines Brunnens nie gleichmäßig und von allen Seiten beansprucht wird, sondern, dass es eine Hauptzustromrichtung gibt.

Die technisch größtmögliche Leistung eines Brunnens ist angegeben durch das Fassungsvermögen Q_f [m^3/s]. Es gibt diejenige Wassermenge an, die der Brunnen pro Zeiteinheit entsprechend seiner durchströmten Filterstrecke aufnehmen kann. Das Fassungsvermögen ergibt sich aus der zur Verfügung stehenden Wassereintrittsfläche, abhängig von Bohrdurchmesser und Filterlänge, und der möglichen Fließgeschwindigkeit des Grundwassers in Abhängigkeit vom k_f -Wert des Grundwasserleiters. Nach empirischer Bestimmung der maximalen Geschwindigkeit, mit der das Grundwasser zufließen darf [SICHARDT, 1928], gilt:

für ungespannte Grundwasserleiter:

$$Q_f = 2r \cdot \pi \cdot h \cdot \frac{\sqrt{k_f}}{15}$$

für gespannte Grundwasserleiter:

$$Q_f = 2r \cdot \pi \cdot M \cdot \frac{\sqrt{k_f}}{15}$$

mit k_f -Durchlässigkeitsbeiwert des Grundwasserleiters [m/s]

h - Betriebswasserspiegel [m]

r - Radius des Brunnens [m]

M -Mächtigkeit des Grundwasserleiters [m]

[nach BIESKE, 1998]

Idealerweise sollte ein Brunnen immer die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters erschließen, d. h. bis zum Erreichen des Grundwasserstauers gebohrt werden [BIESKE, 1998]. Man spricht dann von vollkommenen Brunnen (Abb. 2-6 links).

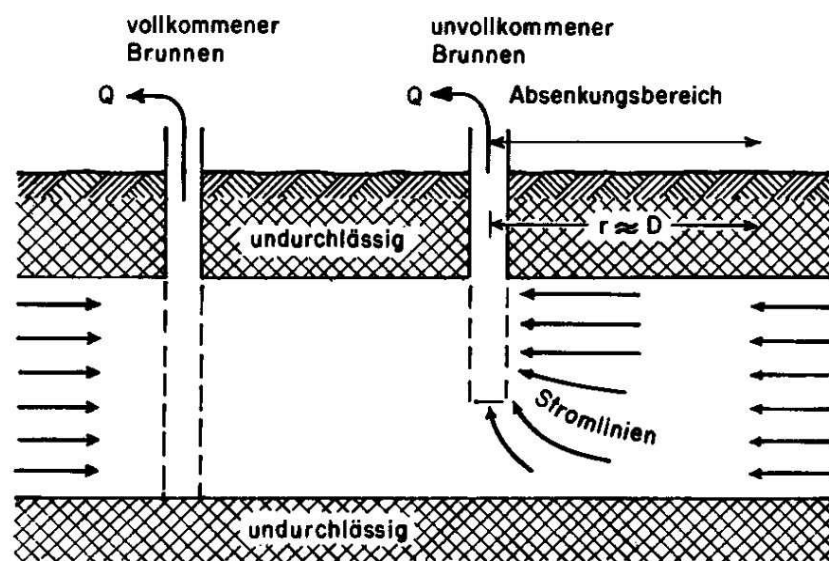


Abb. 2-6: Schematische Darstellung von vollkommenen und unvollkommenen Brunnen und der Anströmung [aus KRUSEMAN & DE RIDDER, 1970, zitiert in HÖLTING, 1996:104]

Um ein Versanden oder andere Alterungserscheinungen eines Brunnens zu vermeiden, wird anstelle des größtmöglichen Fassungsvermögens eines Brunnens eine ideale Brunnenleistung zugrunde gelegt [BALKE, 2000]. Es wird dafür in 1. Näherung die Hälfte der größtmöglichen Brunnenleistung angenommen.

Der Brunnendurchmesser ist damit je nach Anforderung an das Fassungsvermögen des Brunnens, d. h. die gewünschte Ergiebigkeit, zu berechnen.

Die hydrogeologischen Gegebenheiten an einem Standort, d. h. die Art, Mächtigkeit und Tiefenlage des Grundwasserleiters, die Durchlässigkeit des Gesteins sowie Wasserandrang und Fassungsvermögen, die Standfestigkeit des Gesteins und hydrochemische Parameter bestimmen die Wahl des geeigneten Bohrverfahrens, die Dimensionierung und den Ausbau einer Bohrung zu einem Bohrbrunnen.

2.1.2 Bauformen von Bohrbrunnen

In standfesten Gesteinen ist das Niederbringen eines filterlosen Bohrbrunnens möglich. Dies beschränkt sich jedoch auf homogen ausgebildete Festgesteine, die beim Bohren und vor allem beim späteren Betrieb kein Nachfallen zeigen. Diese Bauform stellt eine Ausnahme dar. Filterlose Bohrbrunnen haben eine weitaus geringere Lebensdauer, da das Gestein verwittert und dann zum Nachfallen neigen kann. Des Weiteren ist es schwieriger, sie gegen unerwünschte Wasserzutritte abzusperren.

Die heute bevorzugte Form von Bohrbrunnen ist der Kiesschüttungsbrunnen (vgl. Abb. 2-1, S.12). Dabei wird der Raum zwischen der Bohrlochwand und dem Ausbaurohr mit einer Kiespackung gefüllt. In Festgestein hat sie die Aufgabe, die Lage des Ausbaurohres zu stabilisieren und das Nachfallen gelockerten Gesteins aus der Bohrlochwand zu verhindern. In Lockergestein wirkt sie vor allem als Filter zwischen dem Grundwasserleiter und dem Brunnenfilterrohr und soll Sedimentteilchen des Grundwasserleiters zurückhalten, so dass diese nicht in den Brunnen mitgeschleppt werden können.

Das Wassereintrittsorgan eines Brunnens ist das Filterrohr [BIESKE et al., 1998]. Hier strömt das Wasser horizontal in den Brunneninnenraum und gelangt über die Unterwasserpumpe zur Grundwasserförderung. Der Filterrohrdurchmesser muss so gewählt sein, dass eine turbulente Strömung vermieden wird und ausreichend Platz für den Einbau einer Unterwasserpumpe bleibt. Die Filterrohrlänge richtet sich nach der Mächtigkeit des Grundwasserleiters.

Zu berücksichtigen ist dabei unbedingt die erwartete Absenkung des Grundwasserspiegels beim Brunnenbetrieb, um den Wasserspiegel nicht bis in den Bereich des Filters abzusenken. Verschiedene Grundwasserhorizonte sind mit Vollrohrbereichen gegeneinander abzudichten, um eine Vermischung von Wässern mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung zu unterbinden.

Die heute verwendeten Filterrohre bestehen zum überwiegenden Teil aus PVC (DIN 4922), Stahl (DIN 4925) oder Wickeldraht (DIN 4935). Sie unterscheiden sich vor allem in der Form und Anordnung der Filteröffnungen. Im einfachsten Fall sind dies runde Löcher, die jedoch durch Sedimentkörner leicht verstopft werden können. Entsprechend besser sind Schlitzfilter. Die Schlitzlöcher können unterschiedlich groß, parallel oder senkrecht zur Rohrachse und in Reihe oder versetzt zueinander angeordnet sein. Ein Spezialfall der Schlitzfilter sind die Schlitzbrückenfilter, bei denen die Öffnungen nicht vollständig herausgestanzt, sondern herausgebogen werden.

Hinsichtlich der Länge und des Durchmessers gibt es die genannten Materialien gemäß den DIN-Vorschriften in festgelegten Abmessungen, üblicherweise mit Durchmessern zwischen 40 und 400 mm für PVC-Rohre und 100 und 1000 mm für Stahlrohre, und Längen zwischen 1 und 5 Metern. Die Verbindung der einzelnen Rohrtouren erfolgt über Gewinde oder Steckverbindungen. Die Angabe des Durchmessers erfolgt als so genannte Nennweite (lichte Weite) bzw. als genormter Nenndurchmesser DN in mm.

Die wichtigsten Anforderungen an Brunnenfilterrohre sind nach BIESKE et al. (1998):

- Ermöglichung des möglichst sandfreien Wassereintritts bei größtmöglicher Öffnung zum Erreichen der optimalen Leistungsfähigkeit
- geringer Filtereintrittswiderstand
- Beständigkeit gegenüber Korrosion und Inkrustation
- hohe mechanische Festigkeit
- einwandfreie Beschaffenheit und Unbedenklichkeit in hygienischer und gesundheitlicher Hinsicht
- Langlebigkeit
- Betriebssicherheit.

Die Vorteile von Stahlrohren liegen in der hohen Druck- und Zugfestigkeit. PVC zeichnet sich durch ein geringeres Gewicht, Korrosionsbeständigkeit und eine höhere Unempfindlichkeit gegen chemische Substanzen im Grundwasser aus. Wickeldrahtfilter sind hinsichtlich der Schlitzweite besonders variabel.

Ältere Brunnen können mit Brunnenrohren aus Holz, Kupfer, Bronze oder Steinzeug ausgebaut sein. Diese Materialien wurden früher aufgrund der Korrosionsbeständigkeit verwendet, sind aber heute nicht mehr wirtschaftlich.

Eine Übersicht über die verwendeten Filterrohre, d. h. über die Entwicklung und typische Abmessungen gibt BIESKE et al. (1998, S.75ff).

Den Abschluss eines Brunnens nach unten bildet immer das Sumpfrohr, die Verbindung des Filterrohres nach oben mit dem Brunnenkopf wird als Aufsatzverrohrung (oder Vollrohr) bezeichnet (vgl. Abb. 2-1, S.12). Beide bestehen i. d. R. aus dem gleichen Material wie die Filterrohrstrecke und haben den gleichen Durchmesser.

Das eigentliche Filterorgan eines Brunnens ist die Kiesschüttung [BIESKE et al., 1998]. Sie besitzt die Aufgabe, im Wasser mitgeführte Partikel zurückzuhalten, damit sie nicht in den Brunnen mitgeschleppt werden. Dafür ist die sorgfältige Bestimmung der Schüttkorngröße eine unbedingte Voraussetzung. Als obere Grenze gilt der Ausschluss einer Kontakterosion am Übergang Grundwasserleiter / Filterkies, als untere Grenze die Vermeidung innerer oder äußerer Kolmation [Balke et al., 2000]. Festlegungen zur Bestimmung enthalten DIN-Normen und DVGW-Merkblätter, wie:

- DIN 4924 (1998): Filtersande und Filterkiese
- DIN 4022-I (1987): Baugrund und Grundwasser
- DIN 4023 (1984): Baugrund- und Wasserbohrungen
- DVGW Merkblatt W 113 (2001): Ermittlung, Darstellung und Auswertung der Korngrößenverteilung wasserleitender Lockergesteine für geohydrologische Untersuchungen und für den Bau von Brunnen.

Auf Grundlage des Kennkorns des Grundwasserleiters und des Filterfaktors des Filterrohres errechnet sich die notwendige Schüttkorngröße des Filterkieses. Vereinfacht gilt:

$$\text{Schüttkorndurchmesser} = \text{Kennkorndurchmesser} \times \text{Filterfaktor}$$

[BIESKE, 1998]

Der Kennkorndurchmesser wird aus der Siebanalyse an Bodenproben aus der Bohrung bestimmt, der Filterfaktor gibt an, wie viel mal größer das Korn der Filterkiesschicht sein muss, damit es am Filterrohr zurückgehalten wird. Für die ausführliche Darstellung wird verwiesen auf BALKE et al. (2000, S.397ff) und BIESKE et al. (1998, S. 112ff) sowie die o. g. Normen und Merkblätter.

Um eine Kiesschüttung ausreichender Schichtdicke einbringen zu können, müssen der Filterrohrdurchmesser und der Enddurchmesser der Bohrung in einem bestimmten Verhältnis stehen. Dabei erfolgt die Festlegung des Bohrdurchmessers auf Grundlage des erforderlichen Filterdurchmessers, da die Anströmverhältnisse am Filterrohr entscheidend sind für den optimalen Betrieb mit hoher Leistung und möglichst geringer Brunnenalterung, d. h. langer Lebensdauer.

Die erforderlichen Eigenschaften einer Bohrung bzw. des Brunnens richten sich immer nach den individuellen Gegebenheiten am Standort. Die Planung eines Brunnenneubaus setzt daher umfangreiche Kenntnisse über den Grundwasserleiter, die hydrogeologischen Gegebenheiten und die Anforderungen an das Brunnenbauwerk voraus. Für die Planung hat sich die Abfolge *Erkundungsbohrung – Versuchsbrunnen – definitive Fassung* bewährt [CONRAD, 2002].

Der Bau eines Bohrbrunnens folgt daher immer den folgenden Schritten:

1. Ermittlung des Bedarfs und der hydrogeologischen Gegebenheiten
2. Planung auf Grundlage der Bedingungen und Anforderungen, d. h.
 - a. Festlegung der notwendigen Brunnenabmessungen (Filterrohrdurchmesser, Filterrohrmaterial, Schüttkorngröße des Kiesel usw.)
 - b. Wahl des geeigneten Bohrverfahrens (je nach geologischen Gegebenheiten und Anforderungen an das Bauwerk)
 - c. ggf. Erkundungsbohrung
3. Niederbringen der Bohrung (mit oder ohne Verrohrung) nach den anerkannten Regeln der Technik
4. Einbau des Filterrohres
5. Schütten des Filterkiesel
6. Inbetriebnahme des Brunnens, Entsanden und Pumpversuch zur Bestimmung der Neubauleistung
7. Bau des Brunnenabschlussbauwerkes

Nur die fachgerechte Ausführung von Planung und Bau des Brunnens garantieren die Leistungsfähigkeit und lange Lebensdauer.

Die Anforderungen sind in einem umfangreichen Regelwerk festgelegt und in der Literatur zum Thema Brunnen bzw. Brunnenbau vielfach beschrieben und zusammengefasst. Als Literaturbeispiele seien hier die schon vielfach zitierten Zusammenfassungen von BIESKE et al. (1998:311-332 und 341-357) und BALKE et al. (2000:288-424) genannt. Auf die technischen Regeln und Vorschriften wird in Kap. 2.4.2, ab S.44 eingegangen.

2.1.3 Inbetriebnahme eines Bohrbrunnens

Nach der Fertigstellung und dem Ausbau der Bohrung zu einem Brunnen muss dieser grundsätzlich immer entwickelt werden. Dabei wird der Brunnen stabilisiert, was zur Steigerung seiner Leistung und seiner Lebensdauer führt. Der wichtigste Prozess ist das Entsandem des Brunnens, auch Klarpumpen genannt. Hierbei werden durch intensives Pumpen die Feinstkornanteile aus dem Grundwasserleiter, der immer ein inhomogenes Gemisch verschiedener Korngrößen aufweist, ausgetragen. Dadurch entsteht eine Zone mit einer homogeneren Korngrößenverteilung und ohne Feinstkornanteile rund um den Brunnen, so dass das Grundwasser ungehindert zutreten kann. Abb. 2-7 zeigt den Übergang zwischen dem Aquifer und der Kiesschüttung vor (A) und nach (B) dem Entsandem:

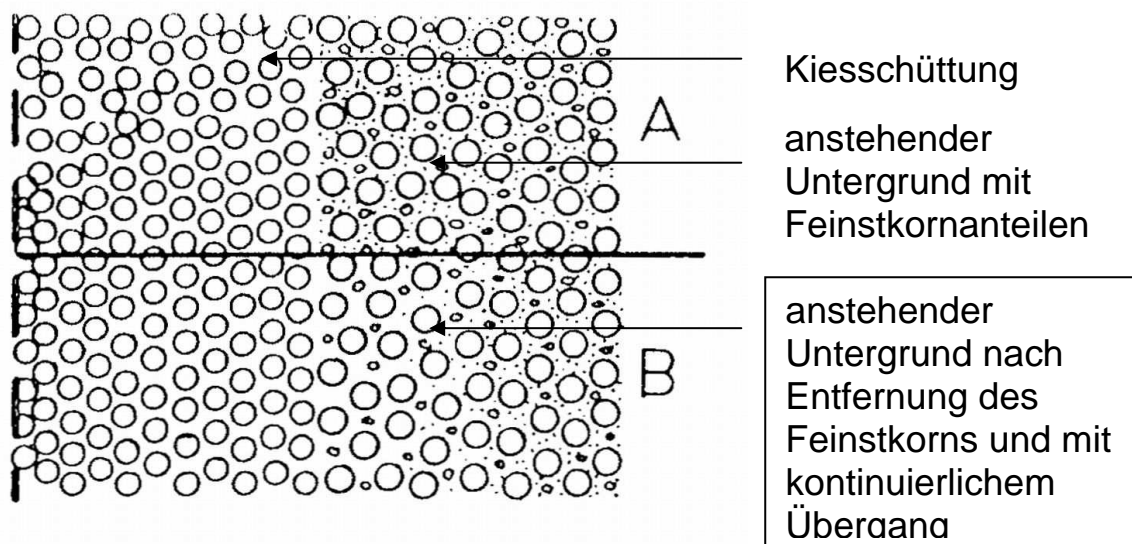


Abb. 2-7: Entsandungswirkung bei richtig bemessener Kiesschüttung, oben (A) vor dem Entsandem; unten (B) nach dem Entsandem [SCHNEIDER, 1961, zitiert in BALKE et al., 2000:432]

Bei Bohrverfahren mit Verwendung einer Bohrspülung werden dabei auch die Ablagerungen der Spülung bzw. durch die Spülung verlagerte Tonkomponenten entfernt. Auch die mögliche Abdichtung der Bohrlochwand beim Niederbringen verrohrter Bohrungen, wo sich beim Ziehen der Verrohrung durch das Mitschleifen von bindigem Bodenmaterial eine geschlossene Bohrlochwand einstellen kann, wird beim Entsanden aufgehoben.

Für das Entsanden gibt es verschiedene Verfahren. Die Festlegungen sind im DVGW-Merkblatt W 117 (2002), Entsanden und Entschlammten von Bohrbrunnen zusammengefasst. Da eine absolute Sandfreiheit nicht erreicht werden kann, wurde darin auch der Begriff der technischen Sandfreiheit definiert, der einen gewissen Sandgehalt erlaubt, solange er den Brunnenbetrieb nicht stört oder die Leistung vermindert.

Ein nicht ordnungsgemäßes oder unzureichendes Entsanden bei der Inbetriebnahme des Brunnens wird sich immer im nachfolgenden Normalbetrieb auswirken. Ein verbliebener Restsandgehalt im Bereich des Grundwasserleiters unmittelbar im Übergang zum Brunnen oder im Filterkies selbst, behindert das einströmende Grundwasser und führt so zu einer geringeren Brunnenleistung. Das Verschleppen von Sandanteilen in den Filterbereich beim Normalbetrieb oder beim Einschalten der Betriebspumpe kann zur Selbstabdichtung des Brunnens führen (vgl. nachfolgendes Kapitel Brunnenalterung/ Versanden) und das geförderte Wasser weist eine erhöhte Sandführung auf, die sich dann in einem erhöhten Verschleiß der Pumpe sowie als Ablagerungen in Steigleitungen, Sammelleitungen und sogar Aufbereitungsanlagen bemerkbar macht. Für Bohrbrunnen, die mit Spülbohrverfahren niedergebracht wurden, konnte außerdem nachgewiesen werden, dass ein nicht vollständiges Entfernen der Spülungsreste aufgrund von speziellen Zusätzen zur Bohrspülung die biologische Verockerung beschleunigte [u. a. TIMMER, 2003].

Die Beurteilung der Entsandungsleistung wird im Normalfall anhand der Menge ausgetragenen Feinkornmaterials vorgenommen. Besonders bei Grundwasserleitern mit feinkörnigen Schichten im vertikalen Brunnenprofil hat sich der Einsatz mehrerer verschiedener Entsandungsverfahren hintereinander empfohlen [BALKE et al., 2000].

Die abschließende Inbetriebnahme des Brunnens erfolgt mit einem Pumpversuch. Deren Durchführung wird im Kap. 2.4.3 ab S.45 beschrieben.

Mit Pumpversuchen wird die Leistung des Brunnens festgestellt. Sie ergibt sich aus zwei Messwerten – der Förderleistung der Pumpe, d. h.

der Wassermenge, die pro Zeiteinheit entnommen wird, und der Absenkung des Wasserspiegels.

Die so genannte Neubauleistung eines Brunnens bildet später die Grundlage zur Beurteilung der Brunnenalterung oder des Erfolges von Regeneriermaßnahmen.

Im weiteren „Leben“ eines Brunnens muss nun nach der ordnungsgemäßen Planung, Bauausführung und Inbetriebnahme die Werterhaltung im Mittelpunkt stehen. Dazu zählen die Überwachung des Brunnens und, wenn nötig werterhaltende Maßnahmen, wie z. B. Regenerierungen oder Sanierungen.

Die folgenden Kapitel geben hierzu einen Überblick.

2.2 Brunnenalterung

2.2.1 Die Bedeutung von Eisen und Mangan

Eisen und Mangan kommen in Grundwasser und Böden vor. Die Konzentrationen sind abhängig von den Gestein-Wasser-Wechselwirkungen und vom Milieu. Gemäß den nachfolgenden Beschreibungen wirken sich besonders die Änderung des Redoxpotenzials und des pH-Wertes auf die Stabilität der Verbindungen aus.

Das Redoxpotenzial E eines Stoffes beschreibt allgemein das Maß der Bereitschaft zu oxidieren oder zu reduzieren. Oxidation ist die Elektronenabgabe und Reduktion die Elektronenaufnahme. Beide Reaktionen finden gleichzeitig statt. Die beteiligten Stoffe werden als Redox-Paar bezeichnet, die ablaufende Reaktion als Redoxreaktion. Es handelt sich dabei immer um eine Gleichgewichtsreaktion. Mit Hilfe des Redoxpotenzials kann dabei berechnet werden, welcher Stoff des Redox-Paares oxidiert und welcher reduziert wird. Die Messung erfolgt als Erfassung der Spannung, die durch den Elektronenfluss beim Übergang von einem Stoff zum anderen auftritt. Die Berechnung folgt aus der NERNSTschen Gleichung. Hierbei ergibt sich ein in Volt ausgedrückter Zahlenwert E_H mit Bezug zur Standardwasserstoffelektrode. Dieses, so genannte Standardpotenzial einer Redox-Reaktion ist tabellarisch gelistet, z. B. in Standard-Tafelwerken der Chemie. Je positiver der Eh-Wert ist, desto stärker ist die Oxidationskraft des Stoffes, also das Vermögen und die Bestrebung, Elektronen aufzunehmen.

Für Eisen und Mangan gelten:

Tab. 2-1: Standardpotenzial für Eisen und Mangan [aus DAS GROßE TAFELWERK, Volk und Wissen Verlag, 1994]

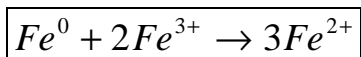
Reduktionsmittel	Oxidationsmittel	+z x e ⁻	Standardpotenzial [V]
Fe ²⁺ (aq)	Fe ³⁺ (aq)	+e ⁻	+0,77
Mn ²⁺ (aq)	MnO ₂ (s)	+2e ⁻	+1,23

Die Angabe der Standardpotenziale ist i. d. R. auf einen pH-Wert von 7 bezogen, d. h. auf neutrales Milieu. Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionen-Konzentration in einer Lösung. Er beschreibt das Maß der Stärke einer sauren oder basischen Wirkung.

Tritt im Zusammenhang mit Redoxreaktionen eine Hydrolysereaktion auf, ist das Redoxpotenzial pH-abhängig. Ein Eh-pH-Diagramm zeigt dann, für welche Bedingungen welche Verbindungen thermodynamisch stabil sind. Dies gilt sowohl für Eisen als auch für Mangan, wie in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

Eisen ist das fünfthäufigste Element der Erdkruste. Die durchschnittliche Konzentration in der Erdkruste beträgt 5,0%. Es ist Bestandteil vieler Minerale in Festgesteinen, Sedimenten und Böden.

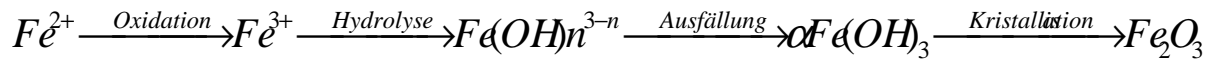
Es ist ein sehr reaktives Element. Die typischen Oxidationszustände sind 0, +2 und +3. In aerober Umgebung und bei neutralem pH-Wert wird zweiwertiges Eisen sehr schnell zu dreiwertigem umgesetzt. In wässrigem Milieu und unter Anwesenheit von dreiwertigem Eisen und metallischem Eisen findet eine Disproportionierung nach der Formel



statt [EHRlich, 2002].

Zweiwertiges Eisen kann von Bakterien zur Energiegewinnung genutzt werden. Die biologische Oxidation von Eisen führt zur Ausfällung von dreiwertigen Eisenverbindungen. Dies spielt für Brunnen und Grundwasserleiter eine große Rolle (vgl. Kap. 2.3.2, Biologische Verockerung). Auch indirekt können Mikroorganismen an der Eisen(II)-Oxidation beteiligt sein, indem sie den pH- oder E_H-Wert in der Umgebung beeinflussen und damit die Stabilität der Eisenverbindungen ändern.

Generell lässt sich die Kinetik der Eisen(II)-Oxidation in wässrigen Medien wie folgt beschreiben:



Das Eh-pH-Diagramm (Abb. 2-8) gestaltet sich wie folgt:

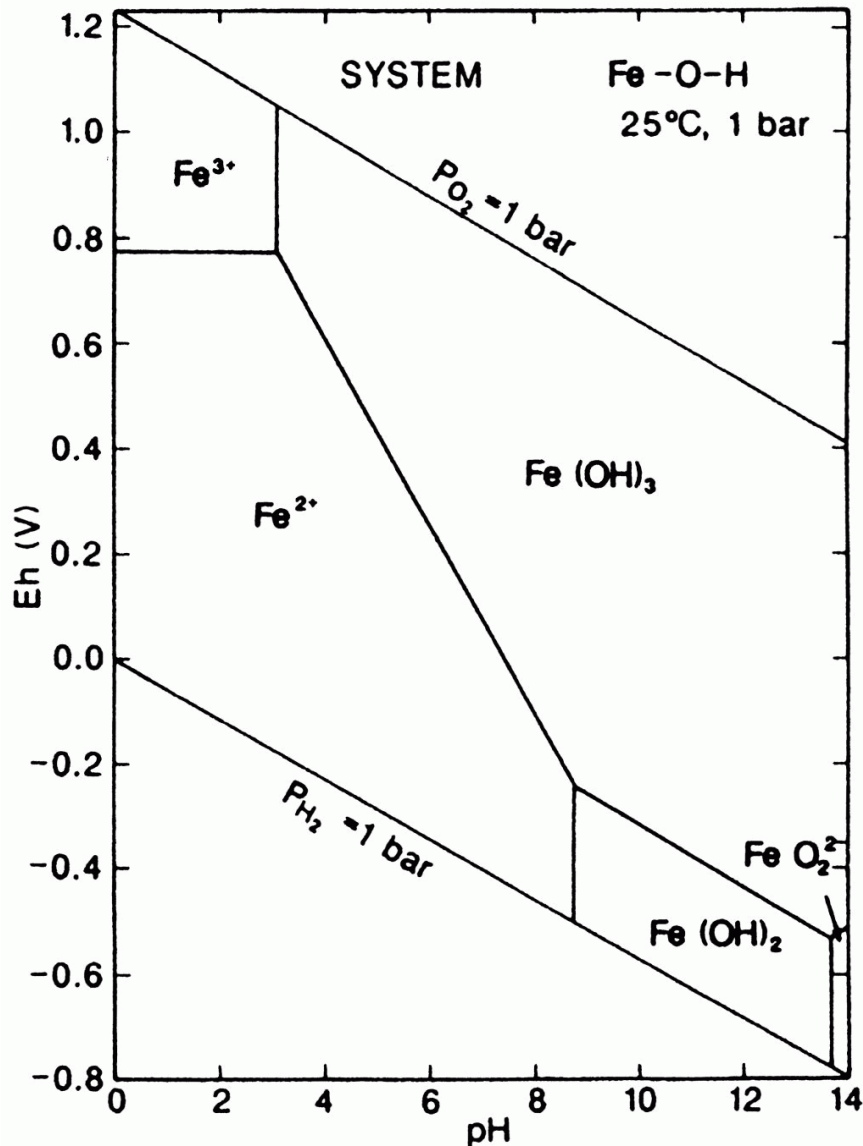


Abb. 2-8: E_H – pH – Diagramm von Eisenspezies in Wasser [aus BROOKINS, 1988]

Im stark sauren Bereich ist das Redoxgleichgewicht Fe³⁺/ Fe²⁺ pH-unabhängig. Im alkalischen Bereich fallen die Hydroxide aus. Dabei ist die Löslichkeit von Fe(OH)₂ größer als die von Fe(OH)₃. Ersteres ist daher ein starkes Reduktionsmittel.

Im neutralen pH-Bereich ist die Verteilung allein vom E_H -Wert bestimmt. Das wichtigste Oxidationsmittel ist hierbei Sauerstoff. Die Löslichkeit von Eisen im Wasser wird also vom Sauerstoffgehalt und dem pH-Wert bestimmt.

Eisen wird dem natürlichen Kreislauf durch die Verwitterung eisenhaltiger Gesteine zugeführt. Es liegt dann in der löslichen Form als zweiwertiges Eisen vor. Je nach den Umweltbedingungen wird es biologisch oder chemisch zu dreiwertigem Eisen oxidiert. Es ist dann unlöslich und fällt aus.

Dreiwertiges Eisen kann in den folgenden Formen vorliegen:

- Eisenhydroxid $Fe(OH)_3$
- Eisenoxihydroxid $FeO(OH)$ (Limonit)
- Eisenoxid Fe_2O_3 oder $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ (Hämatit / Goethit)

Speziell angepasste Bakterien nutzen für ihren Stoffwechsel freiwerdende Energie aus der Oxidation von Eisen. Dazu zählt vor allem *Gallionella ferruginea*, die das Eisen(III) enzymatisch abscheiden. Andere Bakterien, wie *Siderocapsia*, *Siderococcus* und *Leptothrix* scheiden dreiwertiges Eisen nicht enzymatisch aus, sondern, indem sie voroxidiertes Eisen aus organischen Komplexverbindungen auf ihrer Oberfläche binden [EHRlich, 2002].

Die Nutzung der Oxidationsenergie durch ockerbildende Bakterien ist dabei auf einen engen pH-Bereich begrenzt. Sie findet nur zwischen ca. pH 6,8 – 7,5 statt. Darüber findet nur noch die rein chemische Umsetzung von Eisen(II) zu Eisen(III) statt [UHLMANN, 1982].

Für die Bildung von einem Gramm Biomasse werden mehr als 120 Gramm Eisen umgesetzt [UHLMANN, 1982].

Die oben genannten Bakterien sind auch in der Lage, von anderen Organismen enzymatisch oder nicht enzymatisch gebildete Eisen(III)-Verbindungen an ihren Oberflächen anzulagern. Dies geschieht als Reaktion mit extrazellulären Polymeren (EPS). Die EPS können als Überzüge, Kapseln oder Schleim vorliegen. Man spricht dann von Biofilmen (vgl. auch hier Kap. 2.3.2, Biologische Verockerung).

Die Ausfällung dreiwertigen Eisens in den oben genannten Verbindungen und die Kristallisation bzw. Umkristallisation und Ablagerung in Sedimenten oder die chemische oder biologische Reduktion von dreiwertigem zu zweiwertigem Eisen schließen den natürlichen Eisenkreislauf.

Mangan ist das 14.häufigste Element der Erdkruste und nach Eisen das zweithäufigste Schwermetall. Seine Verteilung ist dabei sehr inhomogen. Es ist Haupt- oder Nebenbestandteil in mehr als 100 Mineralen, vor allem in Oxiden, Carbonaten und Silikaten. In Böden schwankt die durchschnittliche Konzentration zwischen 0,002 und 10% [EHRlich, 2002].

Mangan ist ein Element der ersten Nebengruppe des Periodensystems der Elemente. Es kann in den Oxidationszuständen 0, +2, +3, +4, +6 und +7 auftreten. In der Natur kommen jedoch i. d. R. nur zwei-, drei- oder vierwertiges Mangan vor.

Zweiwertiges Mangan tritt in wässrigem Milieu gelöst als freies Ion auf. Dreiwertiges Mangan kommt in wässriger Lösung nur komplexiert vor. Vierwertiges Mangan ist in Wasser nicht löslich. Freies dreiwertiges Mangan wird nach der Formel



zu zwei- und vierwertigem Mangan disproportioniert.

Unter gleichen Eh-pH-Bedingungen ist Mangan(II) stabiler als Eisen. Dies kann auf den höheren Bedarf an Aktivierungsenergie zurückgeführt werden.

Mit steigendem pH-Wert ist Mangan(II) leichter zu oxidieren.

Das E_H-pH-Diagramm für Mangan zeigt Abb. 2-9.

Im neutralen pH-Bereich, den Grundwasser normalerweise aufweist, können somit, je nach Sauerstoffgehalt gelöstes Mn²⁺ oder partikuläres MnO₂ vorliegen. Die abiotische Oxidation des zweiwertigen Mangans verläuft ohne Katalysatoren jedoch sehr langsam. Die Oberfläche der gebildeten Manganoxide wirkt allerdings autokatalytisch, d. h. sie beschleunigt die Weiterreaktion.

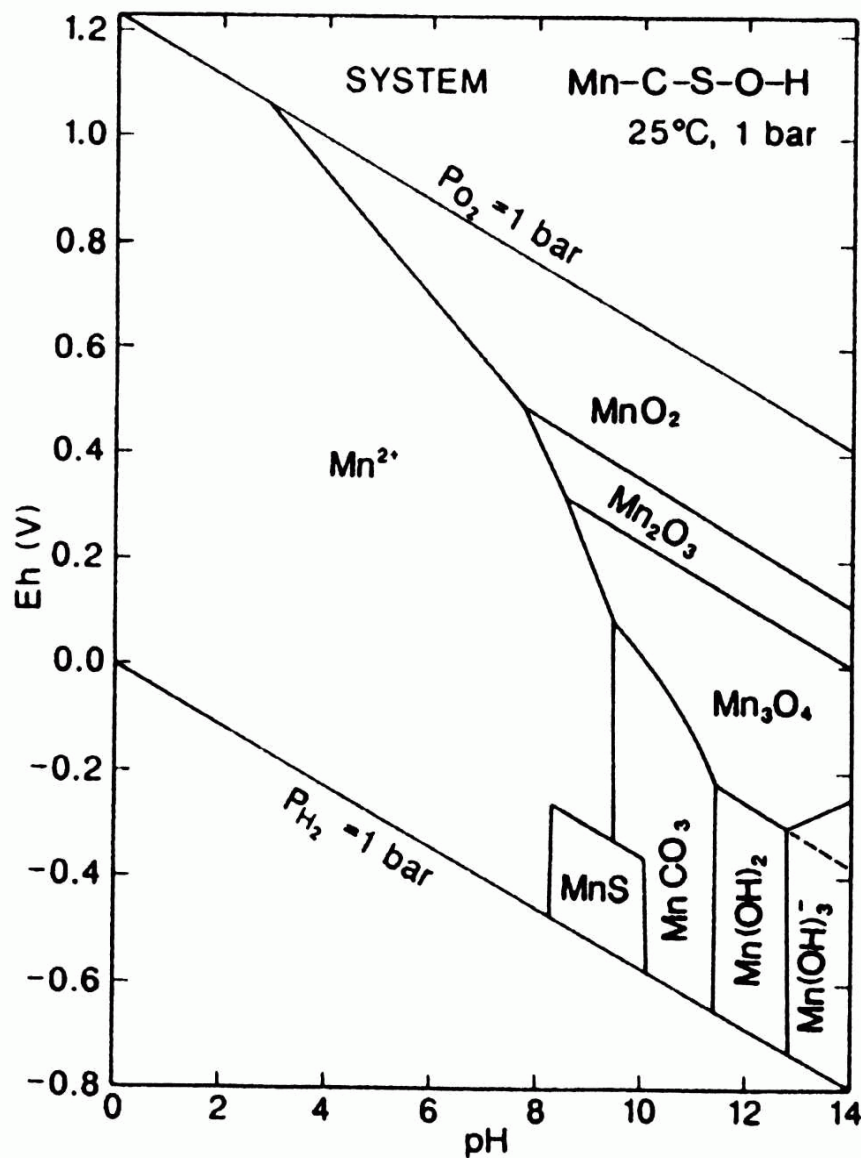


Abb. 2-9: E_H-pH-Diagramm für Manganspezies in Wasser [aus BROOKINS, 1988]

Wie bereits für Eisen beschrieben, ist auch zweiwertiges Mangan eine Energiequelle für bestimmte Bakterienarten. Das Mangan(II) wird dabei enzymatisch oder nicht enzymatisch zu Mangan(IV) aufoxidiert und ausgefällt. Zu diesen Bakterienarten zählen Stämme der Gattungen *Pseudomonas* und *Leptothrix*. Auch sie scheiden das oxidierte Mangan auf ihrer Zelloberfläche ab oder bilden Biofilme [EHRlich, 2002].

Mangan wird dabei vorwiegend als Hydroxid bzw. hydriertes Manganoxid ausgeschieden. Während der Alterung finden dann Umkristallisationsprozesse statt und es bilden sich z. B. Pyrolusit (MnO₂) oder Birnessit (βMnO₂).

Die biologische Oxidation von zweiwertigem Mangan führt zu anderen Reaktionsprodukten als die chemische Oxidation [EHRlich, 2002]. Für ersteren Prozess konnte Mangan(IV)-Oxid, d. h. MnO_2 als Reaktionsprodukt nachgewiesen werden, für letzteren Mn_3O_4 , welches dann langsam zu MnO_2 und zweiwertigem Mangan disproportioniert wurde.

Die Oxidation von gelöstem, zweiwertigem Eisen und Mangan und die daraus resultierende Ausfällung unlöslicher Eisen(III)- bzw. Mangan(IV)-Verbindungen stellt die häufigste Ursache der Brunnenalterung dar. Der Weg der Oxidation wird bestimmt durch die Bedingungen, d. h. hauptsächlich durch den pH-Wert und das Redoxpotenzial. Wie ausgeführt, kommt es dann zu chemischer oder biologischer Oxidation und, folgend dem Bestreben zu einem thermodynamischen Gleichgewicht, zur Ausfällung und Ablagerung der jeweils stabilen Verbindungen. Im Falle der Brunnenverockerung sind dies vor allem amorphes $Fe(OH)_3$ in Form eines rötlich-braunen, weich-flockigen Belages und Manganhydroxid $Mn(OH)_2$ als schwarz-brauner, weicher Belag.

Da die Oxidation des zweiwertigen Eisens und Mangans an unterschiedliche Redoxpotenziale geknüpft ist, treten die Oxidationsprodukte meist nicht gemeinsam auf. D. h., auch wenn in einem Grundwasserleiter beide Elemente im Wasser gelöst sind, sind die sich bildenden Eisenoxide und Manganoxide räumlich voneinander getrennt, treten z. B. in verschiedenen Brunnen auf oder sind auf unterschiedliche Tiefen begrenzt.

Sind beide Elemente vorhanden, bleibt das Redoxpotenzial jedoch unter 0,6V, so wird nur das Eisen oxidiert. Das Mangan kann dann im Rohwasser nachgewiesen werden.

2.2.2 Arten der Brunnenalterung

Grundwasser enthält, je nach den Eigenschaften des Grundwasserleiters und der Verweildauer im Untergrund, unterschiedliche Mengen an chemischen und biologischen Inhaltsstoffen sowie Stoffbestand des anstehenden Gesteins. Komplexe Prozesse zwischen den Bestandteilen des Wassers und denen des Bodens führen in Brunnen im Laufe des Betriebes zur so genannten Brunnenalterung. Darunter versteht man das Nachlassen der Brunnenleistung durch die Ablagerung von Reaktionsprodukten im Brunnenbauwerk oder im angrenzenden Gestein und die daraus resultierende Verringerung des Hohlraumvolumens.

Abb. 2-10 beschreibt den Verlauf der Förderleistung mit zunehmendem Brunnenalter:

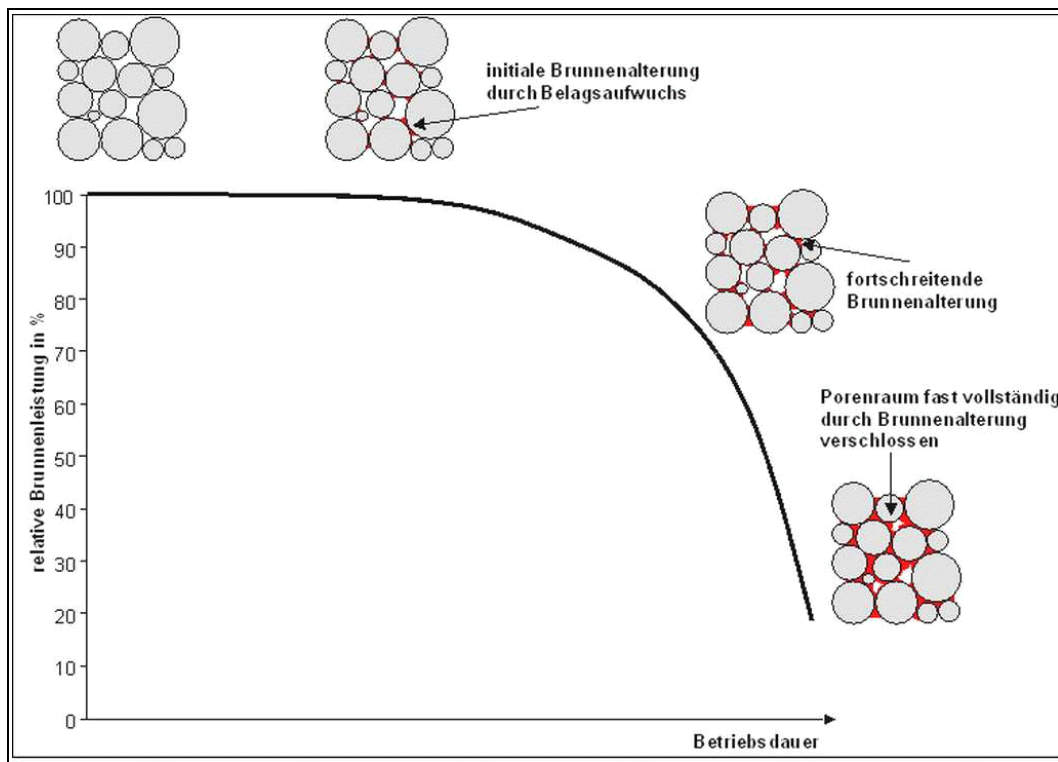


Abb. 2-10: Abnahme der relativen Brunnenleistung in Abhängigkeit von der Betriebsdauer und einsetzender Brunnenalterung [nach BOTT, WIACEK & WILKEN, 2003:6]

Die Förderleistung steht in direktem Zusammenhang zum Wassereintrittswiderstand. Der Verlauf wird bestimmt vom vorhandenen Volumen der Poren. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen Porenräumen und Porenkanälen. Bedeutsam für die Wasserwegsamkeit sind nur letztere. Die Brunnenalterung, d. h. die Ablagerung von Reaktionsprodukten, beginnt in den Porenräumen. Dieses Stadium, die „Initiale Brunnenalterung“, wirkt sich noch nicht leistungsmindernd aus, da die Porenkanäle noch vollständig geöffnet sind. Erst wenn die Alterung auf sie übergreift, werden die Wassereintrittsflächen in das Brunnenbauwerk verringert und die Förderleistung sinkt.

Ein Rückgang der Leistung äußert sich in größerer Absenkung des Betriebswasserspiegels bei gleichbleibender Entnahmemenge, wenn die Förderleistung über die Vorgabe der Entnahmemenge gesteuert wird, oder in einem Rückgang der geförderten Wassermenge bei gleichbleibendem Absenkungsbetrag bei Betrieb des Brunnens innerhalb eines vorgegebenen Maßes der Absenkung.

Weitere Indizien für die Brunnenalterung sind die Zunahme des Stromverbrauchs der Unterwasserpumpe, die Veränderung chemischer oder biologischer Rohwasserdaten oder das Mitführen von Sand und Trübstoffen im Rohwasser.

Die wesentlichen Alterungsprozesse, die den Leistungsrückgang verursachen, sind:

- Versanden
- Verschleimen
- biologische Verockerung
- chemische Verockerung
- Versinterung
- Korrosion

Einige der genannten Prozesse können sich aus Fehlern bei Planung und Bau eines Brunnens ergeben. Dies betrifft vor allem das Versanden sowie die Korrosion an metallischen Brunnenbauteilen. Andere hängen stark vom Brunnenbetrieb oder von der Qualität des Rohwassers ab.

Das Versanden ist ein rein physikalischer Prozess. Es beruht auf den Schleppkräften des Grundwassers und tritt ein, wenn der Brunnen bei Inbetriebnahme ungenügend entsandet wurde, d. h. feinkörnige Anteile des Lockergesteins des anstehenden Untergrundes in selbigem verblieben sind und durch die Wasserbewegung bei Beginn der Förderung in die Kiesschüttung transportiert werden, oder wenn die Korngröße der Kiesschüttung im Verhältnis zum anstehenden Untergrund und zu den Filteröffnungen nicht korrekt bemessen wurde.

Im Falle von zu großer Bemessung der Filteröffnungen können Feinsandanteile mit dem Wasser in den Brunnen eintreten. Das Rohwasser weist Sandführung auf. Im Sumpfrohr und am Pumpeneinlauf sammelt sich Sand.

Im Falle von zu kleiner Bemessung der Filteröffnungen gelangen Feinsandanteile in die Filterkiesschüttung und führen nach und nach zu einem Verstopfen derselben.

Unterschieden werden müssen die Äußere Kolmation und die Innere Kolmation, je nachdem, wo die mitgeführten Partikel schließlich abgelagert werden. Die „Äußere Kolmation“ bezeichnet die Selbstabdichtung des Brunnens durch die Verstopfung der Porenräume und –kanäle am Übergang anstehender Untergrund –Filterkiesschüttung, wenn diese zu fein gewählt wurde.

Hierbei können die Feinkornanteile aus dem anstehenden Untergrund beim Entsandern oder bei erhöhter Förderleistung die Filterkiesschüttung nicht passieren. Die Ansammlung in horizontaler Fließbewegung wird auch als „Radiale Suffusion“ bezeichnet. Bei einer nachfolgenden starken Absenkung des Wasserspiegels kann der Feinkornanteil auch in vertikaler Strömungsrichtung verschleppt werden. Hierbei kommt es zur Kornsortierung von grob nach fein. Dieser Vorgang wird als „Axiale Suffusion“ bezeichnet.

Als „Innere Kolmation“ ist das Verschleppen der Feinkornanteile bis in die Filterkiesschüttung und die Ablagerung im Porenraum und den Porenkanälen am Übergang einer gröberen Kiesschüttungsstufe zur feineren Stufe einer Mehrfachkiesschüttung bezeichnet.

Das Versanden eines Brunnens kann nur durch die richtige Bemessung der Korngröße der Filterkiesschüttung vermieden werden (vgl. Kap. 2.2/ Brunnenbau, S.20).

Schwieriger hingegen ist das Vermeiden chemischer, biologischer oder chemisch-biologischer Prozesse, die zur Brunnenalterung führen.

Im Zusammenhang mit mikrobiologischer Aktivität kann das Verschleimen eines Brunnens auftreten. Dabei kommt es zur Massenentwicklung schleimbildender Bakterien oder niederer Pilze. Die Problematik tritt besonders an Infiltrationsbrunnen auf, da sie durch die Anwesenheit von Stickstoffverbindungen und die Zufuhr organischer Stoffe stark begünstigt ist [DVGW, 2001].

Ebenfalls unter Beteiligung bestimmter Mikroorganismen kommt es zur biologischen Verockerung. Bezeichnet wird damit die Umwandlung gelösten, zweiwertigen Eisens oder Mangans aus dem Grundwasser in schwer lösliche dreiwertige Eisen- bzw. vierwertige Manganverbindungen durch Eisen und Mangan speichernde Mikroorganismen. Voraussetzung ist das Vorhandensein der folgenden Bedingungen, die gleichzeitig vorliegen müssen:

- Anwesenheit Eisen bzw. Mangan speichernder Mikroorganismen
- Gegenwart von zweiwertigen Eisen- bzw. dreiwertigen Manganionen
- Überschreiten eines Grenzwertes für die Redoxspannung
- erhöhte Fließgeschwindigkeit des Wassers gegenüber den natürlichen Verhältnissen

[nach DVGW, 1972].

Entdeckt wurde die biologische Verockerung von KREMS (1958). Die Grundlagen sind ausführlich beschrieben bei HÄSSELBART&LÜDEMANN (1967).

Umfangreiche Untersuchungen zur mikrobiologischen Aktivität in Brunnen und der damit einhergehenden biologischen Verockerung oder Verschleimung sind ausgeführt bei EHRlich (1990) und PAUL (1993, 1994a und 1994b). Demnach ist die biologische Verockerung die am weitesten verbreitete Art der Brunnenalterung. Sie tritt bevorzugt an den Stellen mit der höchsten Strömungsgeschwindigkeit auf, d. h. am Übergang des Wassers von der Kiesschüttung in das Filterinnenrohr an der Filterrohrinnenseite, in den Filterschlitzten und am Pumpeneinlauf. Von dort setzt sich das Wachstum in die Filterkiesschüttung fort.

Die biologische Brunnenverockerung stellt nach PAUL (1994a) eine Biofilm-Bildung dar. Als Biofilm wird die Ansiedlung von Mikroorganismen an Grenzflächen bezeichnet (Abb. 2-11). Sie bestehen aus den beteiligten Mikroorganismen, extrazellulären polymeren Substanzen (EPS), eingelagerten Partikeln und gelösten Stoffen. Die Entwicklungsschritte einer Biofilm-Bildung beschreibt PAUL (1994a). Die Problematik der Biofilm-Bildung in Brunnen und deren Nachweis ist ausgeführt bei BARTETZKO (2002).

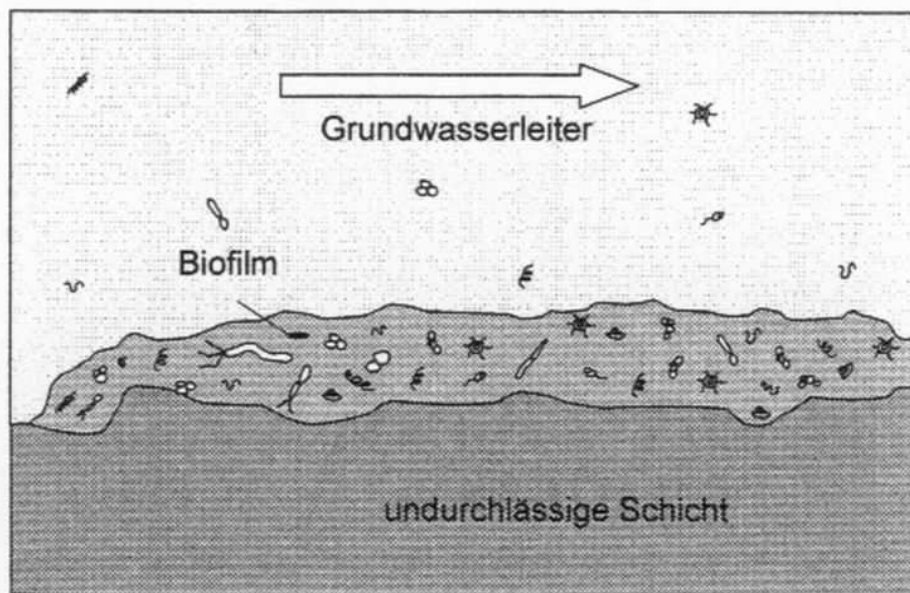
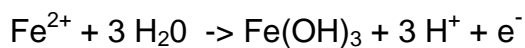


Abb. 2-11: Biofilm auf einer Oberfläche [aus BARTETZKO, 2002:89]

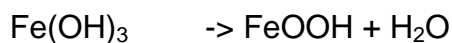
Auch ohne Beteiligung von Mikroorganismen können gelöste zweiwertige Eisen- und Mangan-Ionen zu den schwerlöslichen höherwertigen Verbindungen oxidiert werden.

Man bezeichnet dies dann als chemische Verockerung. Diese stellt nach der biologisch induzierten Alterung die am zweithäufigsten gefundene Alterungsart dar.

Ausgelöst wird der Vorgang durch das Vorhandensein von gelöstem Sauerstoff im Wasser, z. B. bei der Mischung von Wässern aus unterschiedlichen, hydraulisch wirksamen Horizonten mit verschiedener Sauerstoffsättigung oder beim Zutritt von Sauerstoff aus der Bodenluft, wenn der Wasserspiegel bis in den Bereich des Filters abgesenkt wird. Dabei wird das in Brunnenwasser häufig vorkommende, als Carbonat vorliegende Eisen(II) zu Eisen(III)-Hydroxid umgewandelt, welches dann unter Wasserabgabe weiter altert, wobei Eisen-Oxihydrat (Ocker) gebildet wird. BALKE et al. (2000) gibt dazu folgende Reaktionsgleichung an:



(Ferrihydrit)



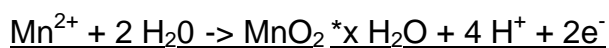
(Goethit)

Nach Bildung der anfänglich weichen, flockigen Verockerungen beginnen diese zu altern. Dabei kommt es zu Mineralumbildungen. Die Beläge härten aus und bilden Inkrustationen. Der hierfür benötigte Zeitraum ist nicht einheitlich und noch nicht eindeutig bekannt und Gegenstand verschiedener Forschungsarbeiten.

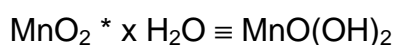
Analog verläuft die Oxidation zweiwertiger Mangan-Ionen zu vierwertigen, schwerlöslichen Mangan(IV)-Oxiden.



(Manganhydroxid)



(Pyrolusit/ Braunstein)



(Mangan-Oxihydrat)

Aufschluss über die Zusammensetzung der Ablagerungen geben chemische und mineralogische Untersuchungen. Beispiele hierzu geben ROGALSKY et al. (1990), SCHIEMANN et al. (1997) und HOUBEN, MERTEN & TRESKATIS (1999). Demnach bestehen die Ablagerungsprodukte typischerweise aus mehr als 50 Gew.-% Eisen- oder Mangananteilen. Röntgenographische Untersuchungen zeigten als Mineralneubildung vor allem Ferrihydrit, das ist amorphes $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bzw. im Falle von Manganinkrustationen amorphes Mangan-Oxihydrat (ohne Mineralbezeichnung). Durch Umkristallisation bei der Alterung bildet sich daraus Goethit (α -FeOOH) bzw. kristallines Mangan(IV)-Oxihydrat (Braunstein).

Unter dem Mikroskop untersuchte An- und Dünnschliffe zeigten einen zonaren Aufbau, dargestellt in Abb. 2-12.

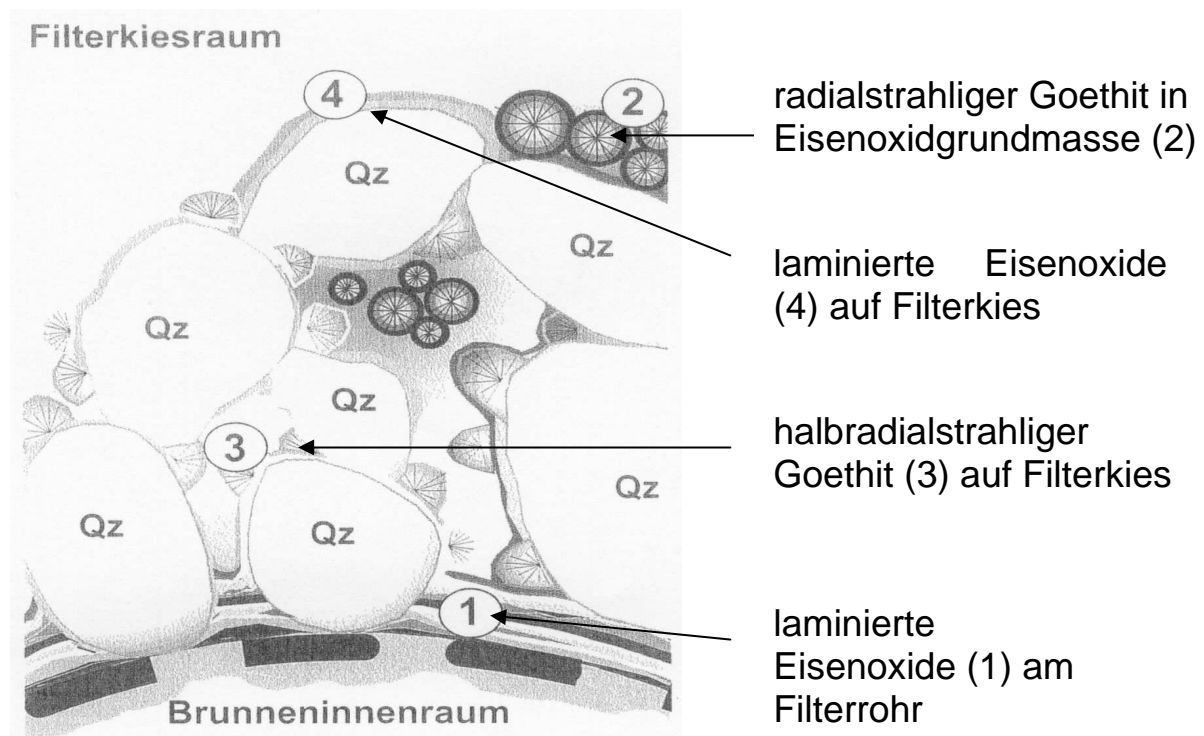


Abb. 2-12: Schematisch und im mikroskopischen Maßstab dargestellter, struktureller Aufbau von Brunneninkrustationen im Filterraum direkt hinter dem Filterrohr [nach HOUBEN, 1999:33]

Eingelagerte Quarzpartikel sowie Feldspäte und Tonminerale sind i. d. R. Partikel, die aus dem Grundwasserleiter oder dem Filterkies eingespült und eingelagert wurden. Hohe Quarz-Anteile weisen auf eine Sandführung des Wassers oder die Tendenz zur Inneren Kolmation hin.

Weitere Untersuchungen von HOUBEN & WEIHE (2004) beschäftigten sich mit der räumlichen Verteilung der Belagsbildung im Filterraum eines Brunnens. Dabei wurden tiefenbezogene Massenbilanzierungen chemischer Regenerierungen, Proben aus überbohrten Brunnen und Kernbohrungen im Ringraum eines aufgegebenen Brunnens auf die vertikale und horizontale Verteilung der Alterungserscheinungen untersucht. Die Beläge zeigten sich in beiden Richtungen ungleichmäßig verteilt.

Dabei konnten enge Zusammenhänge zur Anströmung und zur Betriebsweise des Brunnens hergestellt werden.

Grundwasser fördernde Brunnen verockern demnach vor allem in den oberen Filterbereichen in der Hauptzustromrichtung des Grundwassers, da hier, bei entsprechender Absenkung des Betriebswasserspiegels

bzw. durch die im Brunnenfilterrohr über dem Wasserspiegel stehende Bodenluft Sauerstoff Zutritt. Uferfiltratbrunnen weisen eine stärkere Verockerungsneigung in den unteren Filterbereichen auf, da bei ihnen sauerstoffhaltiges Flusswasser an der Sohle des Brunnens in diesen eintritt und sich mit eisen- oder manganhaltigem echten Grundwasser mischt. Beobachtet wurde die Trennung von Zonen mit Eisenoxidbildung von solchen mit überwiegend manganhaltigen Belägen, entsprechend den Abhängigkeiten vom Redoxpotenzial (vgl. Kap. 2.3.1). Die Verockerungsbildungen reichten in der Hauptzuströmrichtung weiter als 15 cm in den Ringraum hinter dem Filterrohr hinein.

Biologische und chemische Verockerung sind die häufigsten Brunnenalterungsarten. Sie treten oft kombiniert auf. Hinweis darauf ist ein hoher Glühverlust in der chemischen Analyse, der den hohen Anteil organischer Substanz anzeigt.

Seltener ist die Versinterung. Sie tritt nur bei stark karbonatischen oder sulfatischen Wässern auf [BIESKE et al., 1998]. Hierbei kommt es durch Druckentlastung bei der Wasserförderung zum Ausgasen von CO₂. Dadurch verschiebt sich das Kalk-Kohlensäuregleichgewicht und es fallen Calcium- und Magnesiumcarbonate aus.

Beobachtet wurde außerdem an manchen Brunnen die Ausfällung schwerlöslicher Aluminiumverbindungen. Aufgrund der Abhängigkeit der Löslichkeit der Aluminiumverbindungen vom pH-Wert treten diese jedoch nur bei pH-Wechseln im Brunnen in saurem Milieu auf. Die komplexen Faktoren, die die Bildung begünstigen, machen die Aluminiumausfällung in Brunnen sehr selten [BARTETZKO, 2002].

Weitaus häufiger sind Korrosionserscheinungen [BIESKE et al., 1998]. Darunter wird der chemische Angriff des Wassers und, unter Umständen, von festem Untergrundmaterial, sowie die Wirkung technisch bedingter oder natürlicher elektrischer Ströme auf metallische Filterrohre und sonstige Brunnenbestandteile verstanden. Der Korrosionsangriff kann zur teilweisen bis völligen Zerstörung des Ausbaus führen. Die Korrosionsprodukte können, ähnlich den Verockerungsprodukten oder mitgeführten Feinsandanteilen, im Porenraum in der Filterkiesschüttung abgelagert werden und diese zusetzen. Charakteristisch ist eine gleichmäßige Ausbildung der Ablagerungsprodukte in alle Richtungen und ein konzentrisches Zuwachsen [HÄSSELBART&LÜDEMANN, 1967] unabhängig von den Anströmungsbedingungen.

Korrosionserscheinungen sind oft auf Fehler beim Brunnenbau zurückzuführen. Besonders die ungenügende Abdichtung zwischen einzelnen Grundwasserhorizonten in einem vertikalen Brunnenprofil und

der daraus resultierende hydraulische Kurzschluss kann zur Entstehung aggressiver Mischwässer und damit zur Korrosion führen, ohne dass die Untersuchung einzelner Wasserproben im Vorfeld darauf einen Hinweis gibt.

Schutzmaßnahmen beinhalten nach BALKE et al. (2000) und BIESKE et al. (1998) das Beschichten metallischer Bauteile mit korrosionsbeständigen Materialien, das Verzinken von Stahlteilen, den Einbau von Opferanoden und geeignete Isolation aller stromführenden Bauteile zur Unterbindung von Kontaktkorrosion und zur Vermeidung von Streuströmen.

Vermieden werden kann die Brunnenalterung als natürlich ablaufender Prozess unter Zugrundelegung der gegebenen Standortfaktoren wohl nicht. Der korrekt ausgeführte Brunnenbau und ein angemessener Betrieb können die optimale Leistungsfähigkeit eines Brunnens jedoch möglichst lange erhalten. Die Erkenntnis, dass nicht nur die unmittelbaren Fördereinrichtungen, wie Pumpen, Leitungen und Steuerungseinrichtungen regelmäßig gewartet werden müssen, sondern auch die Fassungseinrichtungen selbst, setzt sich mehr und mehr durch.

2.3 Brunnenmonitoring

2.3.1 Grundlagen

In vielen Wasserwerken werden heutzutage die Brunnen oder Brunnenanlagen mehr oder weniger automatisch in Abhängigkeit vom Wasserverbrauch der Endnutzer gesteuert und mit immer weniger Betriebspersonal bewirtschaftet. Dies stellt zunehmende Anforderungen an die bauliche Ausrüstung der Brunnen und das Erstellen von Betriebsprogrammen. Wichtigste Grundlage hierfür sind langjährige Betriebserfahrung und ein den Erfordernissen angepasstes Brunnenmonitoring.

Brunnenmonitoring ist die Überwachung von Brunnen mit der Aufgabe, Veränderungen im Bau- oder Betriebszustand oder im Grundwasserleiter frühzeitig erkennen und richtig bewerten zu können, um geeignete Maßnahmen zum Erhalt oder zur Wiederherstellung der vollen Leistungsfähigkeit einzuleiten. Dazu zählen quantitative Aufnahmen, z. B. des baulichen Zustandes und der Brunnenleistung, aber auch eine qualitative Überwachung hydrochemischer Parameter. Nach HOUBEN & TRESKATIS (2003) werden unterschieden:

- Grundlagen -

1. quantitatives Brunnenmonitoring (Ergiebigkeit des Grundwasserleiters, Leistung des Brunnens usw.)
2. qualitatives Brunnenmonitoring (Rohwasserbeschaffenheit, Sandführung usw.)
3. konstruktives Brunnenmonitoring (baulicher Zustand der Brunnenrohre, Rohrverbindungen, Ringraumverfüllung, Abschlussbauwerk usw.)

Die Bewertung der Betriebsleistung und Ermittlung der Regenerierbedürftigkeit erfordert die umfassende Dokumentation aller Brunnendaten. Dazu zählt, wie auch in DVGW W125 (2004) und W130 (2001) gelistet wird, die regelmäßige Aufnahme der Ruhe- und Betriebswasserspiegel und der Pumpbetriebsdaten, wie dem Volumenfluss Q , der Stromaufnahme und den Einschaltzeiten, beginnend bei der Inbetriebnahme des Brunnens, in regelmäßigen Abständen und vor allem vor und nach Regeneriermaßnahmen. Dies soll insbesondere die Vorbereitung zukünftiger Maßnahmen unterstützen und eine einheitliche Basis zur Bewertung des Regeneriererfolges bieten. Unabhängig davon, welches Verfahren bei einer Brunnenregenerierung zum Einsatz kommt, kann es durch die Erfassung möglichst aller relevanten Daten eines Brunnens und der Ergebnisse vorangegangener Regeneriermaßnahmen möglich sein, schon im Vorfeld Aussagen über die Erfolgsaussichten einer Behandlung des Brunnens mit mechanischen, chemischen oder kombiniert mechanisch-chemischen Verfahren treffen zu können, um anhand dieser Bewertung das am besten geeignete Verfahren auswählen zu können.

Als unbedingt notwendige Datengrundlage werden grundsätzlich folgende Kriterien angesehen [BOTT & WIACEK, 2004]:

1) Brunnendaten

- Baujahr
- Tiefe
- Ausbaumaterial
- Lage und Länge der Filterstrecke(n)
- Ausbauzeichnung inkl. Schichtenverzeichnis
- Änderungen am Originalbauzustand, Sanierungsmaßnahmen und bauliche Veränderungen

2) Leistungsdaten

- Leistung des Brunnens nach seiner Fertigstellung
- derzeitige Leistung
- regelmäßige Aufnahme des Betriebs- und Ruhewasserspiegels
- Pumpdaten (Betriebsdauer und Stromaufnahme)

3) Regenerierungen

- Anzahl und Zeitpunkt der bisherigen Regenerierungen
- Intervall zwischen den Maßnahmen
- Zeitpunkt der letzten Regenerierung
- Verfahren, das dabei angewendet wurde
- Erreichte Leistungssteigerung

Diese Angaben sollten in Form eines Brunnenbuches oder einer Brunnenakte vor Ort geführt werden. Die Leistungsdaten sollten zusätzlich und unter Berücksichtigung von Regenerierungen und Wartungsarbeiten fortlaufend in Form eines Diagramms dargestellt und ausgewertet werden. Abb. 2-13 zeigt beispielhaft eine solche Brunnenleistungskurve mit regelmäßiger Aufzeichnung von Pumpversuchsdaten und Einhängung durchgeführter Regenerierungen.

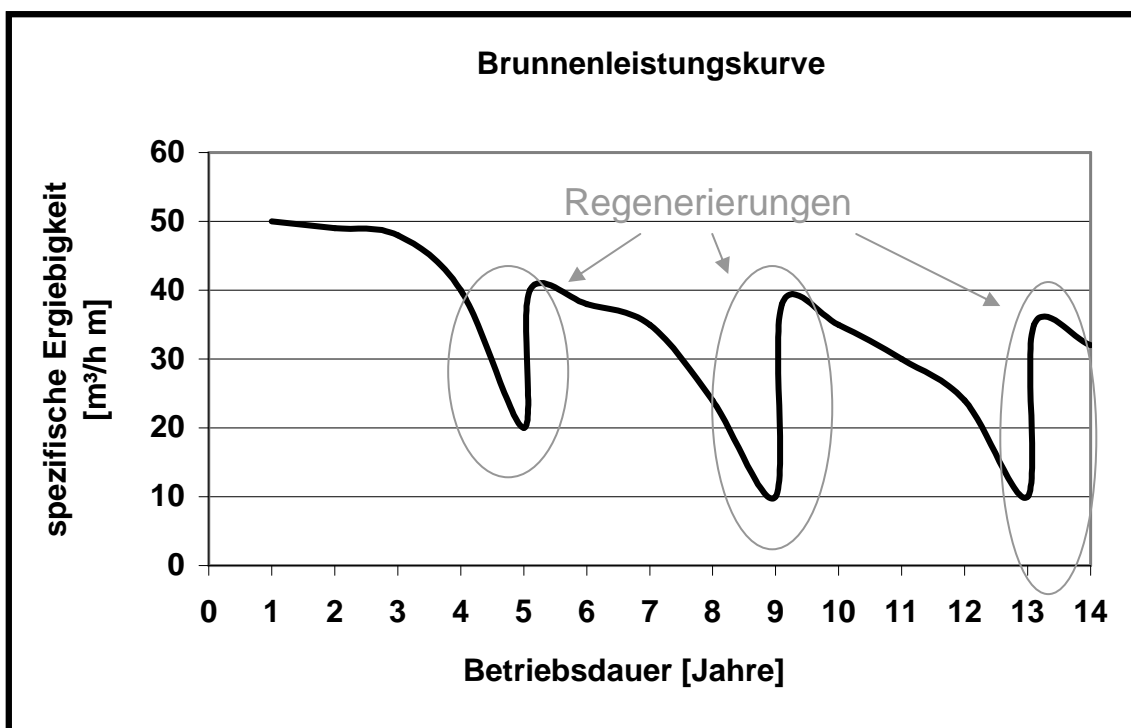


Abb. 2-13: Beispielhafte Brunnenleistungskurve bei z. B. jährlicher Aufzeichnung von Pumpversuchsdaten und Erfassung der Regenerierungen [nach BOTT & WIACEK, 2004:27]

Das Vorgehen zur Erhebung der quantitativen Brunnendaten, d. h. des Bauzustandes und der Betriebsdaten ist ausführlich beschrieben im neuen DVGW Arbeitsblatt W125 (2004). Deshalb sollen hier die gängigen Methoden nur kurz erwähnt werden. Ausführungen zum qualitativen Monitoring werden in Kap. 2.3.4 gegeben.

Zur Erfassung des baulichen Zustandes werden, neben der regelmäßigen allgemeinen äußeren Besichtigung des Bauwerkes, Kamerabefahrungen durchgeführt. Sie dienen der Kontrolle des Ausbauzustandes des Brunnens im Bereich der Aufsatz- und Filterrohrabschnitte. Im Zuge regelmäßiger Wartungsarbeiten werden außerdem sämtliche Einbauteile, wie Unterwasserpumpe und Steigleitungen, der Kontrolle unterzogen.

Zur Funktionsprüfung dienen Wasserstandsmessungen (Ruhe- und Betriebswasserspiegel) im Brunnen und, so vorhanden, im Peilrohr in der Filterkiesschüttung mit dem Lichtlot oder ggf. elektronischen Daten-Loggern, außerdem die Sichtprüfung auf Trübung oder Sandführung des Wassers. In regelmäßigen Abständen sollen Brunnentests durchgeführt werden (vgl. Kap. 2.4.3). Ergänzend können geophysikalische Methoden zum Einsatz kommen, die eine Bewertung des baulichen Zustandes über das Filterinnere hinaus erlauben. DVGW Arbeitsblatt W125 schlägt hierzu einen Überwachungsplan für den laufenden Brunnenbetrieb vor.

Auf der Grundlage eines ausreichenden Brunnenmonitorings können Maßnahmen zum Erhalt oder zur Wiederherstellung der Brunnenleistung rechtzeitig eingeleitet werden. Dazu zählen die Anpassung der Betriebsweise an sich verändernde Bedingungen, die Regenerierung oder Sanierung, je nach wasserwirtschaftlichen Anforderungen und auch wirtschaftlichen Aspekten. Auf Ausführungen zur Kosten-Nutzen-Rechnung soll an dieser Stelle jedoch verzichtet und dies entsprechenden Fachleuten der Betriebswirtschaft überlassen werden.

Dass das Brunnenmonitoring im Sinne einer Werterhaltung der Investition „Brunnenbauwerk“ in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat, nicht nur für die wirtschaftliche Seite des Betriebes sondern auch für die wasserwirtschaftlichen Grundlagen des Brunnenbetriebes, zeigt sich heute in einer Vielzahl von Lehrbüchern und im Regelwerk des DVGW, wie das folgende Kapitel kurz ausführen wird.

2.3.2 Technische Regeln, Vorschriften und Verfahren

Deutschland hat, unter Federführung des DVGW, Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., ein in seiner Ausführlichkeit und Entwicklungsgeschichte weltweit einzigartiges Regelwerk geschaffen. Der DVGW ist ein wirtschaftlich und politisch unabhängiger technisch-wissenschaftlicher Verein. Das besondere ist, dass das Gas- und Wasserfach selbst branchenintern die technischen Regeln erarbeitet, ausgestaltet und umgesetzt hat, während der Staat nur den gesetzlichen Rahmen vorgibt [KLEEBERGER, 2004].

Das DVGW Regelwerk Wasser gliedert sich in die Bereiche:

- Wassergewinnung/ Wasserwirtschaft
- Wassergüte/ Wasseraufbereitung
- Wassertransport/ Wasserverteilung
- Wasserverwendung
- Maschinelle und elektrische Anlagen
- Wasserfachliches Prüfwesen/ Zertifizierung

Damit existiert ein umfangreiches Regelwerk zu allen Aspekten des Brunnenbaus.

Besonders in den letzten fünf Jahren unterlag dieses einer verstärkten Überarbeitung und Ergänzung im Zuge der Anpassung an die technischen Entwicklungen und gesteigerten Qualitätsstandards in diesem Feld. Dies zeigt sich in der großen Zahl der aktuell überarbeiteten Arbeitsblätter. Eine besondere Neuerung stellt dabei der Lückenschluss zwischen den Regeln zum Brunnenbau (W 113 bis W124) und denen zum Erhalt oder zur Wiederherstellung des Brunnens bzw. seiner Leistung (W135 und W130) dar. Während die genannten Arbeitsblätter sozusagen Geburt und Alter eines Brunnens beschreiben, widmet sich das neue Arbeitsblatt W125 der Brunnenbewirtschaftung, d. h. im übertragenen Sinne dem Arbeitsleben(sabschnitt) eines Brunnens.

Die einzelnen, für Brunnenbau und Brunnenbetrieb relevanten Arbeitsblätter sind im Anhang mit jeweils der Nummer, dem Titel und dem Erscheinungszeitpunkt aufgeführt.

Nur ein nach diesen Regeln der Technik erstelltes Bauwerk ist Grundlage und entscheidende Voraussetzung für den hydraulisch effizienten und wirtschaftlichen Betrieb [BERGER, 2004].

2.3.3 Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen

Das wichtigste Instrument zur Überwachung der Brunnenleistung ist neben der Aufzeichnung der Ruhe- und Betriebswasserspiegel sowie der Stromaufnahme der Unterwasserpumpe die regelmäßige Durchführung von Pumpversuchen zur Erfassung und Überwachung der Ergiebigkeit des Brunnens.

Je nach Aufgabenstellung werden verschiedene Arten von Pumpversuchen angewendet, die sich in ihrer Durchführung und zum Teil in der Auswertung unterscheiden. Dies sind nach BALKE et al. (2000):

- Brunnentests, zur Gewinnung einer Leistungscharakteristik eines Brunnens
- Grundwasserleitertests, zur Ermittlung der wasserleitenden und wasserspeichernden Eigenschaften des Grundwasserleiters
- Zwischenpumpversuche, z. B. während einer Brunnenbohrung zur Festlegung der endgültigen Brunnentiefe und des geeigneten Ausbaus
- Pumpversuche zur Brunnenentwicklung zur Leistungsoptimierung, z. B. zur Herstellung der Sandfreiheit bei Inbetriebnahme eines Brunnen-Neubaus
- Betriebstests, zur Klärung des Anfahrbetriebes, der Pumpenauslegung, der Sandführung u. a.
- Langzeitpumpversuche, zum Nachweis ökologischer Auswirkungen einer Grundwasserentnahme, zur Feststellung der Dauerergiebigkeit und der Herkunft des Wassers

Die grundsätzliche Durchführung, d. h. die einzelnen Schritte und der Ablauf sind dabei bei allen Arten weitgehend gleich, sie unterscheiden sich jedoch vor allem im zeitlichen Umfang.

Ein Pumpversuch beinhaltet immer die kontinuierliche und kontrollierte Entnahme von Grundwasser aus einem Grundwasserleiter mittels einer Unterwasserpumpe an einer Grundwassermessstelle oder einem Brunnen. Dabei wird in der bepumpten und in benachbarten Messstellen der Wasserstand gemessen und die Absenkung des Wasserspiegels erfasst. Nach Ende der Pumpphase wird der Wiederanstieg überwacht und dokumentiert.

Je nach Zielsetzung können Pumpversuche unter stationären oder instationären Bedingungen gefahren werden. Ersterer Fall bedeutet, dass so lange gepumpt wird, bis sich der Grundwasserstand nicht mehr ändert, d. h. genauso viel Wasser zuströmt, wie abgepumpt wird.

Die Auswertung erfolgt hierbei nach einem Verfahren nach Dupuit-Thiem (halbgrafisches Auswerteverfahren) zur Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes des Grundwasserleiters. Gemessen werden der Ruhewasserspiegel in der bepumpten Messstelle sowie benachbarten Überwachungsmessstellen sowie die Absenkung in selbigen. Notwendig für die Auswertung sind außerdem die Abstände der Überwachungsmessstellen zur Entnahmestelle, die Zeit seit Pumpbeginn und die Fördermenge der Pumpe. Wenn der quasistationäre Zustand nicht erreicht wird, d. h. der Wasserstand bei gleich bleibender Pumprate immer weiter abnimmt, spricht man von instationären Bedingungen. Hierbei erfolgt die Auswertung nach Verfahren nach Theiss (grafisch, doppeltlogarithmisch, mithilfe von Typkurven der Theisschen Brunnenfunktion) oder nach Cooper&Jacob (grafisch, halblogarithmisch).

Detaillierte Anweisungen zur „Planung, Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen bei der Wassererschließung“ gibt das DVGW Arbeitsblatt W 111(1997) mit ebendiesem Titel. Die verschiedenen Auswerteverfahren sind in Lehrbüchern der Hydrogeologie aufgeführt und erklärt, z. B. in BALKE et al. (2000) oder HÖLTING (1996).

Für das Brunnenmonitoring und die regelmäßige Bewertung der Brunnenleistung werden, entsprechend der obigen Aufzählung, Brunnentests durchgeführt. Dabei wird i. d. R. nur im Brunnen gemessen und auf benachbarte Überwachungs-Messstellen verzichtet.

Die Förderrate der Pumpe wird in Stufen gesteigert. Die Dauer pro Pumpstufe liegt i. A. zwischen 4 und 24 Stunden. Start- und Endwert für die Förderrate sollen dabei so gewählt werden, dass mindestens drei Pumpstufen möglich sind. Die maximale Pumpleistung wird entsprechend den Betriebsdaten des Brunnens gewählt.

Ziel ist die Ermittlung der Leistungskurve (Q-s-Kurve) des Brunnens. Dabei wird die Absenkung des Wasserspiegels s gegen die Fördermenge der Pumpe Q abgetragen. Ein Brunnentest beinhaltet also die Messung der Absenkung bei bestimmten Förderraten Q . Die Fördermenge wird dabei schrittweise gesteigert. Jede Pumpstufe wird so lange beibehalten, bis sich für diese Fördermenge ein quasistationärer Zustand eingestellt hat. Das Schema zeigt Abb. 2-14:

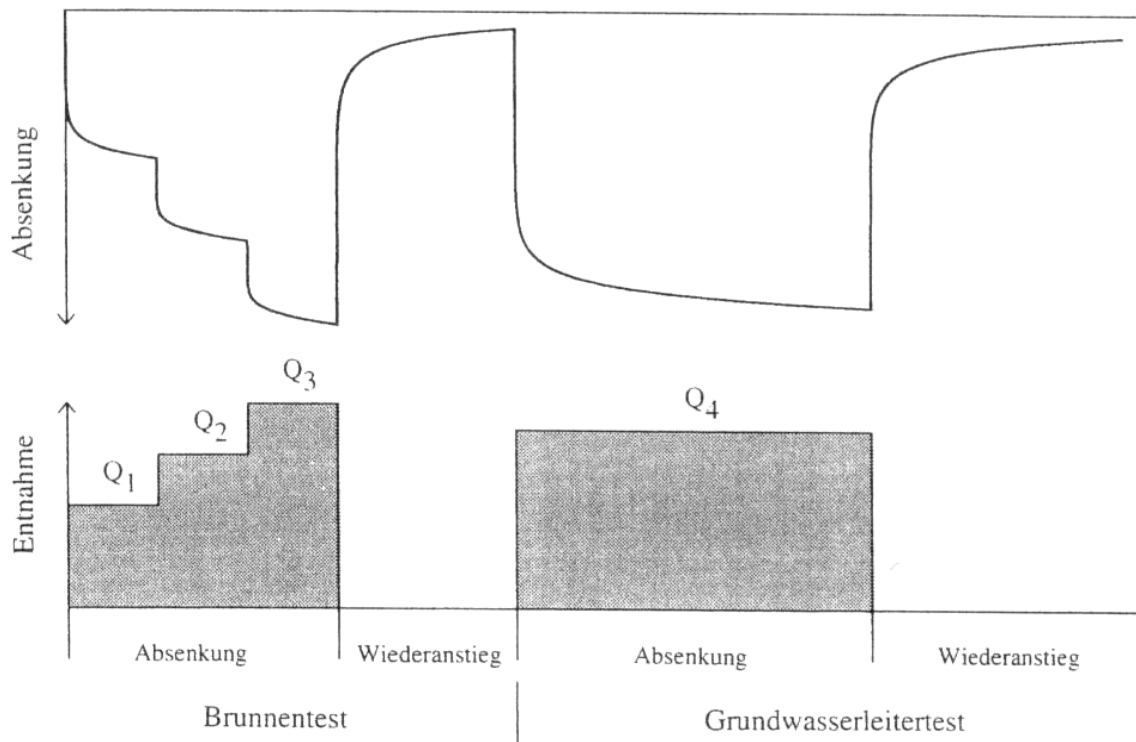


Abb. 2-14: Schema eines Pumpversuches mit Erfassung der Entnahmemenge Q (unten) und der Absenkung im Brunnen (oben) [nach DVGW W111, 1997:9]

Die dabei erreichte Absenkung s wird dokumentiert und grafisch gegen Q abgetragen. Das Ergebnis zeigt Abb. 2-15:

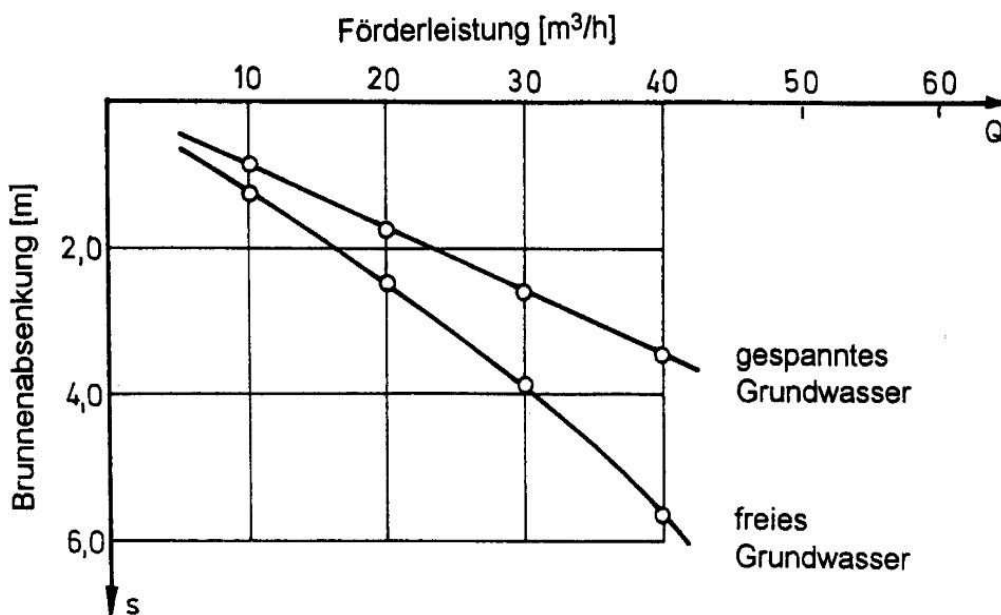


Abb. 2-15: Q-s-Kurve im gespannten und freien Grundwasser [aus DVGW W11, 1997:25]

Das Messintervall zur Feststellung der Absenkung ist im DVGW Arbeitsblatt W 111 und den Standardwerken der Hydrogeologie festgelegt und gliedert sich wie folgt:

- Start bis 10 Minuten: 1 Minute
- 10 bis 60 Minuten: 5 Minuten
- 1 bis 2 Stunden: 10 Minuten
- 2 bis 3 Stunden: 20 Minuten
- 3 bis 5 Stunden: 30 Minuten
- > 5 Stunden: 1 Stunde [BALKE et al., 2000]

Brunnentests können auch in reduzierter Form als Kurzpumpversuche ohne Änderung der Entnahmeleistung durchgeführt werden. Hierbei wird die spezifische Ergiebigkeit Q_s aus der Fördermenge Q und der bei ihr maximal erreichten Absenkung s berechnet (vgl. Abb. 2-13):

$$Q_s = \frac{Q}{s} \quad [\text{m}^3/\text{h} * \text{m}]$$

Die Fördermenge Q orientiert sich dabei an der normalen Förderleistung des Brunnens. Die Absenkung s wird mit folgendem Messintervall bis zum Erreichen des quasistationären Zustandes dokumentiert:

- 1 Minute nach Start
- 3 Minuten nach Start
- 5 Minuten nach Start der Pumpe, danach
- bis 20 Minuten alle 5 Minuten
- bis 60 Minuten alle 10 Minuten
- danach alle 15 Minuten bis zum Erreichen des quasistationären Zustandes.

Nach Beendigung der Pumpphase wird mit gleichem Messintervall der Wiederanstieg dokumentiert.

Sowohl die Ermittlung der Brunnenleistungskurve (Abb. 2-15) als auch die Feststellung der spezifischen Ergiebigkeit des Brunnens zu einem bestimmten Zeitpunkt (Abb. 2-13) dienen der kontinuierlichen, und, so in Intervallen durchgeführt, der regelmäßigen Überwachung der Brunnenleistung. Aus dem Betrag der Absenkung bei einer bestimmten Förderleistung und dem Vergleich mit dem Betrag der Absenkung bei derselben Förderleistung zu einem früheren Zeitpunkt lassen sich Aussagen über die Brunnenalterung treffen (vgl. Abb. 2-10, S.33).

Mit zunehmenden Alterungserscheinungen im Filterbereich des Brunnens erhöht sich der Eintrittswiderstand des zufließenden Wassers. Bei gleichbleibender Förderung wird der Wasserspiegel stärker gesenkt werden oder umgekehrt, um den Wasserspiegel nicht stärker abzusenken, d. h. bei konstantem Absenkungsbetrag s , sinkt die Fördermenge Q . Wie Abb. 2-16 zeigt, verläuft die Q - s -Kurve dann immer steiler.

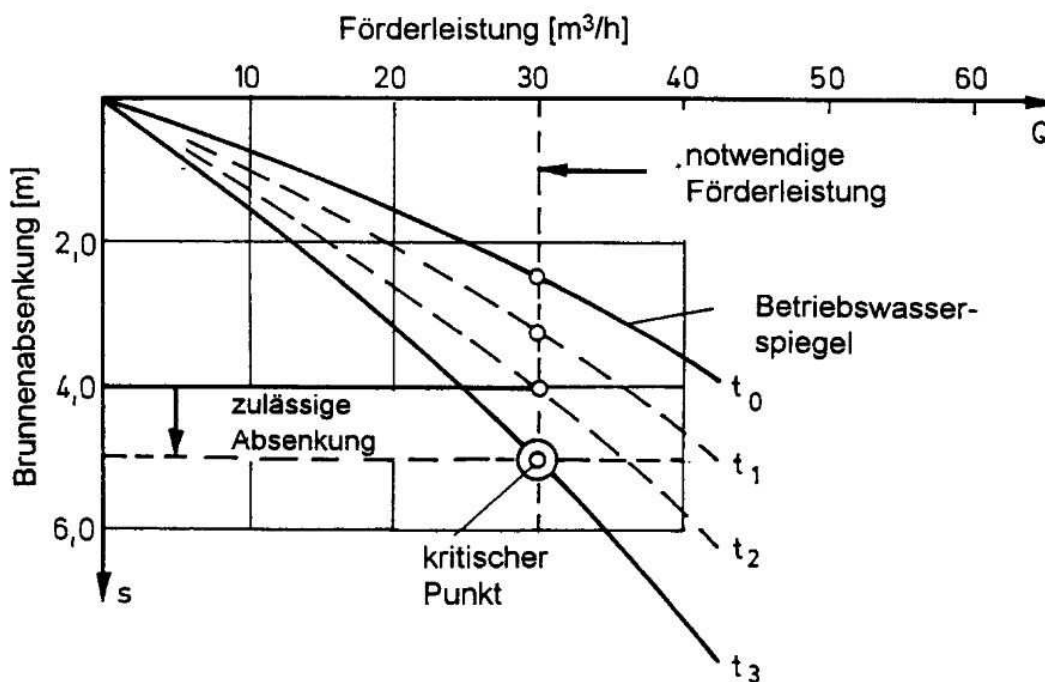


Abb. 2-16: Q - s -Kurve nach verschiedenen Betriebszeiten t_1 bis t_3 eines Brunnens. t_0 ist die Neubauleistung. [aus DVGW W111, 1997:26]

Der Vergleich der Pumpversuchsergebnisse bei Inbetriebnahme des Brunnens, im Laufe des Betriebes sowie vor und nach Regenerierungen gibt also Auskunft über die Leistung des Brunnens, über Brunnenalterung und den Erfolg einer Regeneriermaßnahme.

Der „kritische Punkt“ in Abb. 2-16 markiert das Überschreiten der zulässigen Absenkung. Bei einer notwendigen Förderleistung Q liegt ab dieser Zeit der Betriebswasserspiegel tiefer als zulässig, im Extremfall bereits im Filterbereich. Der Brunnen muss spätestens dann regeneriert oder saniert werden.

Die Durchführung von Brunnentests oder Kurzpumpversuchen stellt somit ein unerlässliches Instrument des Brunnenmonitorings dar und sollte regelmäßig durchgeführt und gut dokumentiert werden.

2.3.4 Monitoring hydrochemischer Veränderungen

Das qualitative Brunnenmonitoring beinhaltet die regelmäßige Entnahme und Analyse von Wasserproben sowie die Vor-Ort-Bestimmung physiko-chemischer Parameter. Daraus können sich bereits Hinweise auf Brunnenalterung gewinnen lassen.

Das Intervall der Rohwasseruntersuchung ist gesetzlich festgelegt. D. h. in bestimmten Intervallen (in Deutschland auf Länderebene geregelt) wird den Brunnen eine Wasserprobe entnommen und gemäß Rohwasseruntersuchungsverordnung (RUV) auf festgelegte Parameter untersucht. Hierzu zählen:

- physikalische Parameter, wie Färbung, Trübung, Geruch, Temperatur
- physiko-chemische Parameter, wie pH-Wert, Gehalt an gelöstem Sauerstoff, elektrische Leitfähigkeit, Basenkapazität, Säurekapazität u. a.

die vor Ort bestimmt werden, sowie

- chemische Parameter, wie Hauptkationen/ -anionen, Gehalt an org. Kohlenstoff, org. Verunreinigungen (AOX, POX usw.) u. a.
- biologische bzw. hygienische Parameter, wie Koloniezahl, Coliforme u. a.

die in zertifizierten Labors analysiert werden.

Einige dieser Parameter dienen als Indikatoren für Veränderungen im Brunnen, wie die folgende Tabelle (Tab. 2-2) aufzeigt:

Dies beruht auf den komplexen Abhängigkeiten zwischen den chemischen Vorgängen im Grundwasserleiter und im Brunnen und den Milieubedingungen, d. h. vornehmlich von pH- und Eh-Wert (vgl. Kap. 2.3.1, S.26ff).

Tab. 2-2: Leitparameter von Wasseranalysen als Indikatoren zur Beurteilung von Regenerier- und Sanierungserfordernissen [nach HOUBEN & TRESKATIS, 2003, S.47]

Veränderung des Leitparameters...	...als Indikator für...
Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , Fe _{gesamt}	Veränderung des Milieus im Brunnen oder im brunnennahen Grundwasserleiter, z. B. durch Zusickerung stockwerksfremder, sauerstoffreicher Wässer oder durch Absenkung des Betriebswasserspiegels in die Filterstrecke) -> evt. Hinweis auf falschen Brunnenbetrieb, d. h. zu starke Wasserspiegelabsenkung
Mangan	dto.
pH-Wert	dto.
Hydrogencarbonat	Veränderungen des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts, z. B. durch Druckverluste und dadurch ausgelöste Entgasungsprozesse, Zusickerung CO ₂ -reicher Wässer u. a. -> evt. Hinweis auf falschen Betrieb oder vorhandene Undichtigkeiten
spez. elektrische Leitfähigkeit	Veränderungen im Salzgehalt des Rohwassers, z. B. durch den Eintrag von Düngemitteln, Salzwasserintrusion usw. -> evt. Hinweis auf defekte Ringraumabdichtung
Temperatur	Veränderung der Herkunft des Rohwassers -> evt. Hinweis auf hydraulischen Kurzschluss und Zutritt von Wasser aus anderen Stockwerken

Mithilfe spezieller Software ist es heute möglich, die gemessenen Werte auf ihre Plausibilität zu prüfen und aus geochemischer Modellierung Rückschlüsse auf mögliche Vorgänge im Brunnen und im angrenzenden Grundwasserleiter zu ziehen.

Eine Überprüfung der Befunde kann dann jedoch immer nur über die o. g. Methoden des Monitorings des Betriebszustandes erfolgen, d. h. es müssen Brunnentests, Kamerabefahrungen usw. zum Einsatz kommen, um festzustellen, ob der Brunnen Alterungserscheinungen aufweist und

regeneriert werden muss, oder Veränderungen im Bauzustand eine Sanierung erforderlich machen.

Bereits an dieser Stelle wird auch die Wirtschaftlichkeit eines regelmäßigen Brunnenmonitorings herausgestellt. Durch das rechtzeitige Einleiten entsprechender Regenerier- oder Sanierungsmaßnahmen rentieren sich die Kosten zur Durchführung der verschiedenen Maßnahmen und der Brunnen kann lange mit voller oder nahezu voller Leistungsfähigkeit erhalten und betrieben werden.

2.3.5 Erstellen von Betriebsprogrammen

Nach STEUSSLOFF&STEINBRECHER (2002:146) ist „Der Beginn des Brunnenbetriebes [ist] zeitgleich der Beginn der Brunnenalterung“. Daraus ergibt sich, dass nur der kontrollierte und überwachte Brunnenbetrieb die lange Nutzung des Brunnens ermöglicht. Dabei hilft das Erstellen eines Betriebsprogramms, das auf die spezifischen Charakteristika des Brunnens und die wasserwirtschaftlichen Anforderungen bezogen ist.

In den meisten Fällen erfolgt der Brunnenbetrieb in Abhängigkeit vom Wasserverbrauch, d. h. er ist tageszeitabhängigen Schwankungen unterworfen. Besonders für kleinere Anlagen kann dies bedeuten, dass die Brunnen oft ab- bzw. zugeschaltet werden und jeweils nur für kurze Zeit Wasser fördern. Dies wirkt sich ganz erheblich nachteilig auf die Lebensspanne eines Brunnens aus, da die daraus bedingten, häufigen Wasserspiegelschwankungen die Brunnenalterung begünstigen.

Auch ist das Anfahren des Brunnenbetriebes als eine Stresssituation für den Brunnen zu bewerten. Hierbei werden starke Druckpotenziale erzeugt, die z. B. eine Sandführung kurze Zeit nach dem Einschalten der Pumpe mit sich bringen können.

Das Anfahren der Wasserentnahme verläuft in drei Phasen [CONRAD, 2002]:

1. Phase: Leerung des Bauwerkes
2. Phase: Absenkung des Wasserspiegels
3. Phase: Erreichen des Gleichgewichtes zwischen Entnahme und Zustrom (stationäre Entnahme)

Um die Brunnenfunktion möglichst lange auf einem hohen Leistungsniveau zu erhalten, muss der Brunnen möglichst schonend betrieben werden. Diesem Grundsatz folgen Maßnahmen, die einen konstanten Brunnenbetrieb erlauben. Bei allen Betriebsprogrammen ist besonders darauf zu achten, den Wasserspiegel nicht in den Bereich der Filterstrecke abzusenken, um den Zutritt von Sauerstoff möglichst zu verhindern, da sonst im Wasser gelöste, reduzierte Verbindungen zu unlöslichen oxidiert werden und ausfallen können.

Aus dem ordnungsgemäßen Bau und Unterhalt eines Brunnens, den periodischen Überprüfungen im Zuge des Brunnenmonitorings und den Maßnahmen zur Werterhaltung baut sich das Betriebsprogramm des Brunnens auf, in dem alle relevanten Angaben, die Soll-Leistung, maximale Leistung usw. festgeschrieben sind. Ein Beispiel hierfür ist das so genannte Brunnenertüchtigungsprogramm RETROFIT [CONRAD, 2002], das in der Schweiz entwickelt und erfolgreich eingesetzt wurde und hier kurz beschrieben werden soll.

Für Brunnen-Neubauten werden dabei bereits zu Beginn des Betriebes die einzelnen Komponenten hinsichtlich ihrer zu erwartenden Lebensdauer beurteilt und ein entsprechender Wartungsplan entwickelt. Außerdem können weitergehende bauliche Maßnahmen vorgenommen werden, die das Brunnenbauwerk vor Fremdeinflüssen schützen und somit die Lebensdauer von Anfang an verlängern.

Bei älteren Fassungen ist der erste Schritt immer ein Soll-Ist-Vergleich mit den gängigen Methoden des Brunnenmonitorings, d. h. Kamerabefahrung, Brunnentest, ggf. geophysikalische Untersuchungen usw. Diese „Ist-Werte“ werden dann mit den Soll-Werten verglichen, die sich aus der Fragestellung ergeben „Wie müsste der Brunnen gestaltet sein, wenn er heute gebaut würde?“. Hilfsmittel hierfür sind natürlich die Dokumentationen aus Brunnenakte oder Brunnencheckheft (vgl. Kap 3.1). Anhand einer Relevanzmatrix nach CONRAD wird dann der Verbesserungsbedarf festgelegt. Hierzu sind zu bewerten:

- der Standort
- die Ausweisung der Schutzzonen
- die Wasserqualität
- Fassungsdaten
- Betriebsdaten

Anhand der Werte wird dann das so genannte Brunnenertüchtigungsprogramm zusammengestellt. Es enthält:

- die Brunnenprüfung mit Kamera, Brunnentest, Geophysik, Wasseranalysen
- Brunnenregenerierung mit geeigneten Methoden
- Brunnensanierung
- Rückbau störender alter Fassungen und Beobachtungsstellen in Brunnennähe
- Festlegung des optimalen Pumpbetriebes
- bauliche Maßnahmen zum Fassungschutz
- Revision oder Anpassung der Schutzzonen

Nach Durchführung der Maßnahmen zur Werterhaltung oder Wiederherstellung, ist dann wiederum besonders auf die schonende Betriebsweise, hier, nach Festlegung des angepassten, optimalen Pumpbetriebes, zu achten und die erstellten Pläne über Betrieb, Unterhalt und Wartungsmaßnahmen sind einzuhalten, durchzuführen und zu dokumentieren.

Dazu stehen heutzutage geeignete Software- und Onlineüberwachungseinrichtungen zur Verfügung, z. B. elektronische Warnsysteme bei Unterschreiten eines kritischen Betriebswasserspiegels, automatische Anpassung der Pumpleistung, Einzelbrunnenbetrieb statt Betrieb mittels Heberleitungen usw.

2.4 Brunnenregenerierung

2.4.1 Allgemeines

Wurde an einem Brunnen eine Veränderung von Parametern, die die Brunnenalterung anzeigen, festgestellt, ist zur Wiederherstellung der optimalen Förderleistung eine Brunnenregenerierung erforderlich. Je eher diese durchgeführt wird, desto besser ist die Aussicht auf Erfolg. Die Erfahrung zeigt, dass spätestens bei 20% Leistungsrückgang, bezogen auf den Neubauwert, geeignete Maßnahmen eingeleitet werden sollten [DVGW, 2001; STEUSSLOFF&STEINBRECHER, 2002 u. a.].

Ein erster Schritt sollte dabei stets eine Unterwasserkamerabefahrung des Brunnens sein, um den Leistungsrückgang einer der in Kap.2.2.2 aufgeführten Alterungsarten zuordnen zu können und die am besten geeignete Methode zur Regenerierung auszuwählen.

Chemische und biologische Untersuchungen des Brunnenwassers und der Ablagerungen im Filterrohr, oder an der Pumpe sowie der Steigleitung, liefern weitere wichtige Hinweise zur optimalen Regenerierung.

Zur Wiederherstellung der Brunnenleistung dienen die Verfahren Reinigung, Regenerierung oder Sanierung [DVGW W130, 2001].

Die Reinigung ist dabei in der Anwendung immer auf das Innere des Filterrohres beschränkt. Demzufolge sind die Effekte im Ringraum hinter dem Filterrohr gar nicht oder nur gering nachweisbar. Zu dieser Verfahrensgruppe zählen das Bürsten und das Auspumpen des Sumpfrohrs.

Als Sanierung wird das Durchführen baulicher Veränderungen oder das Instandsetzen des Bauwerkes selbst bezeichnet, z. B. das Einbringen von Einschubverrohrungen, wenn die Altverrohrung Beschädigungen aufweist.

Als Regenerierung hingegen werden die Verfahren bezeichnet, die die leistungsmindernden Ablagerungen aus dem Brunnenfilterrohr, den Filterschlitz und dem Ringraum bis hin zum angrenzenden Grundwasserleiter lösen und entfernen. Diese sollen im Folgenden weiter beschrieben werden.

Ihnen allen gemeinsam ist die Forderung nach dem Erfüllen der drei Haupt-Bearbeitungsschritte des DVGW Arbeitsblatts W130:

1. Trennen (des Verbundes zwischen Filterrohr/ Filterkies und den Ablagerungen)
2. Entfernen, d. h. Austrag der gelösten Ablagerungen und
3. Überwachung des Regenerierfortschrittes.

Grundsätzlich zu unterscheiden sind mechanische und chemische Verfahren.

Mechanische Verfahren beruhen auf physikalischen Trennprozessen zum Ablösen der Ablagerungen im Brunnen. Hierzu zählen:

- das Kolben, das ist die Anwendung von, in der Größe an den Brunnendurchmesser angepassten, Verdrängerkolben, bei denen durch Ab- und Aufwärtsbewegung Druckschwankungen erzeugt werden, woraus mechanische Scherkräfte und eine vertikale Strömung resultieren;

- die Intensiventnahme, bei der der Brunnen gezielt überpumpt wird. Dies geschieht heutzutage meist abschnittsweise abgepackert. Dabei entstehen starke Strömungen im Ringraum;
- die Wasserdruckspülungen mit Hoch- oder Niederdruck, bei denen Wasser mit speziellen Konstruktionen mit rotierenden Düsen im Brunneninneren oder mit Spüllanzen direkt im Ringraum eingespült wird, wodurch mechanische Scherkräfte erzeugt werden;
- Impulsverfahren, bei denen durch Impulse im Brunnen Druckschwankungen erzeugt werden, die mechanische Scherkräfte bewirken. Hierzu zählen unter anderem die Impulsanregung mit Knallgas, Sprengschocken oder Ultraschall.
- die Injektion von CO₂, wobei erst gasförmiges Kohlendioxid zur Verdrängung des Wassers eingebracht wird und anschließend flüssiges, das dann im Brunnen unter schlagartiger Ausdehnung den Aggregatzustand ändert (gasförmig wird). Das Verfahren wird daher auch als „Gefrierschocken“ bezeichnet.

Die Ablagerungen im Brunneninneren und im Ringraum werden gelöst und anschließend abgepumpt. Die Kontrolle des Regenerierfortschrittes erfolgt meist anhand der Beurteilung der gelösten Feststoffanteile im abgepumpten Wasser.

Jede der Technologien hat verschiedene Eigenschaften und daraus resultierende Vor- und Nachteile. Einige mechanische Verfahren sind mit einem hohen und vor allem plötzlichen Energieeintrag verbunden, weshalb sie nicht für alle Brunnen anwendbar sind.

Besonders die so genannten hydromechanischen Verfahren, zu denen Wasserdruckanwendung und Impulsverfahren zählen, sind in den letzten Jahren kontinuierlich entwickelt worden, so dass heute eine Vielzahl verschiedener Methoden und Geräte zum Einsatz kommen. Entsprechende Darstellungen und Beschreibungen der Verfahren finden sich daher in Neuauflagen der Lehrbücher über Grundwasserentnahme mittels Brunnen, z. B. BALKE et al. (2000), HOUBEN & TRESKATIS (2003) oder WICKLEIN & STEUSSLOFF (2002), im DVGW-Regelwerk Arbeitsblatt W130 (2001) und in Fachzeitschriften wie der *bbr – Fachmagazin für Brunnen und Leitungsbau* oder der *GWF Wasser/ Abwasser*.

Chemische Verfahren beruhen dagegen auf dem chemischen Lösevermögen und Lösungsvorgängen zwischen Ablagerungen und Regeneriermittel. Sie werden schon ca. einhundert Jahren eingesetzt. Weiterentwickelt wurden die eingesetzten chemischen Mittel und die Art des Eintrags in den Brunnen.

Als Regeneriermittel in Frage kommen:

- anorganische Säuren, z. B. Salzsäure (HCl) mit verschiedenen Zusätzen. Genutzt wird hier die zeit- und pH-Wert-abhängige Lösekapazität der Säure auf Beläge;
- organische Säuren, z. B. Ameisensäure (HCOOH), die ebenfalls die Beläge lösen
- ein Reduktionsmittel, das im pH-neutralen Bereich die Ablagerungen löst und
- Desinfektionsmittel, die bei biologischer Brunnentalterung zur Anwendung kommen, da sie die Mikroorganismen, welche die Beläge verursachen, abtöten.

Der Eintrag erfolgt entweder diskontinuierlich, z. B. mit Ventilkolben oder Einfachpackern, bei denen das Regeneriermittel jeweils in einen Filterabschnitt eingepumpt und nach Abwarten der Lösezeit wieder abgepumpt wird, oder kontinuierlich mit Kieswäschern oder Mehrfachpackersystemen, bei denen das Regeneriermittel die Filterkiespackung in einem Kreislaufsystem durchströmt.

Die Auswahl des geeigneten Regeneriermittels erfolgt anhand von Lösemitteltests. Hierbei werden Proben der Ablagerungen im Brunnen im Labor auf ihre Reaktion mit verschiedenen Regeneriermitteln getestet. Dabei werden gleichzeitig die notwendige Reaktionszeit sowie die Menge des benötigten Regeneriermittels ermittelt.

Chemische Regenerierungen dürfen nur nach vorheriger behördlicher Genehmigung durchgeführt werden, da es sich um einen Eintrag gefährlicher Stoffe in das Grundwasser handelt. Weiterhin sind unbedingt die Herstellerangaben zur Handhabung, Einbringung und Dosierung zu beachten und die Regenerierrückstände, d. h. das abgepumpte Regenerat, bestehend aus gelösten Ablagerungen und Regeneriermittel, muss fachgerecht neutralisiert, aufbereitet und entsorgt werden.

Der Regenerierfortschritt wird bei chemischen Verfahren anhand des pH-Wertes und einiger Leitparameter im Regenerat, wie Eisengehalt oder Leitfähigkeit, kontinuierlich überwacht.

Auch für chemische Verfahren gilt, dass die verschiedenen Technologien unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. So sind z. B.:

- anorganische Regeneriermittel unwirksam bei biologisch induzierter Verockerung und Biofilmen und

- organische Regeneriermittel ungeeignet bei kristallinen Krusten und sollten nicht angewendet werden, wenn der Brunnen zu biologischer Verockerung neigt, da die organischen Bestandteile Nährstoff für Mikroorganismen bereitstellen.

Für den bestmöglichen Regeneriererfolg schlägt der DVGW die kombinierte Anwendung mechanischer und chemischer Verfahren vor. Hierbei wird der Brunnen zuerst mechanisch behandelt. Dabei werden vor allem durch Entfernung der Beläge im Filterrohr und im direkt angrenzenden Kiesbereich die Wegsamkeiten für die, anschließend eingebrachten chemischen Mittel geschaffen, die dann besser wirken können.

Bei noch nicht stark verfestigten, gealterten Ablagerungen sind heutzutage die oben genannten hydromechanischen Verfahren eine Alternative zur chemischen Behandlung der Brunnen. Dazu zählen die Wasserdruckspülungen und Impulsverfahren.

Sie reichen wie chemische Verfahren weit in den Ringraum des Brunnens hinein. Die Vorteile liegen, neben dem Verzicht auf den Eintrag umweltgefährdender Stoffe ins Grundwasser, in der schnellen Bearbeitung und darin, dass sie auch bei mikrobiologisch induzierter Brunnenalterung hochwirksam sind und diese vor allem nach der Regenerierung nicht begünstigen und somit als nachhaltig bezeichnet werden können.

Jede Brunnenregenerierung umfasst die sorgfältige Auswahl eines geeigneten Verfahrens anhand der Daten

- zum Brunnenausbau und baulichen Zustand des Brunnens,
- zur vorliegenden Alterungsart, Zusammensetzung und Alter der Beläge und
- zur bisherigen Durchführung von Regeneriermaßnahmen.

Die grundsätzliche Eignung der verschiedenen Verfahren für die unterschiedlichen Brunnen, d. h. die Ausbaumaterialien und die Alterungsarten, gründet sich i. d. R. auf Erfahrungswerten aus Anwendungen in der Praxis. DVGW Arbeitsblatt W130 (2001) enthält außerdem im Anhang eine Tabelle zur Eignung der Verfahren als Übersicht und mit einer Bewertung der Anwendbarkeit. Eine Pauschalisierung der Anwendbarkeit der verschiedenen Verfahren ist aus heutiger Sicht jedoch nicht möglich. Jeder einzelne Brunnen, selbst wenn er, wie in der vorliegenden Arbeit innerhalb einer Brunnengalerie

mit sehr ähnlichen Eigenschaften bezüglich des Grundwasserleiters und des Brunnenausbaus betrieben wird, kann andere Ergebnisse bei der Auswertung einzelner Regenerierungen und dem Vergleich des Einsatzes verschiedener Verfahren zeigen.

Jede Durchführung einer Regenerierung wird mit Begleituntersuchungen zur Kontrolle des Regenerierfortschrittes und zur Dokumentation des Regeneriererfolges überwacht und bewertet. Dies gewährleistet gleichzeitig eine verfahrensunabhängige Beurteilung der Brunnenleistung und die Ableitung weiterer notwendiger Schritte oder eines Wartungs- und Betriebsprogramms (vgl. Kap.2.3.5).

Einige Verfahren wurden in wissenschaftlichen Projekten charakterisiert und untersucht (vgl. Kap. 1.2). Dazu zählt auch das Ultraschallverfahren, das im Rahmen dieser Arbeit im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein eingesetzt wurde. Es soll an dieser Stelle etwas näher beschrieben werden:

2.4.2 Das Ultraschall - Verfahren

Das Ultraschall-Verfahren zählt zu den Impulsverfahren. Ultraschallimpulse erzeugen in den Brunnen Druckwellen, die wiederum Scherkräfte induzieren, wodurch Ablagerungen vom Filterkies gelöst werden.

Ultraschall ist eine akustische Erscheinung. In Anlehnung an Ultraviolettes Licht erfolgt die Abgrenzung zum hörbaren Schall anhand der menschlichen Wahrnehmungsgrenze (Abb. 2-17). Der Bereich des Ultraschalls umfasst Frequenzen zwischen 20 kHz und 1 GHz.

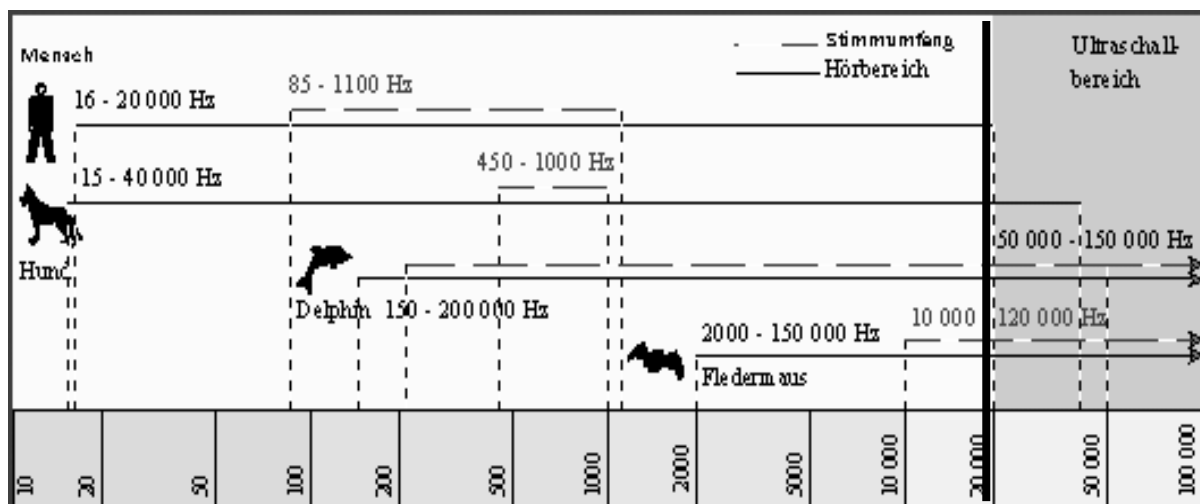


Abb. 2-17: Abgrenzung der Frequenzen und Wahrnehmungsbereiche [aus www.Palkan.de, 27.06.2005]

Die Grundlagen und Gesetzmäßigkeiten der Wellenlehre im Allgemeinen und der Akustik bzw. des Ultraschalls im Speziellen sind Gegenstand vieler Lehrbücher der Physik. Sie sollen hier nur kurz zusammengefasst und vereinfacht wiedergegeben werden.

Für eine umfassende Darstellung der Ultraschall-Physik wird verwiesen auf BERGMANN (1954), KRAUTKRÄMER (1966), KUTTRUFF (1988) oder SUTILOV (1984).

Nach seiner Anregung breitet sich Ultraschall als mechanische Welle in einem Medium aus. Ohne ein Medium kann keine Schallausbreitung erfolgen. Es entsteht ein Schallfeld mit ganz bestimmten Eigenschaften und Größen. Durch die Anregung wird ein Teilchen des Mediums jeweils aus seiner Ruhelage ausgelenkt und nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten hin- und herbewegt. Die Lageänderung pflanzt sich in Ebenen von Teilchen zu Teilchen fort. Die Schwingungsweite der einzelnen Teilchen ist durch die Amplitude charakterisiert. Die Geschwindigkeit der Fortpflanzung von einer Teilchenebene zur nächsten ist die Schallschnelle.

Alle Teilchen einer Ebene bilden bei ihrer Auslenkung so genannte Phasen- oder Wellenflächen. Sind diese alle parallel und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle, spricht man von ebenen Wellen (Abb. 2-18 a). Bei Ausbreitung in alle Richtungen und Anordnung der Wellenflächen in konzentrischen Kugeln, spricht man von Kugelwellen (Abb. 2-18 b).

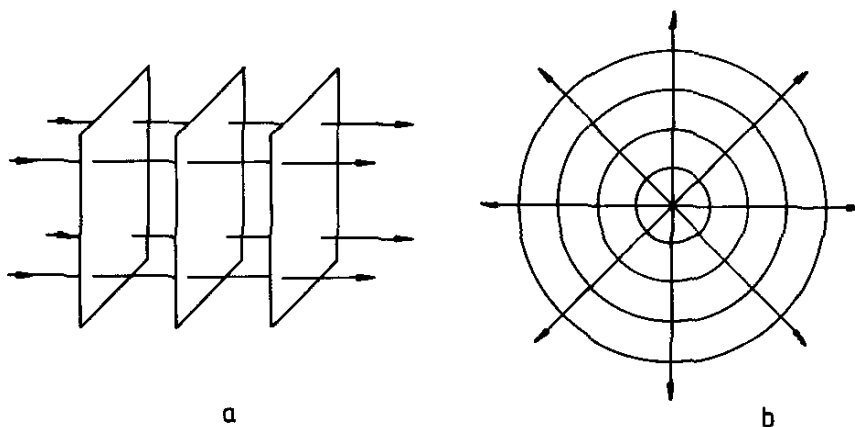


Abb. 2-18: Wellenflächen und Ausbreitungsrichtung von a: Ebene Welle und b: Kugelwelle [aus KUTTRUFF, 1988 zitiert in WIACEK, 2003:17]

Anhand der Richtung der Teilchenbewegung im Verhältnis zur Ausbreitungsrichtung unterscheidet man verschiedenen Wellentypen. Bei Longitudinalwellen bewegen sich die Teilchen in Ausbreitungsrichtung.

Werden die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ausgelenkt, handelt es sich um Transversalwellen.

In Gasen und Flüssigkeiten breiten sich nur Longitudinalwellen aus. In Festkörpern treten, aufgrund der Formelastizität auch Transversalwellen und verschiedene komplizierte Wellenformen, wie Dehnwellen, Biegewellen und Oberflächenwellen auf [KUTTRUFF, 1988].

Die Lageänderung der Teilchen bewirkt lokale Dichteänderung mit der Herausbildung von Verdichtungs- und Verdünnungszonen. Daraus folgt ein Wechsel von lokalem Über- bzw. Unterdruck. Dies ist der Schall(wechsel)druck, definiert als Kraft pro Flächeneinheit, senkrecht zur Wellenfläche. Die maximale Abweichung vom Normaldruck im Medium ist dabei die Schalldruckamplitude \hat{p} .

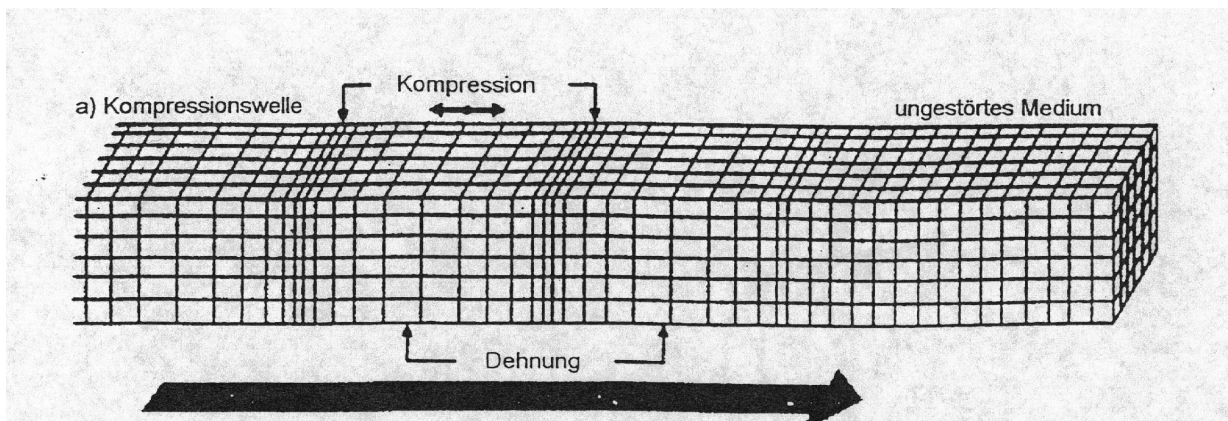


Abb. 2-19: Ausbreitung des Ultraschalls als Longitudinalwelle mit Verdichtungs- und Verdünnungszonen [aus PATZNER, 26.08.2003]

Die Zahl der Schwingungen pro Sekunde gibt die Frequenz f an. Der Abstand zweier Teilchenebenen im gleichen Bewegungszustand ist durch die Wellenlänge λ beschrieben.

Ein Schallfeld ist gemäß den obigen Ausführungen beschrieben durch die folgenden Schallfeldgrößen. Diese sind abhängig von physikalischen Eigenschaften des jeweiligen Mediums.

- den Schall(wechsel)druck in [N/m²]

$$p(x,t) = p_0 + \hat{p} \cdot \cos\left(2\pi f \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right)\right)$$

- die Schalldruckamplitude in [Pa] $\hat{p} = \sqrt{2 \cdot \rho_0 \cdot c \cdot (p \cdot v)}$

- die Schallschnelle in [m/s]

$$v(x,t) = \left[\frac{\hat{p}}{\rho_0 \cdot c}\right] \cdot \cos\left(2\pi f \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right)\right)$$

- die Wellenlänge in [m] $\lambda = \frac{c}{f}$

- die Schallgeschwindigkeit einer Flüssigkeit $c = \frac{1}{\sqrt{\rho_0 \cdot \beta}}$ in [m/s]

mit p_0 - statischer Druck [N/ m²]

\hat{p} - Schalldruckamplitude [N/ m²]

f - Schallfrequenz [1/s]

ρ_0 - Dichte der Flüssigkeit im Ruhezustand[kg/m³]

β - Kompressibilität der Flüssigkeit [m²/N] [WIACEK, 2003]

Die Herleitung der angegebenen Beziehungen und Größen aus den Navier-Stokes-Gleichungen auf Grundlage der Ausführungen von z. B. KUTTRUFF (1988) ist vereinfacht dargestellt bei KAULITZKY (1999: Anhang 9:S.164ff.) und soll hier nicht behandelt werden.

Einen Spezialfall der Wellenausbreitung stellen Harmonische Wellen dar. Hierbei erfolgt eine periodische Anregung der Schwingung der Teilchen des Mediums. Aus der zeitlich und räumlich periodischen Welle ergibt sich ein sinusförmig schwankender Schalldruck.

Alle Schallwellen können in harmonische Schwingungen zerlegt werden. Jeder Frequenzanteil entspricht dabei einer Sinuskurve.

Eine Schallwelle erzeugt keinen Materialtransport und damit auch keine Bewegung in dem Medium. Es wird Energie transportiert. Dennoch bzw. dadurch übt die Schallwelle auf das Medium immer eine Wirkung aus und wird im Gegenzug in seiner Ausbreitung vom Medium beeinflusst.

Die in der Schallwelle transportierte Energie und damit die Stärke des Schallfelds im Hinblick auf die Wirkung im Medium ist beschrieben durch die Schallintensität J.

Ein Teil der in das Medium eingetragenen mechanischen Energie wird immer zu thermischer Energie umgewandelt. Man bezeichnet dies als Absorption oder als Dämpfung der Welle. Jedes Material besitzt eine spezifische Absorptionskonstante. Diese ist abhängig von der Frequenz des Ultraschalls. Eine Maßangabe für die Dämpfung der Schallwelle durch das Material ist das Dämpfungsmaß D , d. h. die Abnahme des Schalldruckpegels (in Dezibel) pro Wegeinheit.

Weitere entscheidende Charakteristika eines Materials hinsichtlich der Schalldämpfung sind seine molekulare Struktur, seine Kompressibilität und Viskosität u. a.

Für die Anwendung von Ultraschall zur Brunnenregenerierung muss das System

Wasser (Fluid) – *Filterrohr* (verschiedene Materialien mit charakteristischen Eigenschaften hinsichtlich des Schalls) – *Filterkiesschüttung* (i. d. R. Quarzkiese und wassererfüllter Porenraum)

betrachtet werden.

Filterrohr und die einzelnen Körner des Filterkieses stellen im Wasser feste Grenzflächen dar. Trifft eine Schallwelle aus einem flüssigen (oder gasförmigen) Stoff auf eine ebene Grenzfläche, kommt es zu Reflexion und Brechung der Welle. Für Ultraschall gelten dabei die allgemeinen physikalischen Gesetze über Einfallswinkel, Reflexions- und Brechungswinkel. Im Allgemeinen werden sich jedoch Phase und Amplitude der Welle ändern.

Die Durchlässigkeit eines Materials bestimmt sich im Wesentlichen aus den Abmessungen, d. h. der Wandstärke und dem freien Durchlass (Filterschlitze), weiterhin aus der Dichte und dem Young'schen Elastizitätsmodul. Letzteres beschreibt die elastischen Eigenschaften eines Materials und bestimmt das Verhalten beim Auftreffen von Schallwellen und die spezifische Schallgeschwindigkeit des Stoffes. Die Durchlässigkeit gibt an, wie viel der Schallenergie durch die Trennschicht hindurch gelangen kann.

Das Verhältnis aus einfallender Schallintensität und reflektierter Schallintensität gibt das Reflexionsvermögen der Trennschicht an. Ist letztere teilweise oder ganz schalldurchlässig, entsteht eine gebrochene Welle. Bei einer räumlich begrenzten Trennschicht bzw. einem Hindernis, wie es z. B. ein Filterrohr darstellt, gelangt ein Teil des Schalls in den Schatten des Hindernisses. Dabei entsteht zusätzlich zur durchgelassenen Welle (Primärwelle) eine Beugungswelle (Sekundärwelle). Die Überlagerung der Beugungswelle und der Primärwelle führt zu Interferenzerscheinungen (Abb. 2-20) und wird als

Schallbeugung bezeichnet. Sie ist abhängig von der Dicke des festen Hindernisses, von seiner Schalldurchlässigkeit und der Frequenz des Schalls.

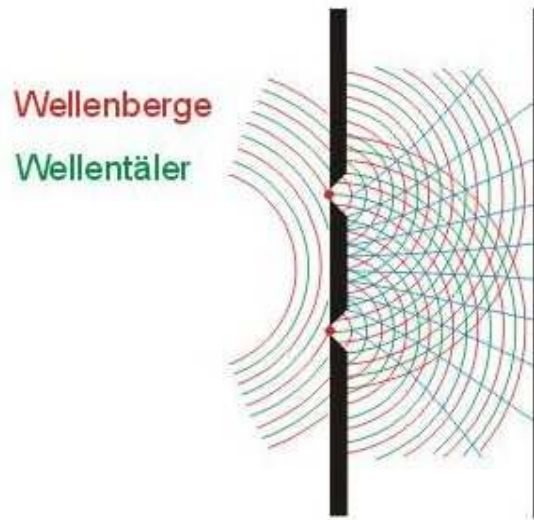


Abb. 2-20: Interferenz hinter einem Doppelspalt durch Überlagerung von Primär- und Beugungswelle [aus www.mbaselt.de/licht/interf.htm, 19.07.2005]

In Brunnen treten Beugungserscheinungen sowohl an den Filterschlitzten (vgl. Abb. 2-20) als auch in der Kiesschüttung auf. Die Stärke und Form ist abhängig von der Schlitzgeometrie des Filterrohrs und der Korngröße und –verteilung in der Kiesschüttung.

In Laborversuchen [BOTT, WIACEK & WILKEN, 2003] wurde die Ultraschallwirkung bei verschiedenen Filterrohrtypen, Kiesschüttungen sowie Belägen untersucht. Schallfeldmessungen dienten der Bestimmung der Schallintensität hinter dem Filterrohr sowie der optimalen Bedingungen und der Reichweite des Ultraschalls in den Ringraum eines Brunnens. Es wurden bisher die folgenden Grundlagen erarbeitet:

- Die Wirksamkeit von Ultraschall im Brunnenringraum konnte in allen Versuchen nachgewiesen werden.
- Der Schall breitet sich sehr gut in den Ringraum aus und konnte noch in 30 cm Entfernung hinter dem Filterrohr in der Kiesschüttung nachgewiesen werden. Die höchsten Intensitäten traten in direkter Linie vor dem Schallgeber auf. Die Intensität nahm mit zunehmender Entfernung zum Schallgeber ab, jedoch nicht in dem erwarteten Maß, d. h. die gemessene Schalldruckamplitude war größer als $1/r^2$.

- Schallintensität und Reinigungswirkung sind druckabhängig. Ein Wirkmaximum liegt zwischen 5 und 6 bar hydrostatischem Druck. Der Anstieg verläuft steil, aber linear. Bei höheren Drücken bleibt die Leistung hoch.
- Die Art des Ausbaumaterials hat nur geringen Einfluss auf Schallintensität und Reinigungswirkung. Letztere ist im Wesentlichen von der Schalldurchlässigkeit des Materials und vor allem der Geometrie der Filterschlitz bestimmt.
- Ultraschall wirkt gleichermaßen auf eisen- und manganhaltige Beläge. Manganhaltige Beläge werden besser abgelöst als eisenhaltige.
- An biologisch induzierten Belägen konnte eine Verflüssigung derselben durch Ultraschall nachgewiesen werden.

Das Verfahren wurde außerdem in den letzten zehn Jahren an über 500 Brunnen bei verschiedensten Wasserwerken zur Brunnenregenerierung eingesetzt.

Dabei wurde festgestellt, dass die Beschallung des Filterbereiches zu einer Ablösung der Verockerungen führt, so dass diese anschließend abgepumpt werden können. Der Erfolg der Methode, d. h. insbesondere das Maß der Leistungssteigerung ist jedoch von einem komplexen Zusammenspiel vieler Faktoren abhängig. Hierzu zählen, wie auch bei anderen Regenerierverfahren, vor allem die Art und Zusammensetzung der Verockerungen sowie deren Alter bzw. Aushärtungsgrad. Die Brunntiefe erwies sich, im Gegensatz zu den Ergebnissen der Laborarbeit, als nicht Einfluss nehmend. Auch das Ausbaumaterial wirkte sich nicht auf den Erfolg einer Regenerierung aus.

Die Beurteilung der Wirkung des Ultraschalls wurde anhand von Vergleichsmessungen vor und nach der Regenerierung vorgenommen. Eingesetzt wurden Brunnen-Kamerabefahrungen, Leistungstests durch Kurzpumpversuche und geophysikalische Verfahren zur Bestimmung der Lagerungsdichte der Filterkiesschüttung und der hydraulischen Parameter. Die geophysikalischen Methoden erlaubten die Untersuchung der Wirkung der Schallwellen im Bereich des Filterkieses hinter dem Filterrohr nachzuvollziehen.

Das Ultraschall-Verfahren zeichnet sich durch mehrere Vorteile aus. Die Reinigungswirkung reicht weit in den Filterkies hinein. Das Verfahren ist schonend für das Brunnenbauwerk und aufgrund der kurzen Bearbeitungszeiten kosteneffektiv. Es ist bei fast allen Ausbaumaterialien anwendbar und wirkt sehr gut sowohl auf chemische als auch auf biologisch gebildete Beläge.

Im Vergleich zur chemischen Brunnenregenerierung fällt vor allem der völlige Verzicht auf den Einsatz möglicherweise umweltgefährdender Chemikalien positiv ins Gewicht.

Brunnen, die nicht oder nur nach genauer Beurteilung der Gegebenheiten mit dem Ultraschallverfahren behandelt werden sollten, sind

1. Kiesklebebelagbrunnen und
2. Brunnen, an denen die Alterungsart „Versanden“ auftritt bzw. die eine starke Sandführung aufweisen

Bei ersteren Brunnen kann die Beschallung zum Auflösen der Klebeverbindungen führen, was eine Destabilisierung des Filters zur Folge hat. Beobachtet wurde in einem Fall auch, dass die Ultraschallbehandlung zu einer Mobilisierung von Feinkornanteilen führte, die sich im Bereich des Kiesklebebelags akkumulierten und diesen bereichsweise abdichteten. Die Möglichkeit der Mobilisierung von Feinsandanteilen ist generell bei Brunnen mit Sandführung gegeben. Die Ultraschalleinwirkung führt hierbei auch zu einer Sortierung nach Korngrößen und dementsprechend zu einem abschnittswisen Abdichten des Filterkieses durch innere oder äußere Kolmation.

Für die Reinigungswirkung verantwortlich sind vermutlich

- die Verflüssigung thixotroper Stoffe [HUG, 1997]
- Schwingungsbewegungen der einzelnen Körner der Filterkiesschüttung und dadurch auftretende Reibungseffekte
- Mikroschwingungen und dadurch bedingte Materialspannungen durch die unterschiedlichen Schwingungsfrequenzen und –weiten der Kieskörner und des Belages gemäß ihrer physikalischen Eigenschaften
- Druckschwankungen im Schallfeld und daraus resultierend das Lockern und Ablösen der Beläge von der Kiesoberfläche u. a.

Festgestellt wurde außerdem eine desinfizierende Wirkung in Brunnen mit starker Neigung zur biologischen Verockerung. Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass der Ultraschalleinsatz nicht zu einer Aufrauung der Oberflächen führt, wodurch die Wiederansiedlung nicht beschleunigt wird. Des Weiteren kann die Beschallung Bakterien in Abhängigkeit ihrer Größe und der Frequenz abtöten.

In Bezug auf die Nachhaltigkeit hebt sich das Ultraschallverfahren jedoch nicht wesentlich von anderen Brunnenregenerierungsmethoden ab, wie die Befragung von Brunnenbetreibern ergab [WIACEK, 2003].

Auch für den Einsatz von Ultraschall gilt, dass nur die rechtzeitige Anwendung und die regelmäßige Kontrolle und Überwachung des Brunnens eine erfolgreiche Regenerierung ermöglicht und jeder Brunnen individuell reagiert.

2.4.3 Beurteilung des Regenerier-Erfolges und Nachhaltigkeit

Unabhängig davon, welches Verfahren zur Regenerierung eines Brunnens eingesetzt wurde, bietet nur die umfassende Dokumentation aller relevanten Daten des Brunnens während seines Betriebes und der Durchführung der Maßnahme selbst, die Möglichkeit zur Auswahl einer geeigneten Methode und zur anschließenden Beurteilung des Erfolges.

Für chemische Regenerierungen erfolgt die Beurteilung des Erfolges i. d. R. über eine Bilanzierung der entfernten Mengen an Eisen und Mangan [DVGW, 2001; PAUL, 2003 u. a.]. Anhand dieser Daten ist jedoch weder ein Rückschluss auf die tatsächlich im Brunnenraum vorhandene Menge der Ablagerungen möglich noch ein Vergleich des Erfolges bei Anwendung verschiedener Regenerierverfahren. Hierfür stellen regelmäßige Leistungstests in Form von Kurzpumpversuchen eine bessere Alternative dar [BOTT & WIACEK, 2004]. Wenn diese zur Bewertung des Erfolges herangezogen werden, muss jedoch unbedingt auf eine einheitliche Bezugsbasis geachtet werden. Idealerweise erfolgt der Bezug der erzielten Leistung nach einer Regenerierungsmaßnahme auf die Leistung bei Neubau des Brunnens. Da dies in der Praxis oftmals schwer durchführbar ist, da der Neubauwert nicht dokumentiert ist oder sich die grundlegenden Bedingungen geändert haben, wie z. B. der Grundwasserstand, Betrieb von Nachbarbrunnen, bauliche Veränderungen am Brunnen usw., muss mindestens ein Vorher-Nachher-Vergleich der spezifischen Ergiebigkeit erfolgen, anhand dessen die Regeneriermaßnahme beurteilt werden kann. Die Ergebnisse werden zweckmäßiger Weise zusammen mit der Aufarbeitung vorliegender Alt-Pumpversuchs-Daten in Form eines Diagramms dargestellt. Dieses enthält, um die verschiedenen Versuche auswert- und vergleichbar zu machen, die maximal erreichte Absenkung s , die sich daraus und aus der Fördermenge Q ergebende spezifische Ergiebigkeit Q_s sowie zusätzlich den Ruhewasserspiegel und bildet die Basis für die zukünftige Ermittlung und Dokumentation der Brunnenleistungskurve.

Weitere geeignete Methoden zur Beurteilung einer Regenerierung sind geophysikalische Messungen zur Hydromechanik und Durchlässigkeit im Filterbereich vor und nach der Bearbeitung des Brunnens.

Diese Werte können sowohl für den Vorher-Nachher-Vergleich einer einzelnen Regeneriermaßnahme als auch für den Vergleich mehrerer Verfahren untereinander herangezogen werden, da sie die Beurteilung der Wirkung im Ringraum eines Brunnens erlauben.

Neben der größtmöglichen Steigerung der Ergiebigkeit des Brunnens ist immer auch das Erreichen einer möglichst langen Standzeit bis zur nächsten notwendigen Durchführung von Wartungsarbeiten. Dies wird als Nachhaltigkeit der Methode bezeichnet. Sie zeigt sich in der langfristigen Dokumentation der Brunnendaten inklusive durchgeführter Arbeiten. Auch hieraus ist ein Vergleich der Regenerierverfahren für die spezifischen Brunnencharakteristika möglich, der schließlich zur Auswahl eines geeigneten Verfahrens beiträgt, da die Standzeit bzw. die Nachhaltigkeit einer Regenerierung immer von den möglichen Wechselwirkungen zwischen Regenerierverfahren, Brunnenalterungsart und Brunnenausbau abhängig ist.

2.4.4 Wahl des Regenerierverfahrens

Die Auswahl eines geeigneten und Erfolg versprechenden Verfahrens zur Brunnenregenerierung erfordert die genaue Kenntnis der brunnen-spezifischen Gegebenheiten und der vorliegenden Alterungsart. Auch das DVGW Merkblatt W 130 führt im Anhang als wesentliche Kriterien zur Eignung der verschiedenen Verfahren den Brunnenausbau, speziell das Material des Filterrohres, und den Aushärtungsgrad der Verockerungen an.

Sie muss weiterhin meist für jeden einzelnen Brunnen individuell getroffen werden, wie auch diese Arbeit mit ihren Ergebnissen zeigen wird. Selbst innerhalb einer Brunnengalerie mit Brunnen mit sehr ähnlichen Eigenschaften kann der Erfolg einer Regenerierung mit ein und der derselben Methode stark variieren.

Ob mechanisch, hydromechanisch oder chemisch regeneriert wird, ist oftmals allein eine Entscheidung des Brunnenbetreibers oder des Beratenden Ingenieurs und auf Erfahrungswerten, Empfehlungen oder dem Interesse an neuen Methoden begründet. Die Verfahrensauswahl ist also subjektiv. Ein weiterer Einflussfaktor sind die Kosten der Gesamtmaßnahme oder des einzelnen Verfahrens.

Generell sind die individuellen Brunneneigenschaften und Erfordernisse bestimmend und nicht die Methode selbst.

Die Wirksamkeit der einzelnen Verfahren ist zumeist durch die Anwenderfirmen oder Entwickler ausreichend belegt, teilweise in unabhängigen Untersuchungen verglichen und wird an dieser Stelle als nachgewiesen vorausgesetzt.

Ein objektiver Vergleich der Verfahren gestaltet sich oftmals schwierig, da sich oft nicht nur die Methoden selbst in ihrer Wirkweise sowie die Brunnen in ihren baulichen und hydrologischen Eigenschaften grundlegend unterscheiden, sondern auch die Beurteilung des Erfolges. Wie im vorhergehenden Abschnitt ausgeführt, werden Mengen entfernter Feststoffe bilanziert oder die Steigerung der spezifischen Ergiebigkeit berechnet. Dabei gibt es jedoch keine einheitliche Basis und Spielraum zur freien Interpretation.

Die Aufarbeitung der Daten und Dokumentation von Regeneriermaßnahmen seitens der Brunnenbetreiber sollte immer wenigstens einen Vermerk über den Erfolg enthalten, besser natürlich die Bestimmung der Brunnenleistung in Relation zur Neubauleistung und zur Ergiebigkeit vor der Regenerierung. Allein die Angabe über Erfolg oder Misserfolg der Maßnahme ist ein Erfahrungswert, der bei genügend großer Datenmenge in Korrelation zum Brunnenausbau und zur Alterungsart betrachtet werden kann. Aus daraus erhaltenen statistischen Betrachtungen können dann Beziehungen zwischen dem Brunnenausbau, der Brunnenalterung und geeigneten Verfahren zur Wiederherstellung der Brunnenleistung abgeleitet werden. Die ständige Fortführung der Dokumentation hilft so, erfolglose Regenerierungen zukünftig zu vermeiden und auf bewährte Verfahren zurückgreifen zu können.

Zu einzelnen Verfahren oder Brunnenstandorten existieren oftmals große Mengen an Einzelwerten und Auswertungen. Es erscheint daher nun sinnvoll und erstrebenswert, in Zusammenarbeit mit entsprechenden Gremien, wie z. B. dem DVGW, Brunnenbetreibern und Firmen, die Brunnen bauen und/ oder regenerieren, vorhandene Daten gemeinsam statistisch zu erfassen und auszuwerten, um so eine ausreichend große Datenbank anzulegen und künftig zu pflegen, die dann sowohl die Auswahl geeigneter Verfahren als auch die Erfolgskontrolle anhand von Korrelationen zu bestimmten Brunnencharakteristika ermöglicht. So ist es vorstellbar, dass zukünftig anhand von Auswahlkriterien zum Brunnenausbau und zur vorliegenden Alterungsart eines Brunnens in Form einer Checkliste oder eines datenbankgestützten Abfrageformulars entsprechend geeignete Methoden vorgeschlagen werden, die sich bei ähnlichen Brunnengegebenheiten bewährt haben (vgl. Abb. 1-2, S.10).

Dazu muss der Mindestumfang der erforderlichen Dokumentation bekannt sein, d. h. es muss festgelegt sein, welche Parameter zu überwachen sind, um die Brunnenalterungsart bestimmen zu können. Die Wahl des Regenerierverfahrens kann sich dann, wie gefordert, grundlegend an den Brunnencharakteristika orientieren, insbesondere am Brunnenausbau und der vorliegenden Hauptalterungsart, und durch Erfahrungswerte optimiert werden.

Bis dahin bleibt die Verfahrenswahl vorwiegend subjektiv geprägt, wird vom DVGW Merkblatt W 130 und dem DVGW Forschungsvorhaben W 55/99 sowie den zahlreichen verfahrens- oder standortabhängigen Publikationen geleitet und liegt im Ermessen des Brunnenbetreibers oder des Beratenden Ingenieurs.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgten die Regenerierungen, aufbauend auf dem Projekt des ESWE-Institutes im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein, mit dem Ultraschall-Verfahren. Dabei stand jedoch weniger die Bewertung des Verfahrens und mehr die hydrochemische Charakterisierung der brunnenspezifischen Gegebenheiten und Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Hydrogeologie, Brunnenbau und Brunnenalterung im Vordergrund.

Die folgenden Kapitel geben daher einen Überblick über den geologischen Hintergrund und die hydrochemischen Gegebenheiten an den Brunnen des Wasserwerkes Wiesbaden-Schierstein.

3 Das Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein

Die Stadt Wiesbaden liegt zwischen dem Südrand des Taunus im Norden und dem Rhein im Süden. Die Wasserversorgung Wiesbadens beruht auf drei Quellen, erstens den seit 1870 gebauten Tiefstollen im Taunus, zweitens dem Wasserwerk in Wiesbaden-Schierstein und drittens dem Fernbezug aus dem Hessischen Ried. Die derzeit ca. 270 000 Einwohner der Stadt werden mit jährlich ca. 20 Mio. m³ Trinkwasser versorgt. Aus dem Wasserwerk Schierstein werden etwa 30% des Versorgungsbedarfs abgedeckt.

Das Wasserwerksgelände befindet sich im Bereich der Niederterrassen des Rheins. Es liegt rechtsrheinisch bei Rheinkilometer 507 und erstreckt sich über eine Fläche von 1,2 km² am Rheinufer zwischen Wiesbaden-Schierstein und Walluf.

Der Rhein fließt hier von Ost nach West. Er ist ca. 500 m breit, bei Mittelwasser 3,5 bis 4,0 m, bei Hochwasser 6,0 m und bei Niedrigwasser 2,5 m tief. Die Sohle liegt bei 77 m ü NN. Das Gefälle ist sehr gering. Die Fließgeschwindigkeit liegt bei 1 m/s [HABERER 1974].

Das Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein dient bereits seit mehr als 100 Jahren der Wasserversorgung der Stadt Wiesbaden [HALBERTSMA & SPIESER]. Die ersten acht Brunnen wurden in den Jahren 1899 bis 1901 gebaut und in Betrieb genommen und dienten lediglich der Erschließung von Nutzwasser. Mit Zunahme der Bevölkerungszahl und damit des Wasserbedarfs wurde das Wasserwerk entsprechend den technischen Fortschritten der damaligen Zeit modernisiert und ausgebaut. So wurde im Jahr 1901 die zu der Zeit erste Ozonungsanlage Europas gebaut, um das geförderte Wasser auch als Trinkwasser nutzen zu können. Bereits zu diesem Zeitpunkt zeigte sich ein für diese Arbeit bedeutsamer Umstand. Durch die stärkere Wasserförderung und die anschließende Ozonung kam es zu einem erheblichen Anstieg des Eisengehaltes im geförderten Rohwasser. Bei der Behandlung mit Sauerstoff wurde zweiwertiges Eisen zu dreiwertigem oxidiert und ausgefällt, so dass das Wasser eine gelbe Färbung zeigte und teilweise nicht mehr genutzt werden konnte. Die weiteren Untersuchungen zeigten allerdings, dass das Wasser auch ohne eine Ozonbehandlung weitestgehend keimfrei war. Daraufhin wurde auf die generelle Ozonbehandlung des Wassers verzichtet und das Wasserwerksgelände stattdessen zum Schutz gegen eine mögliche Verkeimung bei Hochwasserereignissen eingedeicht. In den folgenden Jahren wurde die Leistungsfähigkeit des Werkes schrittweise erhöht, um dem steigenden Bedarf angepasst zu werden. In den Jahren 1903 bis 1907 wurden bereits 42 Brunnen betrieben, die in drei Gruppen angeordnet waren.

Bei 30 Brunnen handelte es sich um Brunnen zur Grundwasserförderung, welche im Bereich eines Tot-Armes des Rheins lagen. 12 Brunnen waren als Uferfiltratbrunnen parallel zum Rhein ca. 100 m entfernt vom Ufer angeordnet. Im Zuge des Ausbaus wurde im Jahr 1907 auch eine Enteisungsanlage in Betrieb genommen [KOPP 1986].

Aufgrund der relativ geringen Ergiebigkeit der lokalen Grundwasserleiter reichte das Wasserdargebot der grundwasserführenden Schichten im Bereich des Tot-Armes des Rheins allein bald nicht mehr aus, den steigenden Bedarf der wachsenden Stadt zu decken. Die dritte Ausbaustufe in den Jahren 1921 bis 1924 brachte grundlegende Veränderungen [KOPP 1986, S. 158]. Die bestehenden Brunnen wurden größtenteils ausgebaut, das Gelände zum Schutz gegen Hochwässer aufgefüllt und dann eine durchgehende Reihe aus 42 Entnahmefrühen erstellt. Diese Brunnenreihe war ca. 1 km lang und 0,5 km vom Rheinufer entfernt auf einer nun nahezu ebenen Wiese.

Ergänzend wurde bereits 1924 auf die künstliche Grundwasseranreicherung zurückgegriffen und im Zuge der dritten Ausbaustufe begonnen, das Grundwasser mit aus dem Rhein entnommenen Wasser künstlich anzureichern. Dazu wurde Rheinwasser aus der Strommitte in Infiltrationsbecken auf dem Wasserwerksgelände geleitet. Der Grundwasserentnahme gingen nun die folgenden Schritte voraus [KOPP 1986, S. 166]: Rheinwasser wurde aus der Strommitte vom Rheinwasserpumpwerk über eine Messkammer in ein Sedimentierbecken gefördert. Nach dessen Passage erreichte es ein Infiltrationsbecken, das so tief angelegt war, dass es in die grundwasserführenden Schichten reichte. Dort vermischte sich das Wasser mit dem echten, aus dem Taunus zuströmenden Grundwasser. Nach der Entnahme wurde das Wasser in einer Enteisungs- und Entmanganungsanlage aufbereitet.

In weiteren Ausbaustufen wurden zusätzliche Entnahmefrühen gebaut. Mit steigenden Einwohnerzahlen und Wasserverbrauch mussten auch die Wassergewinnungsanlagen kontinuierlich verbessert werden. Die Wasserversorgung aus der Gewinnungsanlage Schierstein gewann zunehmend an Bedeutung. Zusätzlich zu den Infiltrationsbecken und den Entnahmefrühen wurden hierzu in den 50er Jahren 25 Uferfiltratbrunnen gebaut. Das Uferfiltratwasser wurde über Schnell- und Aktivkohlefilter aufbereitet.

1960 wurden zusätzlich 30 Infiltrationsbrunnen gebaut, sowie das Rheinwasseraufbereitungswerk in Betrieb genommen, und 1965 wurde um eine Sickergalerie von insgesamt ca. 300 m Länge erweitert, in die das aufbereitete Rheinwasser versickert wurde.

Die Uferfiltratbrunnen wurden jedoch 1965 aus Qualitätsgründen wieder stillgelegt [BERGER et al. 1992] und seither nur noch Entnahmebrunnen betrieben.

Das Rheinwasser wurde seit 1978 nach der Entnahme erst aufbereitet und dann infiltriert, anschließend als Grundwasser entnommen und im ausgebauten Grundwasseraufbereitungswerk nochmals aufbereitet. Bis heute wird das, im Wasserwerk Schierstein geförderte Wasser zweistufig aufbereitet.

Die Gründe für die beschriebene Entwicklung liegen in der Lage des Wasserwerkes nahe der Mainmündung, in der sich ändernden Qualität des Wassers der Flüsse Rhein und Main, in den geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten sowie der Anpassung an die Anforderungen an die Trinkwassergewinnung. Die Grundlagen werden in den folgenden Kapiteln kurz beschrieben. Ausführliche Beschreibungen zur Geschichte und Entwicklung der Wasserversorgung Wiesbadens geben u. a. HABERER, HERZBERG, KOPP UND THEWS.

3.1 Das Einzugsgebiet

3.1.1 Geologischer Überblick

Da für die Wasserversorgung einer Region immer die, im Untergrund anstehenden Formationen die maßgebliche Rolle spielen, soll im Folgenden die geologische Einordnung und Entwicklung des Einzugsgebietes für die Wasserversorgung von Wiesbaden beschrieben werden. Für eine ausführliche Darstellung der geologischen Entwicklung des Landes Hessen wird verwiesen auf LOTZ (1995). Für das Untersuchungsgebiet wird weiterhin verwiesen auf ROTHAUSEN&SONNE (1984) sowie THEWS (1972).

Die Geologie im betrachteten Gebiet ist geprägt von zwei Einheiten (Abb. 3-1), den paläozoischen gefalteten Gesteinen des Taunus und dem südlich anschließenden Mainzer Becken [THEWS 1972].

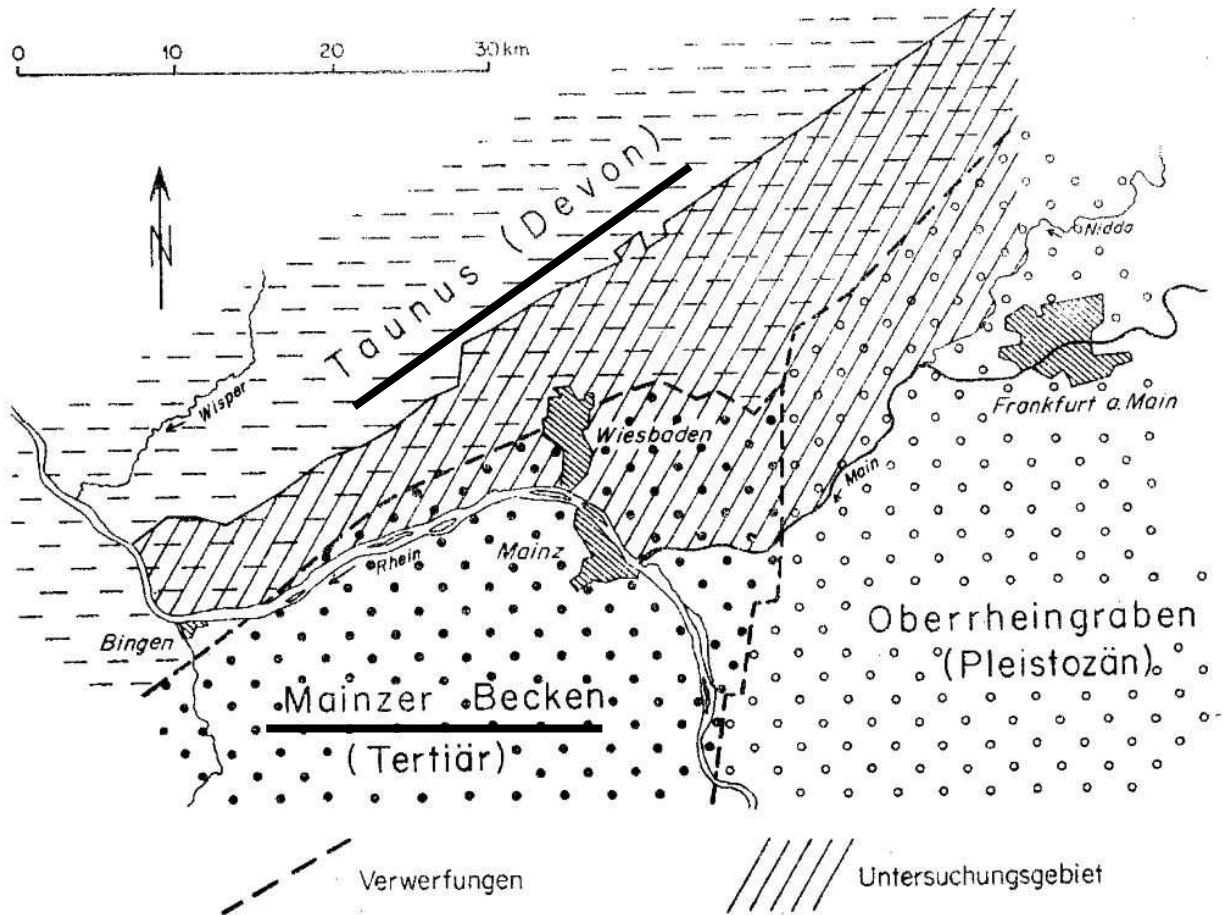


Abb. 3-1: Geologischer Aufbau im Raum Wiesbaden [aus THEWS, 1972:9]

Der Taunus ist der rechtsrheinische südliche Teil des Rheinischen Schiefergebirges. Er wird begrenzt durch die Flüsse Rhein im Westen, Lahn im Norden und Main im Südosten. Im Osten grenzt er an die Hessische Senke, im Süden an das Mainzer Becken. Die Grenze zu letzterem bildet die Hunsrück-Taunus-Südrandstörung.

Abb. 3-2 zeigt eine geologische Übersichtskarte des Rheinischen Schiefergebirges mit Lage und Abgrenzung des Taunus:

- Das Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein -

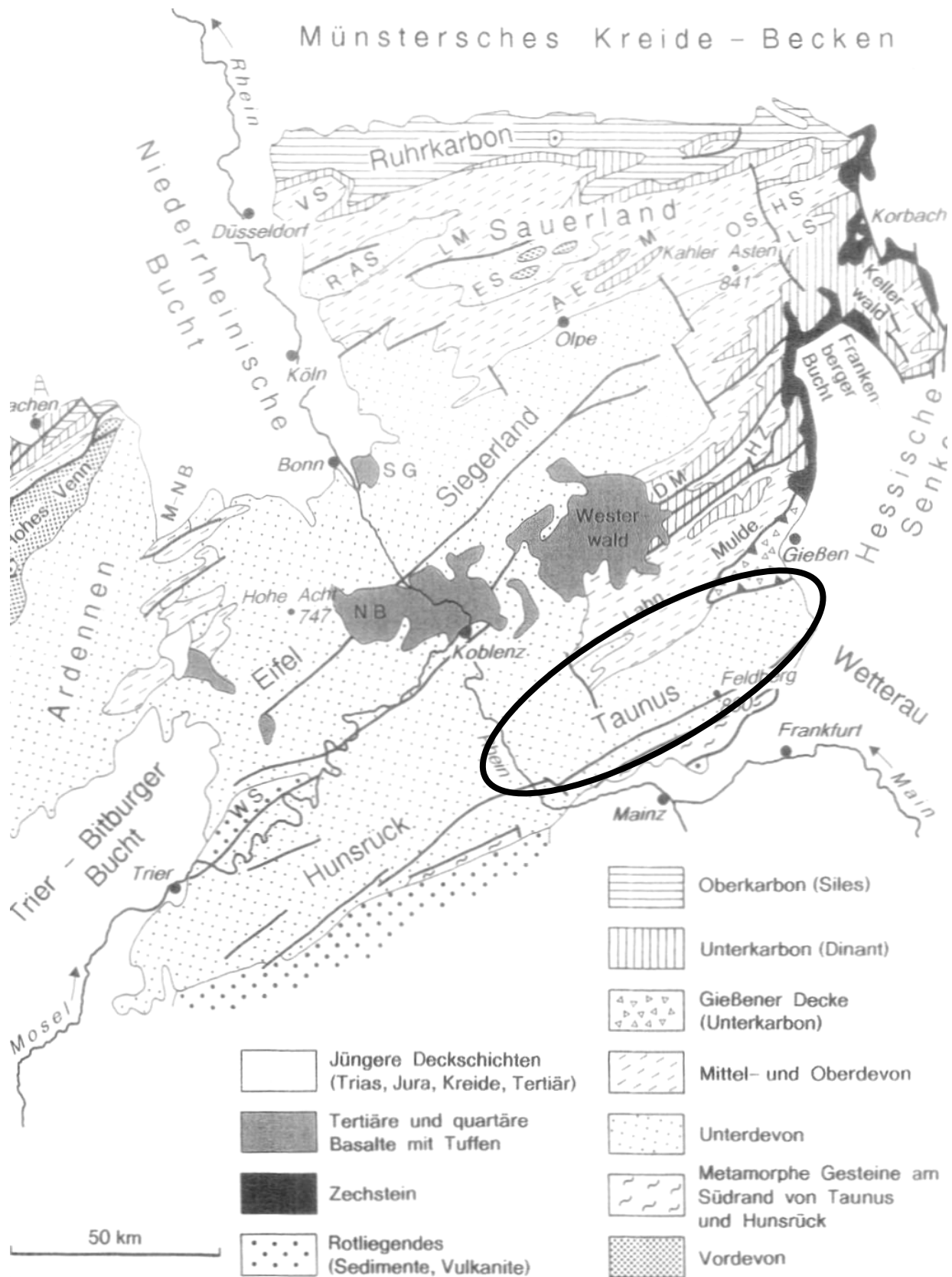


Abb. 3-2: Geologische Übersichtskarte des Rheinischen Schiefergebirges [aus HENNINGSEN & KATZUNG, 2002:44]

Das Rheinische Schiefergebirge ist Teil des Rhenohercynikums, der äußeren nördlichen Zone des variszischen Grundgebirges [HENNINGSEN & KATZUNG 2002]. Es ist vorwiegend aus vordevonischen (500–410 Mio. Jahre), devonischen (410–355 Mio. Jahre) und karbonischen (355–295 Mio. Jahre) Sedimenten aufgebaut, die während der variszischen Orogenese (240–220 Mio. Jahren) mehr oder weniger stark verfaltet und größtenteils verschiefert wurden.

Der Taunus ist eine typische Mittelgebirgslandschaft. Die höchste Erhebung ist der Große Feldberg (800 m ü NN). Im Untergrund verlaufen Sattel- und Muldenstrukturen, die eine morphologische Dreigliederung bewirkten. Der Taunuskamm, auch als Hochtaunus bezeichnet, trennt den Hintertaunus im Norden vom Vordertaunus, auch als Taunusvorland bezeichnet, im Süden. Der Hintertaunus flacht nach Norden hin allmählich zur Lahn hin ab, während der Übergang vom Vordertaunus zum Mainzer Becken im Süden steil und abrupt verläuft. Die Grenze bildet die Hunsrück-Taunus-Südrandstörung.

Das Mainzer Becken, südlich des Taunus, ist Teil der tertiären Grabenstruktur des Oberrheingrabens. Die Bildung des Oberrheingrabens setzte vor rund 40 Mio. Jahren ein [LOTZ, 1995]. Er verläuft auf einer Länge von ca. 300 km und einer Breite von maximal 35 km von Nord nach Süd und bildet das Bett des Flusses Rhein zwischen Basel im Süden und Mainz im Norden, wo er in die Hessische Senke übergeht.

Die geologische Entwicklung der Region kann bis in das Paläozoikum zurückverfolgt werden [LOTZ, 1995]. Die ältesten Gesteine werden dem Vordevon zugeordnet. Es handelt sich um metamorphe Gesteine vulkanischen und sedimentären Ursprungs. Eine genaue Datierung wird durch den hohen Metamorphosegrades erschwert.

Während des Devons, vor 410 bis 355 Mio. Jahren waren Nordamerika und Europa zu einer großen Festlandsmasse vereinigt und bildeten den Großkontinent Laurasia. Dieser so genannte Old-Red-Kontinent erstreckte sich nördlich des heutigen Hessens. Südlich schloss sich die Mitteldeutsche Kristallinschwelle an, die von der Normandie, über das Saarland, Hessen, Thüringen und Sachsen verlief.

Das Rhenohercynikum, d. h. die heutigen Gebirge Ardennen, Rheinisches Schiefergebirge und Harz, waren damals, wie in Abb. 3-3 dargestellt, Teil des Rheinischen Troges. Diese variszische Geosynklinale bildete einen marinen Sedimentationsraum.

Von den Festlandsgebieten im Norden und Süden erfolgte eine stetige Sedimentzufuhr in den Trog, der dabei weiter abgesenkt wurde.

So konnte ein mehr als 10.000 m mächtiger Stapel vor allem unterdevonischer Sedimente abgelagert werden. Die fazielle Gliederung wurde durch den Ablagerungsraum bestimmt, d. h. in den tieferen Teilen des Meeres wurden vorwiegend tonige Gesteine abgelagert und in den Schelfbereichen und in Deltabereichen vorwiegend sandige Gesteine.

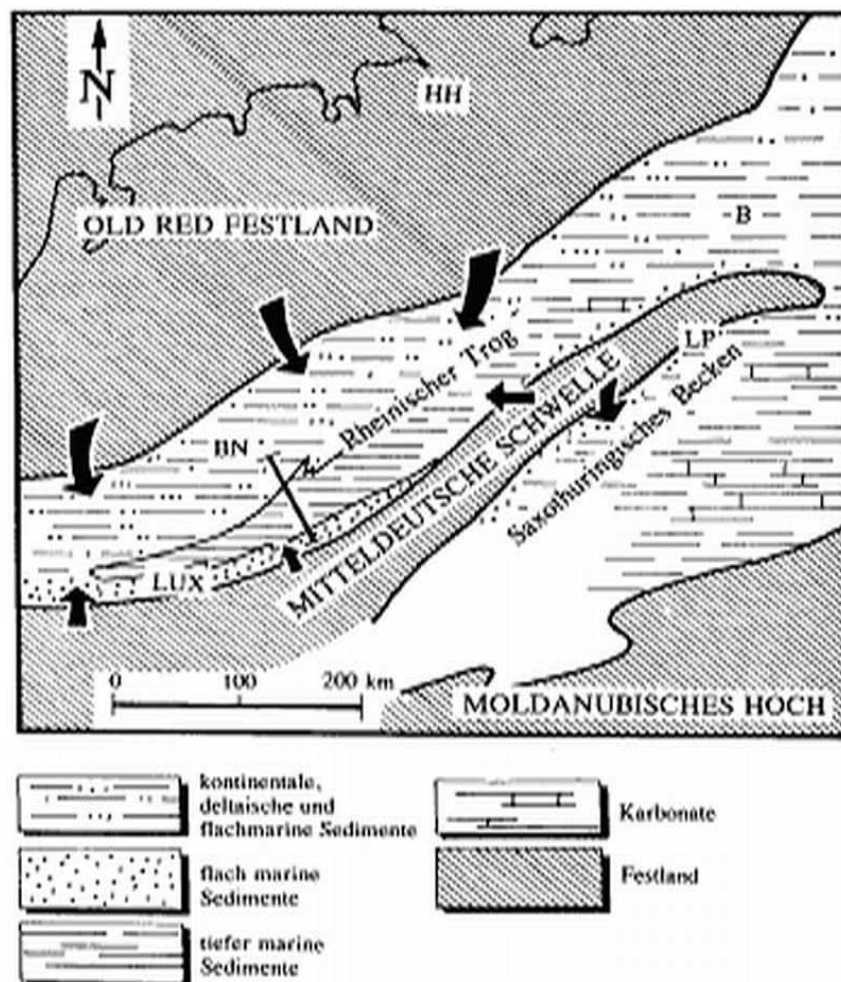


Abb. 3-3: Geologische Verhältnisse im Devon im Gebiet des Rheinischen Trogs [MEYER & STES, 1996]

Die Folge unterdevonisch abgelagerter Gesteine beginnt im Gedinne (410 – 402 Mio. Jahre) mit den so genannten „Grauen Phylliten“. Dabei handelt es sich um in einem Deltabereich abgelagerte, klastische Sedimente. Darauf folgen die „Bunten Schiefer“, das sind dunkelviolette bis rote Tonschiefer mit eingeschalteten grünlich oder grauen Quarzitbänken und quarzitischen Sandsteinen. Zunehmend sandige Einschaltungen kennzeichnen die Hermeskeil-Schichten aus bunten Schiefen und Glimmersandsteinen, die im Siegen (402–395 Mio. Jahre) abgelagert wurden. Sie zeigen eine Meeresregression an.

Deren Höhepunkt stellt der Taunusquarzit dar. Es handelt sich dabei um rötliche und gelbliche grobkörnige Sandsteine mit hohem Anteil an zersetzten Feldspäten mit zwischenlagernden grünlich-grauen oder grauen Quarziten und rotvioletten Tonschiefern. Im Unterems (395–390 Mio. Jahre) brachte eine erneute Meeresstransgression die Ablagerung einer sehr einförmigen Folge dunkelgrauer bis schwarzer Tonschiefer, den Hunsrückschiefern.

Im Mitteldevon begann eine viel stärkere fazielle Differenzierung durch die Herausbildung von Schwellen und zwischengelagerten Becken. Mitteldevonische Gesteine sind im gesamten Bereich des Rheinischen Schiefergebirges nur reliktsch erhalten. Oberdevonische Gesteine fehlen völlig.

Mit dem Einsetzen der variszischen Orogenese im Unterkarbon (360–325 Mio. Jahre) kam es zu einer tektonischen Überprägung der Ablagerungen. Ein Teil von Gondwana, dem Großkontinent im Süden, kollidierte mit Südwest-Europa in Laurasia. Die Kollisionsnaht verlief etwa entlang des südlichen Taunusrandes von Südwesten nach Nordosten. Entsprechend finden sich hier die am stärksten überprägten Gesteine – die oben angeführten hochmetamorphen Phyllite und Grünschiefer vulkanischen und sedimentären Ursprungs, die dem Vordevon zugeordnet werden. Sämtliche abgelagerte Sedimentgesteine wurden intensiv verfaltet, verschuppt und z. T. überschoben. Die Schichten wurden in Falten, Sättel und Mulden zusammengeschoben, aufgerichtet, gebrochen und verschoben. Das heutige Einfallen nach Südosten zeigt an, dass der Druck aus dieser Richtung kam und kontinuierlich nach Nordwesten fortschritt. Zahlreiche Verwerfungen haben ebenfalls einen Südwest-Nordost-Verlauf und folgen damit der Hauptstreichrichtung, die auch als variszisches Streichen bezeichnet wird. Entlang ihrer wurden die einzelnen Bruchschollen staffelartig gegeneinander gehoben oder gesenkt. Vor allem im Osten gegen die Hessische Senke und im Süden gegen das Mainzer Becken ist das Rheinische Schiefergebirge, bzw. der Taunus als dessen südlicher Teil, durch staffelartige, nahezu senkrechte Abbrüche und, daraus folgend, einen steilen Übergang gekennzeichnet. Abb. 3-4 zeigt einen geologischen Schnitt für den Bereich des Wasserwerksgeländes.

Durch die Heraushebung im Zuge der variszischen Orogenese wurde das Gebiet in der folgenden Zeit der intensiven Verwitterung und Abtragung ausgesetzt. Das Gebiet wurde zu einem flachen Hügelland eingeebnet. Mesozoische Gesteine fehlen völlig. Die Abtragungsprodukte finden sich vor allem im Rotliegend der Saalesenke im Osten des Gebietes.

Die devonischen Gesteine des Rheinischen Schiefergebirges sind daher direkt von tertiären und quartären Ablagerungen bedeckt (Abb. 3-4).

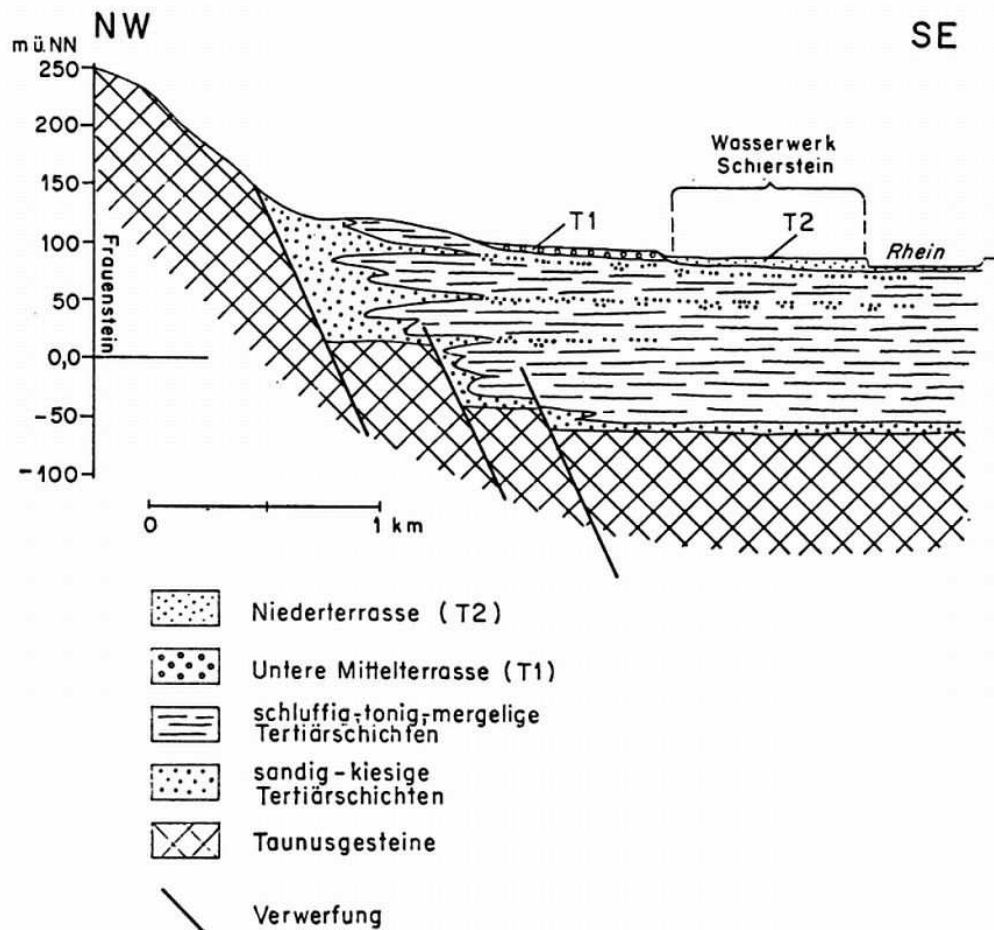


Abb. 3-4: Übergang vom paläozoischen Taunusquarzit zu den tertiären Ablagerungen entlang Verwerfungslinien im Nordwesten [aus THEWS, 1974:57]

Im Tertiär (65–1,6 Mio. Jahre) bildete sich am Südrand des Rheinischen Schiefergebirges eine Randfazies des, seit dem Oligozän (38–24 Mio. Jahre) bestehenden Tertiärmeeres. Ältere Sedimente, d. h. paläozäne und eozäne Gesteine finden sich nicht.

Verschiedene Transgressions- bzw. Regressionsphasen führten zu stark wechselnden Ablagerungsmilieus. Mit Beginn des Tertiärs, im Zuge der alpidischen Orogenese (195 Mio. Jahre bis heute, i.e.S. 40–20 Mio. Jahre), begann im südlich angrenzenden Gebiet das Einsenken des Oberrheingrabens am nördlichen Ende einer, ganz Mitteleuropa durchziehenden, Rift-Struktur.

Die Abfolge tertiärer Gesteine beginnt mit einer sandig-kiesigen Basisschüttung, die im Übergang zum Taunus in ihrer Mächtigkeit zunimmt. Darauf folgen mit wechselnden Ablagerungsbedingungen Sande, Tone und Mergel des Mittel- und Oberoligozäns, im Einzelnen die so genannten Meeressande (Küstenfazies), der Rupelton (Beckenfazies) und der Schleichsand (Beckenfazies). Mit zunehmender Verflachung des Meeres wurden Mergel, Sande und z. T. Kalksteine abgelagert, von unten nach oben sind dies die Cyrenenmergel (brackisch), die Süßwasserschichten (limnisch) und die Cerithienschichten (vollmarin).

Im Verlauf des Miozäns (24-5 Mio. Jahre) zog sich das Meer zurück und die Ablagerungsbedingungen wechselten von brackisch-limnisch zu fluviatil. Abgelagert wurden die Corbicula-Schichten (brackisch), die Hydrobienschichten (limnisch) und schließlich die fluviatilen Sande und Kiese der Dinothereinsande. Im jüngeren Tertiär und im Pleistozän prägte die Verlagerung des Flussbettes des Rheins in das Gebiet das Ablagerungsgeschehen. Während des Quartärs lag das Gebiet im Bereich des Periglazials. In Kaltzeiten lagerten die Flüsse ausgedehnte Schotterkörper-Terrassen ab, in Warmzeiten schnitten sie sich in diesen Untergrund ein und es fanden bodenbildende Prozesse statt. So bildete sich eine klassische Terrassenlandschaft.

Das Wasserwerksgelände befindet sich im Bereich der Niederterrasse. Im Untergrund verzahnen sich quartäre Bildungen mit tertiären Deckschichten. Der Festgesteinssockel befindet sich in 130 bis 160 m Tiefe (vgl. Abb. 3-4).

3.1.2 Hydrogeologie im Einzugsgebiet

Die hydrogeologischen Eigenschaften eines Gebietes werden von der Geologie und der Morphologie bestimmt. Das Einzugsgebiet liegt im Übergangsbereich des Vordertaunus zum Mainzer Becken. Im Untergrund lagern quartäre Deckschichten über tertiären Ablagerungen. Den tiefen Untergrund bilden devonische Gesteine, die intensiv verfaltet und gebrochen sind und in Sattel- und Muldenstrukturen lagern. Die Hauptstreichrichtung der paläozoischen Gesteine ist Südwest – Nordost. Das Gebiet ist von einer Vielzahl von Verwerfungen durchzogen. Diese verlaufen je nach der zeitlichen Zuordnung ihrer Entstehung hauptsächlich in Südwest-Nordost – Richtung (variszisch) bzw. in Nord – Süd – Richtung (alpidisch).

Der Taunuskamm fungiert als Wasserscheide zwischen Rhein und Main einerseits und der Lahn auf der anderen Seite.

Das betrachtete Gebiet liegt südlich des Taunuskamms im Taunusvorland und entwässert zum Rhein. Das Einzugsgebiet umfasst ca. 8 bis 9 km² und erstreckt sich in Nordwest-Südost-Richtung vom Taunusvorland im Nordwesten zum Rhein im Südosten (Abb. 3-5).

Die Strömungsrichtung des Grundwassers folgt generell der Topografie an der Oberfläche und verläuft entsprechend vom Südrand des Taunus im Nordwesten zum Rhein als größten Vorfluter im Südosten.

Die Brunnen stehen im Bereich der jüngsten Terrassenbildung des Rheins, der Niederterrasse (T2). Deren sandige bis kiesige Ablagerungen mit Mächtigkeiten zwischen drei und sieben Metern stellen den genutzten Grundwasserleiter des Wasserwerkes dar.

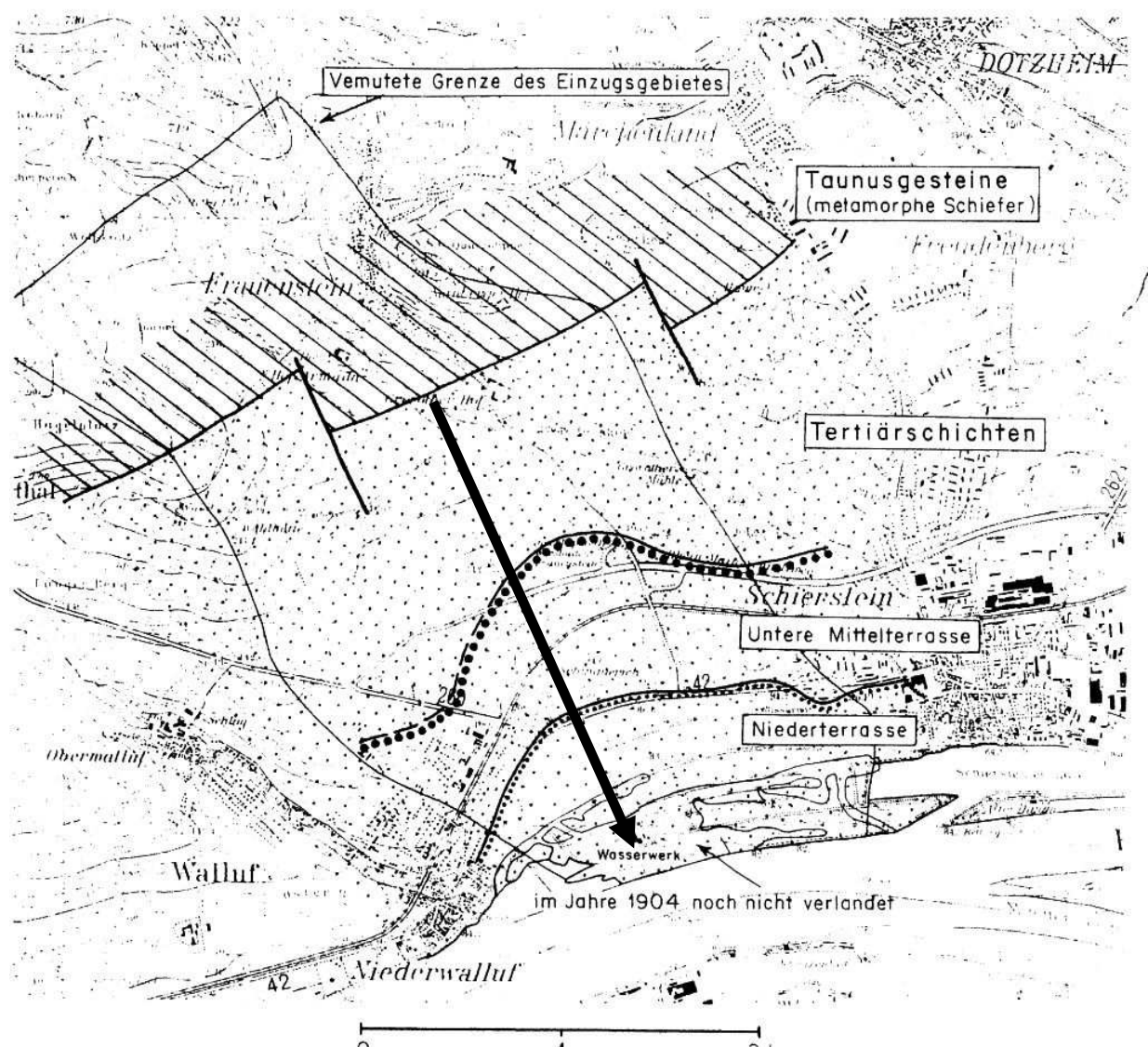


Abb. 3-5: Geologische Übersicht Wiesbadens und Grundwasserfließrichtung (Pfeil)
[aus THEWS, 1974:56]

Bedeutsam für die Hydrogeologie ist das Verhalten eines Gesteines gegenüber dem Grundwasser. Unterschieden werden müssen generell zwei hydrogeologische Einheiten:

- das Taunusvorland, mit paläozoischen Gesteinen im tieferen Untergrund, überlagert von tertiären Schichten und
- der Bereich der tertiären und quartären Rheinterrassen im Übergang zum Mainzer Becken.

Erstere Einheit wird gebildet aus den Taunusquarziten und den Hermeskeil-Schichten. Sie bilden einen Kluftgrundwasserleiter. Der unterirdische Abfluss wird bestimmt durch Klüfte und Schichtwechsel. Für Kluftgrundwasserleiter gilt generell, dass die Durchlässigkeit von der Weite und Anzahl der Klüfte bestimmt wird. Der Taunusquarzit ist ein vergleichsweise gut durchlässiges Gestein.

Der Taunusquarzit ist über die verzahnten tertiären Deckschichten an den Grundwasserleiter im Einzugsbereich des Wasserwerksgeländes hydraulisch angeschlossen (vgl. Abb. 3-4, S.81), d. h. dem genutzten Grundwasserleiter im Wasserwerk fließt echtes Grundwasser aus dem Taunusvorland zu.

Die Brunnen des Wasserwerkes durchteufen den Bereich der Niederterrasse (T2). Die Ablagerungen bestehen aus fluvialen Sanden und Kiesen. Sie sind überlagert von einer Auenlehmschicht mit von Süden nach Norden zunehmender Mächtigkeit und z. T. von anthropogenen Auffüllungen (vgl. S.74). Die Basis des genutzten Grundwasserleiters bilden die tertiären Deckschichten. Sie liegen im Norden des Wasserwerksgeländes in einer Tiefe von 80 m ü NN, im Süden bei 74 m ü NN und sind leicht nach Osten geneigt. Sie setzen im westlichen Teil des Geländes direkt unter der pleistozänen Unteren Mittelterrasse mit geringer Mächtigkeit ein und erreichen nach Osten hin eine Mächtigkeit von ca. 28 m [THEWS, 1974]. Aus einem Modellversuch im Wasserwerk standen Karten zur Aquiferbasis, Aquifermächtigkeit und Verteilung der kf-Werte zur Verfügung. Diese befinden sich im Anhang auf den Seiten.

Die Sande und Kiese der Niederterrasse bilden einen typischen Porengrundwasserleiter. Bei diesen wird die Durchlässigkeit durch das effektive Porenvolumen bestimmt [u. a. HÖLTING, 1996]. BERGER et al. (1992) geben den Durchlässigkeitsbeiwert mit $5 \cdot 10^{-3}$ bis $5 \cdot 10^{-4}$ m/s an. Der Grundwasserleiter ist jedoch, entsprechend seiner Entstehung, sehr inhomogen, so dass nur ein Mittelwert angegeben werden kann.

Das nächste Grundwasserstockwerk liegt in einer Tiefe von etwa 120 m u GOK (ca. 50 m u NN) im Bereich der tertiären Meeressande.

Die Durchlässigkeit der Schichten und entsprechend die Wasserführung ist gut, jedoch ist das Wasser aufgrund hoher Salzgehalte nicht nutzbar. Im östlichen Teil des Bereiches der Entnahmebrunnengalerie zeigten Chloridgehalt-Bestimmungen einen Leakage-Effekt, d. h. den Übertritt von höhermineralisiertem Grundwasser des tieferen Stockwerkes in den Bereich des genutzten Grundwasserleiters der Niederterrasse.

Aufgrund der geringen Mächtigkeit des genutzten Grundwasserleiters wird seit 80 Jahren die bereits beschriebene künstliche Grundwasseranreicherung mit aufbereitetem Rheinwasser betrieben. Im Wasserwerk wird daher ein Mischwasser mit Anteilen unterschiedlicher Herkunft gefördert [THEWS, 1974, BERGER et al., 1992]. Es setzt sich zusammen aus:

- Infiltration aus den Becken
- Infiltration aus Brunnen und Sickergalerie der Infiltrationsanlage
- echtem Grundwasser aus Grundwasserneubildung im Bereich der quartären und tertiären Deckschichten
- taunusseitig zufließendem Grundwasser
- z. T. echtem Uferfiltrat vom Rhein
- z. T. aufsteigendem Grundwasser des nächsttieferen Stockwerkes (Leakage)

Im Zusammenspiel mit der inhomogenen Ausprägung des Grundwasserleiters kann die Wasserzusammensetzung somit von Brunnen zu Brunnen erhebliche Unterschiede aufweisen.

3.2 Wassergewinnung und –aufbereitung

3.2.1 Allgemeines

Die Nutzung der fluvial abgelagerten, sandig-kiesigen Formationen der jüngsten Niederterrasse des Rheins reicht zurück in das Jahr 1899. Seit 1924 wird, wie zuvor beschrieben, zur Erhöhung des Wasserdargebots zusätzlich eine künstliche Grundwasseranreicherung mit, aus dem Rhein gewonnenen und aufbereitetem Wasser betrieben.

Auf die Wassergewinnung aus Uferfiltrat wurde aus Qualitätsgründen im Laufe der Wasserwerksgeschichte verzichtet.

Die gewinnbare Fördermenge ist durch die gegebenen Randbedingungen begrenzt. Wirksam sind der landseitige Zustrom vom Taunus, der Wasserstand im Rhein und der Füllstand der Infiltrationsbecken auf dem Gelände des Wasserwerkes (Foto 3-1). Die Becken erfüllen drei Funktionen. Durch den, im Vergleich zum Rhein, erhöhten Wasserstand dienen sie als hydraulische Sperre gegen den Uferfiltratzufluss. Gleichzeitig stellen sie Sedimentationsbecken zur Vorreinigung des Rheinwassers dar und es erfolgt eine Grundwasseranreicherung durch versickerndes Beckenwasser. Das an den Entnahmebrunnen geförderte Wasser ist immer ein Mischwasser aus vom Taunus zufließendem, echtem Grundwasser, über die Becken infiltriertem Rheinwasser, über die Brunnen infiltriertem, aufbereitetem Rheinwasser und in geringem Maße und seltenen Fällen echtem Uferfiltrat des Rheinstromes. Die Anteile variieren aufgrund der hydrogeologischen und physikalischen Grundlagen in Abhängigkeit der Wasserstände in Rhein und Infiltrationsbecken. Entsprechend kann auch die Zusammensetzung des Wassers der einzelnen Entnahmebrunnen schwanken (vgl. vorheriges Kapitel).



Foto 3-1: Luftbildaufnahme des Wasserwerksgeländes [BERGER, aus HESSENWASSER INTERN, 2004]

Eine schematische Gesamtdarstellung des Wasserwerks zeigt Abb. 3-6:

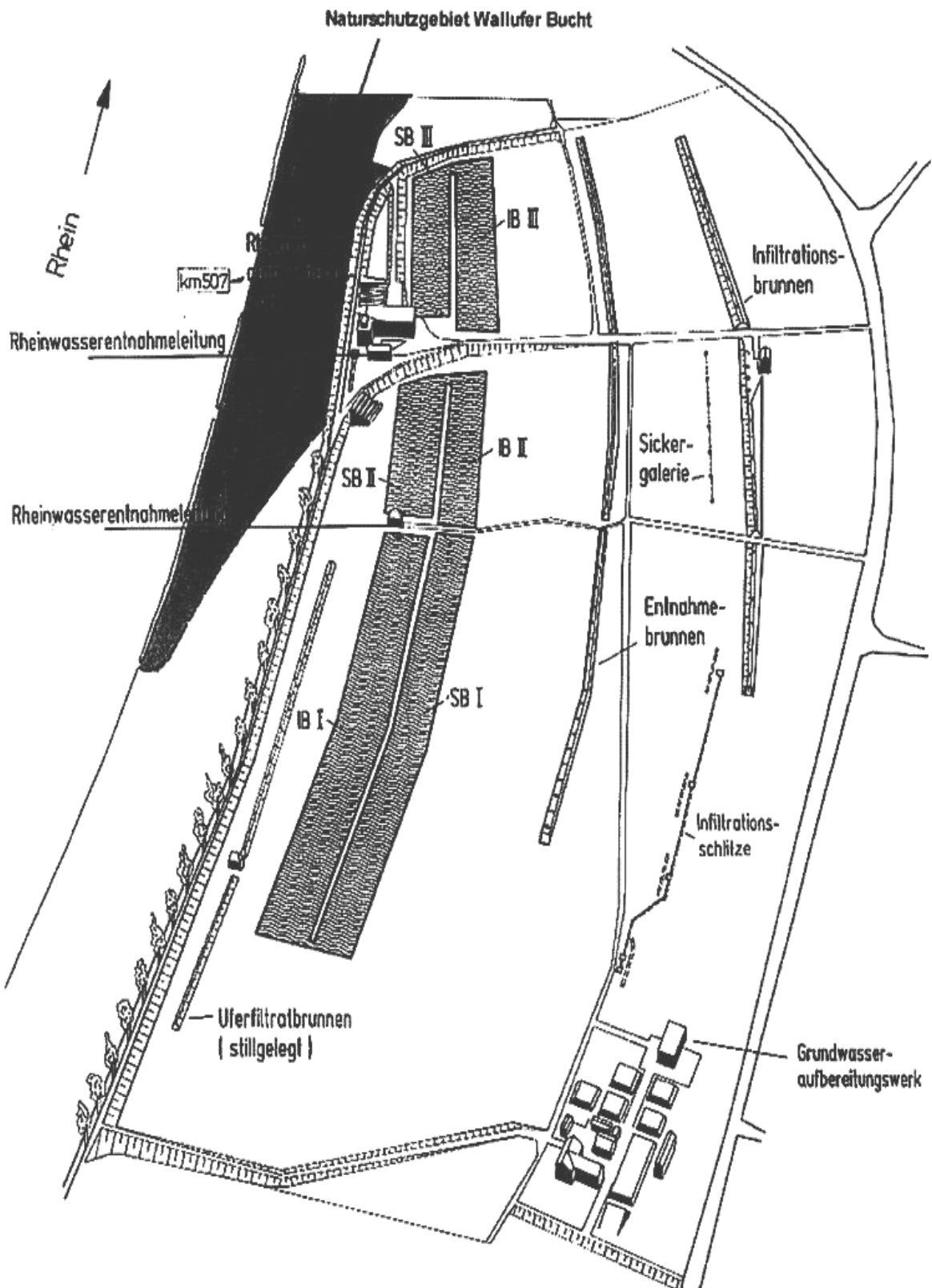


Abb. 3-6: Kartographische Darstellung des Wasserwerkes Wiesbaden-Schierstein [aus DREWS & GERDES, 2002:105]

Das Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein entnimmt Wasser direkt aus der Strommitte des Rheins. In zwei Wasserwerksstufen wird es zu Trinkwasser aufbereitet.

Die einzelnen Schritte sollen im Folgenden kurz dargestellt werden. Ausführliche Beschreibungen enthalten die Veröffentlichungen der Stadtwerke Wiesbaden AG „Wissenschaftliche Berichte über Untersuchungen und Planungen der Stadtwerke Wiesbaden AG“, Bände 1 bis 3.

Die Entnahme aus der Strommitte des Rheins war lange Zeit erforderlich, um das am rechten Ufer entlang fließende Mainwasser, das sich hier aufgrund der unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten des Mains und des Rheins noch nicht vollständig mit dem Rheinwasser vermischt hat, auszuschließen. Dessen Qualität war insgesamt schlechter und schneller schwankend.

Bei Gewässerschutzalarmen, z. B. Öl- oder Chemieunfällen stromaufwärts entlang des Rheins oder des Mains, dienen die Sedimentations- und Infiltrierbecken der Bevorratung. Insgesamt stehen sechs Becken mit ca. 340.000 m³ zur Verfügung. Die Verweildauer des Wassers in den Becken wird, in Abhängigkeit des Wasserbedarfs und von den jahreszeitlichen Schwankungen der Vegetation und des Nährstoffgehaltes im Rhein und im Beckenwasser, durch variable Fließwege zwischen den einzelnen Becken reguliert.

I. Stufe: Das Rheinwasseraufbereitungswerk (RAW)

Das RAW (Abb. 3-7) dient der Erzeugung des Infiltrationswassers zur künstlichen Grundwasseranreicherung. Aufgrund der starken Verschmutzung des Rheinwassers in den zurückliegenden Jahrzehnten kommt schon hier eine komplexe Aufbereitung bis zur Trinkwasserqualität zum Einsatz.

Das Rheinwasser wird zunächst vom Pumpeneinlauf über einen Sandfang und eine Belüftungskaskade in die Sedimentations- und Infiltrationsbecken geleitet. Diese Schritte entfernen mitgeförderten Flusssand und andere grobe Verunreinigungen. Durch die Sättigung mit Luftsauerstoff wird bereits ein Teil leicht flüchtiger Verbindungen ausgetragen. Im Beckensystem findet eine biologische Vorreinigung und weitere Sedimentation mitgeführter Partikel statt. Anschließend werden im RAW in den Schritten Flockung und Sedimentation, Sandfiltration und Aktivkohlefiltration Trübstoffe sowie anorganische und organische Verunreinigungen entfernt.

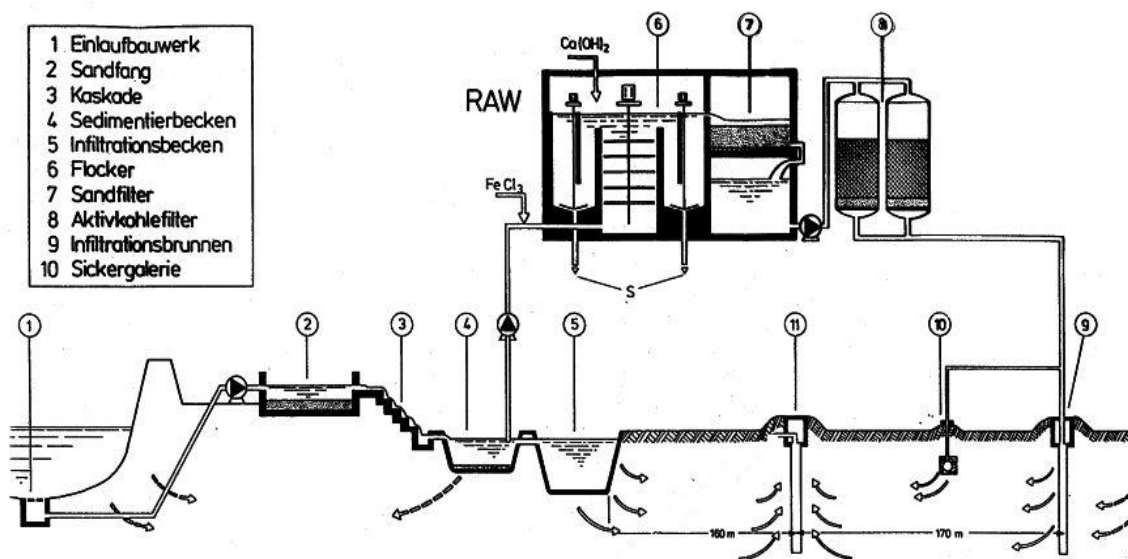


Abb. 3-7: Schema der ersten Stufe (RAW) der Wasseraufbereitung [nach BERGER et al., 1992:89]

Im ersten Schritt wird als Flockungschemikalie Eisen(III)-Chlorid zudosiert. Durch Hydrolyse bilden sich Flocken, die feinste, gelöste Trübstoffe natürlichen und anthropogenen Ursprungs, wie z. B. Huminstoffe oder Tenside, mit einschließen und so in eine sedimentier- bzw. filtrierfähige Form überführen. Damit wird auch ein großer Anteil polarer organischer Schadstoffe erfasst, der an den Trübstoffen angelagert sein kann. In vier Becken mit je 1.200 m³ Inhalt werden die Flocken gebildet und sedimentiert. Die feinen Flocken, die sich hier nicht absetzen, werden im nächsten Schritt beim Durchströmen einer Sandschicht abfiltriert. Im RAW werden 14 offene Sandfilter mit einer Fläche von je 21 m² und einer Schichthöhe des Sandes von 2,50 m betrieben. Die mittlere Filtergeschwindigkeit beträgt 4 m/h. Nach der Sandfiltration kann das Wasser immer noch organische Verunreinigungen und den Geschmack oder Geruch beeinträchtigende Verbindungen enthalten. Daher steht im Anschluss die Filtration über Aktivkohle. Aktivkohle ist ein hochporöser Kohlenstoffkörper. Sie wird aufgrund ihrer großen inneren Oberfläche und ihrer Oberflächeneigenschaften eingesetzt, um organische Schadstoffe im Spurenbereich zu entfernen, indem sie durch Van-der-Waals Kräfte an der Oberfläche gebunden werden. In Schierstein stehen 10 geschlossene Filter mit einem Durchmesser von 3,50 m und einer Höhe von 6 m zur Verfügung. Jeder Filter enthält ca. 7.000 kg Aktivkohle in einer Schichthöhe von ca. 2,40 m. Die Filtergeschwindigkeit liegt bei 14 m/h bei Nennlast.

Das Rheinwasseraufbereitungswerk besitzt eine Nennleistung von 1.000 m³/h.

Das aufbereitete Wasser wird über 30 Infiltrationsbrunnen und eine ca. 300 m lange Sickergalerie in den Boden infiltriert. Die Infiltrationsanlagen befinden sich in ca. 520 m Entfernung zum Rheinufer und 170 m Entfernung zu den Entnahmebrunnen. Die Bodenpassage (Abb. 3-8) dient vor allem der Vergleichmäßigung der Wassertemperatur. Die biologische Reinigung spielt nur eine untergeordnete Rolle, da aufbereitetes Wasser infiltriert wird. Sie ist allerdings für die Anteile an infiltriertem Beckenwasser wirksam. Das infiltrierte Wasser vermischt sich mit dem Grundwasserzustrom. Da es im Boden auch Anteile an Eisen-, Mangan- und Ammoniumverbindungen aufnimmt, ist nach der Förderung mittels der Entnahmebrunnen eine erneute Aufbereitung erforderlich, bevor das Wasser als Trinkwasser das Werk verlässt.

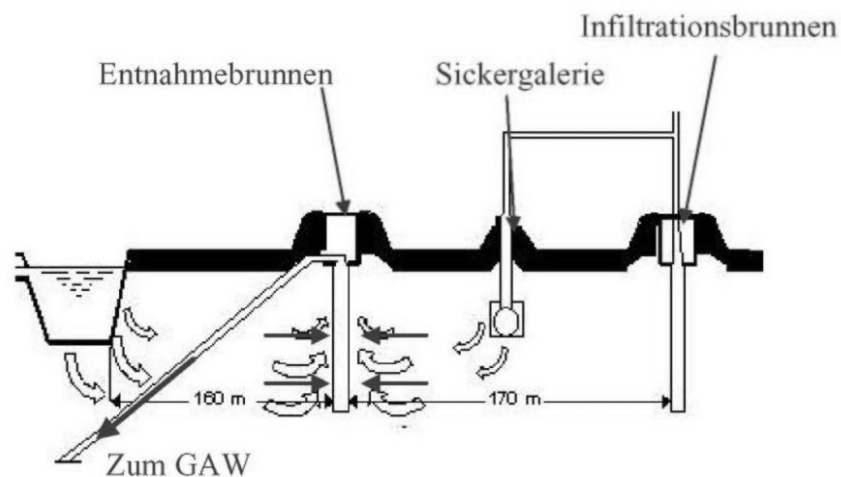


Abb. 3-8: Schema der Bodenpassage [nach BERGER et al., 1992:89]

II. Stufe: Das Grundwasseraufbereitungswerk (GAW)

Im GAW (Abb. 3-9) wird das künstlich angereicherte Grundwasser zu Trinkwasser aufbereitet. In zwei Aufbereitungsstraßen, die je nach Bedarf und Auslastung des Werkes parallel mit je 750 m³/h oder hintereinander mit insgesamt 750 m³/h betrieben werden können, wird das Wasser zunächst vorbelüftet, dann wird mittels einer in Wiesbaden entwickelten Technologie, dem „Refifloc-Verfahren“, Eisen, Mangan und Ammonium abgeschieden, anschließend nachbelüftet und über Langsandsfilter geleitet.

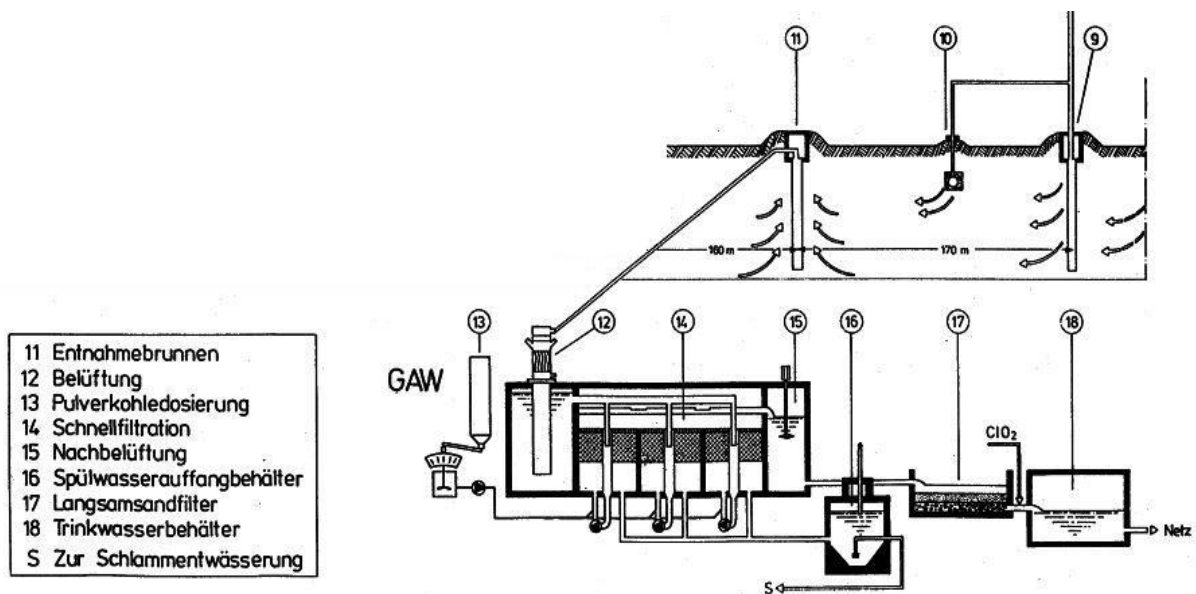


Abb. 3-9: Schema der zweiten Stufe (GAW) der Wasseraufbereitung [nach BERGER et al., 1992:89]

Im ersten Schritt wird das Wasser in einen Verrieselungsturm geleitet. Durch die hohe Fallgeschwindigkeit des Wassers wird Luft angesaugt und zweiwertiges Eisen und Mangan sowie Ammonium werden oxidiert. Im nächsten Schritt werden die unlöslichen Oxide abfiltriert. Hierzu wird das Wasser im „Refifloc-Verfahren“ durch drei Filterkammern von je 25 m² Fläche geleitet. Die Filterkammern sind mit einer 1,00 m hohen Schicht Styroporkugeln gefüllt und werden von unten nach oben durchströmt. Die Filtergeschwindigkeit beträgt 16 m/h. Das Verfahren dient der Enteisung, Entmanganung und Nitrifikation. Für den Fall einer Belastung des Wassers mit organischen Verunreinigungen im Spurenbereich kann dem „Refifloc-Filter“ Aktivkohle in Form einer Pulverkohle zudosiert werden. Für die detaillierte Beschreibung des Verfahrens wird auf die entsprechenden Publikationen der ESWE Stadtwerke Wiesbaden AG verwiesen. Als letzten Aufbereitungsschritt wird das Wasser über Langsandsandfilter geleitet. Da die Filtergeschwindigkeit bei lediglich 20 bis 30 cm liegt, sind große Filterflächen erforderlich. Zur Verfügung stehen insgesamt 18 überdeckte Langsandsandfilter mit je 200 m² Fläche. Die Wirksamkeit beruht auf biologischen Abbauvorgängen organischer Wasserinhaltsstoffe, da sich auf den Sandkörnern besonders in der oberen Schicht Mikroorganismen ansiedeln und ähnlich dem natürlichen Boden eine biologisch wirksame Zone bilden.

Abschließend wird das aufbereitete Trinkwasser aus Sicherheitsgründen desinfiziert. Seit 1981 wird dazu Chlordioxid verwendet. Nach Zugabe des Desinfektionsmittels gelangt das Wasser in die Speicherbehälter bzw. ist fertig zur Abgabe in das Versorgungsnetz.

Die durchschnittliche Jahresabgabe richtet sich nach dem Bedarf und liegt bei 5 bis 7 Mio. m³/ Jahr. Das entspricht durchschnittlich 17.500 m³ pro Tag.

3.2.2 Die Entnahmebrunnen

Die heute betriebene Entnahmebrunnengalerie gründet auf den Umbaumaßnahmen der dritten Ausbaustufe des Wasserwerkes [KOPP, 1986]. Nach der Geländeauffüllung und der Stilllegung alter Brunnen wurde eine Brunnenreihe angelegt (Foto 3-2).



Foto 3-2: Westteil der Brunnengalerie (Wiacek, 2005)

Die Galerie befindet sich in ca. 160 m Entfernung zu den Infiltrationsbecken und 170 m zu den Infiltrationsbrunnen bzw. der Sickergalerie (vgl. Abb. 3-8). Das Rheinufer ist ca. 500 m entfernt, der Achsabstand der Brunnen untereinander beträgt 25 m und wurde so festgelegt, dass ein Absenkungstrichter ohne Überschneidung an den nächsten grenzt [BERGER et al., 1992].

Verschiedene Sanierungsmaßnahmen im Laufe der Jahre führten zu Neubaumaßnahmen. Dabei wurde jeweils der gealterte Brunnen aufgegeben und verschlossen und in direkter Nachbarschaft neu gebohrt [BERGER et al., 1992].

Seit 1954 wurde vom Betrieb über zwei Heberleitungen auf den individuellen Betrieb der einzelnen Brunnen mit Unterwasserpumpen umgestellt. Bis 1982 wurden 42 Brunnen entsprechend umgerüstet, der Rest der Brunnen wurde stillgelegt.

Die derzeit in Betrieb befindlichen 42 Entnahmebrunnen sind in drei Gruppen mit den folgenden Eigenschaften unterteilt [BERGER et al., 1992]:

- Ost-Gruppe (Brunnen 14a bis 30a)
 - Baujahr 1950, Preussag AG, Darmstadt
 - Bohrdurchmesser: 1.000 mm
 - Bohrverfahren: Trockenbohrung
 - Kiesschüttung: dreifach (1,5–2,0/ 4,0–8,0/ 15,0–25,0 mm)
 - Ausbau: Steinzeugfilter- und Aufsatzrohre, 300 mm
 - Schlitzart: schräg abwärts gestochene Längsschlitze
Öffnungsweite unbekannt
 - Filterlänge: 5 m

- Mittel-Gruppe (Brunnen 31a bis 41a, ohne 37a)
 - Baujahr 1960 und 1961, Fa. Brechtel, Ludwigshafen
 - Bohrdurchmesser: abgestuft oben 1.000 mm,
im Filterbereich 900 mm
 - Bohrverfahren: k.A.
 - Kiesschüttung: zweifach (Korndurchmesser unbekannt)
 - Ausbau: Kupferfilter- und Aufsatzrohre, 300 mm
 - Schlitzart: Schlitzbrückenfilter
Öffnungsgröße unbekannt
 - Filterlänge: 6 m

- West-Gruppe (Brunnen 42a bis 56a)
 - Baujahr 1957 und 1959, Fa. Brechtel, Ludwigshafen
 - Bohrdurchmesser: abgestuft, oben 900 mm,
im Filterbereich 800 mm
 - Bohrverfahren: k.A.
 - Kiesschüttung: zweifach (Korndurchmesser unbekannt)
 - Ausbau: Kupferfilter- und Aufsatzrohre, 300 mm
 - Schlitzart: Schlitzbrückenfilter
Öffnungsgröße unbekannt
 - Filterlänge: 6 m

Abb. 3-10 zeigt einen der Entnahmebrunnen im Querschnitt:

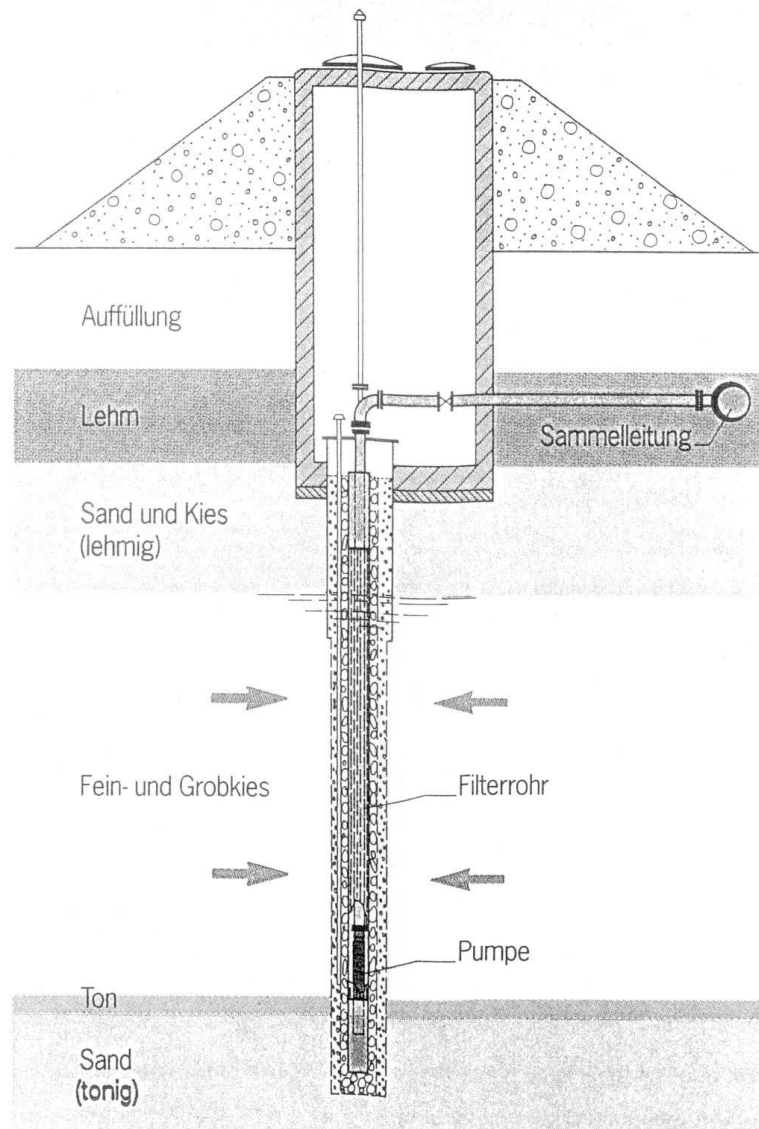


Abb. 3-10: Schnitt durch einen Entnahmebrunnen [aus BERGER, 1992:104]

Die Brunnen werden derzeit in zwei Entnahmegruppen (Ostreihe: Brunnen 14a bis 31a / Westreihe: Brunnen 32a bis 54a) betrieben. Über jeweils eine frequenzgesteuerte Pumpe wird eine Soll-Leistung für die Sammelleitung vorgegeben. Die Anteile der einzelnen Brunnen an dieser Gesamtfördermenge werden im Normalbetrieb nicht einzeln bestimmt. Über das Ab- oder Zuschalten einzelner Brunnen kann die Leistung jedoch gezielt ermittelt werden. Die Neubauleistung ist nur für einzelne Brunnen in den Akten vermerkt. Die Ergiebigkeit der Brunnen ist stark unterschiedlich. Die höchsten Anteile an der Fördermenge weisen die Brunnen der West-Gruppe auf.

Der erschlossene Grundwasserleiter liegt im Bereich der Entnahmebrunnengalerie etwa 3 m u GOK und besitzt eine Mächtigkeit von 5 bis 8 m (vgl. Karten im Anhang). Die Sande und Kiese der Niederterrasse werden von Auenlehm und, gemäß den Ausführungen auf Seite 61, von anthropogenen Auffüllungen bedeckt. Der Brunnensumpf liegt in Tonschichten des Oligozäns. Der Grundwasserleiter ist sehr inhomogen.

Bei entsprechendem Betrieb der Infiltrationsanlagen zur Grundwasseranreicherung liegen im Grundwasserleiter weitgehend gespannte Verhältnisse vor. Damit ist vor allem auch sichergestellt, dass eventuelle Uferfiltratzuflüsse abgedrängt werden [BERGER et al., 1992]. Der Ruhewasserspiegel liegt im Bereich der Auenlehmschicht (vgl. Karten im Anhang). Je nach Betriebszustand der Infiltrationsgalerie und benachbarter Entnahmebrunnen können die Brunnen auch artesisch sein. Der Betriebswasserspiegel wird nicht individuell überwacht. Die Absenkung kann, je nach Ergiebigkeit des Brunnens und seiner Nachbarn, aufgrund des Betriebes in Gruppen, in den Filterbereich hinein reichen.

Das geförderte Rohwasser ist, wie bereits auf Seite 86 ausgeführt, immer ein Mischwasser aus dem infiltrierten Wasser aus den Infiltrationsbrunnen, den Becken und echtem Grundwasserzufluss vom Taunus. Die Anteile sind abhängig von einem komplexen Zusammenspiel mehrerer Faktoren, vor allem vom Wasserstand im Rhein und den Becken sowie dem Betrieb der Infiltrationsanlagen (vgl. S.86). Aufgrund der uneinheitlichen Rohwasserqualität ist auch die Brunnenalterung von Brunnen zu Brunnen verschieden.

BERGER et al. (1992) belegen die Differenzen von Brunnen zu Brunnen und die zeitliche Variation anhand der Eisen- und Mangan-Konzentrationen bei Messungen an verschiedenen Brunnen (Abb. 3-11) und am selben Brunnen zu verschiedenen Zeiten.

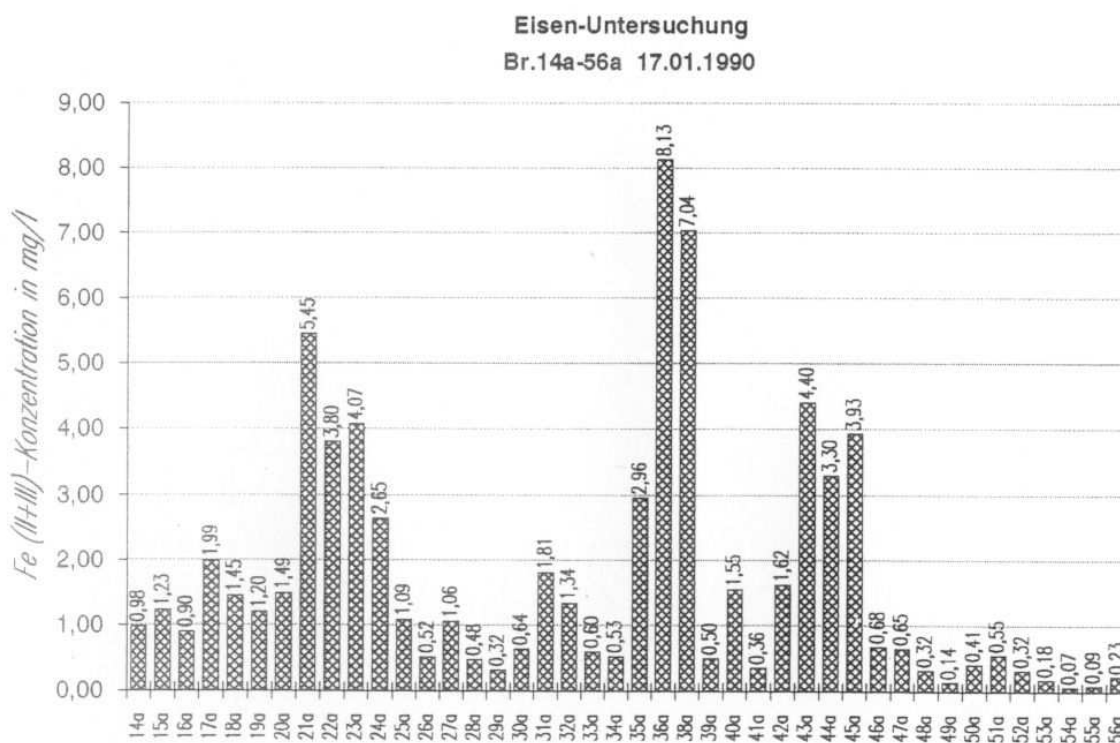


Abb. 3-11: Messung des Eisengehaltes im Rohwasser der Brunnen, Beispiel für eine Messkampagne vom 17.01.1990 [aus BERGER, 1992:112]

Die hohen Eisengehalte im Rohwasser zeigen reduzierende Verhältnisse an. Dabei wird Eisen(III) zu Eisen(II) reduziert und gelöst. Die besonders hohen Eisengehalte in den Brunnen der Mittel-Gruppe können nach BERGER et al. (1992) auf einen verstärkten Einfluss echten Grundwassers zurückgeführt werden, das vom Taunus zuströmt und dabei so genannten Ortstein durchströmt. Das ist ein Gestein, das reich an Eisen und organischen Bestandteilen ist, wobei letzteres dann die reduzierenden Verhältnisse bestimmt, da der Abbau der organischen Masse den verfügbaren Sauerstoff aufzehrt. Der Eisengehalt spiegelt somit direkt die Mischungsverhältnisse des Wassers wieder, die je nach Lage der Brunnen, d. h. Nähe zu den Infiltrationsbecken, zum Rhein usw., verschieden sind.

Entsprechend uneinheitlich sind auch die Brunnenalterungsvorgänge an den Entnahmehrunnen des Wasserwerkes Wiesbaden-Schierstein. Es treten als Alterungsvorgänge auf:

- Versandung (Selbstabdichtung)
- chemisch induzierte Verockerung
- biologisch induzierte Verockerung
- Verschleimung

Da die einzelnen Alterungsarten bereits in Kap. 2.3 beschrieben wurden, soll hier nur auf die Besonderheiten für die Brunnen des Wasserwerkes Schierstein eingegangen werden.

Die Problematik des Versandens mit einer Selbstabdichtung wird vor allem für die Brunnen der Ostgruppe angenommen. Bei deren Bau wurden pro Bohrung nur 1 bis 2 Proben entnommen und Siebanalysen durchgeführt. BERGER et al. (1992) berichten über eine nachträgliche Überprüfung der Siebdaten mit folgendem Ergebnis: „Bei den Brunnen der Ost-Gruppe sind die Schichten durch zumeist nur 1 bis 2 Bohr-Proben nur ungenügend erfasst und mit Siebanalysen nicht ausreichend genug geprüft worden; zudem stand noch nicht das heutige Wissen der Auswertungs-Methoden zur Verfügung. So hat man, insbesondere ,durch beim Bohren in Rheinkiesen gelegentlich übersehene, geringmächtige Feinsandablagerungen' [Lit: Bi 1] und der daraus resultierenden Angst vor einer Sandführung bei fast allen Brunnen der Ost-Gruppe eine im Verhältnis zum anstehenden Untergrund zu geringe Abstufung der äußeren Schüttkornfraktion gewählt.“ (S. 123, zit. n. Bieske, 1961).

Besonders durch die Umstellung des Betriebes vom Heberleitungsbetrieb auf Unterwasserpumpen und die daraus resultierende Erhöhung der Förderleistung und damit der Fließgeschwindigkeiten im anstehenden Untergrund und der Kiesschüttung können Feinsandteile in Bewegung gesetzt, am Übergang zwischen Aquifer und Kiesschüttung jedoch nicht weitertransportiert werden, so dass sie sich dort ansammeln.

Zur chemischen Verockerung trägt vor allem die Betriebsweise der Brunnen bei. Die Absenkung des Betriebswasserspiegels bis in den Filterbereich verursacht den Zutritt von Sauerstoff. Zweiwertige Eisen-Ionen im Rohwasser werden oxidiert und in unlösliche Eisen(III)-Verbindungen überführt und abgelagert. Hierbei bestimmt vor allem die chemische Zusammensetzung des Wassers das Ausmaß und die Geschwindigkeit der Alterungserscheinungen. Aufgrund der Strömung und des von außen nach innen gerichteten Zuflusses bestehen die Bedingungen zur adsorptiven Anlagerung erst nach Eintritt in das Innere des Filterrohres. Die Ablagerungen finden sich somit vor allem im Filterinnenrohr und in den Steigleitungen [BERGER et al., 1992].

Eine chemische Oxidation von Mangan kann aufgrund des Fehlens erhöhter pH-Werte ausgeschlossen werden.

Die biologische Verockerung kann ebenfalls an allen Brunnen des Wasserwerkes beobachtet werden. Unterschiede treten lediglich bei den Arten der beteiligten Mikroorganismen und der Geschwindigkeit der Alterung bzw. dem Maß des Leistungsrückganges auf.

Unbedingte Einflussgrößen sind das Vorhandensein zweiwertiger Eisen- und Mangan-Ionen und eine erhöhte Fließgeschwindigkeit mit Zufuhr der Ionen und von Nährstoffen zu den Mikroorganismen. Diese Bedingungen liegen in allen Brunnen vor. Aufgrund höherer Eisen- und Mangangehalte im Rohwasser der Brunnen der Ostgruppe sind diese stärker von der biologischen Verockerung betroffen. Die Haupt-Alterungsprodukte sind nach BERGER et al. (1992) Eisenhydroxid $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Eisenoxihydrat FeOOH sowie Mangandioxid MnO_2 . Die Verschleimung beruht auf dem Vorhandensein schleimbildender Bakterien und niederer Pilze. Sie benötigen Stickstoffverbindungen und organische Substanzen. Daher wird das Auftreten dieser Alterungsart durch den Zufluss von Uferfiltratwasser begünstigt und tritt vor allem an den ganz äußeren Brunnen der Ost-Gruppe auf, die aufgrund ihrer Lage Uferfiltrat-Anteile im Rohwasser führen können.

Die genannten Alterungsarten treten zum größten Teil in Kombinationen auf, d. h. Belagsproben aus Filterrohr oder Steigleitung bestehen aus Eisen- und Manganverockerungen, die auf chemischem und biologischem Wege abgelagert worden sein können. Letzteres wird durch den Nachweis von Biofilm-Bestandteilen (Verschleimung) bestätigt.

3.3 Entwicklung der Brunnenregenerierung im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein

Zur Wiederherstellung der vollen Brunnenleistung müssen Brunnen regeneriert werden.

Während man früher gealterte Brunnen einfach aufgab und neu bohrte, stehen heute kaum noch geeignete Standorte für Brunnenneubauten zur Verfügung und die Planung umfasst aufwendige behördliche Genehmigungsverfahren.

Im Wasserwerk Schierstein besteht die Notwendigkeit zur Brunnenregenerierung verstärkt seit dem Ende des zweiten Weltkrieges. Bei einer starken Zunahme des Wasserbedarfs bedurfte es neben dem Neubau auch der Reinigung und Sanierung bestehender Brunnen [DEUTER & ROTH, 1974]. Die damals im Betrieb befindlichen Brunnen hatten einen geringeren Durchmesser. Sie wurden gereinigt, indem ein Schutzrohr niedergebracht wurde. Gleichzeitig wurde das Filterrohr gezogen und der Filterkies ausgespült.

Die ausgebauten Teile wurden dann an der Oberfläche mechanisch gereinigt, bei Bedarf erneuert und wieder eingebaut. Dies führte auch zu einer Vermischung der ursprünglich abgestuften Kiesschüttung. Das Verfahren fand Anwendung in den Jahren 1945 bis 1969.

Durch den Ausbau der Brunnenanlagen kamen jedoch zunehmend Brunnen mit größeren Durchmessern hinzu, die auf diesem Wege nicht mehr gereinigt werden konnten. Diese wurden dann mit Rohrbürsten bearbeitet und anschließend intensiv bepumpt. Das Verfahren erzielte jedoch nicht die gewünschte Leistungsverbesserung. Aus diesem Grund wurde in Wiesbaden in den Jahren 1969 und 1970 ein neues Verfahren entwickelt, das eine herkömmliche mechanische Reinigung mit einer chemischen Regenerierung verband. Bei dieser, „ESWE Kombi-Verfahren“ genannten Technik, musste das Filterrohr nicht mehr gezogen werden und die Wirkung reichte bis tief in den Filterkies und sogar ins anstehende Gebirge [DEUTER & ROTH, 1974]. Das Verfahren beinhaltete das Bürsten der Innenwand der Filterrohre und den anschließenden abschnittswise Einsatz einer Mammutpumpe mit Blaskopf, die ein Wasser-Luft-Gemisch in die Kiesschüttung pumpt. Nachdem Untersuchungen ergeben hatten, dass die Alterungserscheinungen hauptsächlich auf eisenhaltigen Verockerungen beruhten, die sich unter Zugabe von Salzsäure lösen ließen, wurde anschließend eine Säurelösung eingefüllt und die Lösung abgewartet. Nach 24 bis 48 Stunden wurde das Säuregemisch mit Hilfe von Pressluft weiter in die Kiesschüttung eingebracht und anschließend mitsamt dem Lösungsinhalt abgepumpt. Der Arbeitsaufwand lag bei ca. 70 Arbeitsstunden pro Brunnen. Das Verfahren ist detailliert beschrieben bei DEUTER & ROTH (1974). Es wurde in den Jahren 1970 bis 1981 angewendet.

Leistungspumpversuche zeigten dabei zunächst einen guten Erfolg, jedoch hielt dieser nicht an und nach sechs bis zwölf Monaten war die Brunnenleistung wieder soweit zurück gegangen, dass erneut hätte regeneriert werden müssen. Ein weiterer Nachteil war der hohe Verbrauch an Chemikalien, da der gesamte Filterrohr-Volumeninhalt mit Salzsäure aufgefüllt wurde.

Die Weiterentwicklung des Verfahrens stellte die Verwendung eines Kieswäschers [Patentinhaber: Fa. Charlottenburger Motoren- und Gerätebau KG, Berlin (1976, 1979, 1984, 1989)] dar. BERGER et al. et al. (1992) beschreibt das Verfahren in Anlehnung an PAUL (1985) wie folgt:

„Der Kieswäscher ist ein abschnittsweise arbeitendes Zweikammersystem zur chemisch-hydraulischen Brunnenregenerierung mit den Merkmalen:

- periodische Spülrichtungsumkehrung „auf/ ab“ in der Kiesschüttung und
- hydrodynamische Abdichtung mit Packern im Filterrohr.“

In den Jahren 1982 bis 1987 wurde die Brunnenregenerierung nach der Systematik mechanische Vorreinigung mit Bürsten – Auspumpen des Brunnensumpfes – abschnittsweise chemisch-hydraulische Reinigung mit dem Kieswäscher – Abpumpen – Klarpumpen durchgeführt [BERGER et al., 1992]. Abb. 3-12 zeigt das Aufbauschema:

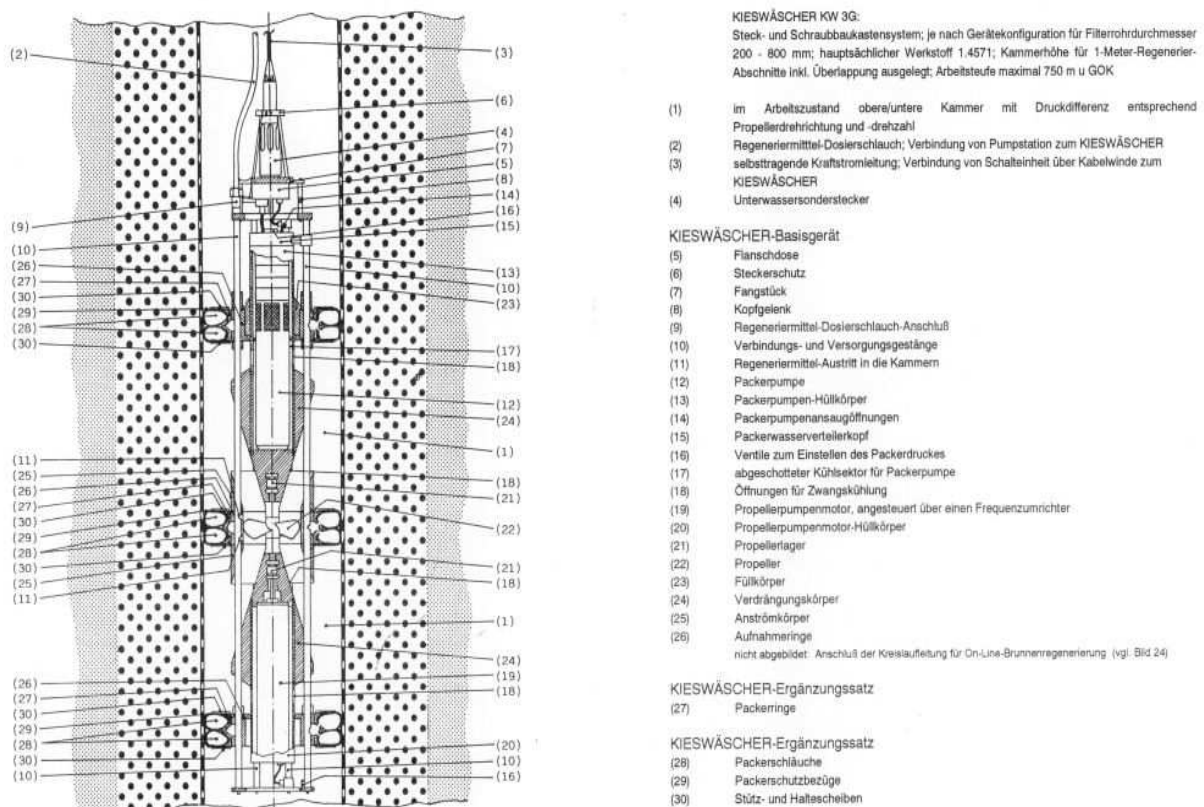


Abb. 3-12: Der Kieswäscher KW 3G [aus BERGER, 1992:146]

Im Arbeitszustand werden durch drei mit Wasser gefüllte Packerebenen zwei Kammern gebildet. Durch eine Propellermotorpumpe wird in einer der beiden Kammern ein Unterdruck und in der anderen Überdruck erzeugt, was eine Strömung durch die Kiesschüttung bewirkt.

Die Veränderung der Drehrichtung des Propellers kehrt die Strömungsrichtung um und bewirkt eine gleichmäßige Verteilung des Regeneriermittels. Über eine separate Schlauchleitung wird den Kammern das Regeneriermittel, ein Spezial-Säuregemisch mit Hauptbestandteil Salzsäure zugegeben und mit der Strömung in die Kiesschüttung eingebracht.

Ein Arbeitsabschnitt entsprach dabei einem Filtermeter. Die Reinigungszeit pro Abschnitt lag bei 3 Stunden, die Richtungsumkehr der Spülrichtung wurde jede Minute vorgenommen. Die Brunnen wurden von oben nach unten bearbeitet. Untersuchungen in einem Versuchsstand bestätigten die Wirksamkeit und die Reichweite in die gesamte Kiesschüttung.

Die letzte Weiterentwicklung des Verfahrens beinhaltete die Ergänzung um eine On-Line-Steuerung, bei der die Regeneriermittelzufuhr individuell gesteuert wird und die Dauer der Bearbeitung der einzelnen Abschnitte an den Reinigungsfortschritt angepasst erfolgt. Des Weiteren wurde begonnen, die optimale Regeneriermittel-Dosierung und andere Randbedingungen vorab in Labortests zu untersuchen.

Das Verfahren der On-Line-Regenerierung mit Kieswäscher und einem Salzsäuregemisch wird im Wasserwerk Schierstein seit 1988 eingesetzt. Dabei werden der pH-Wert und der Eisengehalt des Regenerats (Regeneriermittel + Grundwasser + gelöste Ablagerungen) kontinuierlich überwacht und die Regeneriermitteldosierung, die Behandlungsdauer und eventuelle Zwischenabpumpung und Wiederholungen pro Bearbeitungsabschnitt individuell angepasst. Eine detaillierte Beschreibung gibt BERGER et al. (1992). Die Beurteilung der chemischen Regenerierung erfolgt über die Bilanzierung der Gehalte an gelöstem Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium im abgepumpten Wasser.

Die in Betrieb befindlichen Entnahmebrunnen des Wasserwerkes werden derzeit regelmäßig mechanisch gereinigt, indem mittels Bürsten Ablagerungen im Filterinnenrohr entfernt werden. Die chemische On-Line-Regenerierung erfolgt nach Bedarf bei einer erkennbaren Leistungsabnahme einzelner Brunnen. Die Auswertung beinhaltet die Bilanzierung entfernter Mengen auf Grundlage der Mengen an gelöstem Eisen und Mangan im Regenerat.

Ein erster Einsatz des Verfahrens der Brunnenregenerierung mit Ultraschall fand im Jahr 1997 auf Vorschlag des DVGW statt. Dabei sollte die Wirksamkeit des Verfahrens bestimmt werden. Seitdem wird im ESWE-Institut für Wasserforschung an der Erforschung und Weiterentwicklung des Verfahrens gearbeitet.

Durchschnittlich werden pro Jahr drei Brunnen chemisch regeneriert. Mit dem Ultraschallverfahren wurden bisher sieben verschiedene Brunnen behandelt, zwei davon im Jahr 1997 im Zuge des DVGW-Versuches zur Wirksamkeit des Ultraschall-Verfahrens und weitere fünf Brunnen im Rahmen dieser Arbeit. Die folgenden Kapitel geben den aktuellen Bearbeitungsstand wieder.

4 Methodik

4.1 Datenerhebung und Brunnenauswahl

Die Grundlagen der vorliegenden Arbeit wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes des ESWE-Institutes für Wasserforschung und Wassertechnologie erarbeitet. Das Projekt umfasste im Wesentlichen die Regenerierung von fünf Entnahmebrunnen des Wasserwerkes Wiesbaden Schierstein mit dem Ultraschall-Verfahren. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag darauf, die Abhängigkeit des Regeneriererfolges von der chemischen Zusammensetzung und dem Alter der Brunnenbeläge zu beurteilen. Dafür war die Auswahl von fünf der insgesamt 42 Entnahmebrunnen der Brunnengalerie des Wasserwerkes der erste Schritt. Die Auswahlkriterien waren:

- Analysendaten des Wassers aus Rohwasseruntersuchungen
- Altanalysen der Beläge aus den Brunnen
- Daten bisher durchgeführter Regenerierungen
- Zeitpunkt der letzten Regenerierung und eingesetztes Verfahren.

Zur Datenerhebung wurde wie folgt vorgegangen:

1. Befragung der Mitarbeiter des Wasserwerkes nach
 - a. regulärem Vorgehen zur Brunnenpflege und Wartung
 - b. Vorhandensein von Datenmaterial
 - c. auffälligen Brunnen
2. Zusammenstellung der Wasseranalysendaten aus den Rohwasseruntersuchungen der letzten zehn Jahre der 42 in Betrieb befindlichen Entnahmebrunnen
3. Erhebung der Daten von Analysen der Brunnenbeläge im Zuge von Regenerierungen
4. Zusammenstellung und Auswertung der Begleitanalysen chemischer Regenerierungen
5. grafische Darstellung der Werte
6. Feststellung auffälliger Brunnen
7. Abstimmung mit den Mitarbeitern des Wasserwerkes zur Festlegung der zu regenerierenden Brunnen

8. Erfassung der vorliegenden Dokumentation über die ausgewählten Brunnen
 - a. Brunnenakten mit Angaben zum Bau des Brunnens und zur Brunnenleistung
 - b. Daten der Rohwasseruntersuchungen

4.1.1 Wasseranalysen

Im ersten Schritt wurden für alle Entnahmebrunnen des Wasserwerkes die Analysendaten der Jahre 1992 bis 2004 für den Gehalt an gelöstem Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan sowie die Leitparameter Sauerstoffgehalt, pH-Wert und Leitfähigkeit aus der Datenbank des ESWE-Labors in einer Tabelle zusammengestellt.

Die Datenbank enthielt zu den einzelnen Brunnen einen unterschiedlichen Umfang an Datensätzen (Tab. 4-1). Sie stammten aus den gesetzlich vorgeschriebenen Rohwasseruntersuchungen gemäß Rohwasseruntersuchungsverordnung (RUV) oder aus Probenahmen im Zuge von Projekten und Forschungsvorhaben im Wasserwerk Schierstein.

Tab. 4-1: Anzahl der vorhandenen Datensätze in der Labordatenbank für die fünf, später ausgewählten Brunnen (Wiacek, 2005)

Brunnen Nr.	20a	29a	31a	51a	54a
Baujahr	1950	1950	1961	1959	1959
Daten aus RUVs	3	3	3	3	3
Projektdate	6	0	4	0	0
Summe Datensätze	9	3	7	3	3

Aus diesen Daten wurde für jeden der 42 Brunnen, soweit vorhanden, pro Jahr ein Datensatz selektiert und in einer gesonderten Zusammenstellung erfasst. Dabei wurde darauf geachtet, Datensätze vom gleichen Probenahmedatum oder zumindest aus dem gleichen Monat zu wählen, um den Einfluss jahreszeitlicher Schwankungen der Wasseranalysen möglichst gering zu halten.

Zur Überprüfung, ob die gewählten Daten auch repräsentativ für den jeweiligen Brunnen sind, wurden sie mit den Durchschnittswerten aller vorliegenden Daten des Brunnens abgeglichen.

Diese Zusammenstellung wurde dann um die Daten aus der Überwachung und Bilanzierung vorangegangener Regenerierungen sowie Analysenwerte von Belagsproben aus den Brunnen ergänzt.

4.1.2 Daten aus Regenerierungen

Die Bilanzierung von Regenerierdaten wurde von den Mitarbeitern des Wasserwerkes bei jeder chemischen Regenerierung der Brunnen durchgeführt. Dabei wurden Wasserproben des abgepumpten Wassers entnommen und auf den Gehalt an gelöstem Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium analysiert. Die Analyse wurde im Labor der Stadtwerke Wiesbaden AG vorgenommen, die Bestimmung der Ionengehalte erfolgte mittels ICP-OES. Das Verfahren wird in Kap. 4.3 ab S. 127 kurz beschrieben. Der Ablauf chemischer Brunnenregenerierungen im Wasserwerk Schierstein ist detailliert beschrieben bei BERGER et al. (1992, S.266ff.). Kurz zusammengefasst, stellt sich die Bilanzierung wie folgt dar:

Die Regenerierung erfolgt mit dem Kieswäscher abschnittsweise. Das Regenerat wird in Kunststoffbehältern aufgefangen. Mittels eines Eisen-Schnelltests wird die Anzahl der notwendigen Regenerierdurchgänge bestimmt. Der Abschnitt wird so lange bearbeitet, bis sich der Eisengehalt im Regenerat nicht mehr ändert. Pro Abschnitt und Durchgang werden drei Behälter mit je 700 l Regenerat befüllt. Aus diesen wird dann nach ausreichender Homogenisierung eine 1l-Mischprobe entnommen. Nach Bestimmung der Ionengehalte der o. g. Elemente wird der Analysenwert [mg/ l] mit dem Volumen (700 l) multipliziert. Aus der Addition aller Behälter ergibt sich die Gesamtmenge entfernter Eisens, Mangans, Calciums und Magnesiums. Da die Grundlage der chemischen Regenerierung die Zugabe eines stark säurehaltigen Regeneriermittels ist, erfolgt die Bearbeitung der Abschnitte und die Probenahme sowie die anschließende Analytik bei einem pH-Wert der Probe von ca. 0,8.

Das Datenmaterial enthielt pro Brunnen die letzte durchgeführte chemische Regenerierung, die Gesamtsumme des entfernter Eisens, Mangans, Calciums und Magnesiums in Gramm [g absolut] sowie die prozentualen Anteile der einzelnen vier Ionen. Aus der Gesamtsumme und den Prozentangaben wurde auf die Gehalte der vier Ionen in Gramm zurückgerechnet.

Ergänzend lagen für die meisten der 42 Brunnen Werte aus Belagsanalysen entnommener Proben von Pumpen und Steigleitungen aus den Jahren 1992 bis 1994 vor. Die Belagsproben wurden damals bei Wartungsarbeiten an den einzelnen Brunnen entnommen und wie folgt analysiert:

Nach dem Trocknen der Probe wurde der Glühverlust bestimmt. Der Glührückstand wurde dann mit Schwefelsäure aufgeschlossen. Der Aufschluss wurde mit Wasser verdünnt und mittels ICP-OES auf seinen Ionengehalt analysiert. Die Daten lagen zum Teil als Gramm pro Kilogramm Trockensubstanz [g/ kg TS] und zum Teil als prozentuale Anteile der einzelnen Ionen vor. Zur Ergänzung des vorliegenden Datenmaterials wurden alle Proben auf g/ kg TS zurückgerechnet. Anschließend wurden die vier Ionengehalte Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium aufsummiert und wiederum die prozentualen Anteile der vier Elemente an deren Summe angegeben.

Tab. 4-2 zeigt einen Ausschnitt aus der zusammengefassten Darstellung mit den Angaben aus den Belagsanalysen, oben aus dem Datenmaterial oder berechnet als [g/ kg TS] und darunter in Prozent Fe, Mn, Ca und Mg von der Summe der vier genannten Ionen und der Gesamtsumme.

Auf Grundlage dieser Tabelle wurden die Werte für alle 42 Brunnen in verschiedenen Grafiken erfasst, um Auffälligkeiten besser erkennen und beurteilen zu können, um daraus fünf zu regenerierende Brunnen festzulegen.

Tab. 4-2: Erfassung der Altdaten, Ausschnitt (nur die später ausgewählten Brunnen) aus den Belagsanalysen der Brunnen (Wiacek, 2005)

Untersuchung	Brunnen				
	20a	29a	31a	51a	54a
Brunnenausbau	1950	1950	1961	1989	1959
Filtermaterial	Steinzeug	Steinzeug	Kupfer	Kupfer	Kupfer
DN (Bohrung/ Filterrohr)	1000 / 300	1000 / 300	800 / 300	800 / 300	820 / 300
Filterkies					
Teufe [m u GOK]	12,60	12,89	12,76	12,19	12,57
Filterrohrbeginn [m u GOK]	6,60	5,89	5,76	5,19	5,57
Filterlänge [m]	5,00	6,00	6,00	6,00	6,00
RW [m u GOK]					
BW [m u GOK]					
Leistung Neubau [m³/h]	47,00	45,00			
Datum	?	04.07.1994	10.01.1996	10.04.1995	19.04.1996
Belagsanalysen					
[g/ kg TS]					
Ca	53,0	68,0	43,0	45,0	45,0
Mg	0,3	0,0	2,0	2,0	2,0
Fe	309,0	453,0	263,0	212,0	342,0
Mn	0,0	78,0	86,0	154,0	45,0
K	25,0	0,0	k.A.	k.A.	k.A.
Na	19,0	0,0	k.A.	k.A.	k.A.
SiO ₂	2,0	36,0	10,0	10,0	12,0
Ti	0,0	0,0	k.A.	k.A.	k.A.
Al	0,0	3,0	0,3	0,6	0,2
P	178,0	67,0	46,0	36,0	46,0
As	0,0	1,0	k.A.	k.A.	k.A.
Summe alles [g]	586,3	706,0	450,3	459,6	492,2
Summe (Ca-Mn) [g]	362,3	599,0	394,0	413,0	434,0
Belagsanalysen					
[%]					
Ca	14,6	11,4	10,9	10,9	10,4
Mg	0,1	0,0	0,5	0,5	0,5
Fe	85,3	75,6	66,8	51,3	78,8
Mn	0,0	13,0	21,8	37,3	10,4
[% von gesamt]					
Ca	9,0	9,6	9,5	9,8	9,1
Mg	0,1	0,0	0,4	0,4	0,4
Fe	52,7	64,2	58,4	46,1	69,5
Mn	0,0	11,0	19,1	33,5	9,1
	61,8	84,8	87,5	89,9	88,2

4.1.3 Wahl der fünf zu regenerierenden Brunnen

Für die im Rahmen des Projektes geplanten Regenerierungen mit dem Ultraschallverfahren mussten aus den 42 Entnahmebrunnen der Galerie fünf ausgewählt werden. Entscheidendes Kriterium war hierbei die Zusammensetzung und das Alter der Beläge.

Da die Brunnenalterung im wesentlichen von der Bildung von Eisen- und Manganverockerungen bestimmt wird (vgl. Kap. 2.3.1 und Kap. 3.2.2), waren die Gehalte der beiden Elemente in den Bilanzierungen der, jeweils letzten chemischen Regenerierung und den Belagsanalysen von Bedeutung.

Im ersten Schritt wurden daher die Eisen- und Mangangehalte der Rohwasseruntersuchungen (RUV), der Bilanzierung der chemischen Regenerierungen (Bilanzierung) und aus den Belagsanalysen zusammengefasst und grafisch dargestellt. Das Ergebnis zeigt für den Eisengehalt Abb. 4-1 und für den Mangangehalt Abb. 4-2:

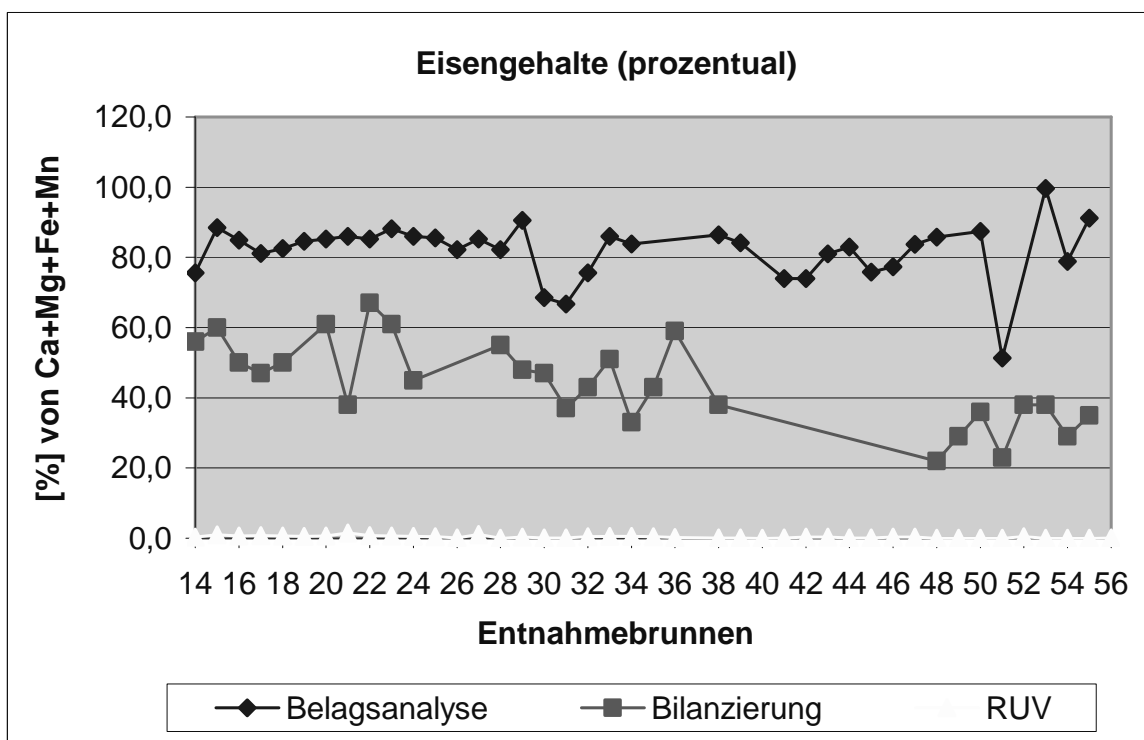


Abb. 4-1: Eisengehalte im Rohwasser und den Altdaten der chemischen Regenerierungen und Belagsuntersuchungen, angegeben als prozentuale Anteile an der Bilanzierung der Summen Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium [WIACEK, 2004]

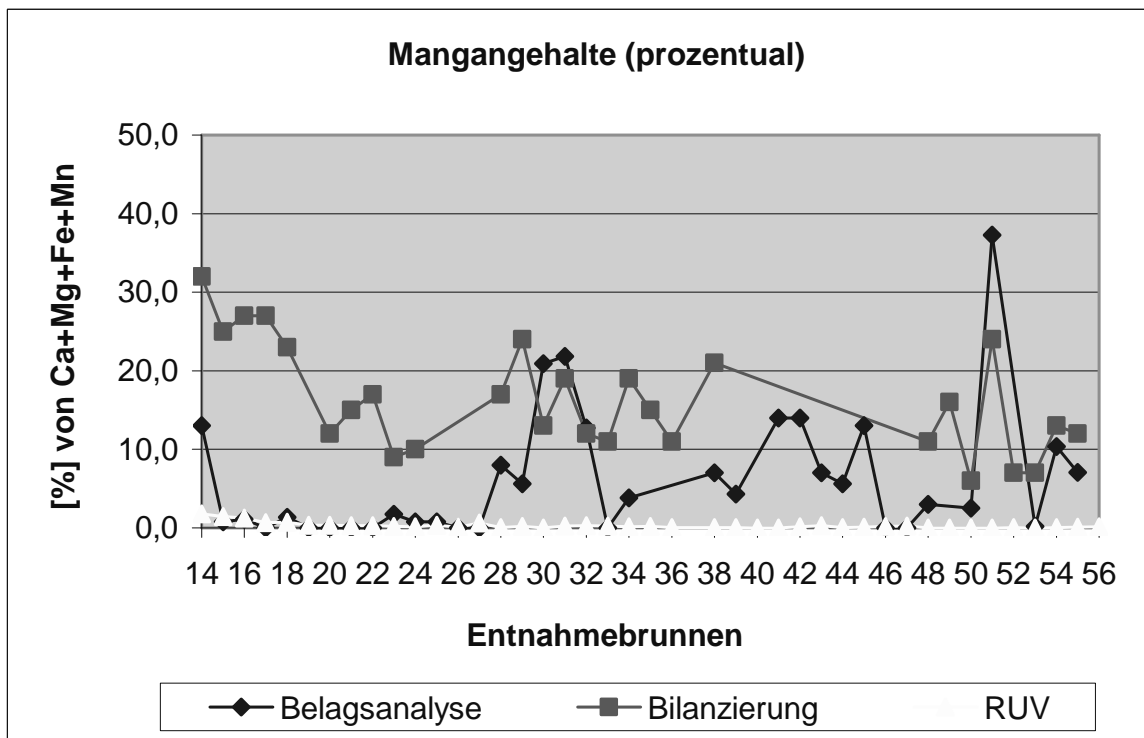


Abb. 4-2: Mangangehalte im Rohwasser und den Altdaten der chemischen Regenerierungen und Belagsuntersuchungen, angegeben als prozentuale Anteile an der Bilanzierung der Summen Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium [WIACEK, 2004]

In den Gehalten gelösten Eisens und Mangans im Rohwasser der Brunnen zeigte sich keine Auffälligkeit. Die Werte lagen innerhalb von 0,0 und 2,8 mg/ l für Eisen und 0,0 und 2,4 mg/l für Mangan mit insgesamt höheren Werten in den östlichen Brunnen der Entnahmegalerie und weitgehend deckungsgleichem Verlauf der beiden Kurven. Für die Auswahl der Brunnen wurde deshalb das Hauptaugenmerk auf die Daten der Belagsanalysen und der Regenerierungen gelegt. Abb. 4-3 zeigt die grafische Darstellung. Hier zeigten sich von Brunnen zu Brunnen unterschiedliche Werte, zum größten Teil ohne Bezug zur Lage des Brunnens bzw. auch für direkt benachbarte Brunnen verschieden. Die Grafik wurde dann um die Zeitpunkte der, jeweils letzten chemischen Regenerierung der einzelnen Brunnen ergänzt. Aus dieser Abbildung wurden in Absprache mit den Mitarbeitern des Wasserwerkes fünf Brunnen gewählt. Berücksichtigt wurden dabei auffällig hohe oder niedrige Eisen- und Mangangehalte und unterschiedliche Zeiträume der Brunnentalterung. Die Brunnen 17 und 53 wurden von den Mitarbeitern des Wasserwerkes ausgeklammert. Die fünf gewählten Brunnen sind in Abb. 4-3 durch rote Linien markiert. Tab. 4-3 listet die wesentlichen Eigenschaften und die Gründe für die Wahl.

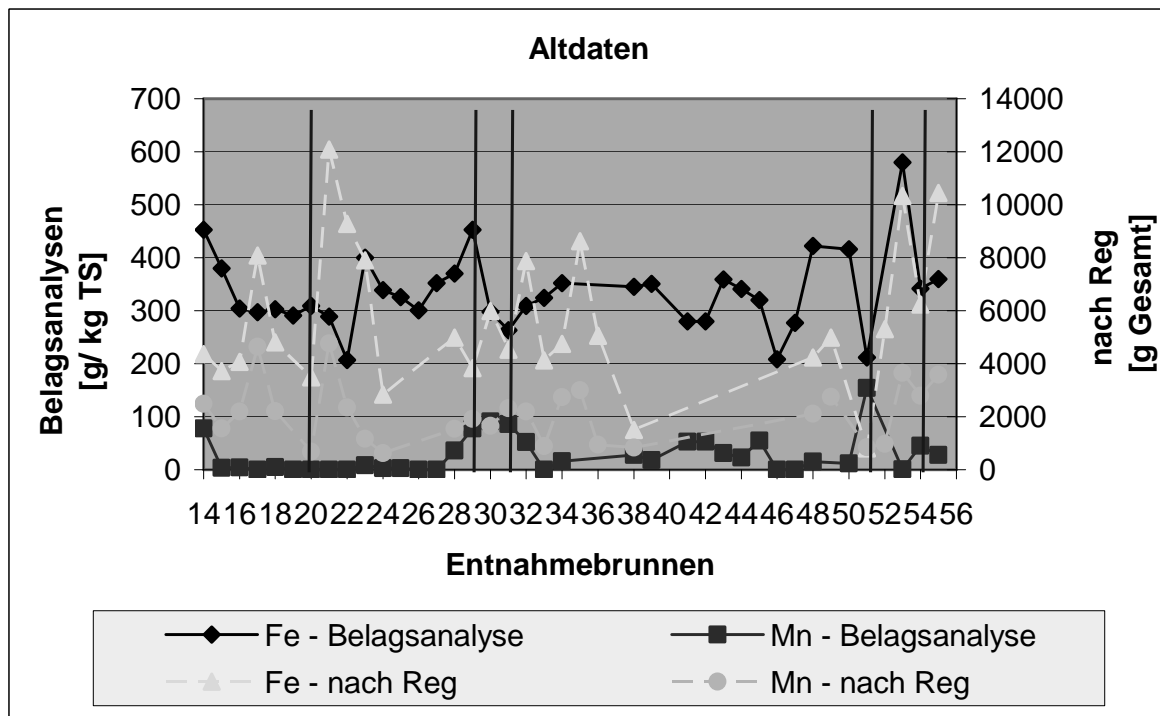


Abb. 4-3: Belagsanalysen und Daten der Chemischen Regenerierungen für die Gehalte an gelöstem Eisen und Mangan. Die roten Linien markieren die fünf, für die Versuche ausgewählten Brunnen. [Wiacek, 2004]

Tab. 4-3: Übersicht über die Eigenschaften der ausgewählten Brunnen [Wiacek, 2004]

Brunnen Nr.	20	29	31	51	54
Baujahr	1950	1950	1961	1959	1959
Filtermaterial	Steinzeug	Steinzeug	Kupfer	Kupfer	Kupfer
DN (Bohrung/ Filterrohr)	1000 / 300	1000 / 300	800 / 300	800 / 300	820 / 300
Filterkies	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Teufe [m u GOK]	12,60	12,89	12,76	12,19	12,57
Filterrohrbeginn [m u GOK]	6,60	5,89	5,76	5,19	5,57
Filterlänge [m]	5,00	6,00	6,00	6,00	6,00
RW [m u GOK]					
BW [m u GOK]					
Leistung Neubau [m³/h]	47,00	45,00	k.A.	k.A.	k.A.
Chemismus	unauffällig Fe + Mn	vorwiegend Fe	vorwiegend Mn		vorwiegend Fe
letzte Regenerierung	07 / 1993	07 / 1994	02 / 1996	03 / 2002	02 / 1999

Die Beschreibung der Brunneneigenschaften folgt in Kap. 5 ab S.149.
Die Lage der ausgewählten Brunnen zeigt Abb. 4-4.

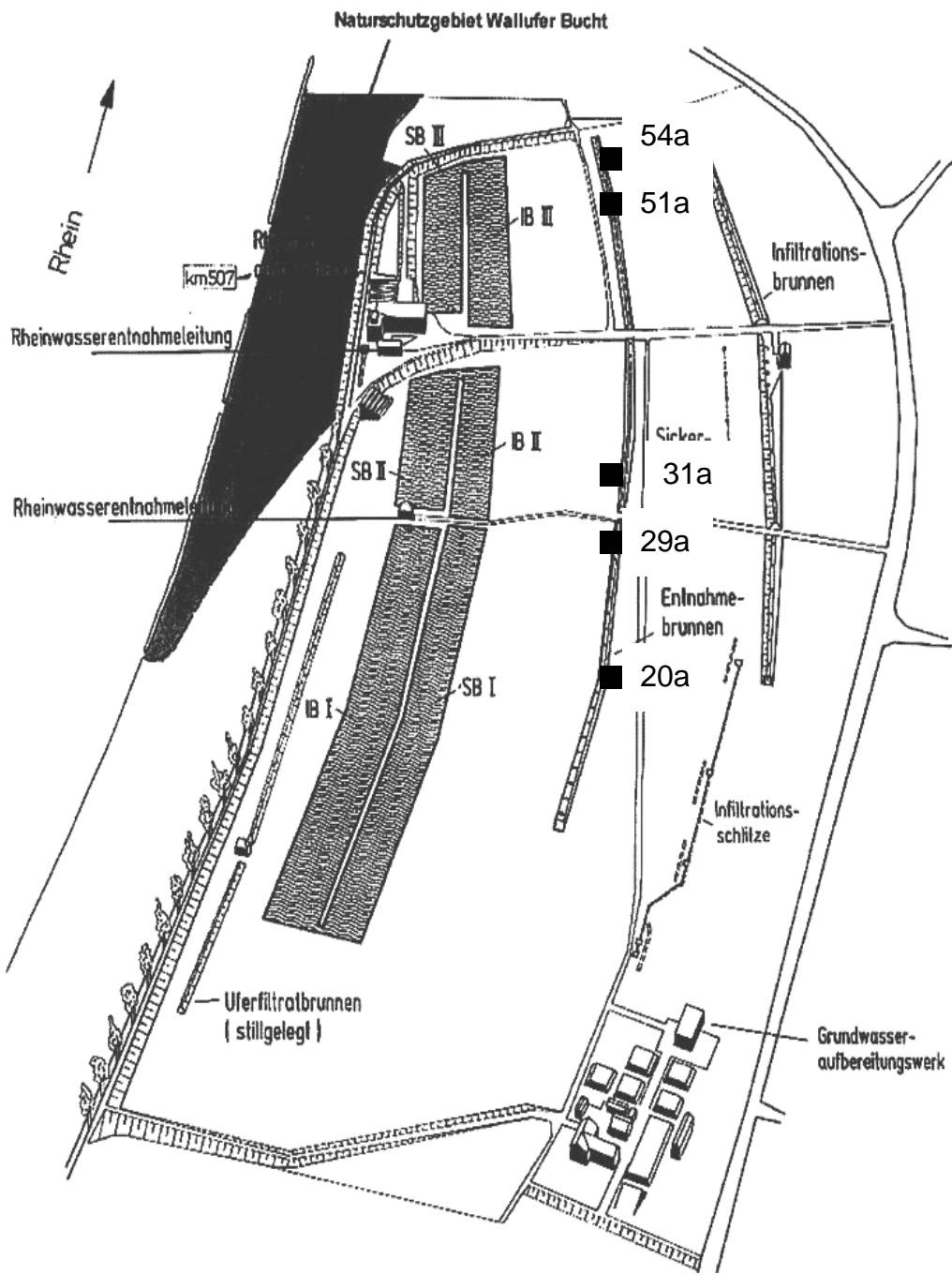


Abb. 4-4: Lage der fünf ausgewählten Brunnen innerhalb der Entnahmebrunnengalerie des Wasserwerkes [nach Abb. 3-6]

Die ausgewählten Brunnen waren dann Gegenstand genauerer Recherche. Die Brunnenakten wurden eingesehen und alle vorliegenden Daten zum Ausbau und aus geophysikalischen Untersuchungen, TV-Befahrungen und Pumpversuchen gesammelt und bewertet.

4.2 Regenerierung ausgewählter Brunnen im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein

4.2.1 Voruntersuchungen

Die Regenerierungen folgten dem üblichen Ablauf und wurden durch zusätzliche Messungen und Probenahme wissenschaftlich begleitet, wie im Folgenden beschrieben wird..

Als Basis für die Bewertung des Regeneriererfolges wurde für alle fünf Brunnen der Ist- Zustand durch eine Kamerabefahrung festgestellt. Ein Kurzpumpversuch dokumentierte außerdem die Ergiebigkeit der Brunnen vor der Regenerierung. Die Regenerierung wurde dann zusätzlich von geophysikalischen Untersuchungen begleitet.

Die Kamerauntersuchung erfolgte durch die Fa. BRM GmbH, Biebergemünd. Sie erfüllte mehrere Zwecke. Einerseits wurde damit der Ausbau des Brunnens kontrolliert, d. h. auch eventuelle Beschädigungen des Filterrohres festgestellt, die eine Regenerierung behindern oder unmöglich machen können. Andererseits zeigt sich auch das Ausmaß der Alterungserscheinungen. Die Verockerungen werden lokalisiert und die Art der Beläge kann beurteilt werden.

Die Kamera verfügt über mehrere Objektivsysteme und eine Lichtquelle. Sie wird an einem Steuerkabel in den Brunnen herabgelassen. Letzteres dient gleichzeitig als Haltekabel, zur Tiefenerfassung und Datenübertragung. Im Kamerawagen werden die Bilder auf zwei Videobändern aufgezeichnet. Sowohl der Blickwinkel (360°) als auch die Blickrichtung (radial oder axial) kann beliebig geändert werden. Foto 4-1 zeigt die zweiaxiale Kamera der Regenerierfirma BRM GmbH, Biebergemünd, welche bei den Kamerabefahrungen zum Einsatz kam. Tiefenbezugspunkte sind jeweils die Mitte der Kamera mit dem Objektiv zur radialen Aufnahme und die Oberkante des Brunnenkopfes.

Idealerweise werden bei jeder Kamerabefahrung an mehreren Tiefenlagen Fotos gemacht, anhand derer der Regeneriererfolg direkt visuell beurteilt werden kann. Die Dokumentation erfolgt, neben der Videoaufzeichnung, in Form eines Kurzprotokolls, das Fotos, Tiefenangaben zur Lage der Ausbau- und Filterrohre und festgestellte Schäden oder Alterungserscheinungen enthält.

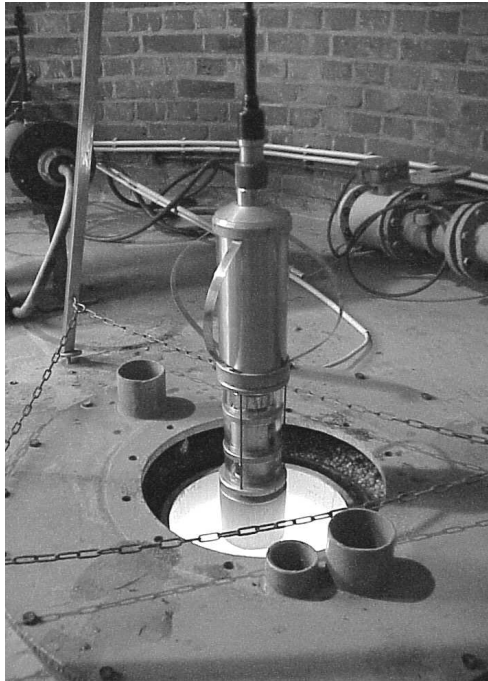


Foto 4-1: Brunnenkamera der Fa. BRM GmbH, Biebergemünd [WIACEK, 2003]

Da die Brunnen in einer Galerie mit zwei frequenzgesteuerten Pumpen betrieben werden, war die Einzelleistung der fünf Brunnen nicht bekannt (vgl. Kap. 3.2.2, S.92). Daher wurde vor Beginn jeder Regenerierung ein Kurzpumpversuch durchgeführt und die Förderleistung des jeweiligen Brunnens vor der Regenerierung festgestellt.

Als Besonderheit anzumerken ist an dieser Stelle, dass während des gesamten Zeitraums der Regenerierungen die komplette Brunnengalerie mit einer konstanten Förderleistung betrieben wurde, um Einflüsse von Nachbarbrunnen auf die bearbeiteten Brunnen auszuschließen und die Grundbedingungen stabil zu halten.

Die Pumpversuche erfolgten in Form einstufiger Kurz-Leistungstests. Dazu wurde im unteren Teil des Filterbereichs eine Unterwasserpumpe eingebaut. Einbautiefe und Förderleistung orientierten sich an den Daten aus dem normalen Betrieb des Brunnens bzw. an den Altdaten und variierten somit leicht von Brunnen zu Brunnen. Die Fördermenge wurde mit einem Schieber geregelt und mittels eines Durchflusswasserzählers abgelesen.

Jeder Pumpversuch wurde bis zum Erreichen des quasistationären Zustandes gefahren. In allen fünf Brunnen stellte sich dieser nach 60 bis 90 Minuten ein. Zur Sicherheit wurde der Pumpversuch nach Erreichen eines konstanten Betriebswasserspiegels jeweils noch ca. 60 Minuten fortgesetzt.

Die Wasserstände wurden in den vorgegebenen Abständen (DVGW, 1997) mittels eines Lichtlotes gemessen und zusammen mit der Fördermenge protokolliert (Foto 4-2)

Nach Abschalten der Pumpe wurde der Wiederanstieg gemessen.



Foto 4-2: Durchführung eines der Pumpversuche an Brunnen 31a [WIACEK, 2004]

Aus der Förderleistung und dem erreichten Betrag der Absenkung im Beharrungszustand errechnete sich dann die spezifische Ergiebigkeit nach der Formel:

$$Q_s = \frac{Q}{s} \quad [\text{m}^3/\text{h} * \text{m}]$$

mit Q- Fördermenge der Pumpe [m³/ h]

s- Betrag der Absenkung [m]

Das Protokoll der Kamerabefahrung und des Pumpversuches mit Aufnahmen aus dem Filterinnenraum sowie der erreichten spezifischen Ergiebigkeit zeigten den Ist- Zustand des Brunnens und bildeten die Basis zur Bewertung des Regeneriererfolges.

Die Werte werden in der Beschreibung der Ergebnisse an den einzelnen Brunnen in Kap. 6.1 ab S. 172 wiedergegeben.

4.2.2 Ablauf der Regenerierungen

Um die Vergleichbarkeit, auch mit Daten aus vorangegangenen Projekten zu gewährleisten, wurden alle fünf Brunnen nach einem einheitlichen Ablaufplan regeneriert.

Nach der Erfassung des Zustandes des Brunnens, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, war der erste Schritt zur Regenerierung immer die Vorreinigung des Filterrohrinneren durch Bürsten. Dazu wurde eine PVC-Bürste passenden Durchmessers an einem Gestänge in den Brunnen hinab gelassen und vorsichtig mehrmals auf und ab bewegt (Foto 4-3).



Foto 4-3: Mechanische Vorreinigung mit einer auf den Durchmesser angepassten Kunststoffbürste [WIACEK, 2004]

Anschließend wurde das durch die Bürste gelöste Material abgepumpt. Dazu wurde eine Pumpe bis hinunter in das Sumpfrohr gelassen und so lange gepumpt, bis das geförderte Wasser klar war. Die Pumpleistung musste der Ergiebigkeit der Brunnen angepasst sein und lag so hoch wie möglich.

Nach Abschluss der Vorreinigung begann dann das Kernprogramm des Projektes. Die Maßnahme umfasste die Regenerierung mit Ultraschall und begleitende geophysikalische Messungen.

Um die Wirkung der Ultraschallbehandlung von der Vorreinigung trennen zu können, wurden nach dem Bürsten wiederum eine Kamerabefahrung und ein Kurzpumpversuch durchgeführt.

Damit konnte der Status des Brunnens vor dem Ultraschalleinsatz mit den Ergebnissen nach der Behandlung verglichen werden.

Der Ablauf stellte sich somit insgesamt folgendermaßen dar:

1. Kamerauntersuchung des Brunnens (Ist-Zustand)
2. Kurzpumpversuch zur Ermittlung der spezifischen Ergiebigkeit (Ist-Zustand)
3. Vorreinigung durch Bürsten
4. Kamerauntersuchung (vor Ultraschall)
5. Kurzpumpversuch mit den gleichen Parametern wie bei 2. (vor Ultraschall)
6. geophysikalisches Messprogramm (vor Ultraschall)
7. Regenerierung des Brunnens mit Ultraschall inkl. Probenahme (vgl. Kap. 4.3)
8. geophysikalisches Messprogramm (nach Ultraschall)
9. Kurzpumpversuch zur Ermittlung der Leistungssteigerung
10. abschließende Kamerabefahrung

Der eigentliche Regenerierschritt erfolgte mit einer von der Firma BRM GmbH, Biebergemünd in Zusammenarbeit mit der Firma SONIC Ultraschalltechnik, Bad Mergentheim, gebauten Ultraschallsonde. Sie besteht aus sechs einzelnen, baugleichen Ultraschallgeber-Einheiten. Diese sind untereinander und im Winkel von 30° zueinander gedreht angeordnet. Dadurch wird eine Überschneidung der einzelnen Ausbreitungskegel des Ultraschalls jeder der sechs Einheiten und damit die Schallausbreitung über 360°, d. h. im komplette n Ringraum des Brunnens erreicht.

Abb. 4-5 zeigt links die verwendete Ultraschallsonde und rechts die schematische Darstellung eines magnetostriktiven Blockschwingers.

Jede der sechs Ultraschall-Einheiten besteht aus einem solchen Blockschwinger. Als Magnetostriktion bezeichnet man die elastische Formänderung ferromagnetischer Stoffe in einem Magnetfeld. Das Magnetfeld wird durch eine Spulenwicklung erzeugt.

Diese Form der Ultraschallerzeugung eignet sich aufgrund der großen mechanischen und elektrischen Robustheit besonders gut für die Anwendung zur Brunnenregenerierung, wo mit hohen Schallintensitäten und niedriger Frequenz gearbeitet wird.

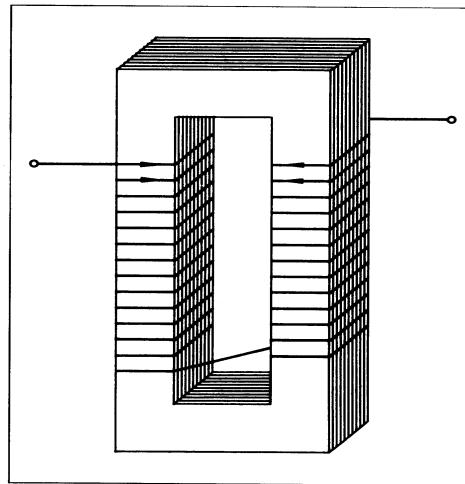
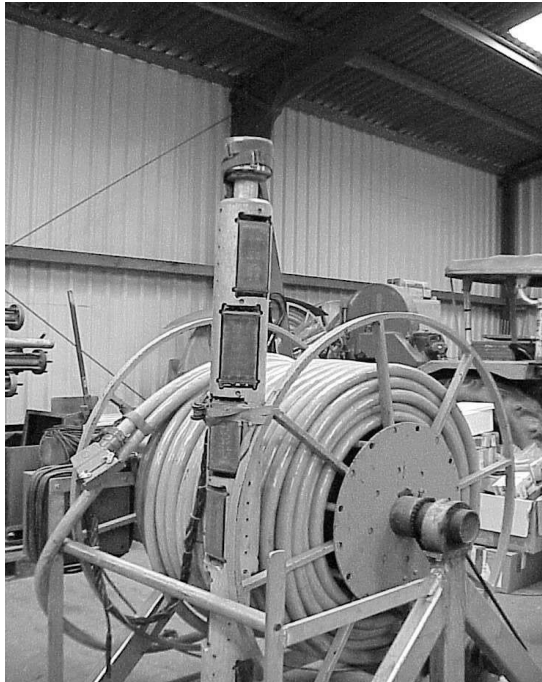


Abb. 4-5: links: Ultraschallsonde der Fa. BRM GmbH, Biebergemünd [WIACEK, 2003]; rechts schematische Darstellung eines magnetostruktiven Blockschwingers [aus KRAUTKRÄMER, 1966 zitiert in WIACEK, 2003]

Ein solcher Blockschwinger besteht aus vielen, sehr dünnen Nickel-Bleichen, die gestanz sind, um eine Spulenwicklung aufzunehmen.

Die hier verwendeten sechs Blockschwinger werden jeweils von einem eigenen Generator betrieben. Die Angaben zur Betriebsfrequenz, Leistung und den Abmessungen der Schallgeber sind in der folgenden Tabelle (Tab. 4-4) zusammengestellt.

Zur Regenerierung wurde über der Ultraschallsonde eine Unterwasserpumpe montiert und beide an der Pumpensteigleitung in den Brunnen hinab gelassen. Die Pumpe war oben und unten mit Packerscheiben versehen, um den Abschnitt des Abpumpens abzugrenzen. Die Ultraschallbehandlung der Brunnen erfolgte abschnittsweise. Ein Abschnitt war, entsprechend der Länge der Ultraschallsonde, ca. ein Meter lang. Beschallt wurde nur der Filterbereich. Im Vollrohrabschnitt kann sich eine Beschallung negativ auf Tonsperren auswirken. Abb. 4-6 zeigt das Schema der Brunnenregenerierung mit Ultraschall.

Tab. 4-4: technische Spezifikationen eines Blockschwingers bei einer Wassertemperatur von 10°C [nach www.Sonic-Umwelttec hnik.de]

Schallfrequenz f [kHz]	20
Kreisfrequenz ω [s^{-1}]	125664
Schallleistung des Schwingers (Wirkungsgrad $\eta = 70\%$) [W]	1000
Nennleistung [W]	2000
Spitzenleistung [W]	4000
Flächenbezogene Schallintensität J [kW/m^2]	68
Energiedichte w [J/m^3]	46
Schalldruckamplitude p [Pa]	450 000
Ultraschallerzeugung	magnetostruktiv
Modulation	Doppelhalbwelle
Schallstrahlende Fläche [mm]	85 x 185
Gewicht [kg]	18

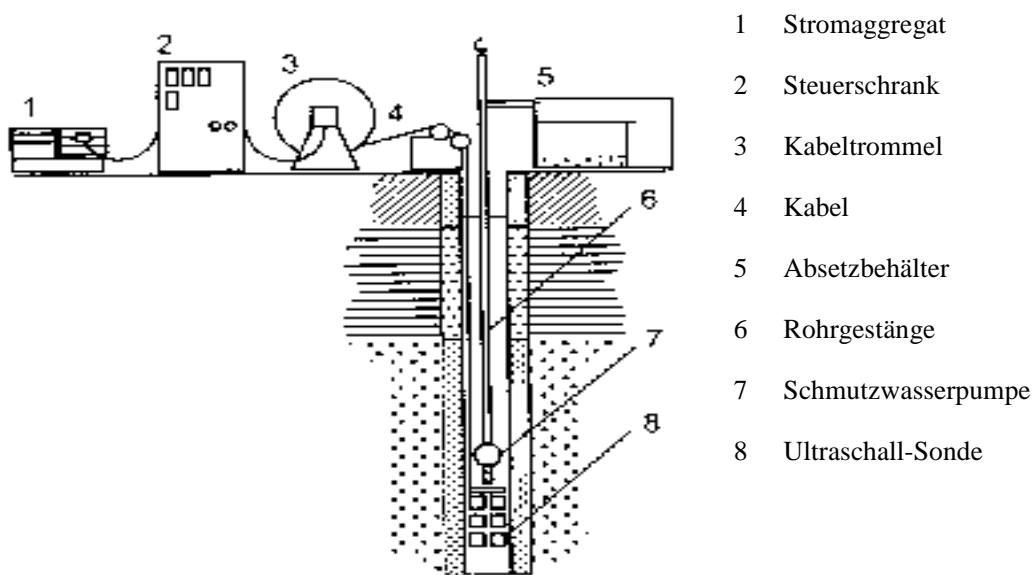


Abb. 4-6: Prinzipskizze des Verfahrens [nach www.Sonic-Umwelttechnik.de, zitiert in WILKEN & WIACEK, 2004]

Die Brunnen wurden von oben nach unten bearbeitet. Jeder Abschnitt wurde etwa 10 Minuten beschallt. Danach wurde die Sonde um einen Meter in den nächsten Abschnitt abgesenkt. Die über dem Schaller angeordnete Pumpe befand sich dann in dem zuvor beschallten Abschnitt und pumpte das durch den Ultraschall gelöste Material ab. Das Abpumpen musste der Förderleistung angepasst sein. Bei den Brunnen im Westteil der Entnahmebrunnengalerie (Brunnen 51a und 54a) erfolgte das Abpumpen direkt nach der Beschallung Abschnitt für Abschnitt. Bei den Brunnen mit geringerer Ergiebigkeit wurde erst der gesamte Filterbereich beschallt und anschließend, ebenfalls abschnittsweise der gesamte Brunnen abgepumpt.

Das abgepumpte Wasser wurde für weitere Untersuchungen in Containern aufgefangen (Foto 4-4).



Foto 4-4: Container mit 1000 Liter Inhalt zum Auffangen des abgepumpten Wassers, 1000 Liter pro Filtermeter [WIACEK, 2004]

4.2.3 Begleituntersuchungen

Jede der fünf Regenerierungen wurde von geophysikalischen Messungen begleitet.

Die Anwendung geophysikalischer Verfahren stammt allgemein aus der Erdöl- und Erdgasexploration. In vereinfachter Form finden die Verfahren zunehmende Anwendung im Wasser-, Umwelt- oder Geotechnikbereich. Mithilfe verschiedener Sonden können unterschiedliche Parameter des Umgebungsgesteins oder des Bohrlochfluids erfasst werden, z. B.:

- Temperatur
- Elektrische Widerstände, Leitfähigkeit, Salinität
- Schalllaufzeiten
- natürliche Radioaktivität oder Reaktion auf künstliche Radioaktivität
- Wasser- bzw. Durchflussmengen

Die Messsignale werden tiefengetreu aufgezeichnet und ausgewertet. Auf Basis der physikalischen Eigenschaften der Gesteine, des Brunnenausbaus und des Wassers können so in Brunnen die Parameter des Grundwasserleiters sowie des Wassers überwacht werden.

Für Fragestellungen der Brunnenregenerierung ist die Durchlässigkeit des Filterbereiches relevant. Messmethoden können die direkte Bestimmung der Gesteinseigenschaften Permeabilität und Porosität, d. h. der Materialdichte und Lagerungsdichte zum Ziel haben, aber auch die Bestimmung der Wasserwegsamkeiten, d. h. die Feststellung der am Zufluss beteiligten Filterabschnitte und der Durchlässigkeit des Filters.

Das DVGW Merkblatt W110 (1990) „Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern und Brunnen zur Erschließung von Grundwässern“ enthält eine Zusammenstellung von Methoden, die in Brunnen Anwendung finden. Im Folgenden sollen die im Rahmen des Projektes verwendeten Verfahren kurz beschrieben werden. Aufgrund des, nicht unerheblichen Zeit- und Kostenaufwandes wurden nur einige der gängigen Methoden angewendet und auf ein komplettes Messprogramm mit Bestimmung der natürlichen Radioaktivität des Gesteins sowie Temperatur oder Salinität des Wassers usw. verzichtet.

So wurden jeweils vor und nach dem Einsatz des Ultraschall-Verfahrens

1. ein Gamma-Gamma-Log
2. eine Flowmeter- Messung ohne Pumpbetrieb
3. eine Flowmeter- Messung bei Pumpbetrieb

von der Fa. BLM Bohrlochmessungen, Gommern durchgeführt und in Form eines Kurzberichtes ausgewertet.

Die beiden Verfahren sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden. Für eine ausführliche Darstellung wird auf entsprechende Fachliteratur verwiesen, z. B. FRICKE & SCHÖN (1999).

Die Gamma-Gamma-Dichtemessung ist ein Verfahren zur Bestimmung der Dichte im Ringraum eines Brunnens.

Sie wird daher auch als Dichte- oder Ringraum-Scan bezeichnet. Sie zählt zur Verfahrensgruppe der aktiven Messungen, bei denen im Allgemeinen mittels eines Senders und eines Empfängers eine Antwort des Gebirges auf ein ausgesendetes Signal gemessen wird. Eingesetzt wird eine künstliche Gammaquelle zur Abgabe radioaktiver Strahlen in die Umgebung. Anhand der zurückkommenden Impulse wird die Dichte in der Umgebung der Sonde bestimmt.

Die Sonde besteht aus

1. einer Gammaquelle (i. d. R. ^{137}Cs)
2. einer Bleiabschirmung zur Unterdrückung direkter Strahlung von der Quelle zum Detektor
3. einem Szintillationszähler als Detektor
4. einer Andrückvorrichtung, die eine definierte Position im Bohrloch gewährleistet.

[FRICKE & SCHÖN, 1999].

Das zugrunde liegende Prinzip ist das Auftreten des Compton-Effektes (Abb. 4-7), d. h. die dichteabhängige Adsorption und Zerstreuung der ausgesendeten Gammastrahlung. Wird ein Elektron durch Gammastrahlung getroffen, gibt letztere bei diesem Zusammenstoß einen Teil seiner Energie an das Elektron ab. Übrig bleibt Gammastrahlung mit niedrigerer Energie - das Sekundär-Photon, und das Sekundär-Elektron.

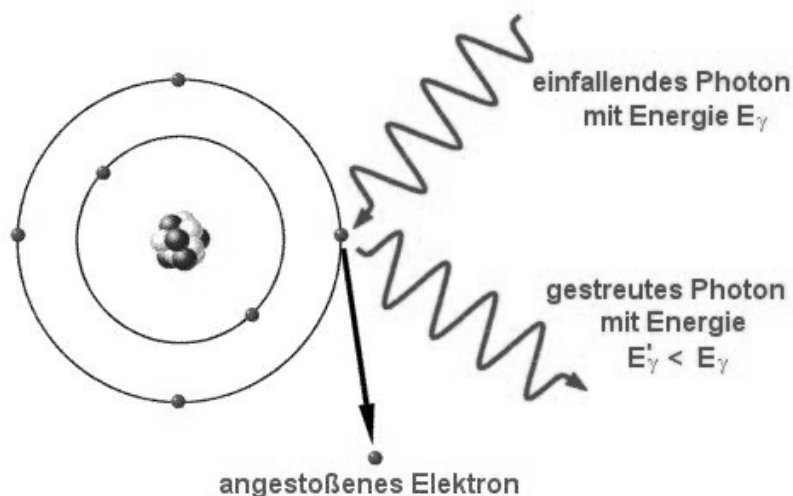


Abb. 4-7: Prinzipskizze des Compton-Effekts [aus www.med.uni-marburg.de, 19.07.2005]

Die Anzahl solcher Zusammenstöße ist abhängig von der Elektronendichte, diese wiederum ist proportional der Dichte des Materials. Je höher die Materialdichte ist, desto mehr Energie der Gamma-Strahlung wird absorbiert. Die rückgestreute Strahlung, je weniger, desto höher die Materialdichte ist, wird registriert.

Die Impulsrate in Counts per Minute kann durch geeignete Kalibrierung und anhand von Diagrammen und Formeln, unter Zuhilfenahme der Verfahren zur Messung der natürlichen Gammastrahlung und des Bohrlochdurchmessers, in die Gesamtdichte des Gesteins überführt werden. Anhand dieser können Aussagen über Schichtgrenzen und die Porosität getroffen werden.

Die vollständige Aufzeichnung einer Gamma-Gamma-Dichtemessung enthält zwei Messdurchgänge mit unterschiedlichem Abstand zwischen Strahlungsquelle und Detektor, dem kurzen Spacing (GG.K) und dem langen Spacing (GG.L). Dies erlaubt die Kompensation von Effekten aus Unebenheiten des Bohrloches. Auch die Eindringtiefe des Verfahrens ist u. a. abhängig vom Spacing, außerdem auch von der Energie der Strahlungsquelle und vom Sondentyp.

Abb. 4-8 zeigt das Prinzip der Messung:

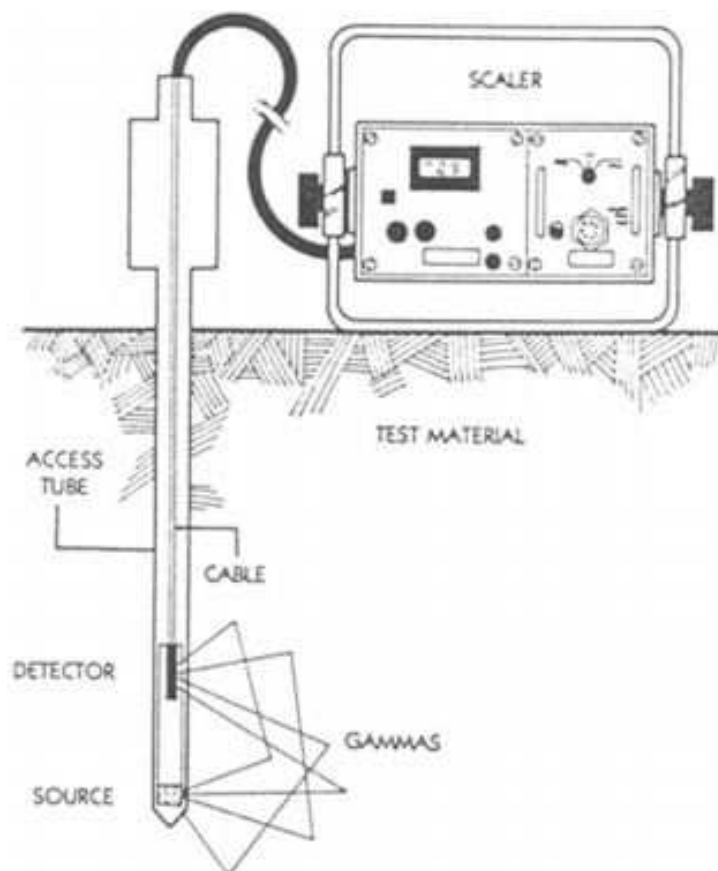


Abb. 4-8: Prinzip der Gamma-Gamma-Messung [aus www.calice.igt.ethz.ch, 29.06.2005]

Die Messung erfolgte in jedem der fünf Brunnen und bei beiden Messeinsätzen mit der gleichen Sonde. Es handelte sich dabei um eine 2-Spacing-Sonde, d. h. eine Sonde mit zwei Detektoren in unterschiedlichem Abstand zur Strahlungsquelle. Gemessen wurde an der Filterrohrwand anliegend von unten nach oben mit etwa 5 m/ Minute Fahrgeschwindigkeit der Sonde. Tiefenbezugspunkt war die Oberkante des Brunnenschacht-Deckels.

Die Ergebnisdarstellung erfolgte in Form von einzelnen Messkurven für

- die Counts per Minute (cpm) des kurzen Spacings
- die Counts per Minute des langen Spacings
- die daraus errechnete Dichte im Ringraum des Brunnens in g/ cm^3

jeweils vor und nach der Regenerierung. Die Ergebnisse werden im Kap. 6 ab S. 171 zusammengefasst und verglichen.

Die Flowmeter-Messung hingegen dient der Bestimmung der Zuflusssituation in Brunnen. Sie wird mit und ohne Pumpbetrieb durchgeführt. Die Messung im Ruhezustand dient dabei als Nullmessung.

Flowmeter messen vertikale Wasserbewegungen. Der am häufigsten verwendete Bautyp ist das elektromechanische Flowmeter (Impellerflowmeter), bei dem die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids aus der Zählrate der Umdrehungen pro Sekunde (counts per second – cps) eines propellerförmigen Messflügels ermittelt wird. Foto 4-5 zeigt ein solches Impeller-Flowmeter, wie es von der Fa. BLM, Gommern verwendet wurde:



Foto 4-5: Flowmeter, das (entlang der Pumpensteigleitung) in den Brunnen abgesenkt wird [WIACEK, 2004]

Die Messung kann stationär erfolgen, d. h. mit unbewegter Sonde oder kontinuierlich bei bewegter Sonde. Bei der kontinuierlichen Messung ist die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers die Umdrehungsgeschwindigkeit des Propellers abzüglich des Fahreffektes. Der Fahreffekt wird in der Nullmessung im Ruhezustand des Brunnens gemessen. Er enthält die Geschwindigkeit, mit der die Sonde im Brunnen bewegt wird und eventuelle vertikale Kurzschlussströmungen im Brunnen. Die durch das Pumpen erzeugte Strömung muss dabei immer so sein, dass die Wassergeschwindigkeit größer ist als die Fahrgeschwindigkeit der Sonde. Gleichzeitig muss die Sonde ausreichend schnell bewegt werden, um die Anlaufschwelle des Messflügels zu überschreiten.

Die Sonde (Abb. 4-9) besteht aus einem Impeller als Sensor und einer Zählleinheit zur Erfassung der Umdrehungen pro Sekunde des Messflügels. Über eine Kalibrierkurve ist der Zusammenhang zwischen den Umdrehungen pro Sekunde und der Strömungsgeschwindigkeit in m/ min beschrieben.

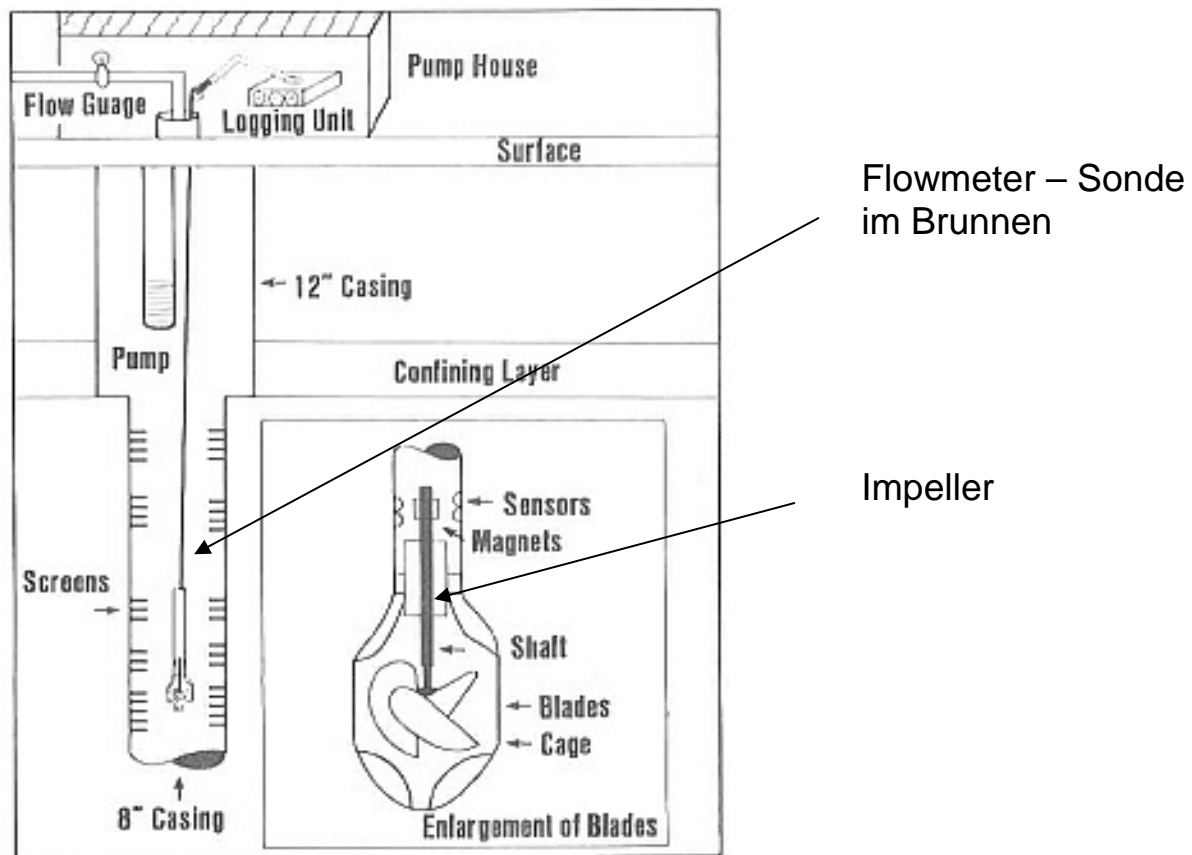


Abb. 4-9: Prinzipieller Aufbau eines Impellerflowmeters [aus www.terraplus.ca, 29.06.2005]

Um einen möglichst großen, und damit repräsentativen Querschnitt der Strömung zu erfassen, muss der Durchmesser der Sonde größtmöglich gewählt werden.

Die Zustromverteilung wird während des Pumpbetriebes im Brunnen gemessen. Dazu wird eine Unterwasserpumpe über dem Filterbereich eingebaut und mit einer konstanten Förderrate gepumpt, so dass eine vertikale Strömung entsteht. Aus der Änderung der Fließgeschwindigkeiten kann mit Hilfe des Brunnendurchmessers die Förderrate pro Abschnitt bzw. die Zustromverteilung bestimmt werden.

Die Sonde wird im Brunnenrohr von oben nach unten bewegt. Dabei werden Bereiche mit erhöhtem oder erniedrigtem Wasserzutritt passiert. Der Messflügel wird durch die Wasserbewegung zum Rotieren gebracht. Seine Drehgeschwindigkeit ergibt die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers im jeweiligen Filterbereich vom Wasserzutritt zu der oben betriebenen Pumpe. Da die Messung von oben nach unten erfolgt, wird, nachdem ein Wasserzutritt passiert wurde, sein Anteil an der Gesamtströmung des Wassers nicht mehr erfasst. In der Messkurve macht sich dies durch treppenförmige Abstufungen mit nachlassender Strömungsgeschwindigkeit bemerkbar. Aus dem Messwert im oberen Bereich (100 %) und dem Maß des Nachlassens im Tiefenprofil des Filterbereiches können dann die prozentualen Anteile der Wasserzutritte an der Gesamtfördermenge berechnet werden. Abb. 4-10 zeigt das Messprinzip:

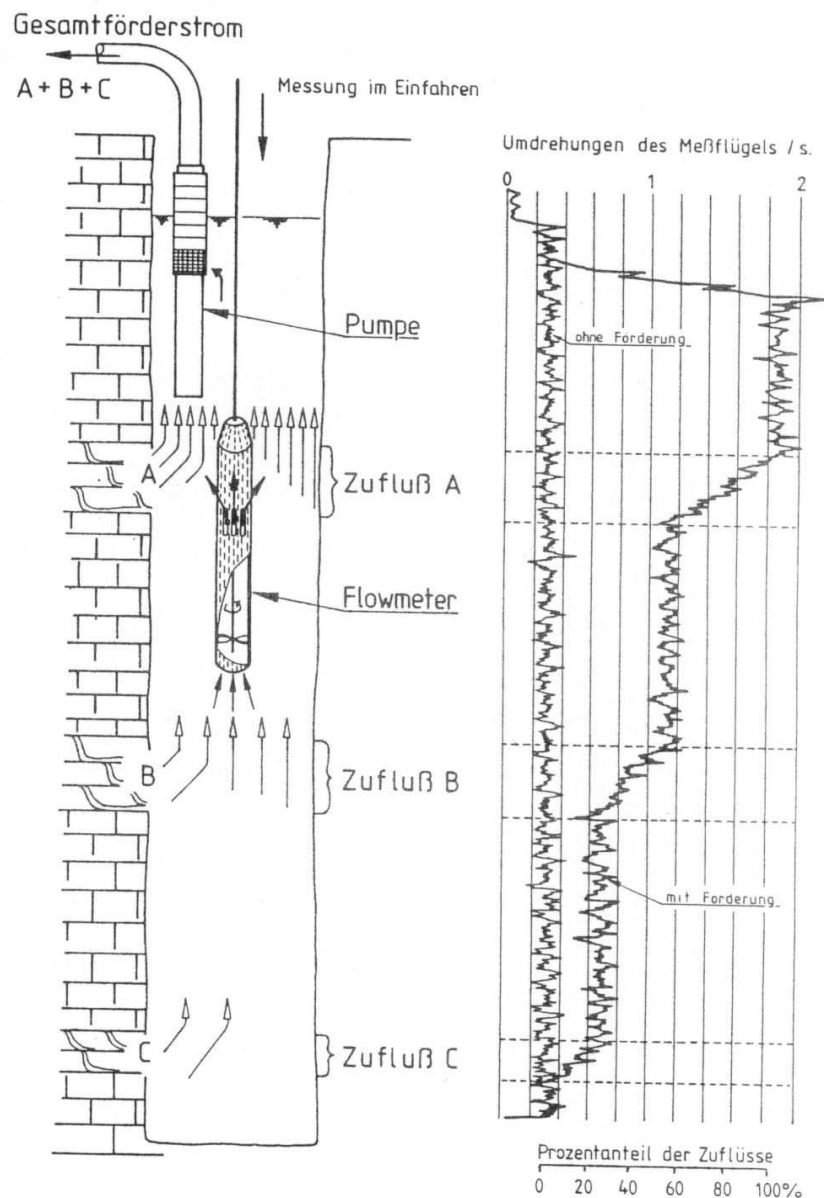


Abb. 4-10: Messprinzip der Flowmeter-Messung [aus DVGW W110, 1990:28]

Auch bei dieser Messung wurde für jeden der Messdurchgänge die gleiche Sonde verwendet. Diese wurde, über Abstandshalter im Brunnenrohr zentriert, mit konstanter Fahrgeschwindigkeit von oben nach unten bewegt.

Der Pumpbetrieb war für die einzelnen Brunnen verschieden, für die Messungen vor und nach Regenerierung jedoch identisch, um die Messungen direkt vergleichen zu können. Die Förderraten orientierten sich am Ergebnis der Pumpversuche und wurden so gewählt, dass die Wasserbewegung angeregt war, der Brunnen aber nicht in den Bereich der Pumpe abgesenkt wurde, sondern sich ein konstanter Betriebswasserspiegel im Aufsatzrohr über dem Filterbereich einstellte.

Die jeweilige Förderrate ist in den Messwertdarstellungen immer mit angegeben.

Die Ergebnisdarstellung erfolgte in Form von einzelnen Messkurven für

- die Flowmeter-Nullmessung (FLW0) in counts per second (cps)
- die Fahrgeschwindigkeit bei der Nullmessung (CVEL0) in m/ min
- die Abwärts-Messung bei Pumpbetrieb (FLW1) in cps
- die Fahrgeschwindigkeit bei der Messung bei Pumpbetrieb (CVEL1)

jeweils vor und nach der Regenerierung. Die Anteile der einzelnen Filterbereiche an der Gesamtfördermenge bei Pumpbetrieb wurden in Form eines Zuflussprofils dargestellt und verglichen. Die Ergebnisse werden im Kap. 6.1 ab S.172 brunnenweise zusammengefasst und ausgewertet.

4.3 Probenahme und -aufbereitung

Gemäß den oben stehenden Ausführungen wurde der Brunnen abschnittsweise bearbeitet. Ein Abschnitt entsprach dabei einem Filtermeter. Diese Unterteilung wurde auch für die Probenahme zur chemischen Analytik beibehalten.

Das abgepumpte Wasser wurde pro Abschnitt komplett in Containern mit 1000 L Inhalt aufgefangen. Außer bei Brunnen 20a, dessen Ergiebigkeit nicht ausreichte, wurden dabei alle Container vollständig gefüllt. Aus jedem Container wurde eine Mischwasserprobe entnommen. Nach mindestens 24 Stunden Wartezeit wurde außerdem der absedimentierte Feststoff beprobt. Da bei allen Brunnen der Hauptanteil an Partikelmasse im unteren Filtermeter konzentriert war, wurde die Feststoffprobe aus dem jeweils ersten Container entnommen.

Im Folgenden wird das Vorgehen für die einzelnen Probenarten detailliert beschrieben.

4.3.1 Wasserproben

Die Wasserproben wurden aus den Containern mit dem abgepumpten Wasser pro Filtermeter entnommen. Die Container wurden während des Abpumpens der beschalteten Brunnen von oben bis zur 1000Liter-Markierung gefüllt. Im unteren Teil der Container war ein Ablauf mit einem Drehventil-Verschluss.

Das Wasser wurde zur Entnahme der Probe mittels einer elektrisch betriebenen Fasspumpe für ein bis zwei Minuten gut durchmischt. Der Grad der Durchmischung wurde anhand der Trübung des Wassers optisch beurteilt, d. h. die Pumpe wurde solange betrieben, bis sich die Farbe des Wassers nicht mehr änderte. Anschließend wurde am Ablauf unten das Ventil geöffnet und eine 1Liter-Probenflasche bis zur 1Liter-Marke gefüllt und sofort verschlossen.

Als Probenflaschen wurden konditionierte 1Liter-PP-Flaschen verwendet.

Aus jedem der Container wurde eine Flasche Probenmaterial entnommen.

Das Abpumpen in den Brunnen erfolgte von unten nach oben, abschnittsweise abgepackert. Dem gemäß enthielt der erste gefüllte Container Material aus dem unteren Filtermeter. Die Probenbezeichnung enthielt den bearbeiteten Brunnen und die Nummer des Containers, beispielsweise 54/1 bis 54/6 für jeden der sechs Meter Filterlänge des Brunnens 54a, nummeriert von unten nach oben, also 1 für den unteren Filtermeter und 6 für den oberen Filtermeter.

Der erste Aufbereitungsschritt erfolgte im Betriebslabor des Rheinwasseraufbereitungswerkes direkt im Anschluss an die Probenahme:

Um Bedingungen für den Vergleich des Lösungsvermögens der Ultraschallbehandlung mit dem bisherigen Regenerierverfahren, der chemischen On-Line-Regenerierung zu schaffen, wurden die Wasserproben auf einen pH-Wert von 0,8 angesäuert. Hierzu wurde den Probenflaschen mit 1 Liter Wasserprobe konzentrierte Salzsäure zugegeben und dabei der pH-Wert unter kontinuierlichem Rühren ständig gemessen. Nach Zugabe von ca. 50 ml $\text{HCl}_{\text{konz.}}$ war der pH-Wert 0,8 jeweils erreicht. Die Probe wurde dann gut geschüttelt und für die weitere Behandlung aufbewahrt.

Im nächsten Schritt wurden die Proben über einen Glasfaserfilter filtriert, um die säureunlöslichen Bestandteile abzutrennen.

Das Filtrat wurde dann zur Analyse an das Labor der Stadtwerke Wiesbaden gegeben und dort auf die Gehalte an Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium untersucht. Die Untersuchung erfolgte im Normalbetrieb des ESWE-Labors am dortigen ICP-OES-Gerät (vgl. Kap. 4.4.1, S.109ff).

Der Filtrerrückstand wurde fotografisch aufgenommen (Foto 4-6) und unter dem Auflichtmikroskop betrachtet. Außer der optischen Bewertung der Hauptbestandteile wurden keine weiteren Untersuchungen vorgenommen, da die Gehalte des Filtrerrückstandes inhaltlich den Feststoffproben entsprechen mussten und diese weitergehend untersucht wurden.

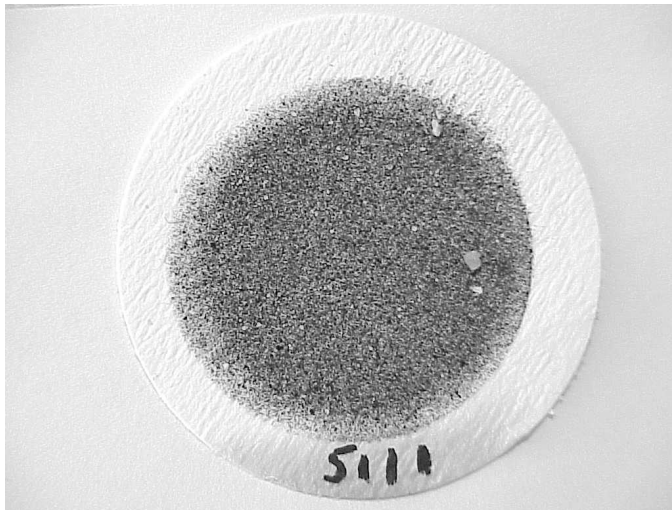


Foto 4-6: Aufnahme des Filtrerrückstands der Wasserproben, hier: Brunnen 51, Container 1 (entspricht dem unteren Filtermeter [WIACEK, 2004])

4.3.2 Sedimentproben

Beim Abpumpen nach der Ultraschallbehandlung zeigte sich bei allen fünf Brunnen, dass der untere Filtermeter die größte Feststofffracht aufwies, erkennbar an der starken Trübung des abgepumpten Wassers. Deshalb wurde der jeweils erste Container jeder Regenerierung zur Entnahme von Proben der abgepumpten Feststoffe ausgewählt.

Hierzu wurde der Container nach dem Befüllen verschlossen und über Nacht ruhig stehen lassen. Am nächsten Vormittag hatte sich dann jeweils der Großteil der Partikel absedimentiert und am Grund des Containers gesammelt.

Nach Beurteilung der Wassertrübung, d. h. wenn das Wasser im Container annähernd klar war, wurde das untere Ventil vorsichtig geöffnet und das ablaufende Wasser durch ein Sieb mit der Maschenweite 2µm laufen lassen.

Die sich im Sieb ansammelnden Feststoffe wurden dann in Plastikbeutel überführt. Diese wurden fest verschlossen und bis zur Probenaufbereitung in einem Kühlschrank gelagert.

Zur Bestimmung der Inhalte wurden gewählt:

- Infrarot-Spektroskopie zur qualitativen Bestimmung organischer Anteile
- RFA für die Analyse der Sedimentproben auf den Elementgehalt
- RDA zur qualitativen Beschreibung des Vorliegens kristalliner Mineralphasen

Nach Auswahl der geeigneten, anwendbaren Analyseverfahren war der erste Aufbereitungsschritt das Trocknen und Homogenisieren der Proben.

Die stark wasserhaltigen Schlämme wurden dazu aus den Plastikbeuteln in Eindampfschalen gegeben und ca. 24 Stunden im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. Von zwei der fünf Proben wurde Material zurückgehalten und anschließend bei 30 °C schonend getrocknet. Diese beiden Proben sollten zum einen dem Vergleich der beiden Trockenverfahren und ihrer Auswirkungen auf die Probe dienen und zum anderen per Infrarot-Spektroskopie untersucht werden. Die Durchführung der Messungen wurde von der Arbeitsgruppe am Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz für zwei der fünf Proben kostenfrei angeboten. Die Proben sollten dafür möglichst wenig thermisch beansprucht sein, weswegen bei nur 30 °C getrocknet wurde.

Die getrockneten Proben wurden dann in entsprechend beschriftete Probengläser mit Schraubverschluss umgefüllt. Die Beschriftung enthielt jeweils die Nummer des Brunnens und das Datum des Trocknens. Die beiden Extra-Proben wurden zusätzlich mit den Buchstaben „IR“ (für Infrarot-Spektroskopie) gekennzeichnet.

Für die weitere Analyse mussten die Proben homogenisiert werden. Dazu wurden sie im Probenaufbereitungslabor des Institutes für Geowissenschaften an der kleinen Probenmühle aufgemahlen. Jede Probe wurde zwei bis drei Minuten in der Mühle belassen. Das erhaltene, sehr feinkörnige Material wurde anschließend wieder in die Probengläser zurückgefüllt.

Je nach dem Ausmaß der Brunnenalterung der einzelnen Brunnen standen unterschiedliche Mengen an Probenmaterial zur Verfügung.

Erste Beobachtungen, die sich bei der Aufbereitung der Proben zeigten, ließen Rückschlüsse auf Eigenschaften der Brunnen bzw. der Brunnenbeläge zu. Dies waren:

- Die Proben 20a und 29a waren deutlich dunkler. Dies deutet auf einen hohen Gehalt organischer Bestandteile hin.
- Die Proben 20a und 29a waren sehr schwer aus der Gesteinsmühle zu entfernen. Diese musste in deutlich mehr Durchgängen gesäubert werden, um von Probenrückständen befreit zu sein. Das Probenmaterial war also feiner, wodurch es stärker an den Oberflächen der Mühle haftete.
- Die Proben 51a und 54a glitzerten stärker als die anderen Proben. Sie enthielten vermutlich mehr Sand- und Tonanteile, erkennbar durch Glimmerminerale. Auch hier unterstützt die hellere, leicht in gelbbraun-ocker übergehende Farbe diese Beobachtung.

Das weitere Vorgehen ist im nachfolgenden Kapitel Analytik beschrieben, die Ergebnisse der Messungen werden in Kap. 6.3 ab S.206 dargestellt und diskutiert.

4.4 Analytik

Sowohl zur Analyse der Wasserproben als auch der Sedimentproben wurden gängige Methoden der Wasseranalytik bzw. Geochemie angewendet. Die Analytik wurde bei Anwendung von Verfahren mit Einzelementbestimmung auf die vier Hauptelemente Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan beschränkt.

Die Wasseranalysen wurden im Labor der Stadtwerke Wiesbaden mittels ICP-OES analysiert, die Sedimentproben am Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz. Die Analysen wurden vom Fachpersonal der jeweiligen zertifizierten Labors durchgeführt. An dieser Stelle sollen die Grundzüge der eingesetzten Verfahren beschrieben werden. Ausführliche Beschreibungen finden sich in Standardwerken zur Instrumentellen Analytik sowie in Lehrbüchern zu einzelnen Methoden und deren Anwendung.

4.4.1 ICP-OES

Allgemeines

Das Verfahren zählt zu den atomspektrometrischen Methoden. Die Abkürzung steht für „Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy“. Der Name enthält somit sowohl das Verfahren zur Anregung als auch das Prinzip der Messung.

Das zugrunde liegende Prinzip ist die Aussendung elektromagnetischer Strahlung im Bereich des optischen Spektrums beim Übergang von Elektronen der äußeren Schalen der Atomhülle von einem höheren in einen niedrigeren Energiezustand. Der zu analysierende Stoff ist dabei selbst der Emittent der Strahlung.

Nach Einstein besteht folgender Zusammenhang zwischen Energie und Wellenlänge:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

mit E – Energie der Strahlung (Photoenergie)

h – Plancksches Wirkungsquantum (6,626 · 10⁻³⁴ Js)

c – Lichtgeschwindigkeit (3 · 10⁸ m/s)

λ - Wellenlänge

[aus SCHWEDT, 1995]

Nach dieser Formel ist jedem Elektronenübergang zwischen zwei Energieniveaus eine Spektrallinie mit bestimmter Wellenlänge zugeordnet. Aus der Intensität der Spektrallinie lässt sich die Menge der zu messenden Elemente in der Probe bestimmen. Aus der so genannten Boltzmann-Verteilung ergibt sich eine Intensitätsgleichung der Linienintensitäten, welche die Abhängigkeit der Teilchenzahl N_0 der zu bestimmenden Atomart von der gemessenen Intensität der Spektrallinie darstellt [SCHWEDT, 1995].

Die Messung erfolgt in Plasma. Das ist ein Gas, das neben den Atomen auch Moleküle und Ionen in allen Anregungszuständen, d. h. Elektronen bzw. Kationen enthält, elektrisch leitfähig ist und Strahlung abgibt, nach außen jedoch neutral ist. Verwendet wird üblicherweise das Edelgas Argon (Ar), da es eine niedrige Ionisierungsenergie hat und chemisch inert ist.

Ein ICP-OES-Spektrometer besteht grundsätzlich aus:

- einem Hochfrequenz-Generator (Induktionsspule) zur Erzeugung des Plasmas
- dem Plasma-Brenner (drei konzentrische Quarzröhren, in denen Argon und Probe strömen) zur Anregung der Probe
- dem Proben-Zerstäuber
- dem Spektrometer, d. h. dem Detektor für die emittierte Strahlung.

Das Argon durchströmt die drei Quarzröhren des Plasma-Brenners. Mit Hilfe eines Zündfunken wird es ionisiert und es entsteht eine Plasma-Flamme. Im elektromagnetischen Feld der Induktionsspule, die um die Quarzröhren gewickelt ist, werden die Ionen und Elektronen stark beschleunigt. Die Probe wird über den Zerstäuber als Aerosol in der Inneren der drei Quarzröhren der Plasma-Flamme zugeführt. Eine schematische Darstellung zeigt Abb. 4-11:

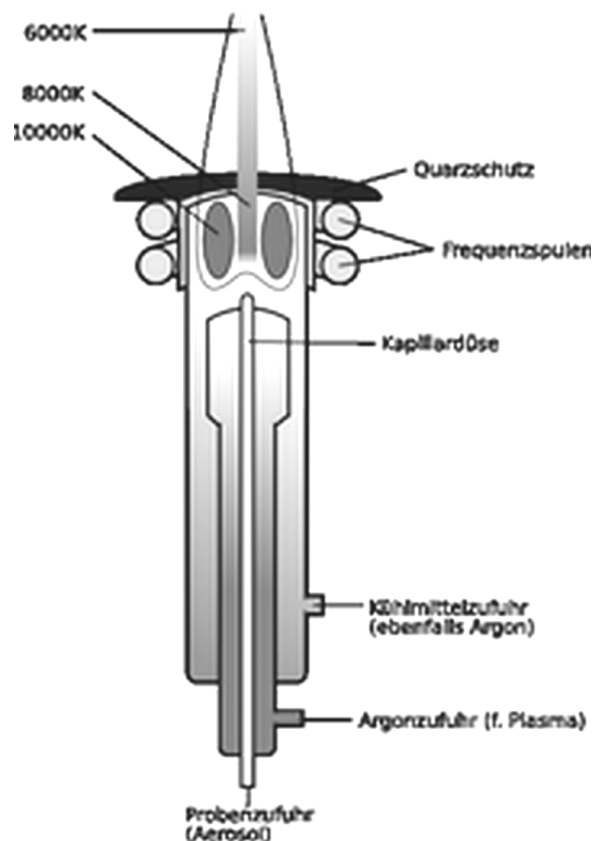


Abb. 4-11: Schematische Darstellung der Plasma-Flamme mit Kennzeichnung der Temperaturbereiche [aus www.wikipedia.de, 01.03.2005]

Aufgrund der hohen Energiezufuhr und der hohen Temperatur werden die Atome dissoziiert und stark beschleunigt.

Durch Zusammenstöße mit den freien Elektronen des Plasmas gelangen sie in einen angeregten Zustand. Dabei begeben sich Elektronen einer äußeren Schale auf höhere Energieniveaus. Da dieser Zustand jedoch energetisch nicht stabil ist, begeben sich die Elektronen nach kurzer Zeit wieder auf das niedrigere Energieniveau. Die Energiedifferenz wird dabei in Form von Licht freigesetzt. Dieses wird dann am Spektrometer gemessen.

Spektrometer gibt es mit verschiedenen Aufbau-Typen. Prinzipiell unterschieden werden Sequenz-Spektrometer, die zu einem bestimmten Zeitpunkt nur bei einer festgelegten Wellenlänge messen können (Monochromatoren) und Simultan-Spektrometer. Für Wasserproben werden i. d. R. letztere verwendet, da sie die Multi-Element-Analyse erlauben.

Bei Simultanspektrometern wird die emittierte polychromatische Strahlung an einem in eine konkave Oberfläche geritzten Gitter in seine Spektralanteile zerlegt. Das Licht fällt durch einen Eintrittsspalt auf das Gitter und von diesem auf bis zu 60 verschiedene Austrittsspalte und zugehörige Detektoren des jeweiligen Spektralbereiches (d. h. der jeweiligen Wellenlänge). Das Prinzip zeigt Abb. 4-12:

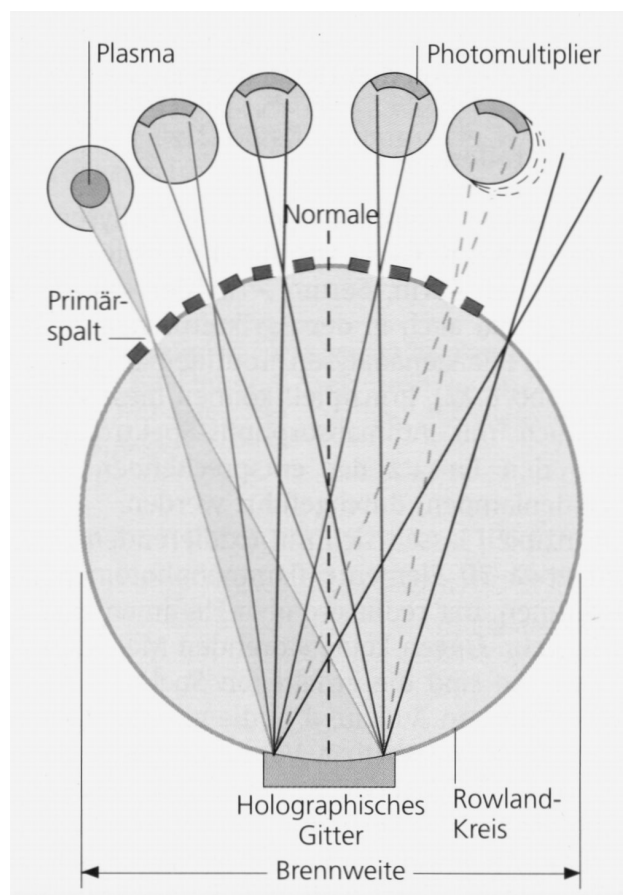


Abb. 4-12: Prinzip des Simultanspektrometers für Multi-Element-Analysen [aus SCHWEDT, 1995:205]

Ein Photomultiplier für jeden Spektralbereich, bestehend aus Photozelle und Verstärker, zeichnet das ankommende Licht auf und wandelt es in ein elektrisches Signal um. Die Zahl der Lichtimpulse an der Photozelle ist durch die Intensität der Spektrallinie wiedergegeben.

Jedes Element weist Spektrallinien in einem charakteristischen Wellenlängenbereichen auf (Abb. 4-13). Die Intensitäten der jeweiligen Spektrallinien geben das Mengenverhältnis in der Probe wieder. Die Auswertung erfolgt über spezielle Mess-Software.

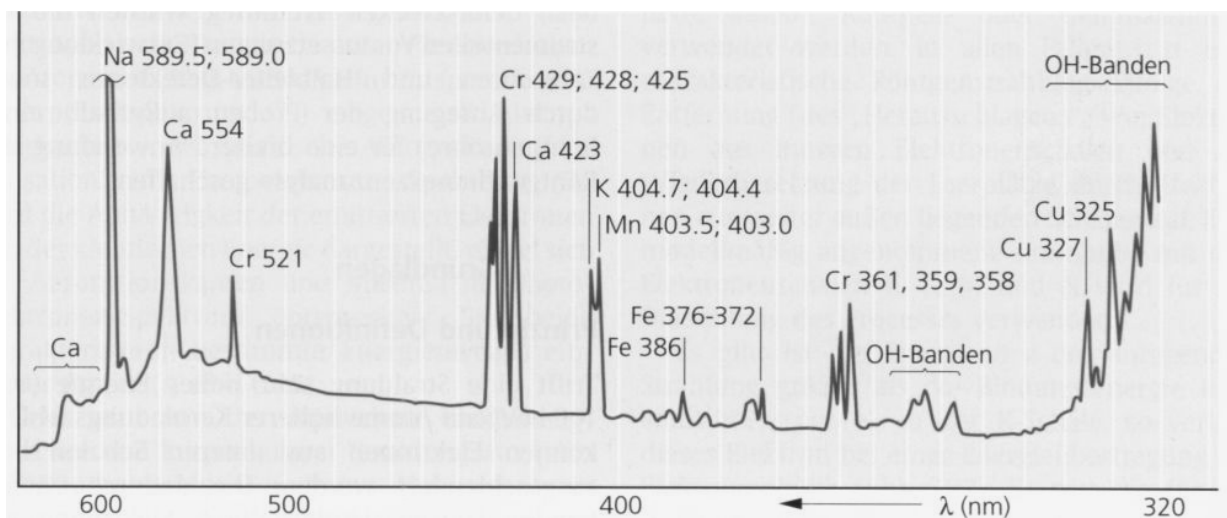


Abb. 4-13: Beispiel eines Emissionsspektrums aus einer Multi-Element-Analyse [aus SCHWEDT, 1995:207]

Probenvorbereitung und Messung

Im Labor der Stadtwerke Wiesbaden steht ein Gerät der Fa. Perkin-Elmer zur Verfügung. Die Messungen der Gehalte an Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan in den Wasserproben des bei der Regenerierung abgepumpten Wassers wurden im Juni 2004 durch das Laborpersonal vorgenommen.

Probenmaterial war das Filtrat der entnommenen Wasser-Mischproben pro Container des abgepumpten Wassers bei den Ultraschall-Behandlungen der fünf Brunnen.

Die Daten wurden als Konzentrationen [mg/l] angegeben und, da pro Container mit einem Kubikmeter Inhalt genau 1 l Probe genommen worden war, auf die Absolutgehalte in Gramm pro Container und damit pro Filtermeter umgerechnet.

Die Ergebnisdarstellung erfolgte in Form einer Excel-Tabelle, in der pro Brunnen tiefendifferenziert die Gehalte der vier genannten Ionen in g/m³ sowie die Gesamtsummen der Elemente in g angegeben waren (vgl. Tab. 6-1, S.208). Die gemessenen Werte wurden anschließend mit der Bilanzierung vorangegangener chemischer Regenerierungen verglichen. Die Ergebnisse werden im Kap. 6.3 ab S.206 vorgestellt und diskutiert.

4.4.2 IR-Spektroskopie

Allgemeines

Die Infrarot-Spektroskopie wurde als ergänzende Methode herangezogen, um einen ersten Überblick über die Zusammensetzung der Feststoffproben zu erhalten. Hauptziel war es, zu ermitteln, ob und zu welchem Anteil organische Bestandteile in den Proben enthalten waren. Die Messungen wurden an zwei Proben durchgeführt und die Ergebnisse als für alle Proben geltend angenommen.

Die Infrarot-Spektroskopie zählt zu den molekülspektrometrischen Methoden. Dazu zählen außerdem die Verfahren Mikrowellen-Absorption und UV- / Vis-Spektroskopie, die sich im erfassten Spektralbereich und in der Art der Erzeugung der messbaren Strahlung unterscheiden. Die Infrarot-Spektroskopie misst, im Infrarot-Bereich des elektromagnetischen Spektrums (Abb. 4-14) auftretende, Wechselwirkungen zwischen Molekülen und Lichtquanten unterschiedlicher Energie.

Art des Übergangs	Molekül-Rotation			Molekül-schwingung			Elektronen-anregung					
	Mikrowellen-Absorption			Infrarot-Spektroskopie			UV- / Vis-Spektroskopie					
Spektralbereich	Radiowellen		Mikrowellen		Infrarot (IR)			Vis	UV	Röntgenstrahlen		
					F	M	N					
Wellenlänge [m] $\lambda = \frac{c}{\nu}$	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰
				1 cm				1 μm			1 nm	1 Å
Frequenz [Hz] $\nu = \frac{c}{\lambda} = c \cdot \tilde{\nu}$	10 ⁻⁷		10 ⁻⁹	10 ⁻¹¹			10 ⁻¹³		10 ⁻¹⁵		10 ⁻¹⁷	
Wellenzahl $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$ [cm ⁻¹]			10 ⁻³	10 ⁻¹	10		10 ³		10 ⁵		10 ⁷	

Abb. 4-14: Elektromagnetisches Spektrum [aus SCHWEDT, 1995:219]

Das Verfahren beruht auf der Anregung mechanischer Schwingungen in einem Molekül durch die Absorption von Lichtenergie. Die Moleküle müssen dabei IR-aktiv sein, d. h. es müssen bewegte elektrische Ladungen zur Verfügung stehen (Dipolmoment).

Lichtenergie pflanzt sich in Form elektromagnetischer Wellen fort. Die Frequenz ν der Wellen ergibt sich aus der Lichtgeschwindigkeit c und der Wellenlänge λ aus:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Die Angabe der Schwingungsfrequenz erfolgt in Form der Wellenzahl $\tilde{\nu}$. Das ist der Kehrwert der Wellenlänge, also:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$$

In allen Molekülen führen die Atome Eigenschwingungen aus, die sich aus der Wirkung der innermolekularen Anziehungs- und Abstoßungskräfte ergeben. Trifft nun ein Lichtquant auf solch ein Molekül, wird diesem Energie zugeführt. Unter der Voraussetzung, dass die Frequenz der Eigenschwingung gleich der Frequenz der Strahlung ist (Resonanzbedingung) und das Molekül IR-aktiv ist, geht das Molekül dabei in einen energetisch höheren Zustand über. Dabei ändert sich die Frequenz der Molekülschwingung. Ein Teil der Energie des Lichtquants wird absorbiert, der Rest wird durchgelassen.

Infrarot-Spektren zeigen die Durchlässigkeit der Probe, abgetragen gegen die Wellenzahl. Bestimmte Strukturgruppen chemischer Verbindungen weisen dabei charakteristische Absorptionsbanden auf. Diese werden auch als Schlüsselfrequenzen bezeichnet [SCHWEDT, 1995]. Komplette Moleküle besitzen ebenfalls ein charakteristisches Absorptionsspektrum. Dieses wird als „fingerprint“ (engl. für Fingerabdruck) bezeichnet.

Die IR-Spektroskopie nutzt also elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen im Infrarot-Bereich. Die Moleküle der Probe absorbieren, entsprechend ihrer Eigenschwingungsfrequenz Anteile der Wellen. Im Spektrum zeigt sich dies in Form verminderter Durchlässigkeit in den entsprechenden Wellenlängenbereichen, dargestellt in Form der Wellenzahl. Aus den negativen Peaks der Durchlässigkeit lassen sich also die zu diesen Wellenzahlen zugehörigen Moleküle bzw. funktionellen Gruppen ermitteln.

Infrarot-Spektrometer (Doppelstrahlgeräte) bestehen i.A. aus:

- einer Lichtquelle, i. d. R. ein „Nernst-Stift“, der beim Erhitzen auf ca. 1600°C Strahlung im Infrarot-Bereich aussendet
- einem Teiler für den Lichtstrahl, der die Strahlung in zwei Bündel gleicher Intensität aufteilt
- dem Probenaufnehmer für die IR-Küvette
- einem Drehspiegel, der den Lichtstrahl durch die Probe hindurch auf einen Monochromator lenkt und dabei periodisch zwischen Mess- und Vergleichsstrahl hin und her schaltet
- einem Monochromator
- einem Thermoelement als Empfänger.

Die Analyse lässt sich grundsätzlich in allen Aggregatzuständen der Probe durchführen. Gemessen werden immer parallel die Probe und, als Blindmessung, das reine Lösungs- bzw. Trägermaterial. Abb. 4-15 zeigt das Prinzip:

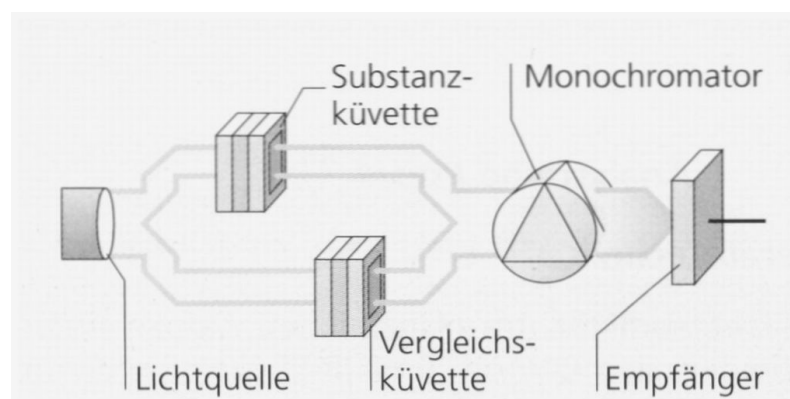


Abb. 4-15: Prinzip eines Doppelstrahlspektrometers [nach SCHWEDT, 1995:242]

Probenvorbereitung und Messung

Im Rahmen des Projektes wurden zwei der fünf Feststoffproben am Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz mit der Infrarot-Spektroskopie untersucht. Die Durchführung oblag komplett den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe für IR-Spektroskopie des Institutes für Geowissenschaften.

Die Analysen erfolgten an Presslingen aus dem gut homogenisierten Probenmaterial und Kaliumbromid (KBr) als Trägermaterial.

Die Auswertung war rein qualitativ, d. h. es wurde lediglich überprüft, ob das Probenmaterial organische Bestandteile enthielt.

Die Proben wurden in Pulverform übergeben. Die Ergebnisse wurden als Spektren dargestellt und mit Anmerkungen zu den gemessenen Peaks versehen.

Darüber hinausgehende Auswertungen oder Mengebestimmungen wurden nicht vorgenommen. Die Ergebnisse der beiden Proben waren erwartungsgemäß sehr ähnlich und zeigten deutlich das Vorhandensein organischer Bestandteile. Diese Aussage wurde als generelle Annahme auf die Proben aus den anderen Brunnen übertragen.

Eine genaue Analyse der organischen Bestandteile in folgenden Bearbeitungsschritten konnte jedoch nicht durchgeführt werden, da entsprechende Geräte und Methoden nicht zur Verfügung standen.

4.4.3 RFA

Allgemeines

Die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ist eine der klassischen physikalischen Methoden zur zerstörungsfreien Multielementanalytik [HAHN-WEINHEIMER, 1995]. Sie zählt, wie ICP-OES, zu den atomspektrometrischen Methoden und nutzt Röntgenstrahlung zur Anregung der Atome. Gemessen wird ebenfalls im Bereich der Röntgenstrahlung, der so genannten Fluoreszenzstrahlung, die von der Probe als Sekundärstrahlung emittiert wird.

Aus dem Spektrum der angeregten Sekundärstrahlung kann die Zusammensetzung der Probe ermittelt werden. Dabei gilt eine lineare Abhängigkeit zwischen der Frequenz der Röntgenlinie der K-Serie, d. h. der freiwerdenden Energie beim Übergang eines Elektrons von einer äußeren (L- oder M-Schale) auf die ganz innere Schale der Atomhülle (K-Schale), und der Ordnungszahl des Atoms (Moseleysches Gesetz).

Das zugrunde liegende Prinzip ist also die Messung freiwerdender Energie bei Elektronenübergängen zwischen den Schalen der Atomhülle eines Atoms, das mit Röntgenstrahlung angeregt wurde (Abb. 4-16).

Trifft energiereiche Strahlung auf Atome und ist die Energie der Strahlung höher als die Bindungsenergie von Elektronen auf der K-Schale der Atomhülle, so können Elektronen aus der inneren Schale herausgeschleudert werden. Dabei entstehen auf der Atomhülle Lücken. Das Atom befindet sich im angeregten Zustand. Diese Lücken werden dann durch Elektronen von äußeren Schalen wieder aufgefüllt.

Beim Übergang von einer Schale zur nächsten wird Energie im Bereich des Röntgenspektrums freigesetzt. Man bezeichnet dies auch als „charakteristische Fluoreszenzstrahlung“ des Atoms.

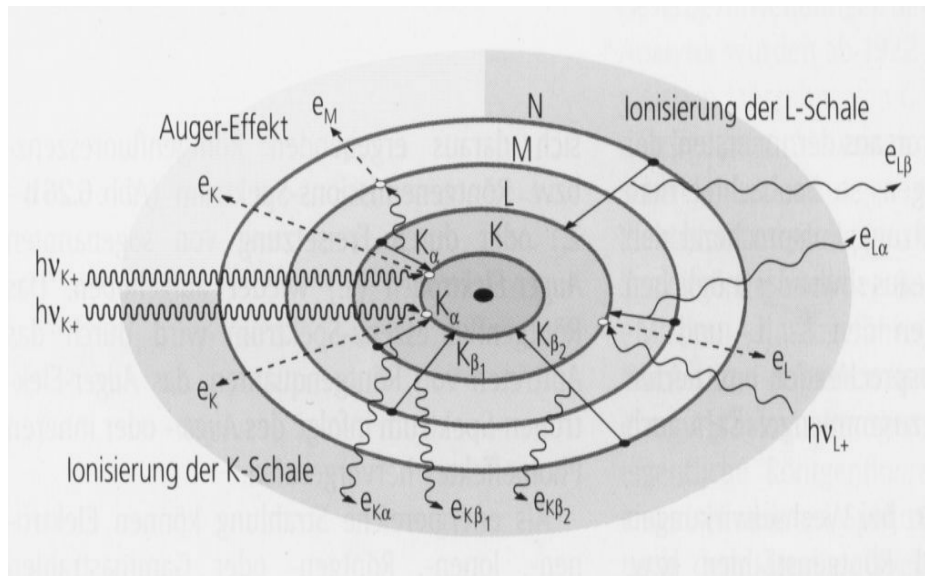


Abb. 4-16: Prinzip der Anregung von charakteristischer Fluoreszenzstrahlung [aus SCHWEDT, 1995:210]

Der Betrag der freiwerdenden Energie ergibt sich aus der Differenz zwischen den Energieniveaus der beteiligten Schalen.

Neben der Erzeugung von Fluoreszenzstrahlung können noch andere Effekte bei der Wechselwirkung zwischen Röntgenstrahlung und Atomen bzw. Elektronen entstehen, z. B. die Absorption eines Teils der Primärstrahlung unter Abgabe von Photoelektronen (Photoionisation des Atoms) oder der Auger-Effekt (innerer Photoeffekt), die hier aber nicht näher betrachtet werden sollen. Sie können jedoch zur Verringerung der so genannten Fluoreszenzausbeute führen. Diese beschreibt das Verhältnis der Zahl der erzeugten Fluoreszenzstrahlungsquanten zur Zahl der erzeugten Leerstellen in derselben Zeit. Sie steigt mit zunehmender Ordnungszahl des Atoms. Je nach Gerät sind Analysen für die Elemente Beryllium (OZ = 4) bis Uran (OZ = 92) möglich.

Gerätetechnisch werden energiedispersive und wellenlängendispersive RFA unterschieden. Erstere nutzen Detektoren, die die Energie eintreffender Fluoreszenzstrahlungsquanten messen, bei letzteren wird ein Analysatorkristall genutzt, um die eintreffende Röntgen-Sekundärstrahlung in die einzelnen Wellenlängen zu zerlegen. Die Elemente werden dabei qualitativ anhand des Beugungswinkels der Röntgenstrahlung erfasst und quantitativ anhand der Intensität der Strahlung. Wellenlängendispersive RFA (WDRFA) verfügt über eine deutlich höhere Energieauflösung.

Energiedispersive RFA (EDRFA) ist effektiver, d. h. die zugeführte Energie wird um ein Vielfaches besser ausgenutzt als bei den wellenlängendispersiven Geräten.

Da die Proben mittels der WDRFA analysiert wurden, wird im Folgenden auf diesen Gerätetyp eingegangen.

Grundsätzlich bestehen Röntgenspektrometer für die WDRFA aus:

- einer Strahlungsquelle, üblicherweise werden hierfür Röntgenröhren eingesetzt
- einem Selektivfilter, um die Strahlung der Quelle von der Sekundärstrahlung zu trennen
- einem Kollimator, der die divergente Strahlung parallel bündelt
- einem Analysatorkristall, zur Beugung und Zerlegung der Fluoreszenzstrahlung in die einzelnen Frequenzanteile
- Detektoren für die einzelnen Frequenzbereiche, üblicherweise Szintillationszähler oder Zählrohre

In der Röntgenröhre wird die primäre Röntgenstrahlung erzeugt. Dabei werden durch eine angelegte Hochspannung durch Glühemission Elektronen aus einer Metallkathode freigesetzt und in einer Vakuumröhre beschleunigt. Sie fallen auf eine Anode und werden dabei stark abgebremst. Dabei entsteht neben Wärme die so genannte Bremsstrahlung. Dabei handelt es sich um Röntgenstrahlen mit Wellenlängen zwischen 10 und 0,01 nm. Diese Primärstrahlung fällt nun auf die Probe und es wird, je nach Elementgehalt charakteristische Fluoreszenzstrahlung emittiert (Sekundärstrahlung). Diese wird dann durch einen Kollimator auf ein Analysatorkristall gelenkt, der, je nach seinem Winkel bestimmte Wellenlängen zum Detektor weiterleitet (Abb. 4-17).

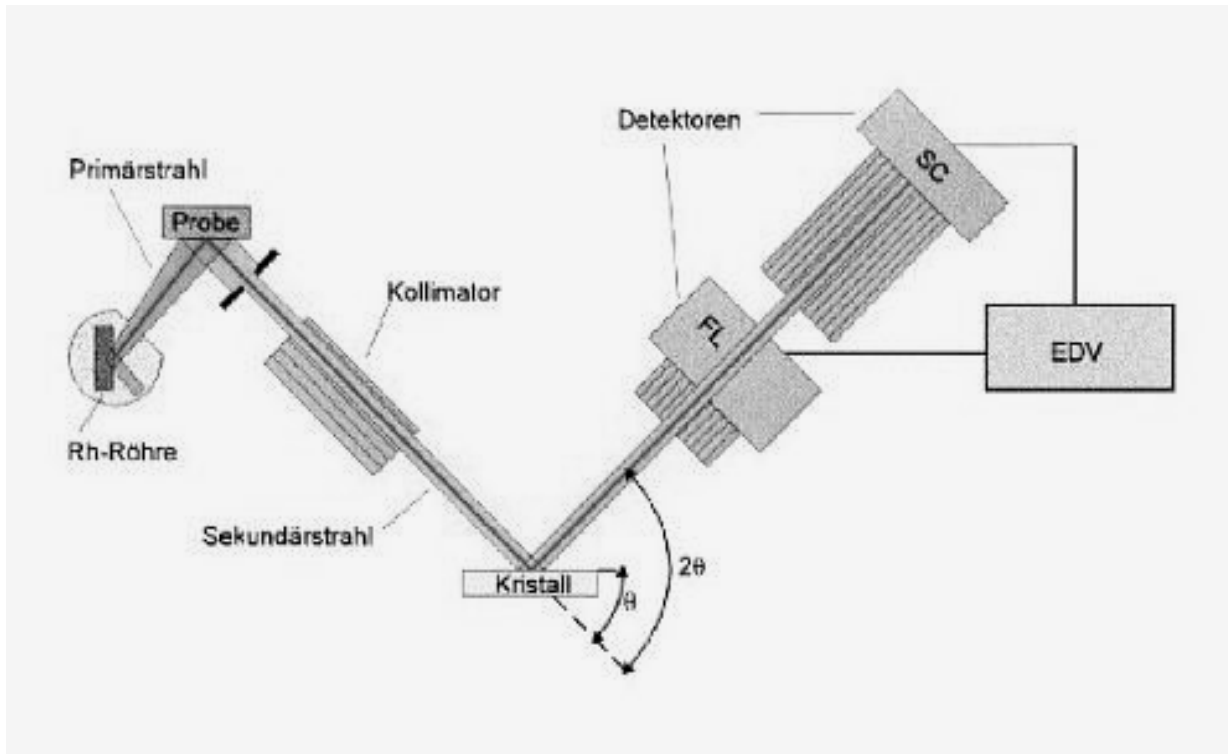


Abb. 4-17: Strahlengang in einem wellenlängendispersiven Röntgenspektrometer [aus www.uni-mainz.de, 01.03.2005]

Probenvorbereitung und Messung

Im Rahmen des Projektes wurden die Feststoffproben der fünf regenerierten Brunnen mittels WDRFA auf Elementgehalte analysiert. Die Messungen wurden im RFA-Labor des Institutes für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz durchgeführt. Dort steht ein Röntgenspektrometer der Fa. Phillips zur Verfügung.

Gemessen wurden die Hauptelemente Si, Al, Ti, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P, Cr und Ni an Schmelztabletten und die Spurenelemente Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Pb, Th und U an Pulvertabletten. Die Messungen wurden durch das Fachpersonal des Institutes für Geowissenschaften durchgeführt.

Zur Herstellung der Schmelztabletten für die Hauptelementanalyse wurde wie folgt vorgegangen:

Ausgangsmaterial war das getrocknete und aufgemahlene Pulver aus den absedimentierten Feststoffen des jeweils unteren Filtermeters der Brunnen (vgl. Kap.4.3.2).

Da sich organische Bestandteile bei der Herstellung der Schmelztabletten und der nachfolgenden Analysen störend auswirken, war der erste Schritt der Probenaufbereitung die Ermittlung des Glühverlustes. Dadurch wurde gleichzeitig der mengenmäßige Anteil organischer Bestandteile in der Probe erfasst und selbige durch das Verbrennen entfernt. Das geglühte Material wurde dann weiterverarbeitet.

Zur Bestimmung des Glühverlustes wurden 2 bis 3 g jeder Probe eingewogen und für 2 Stunden bei 1000°C im Ofen belassen. Nach dem Abkühlen im Exsikkator wurden sie wiederum ausgewogen und die Differenz der Gewichtsprozent berechnet.

Das geglühte Material wurde dann im Mörser homogenisiert. Davon wurden 0,8 g mit 4,8 g Schmelzmittel vermischt und in Platintiegeln geschmolzen. Nach ca. 6 Minuten wurde die Schmelze vom Brenner genommen und abgekühlt. Aus der Form gelöst, lagen die fertigen Schmelztabletten für die Hauptelementanalyse vor.

Die Proben der Brunnen 54a und 51a wurden 1:1 mit SiO₂ verdünnt, nachdem sie beim Abkühlen immer wieder gerissen waren. Dazu wurden statt 0,8 g Probenmaterial 0,4 g der Probe und 0,4 g SiO₂-Pulvers mit dem Schmelzmittel vermischt. Die Ergebnisse mussten für diese Proben entsprechend zurückgerechnet werden.

Die Pulvertabletten für die Spurenelementanalyse wurden gepresst. Dazu wurden 6 g Probe mit der definierten Menge eines speziellen Harzes und eines Härters im Mörser gut vermischt und homogenisiert. Die Mischung wurde dann in eine Pressform gegeben und für 20 s ca. 7 t Gewicht ausgesetzt. Anschließend wurden die Pulvertabletten zum Aushärten für mehrere Tage im Trockenschrank bei ca. 30°C gelagert.

Die Messungen wurden von den Mitarbeitern des RFA-Labors durchgeführt. Die Ergebnisse der Analysen wurden in Form einer Excel-Tabelle übergeben, die dann weiter aufbereitet wurde. Dabei wurden die gemessenen Oxide auf die Elemente umgerechnet und über die Einwaage auf Gramm pro Kilogramm Trockensubstanz [g/ kg TS] zurückgeführt. Diese Werte wurden dann mit den Angaben der Belagsanalysen aus den Altdaten zu den Brunnen verglichen und ausgewertet.

Die Ergebnisdarstellung folgt in Kap. 6.3 ab S.206.

4.4.4 RDA

Allgemeines

„RDA“ steht für die Röntgendiffraktometrie- Analyse (Diffraction = lat. Beugung). Sie dient der Strukturaufklärung an Proben und ist eine zerstörungsfreie Methode.

Prinzip der Messung ist die Beugung von Röntgenstrahlen an Kristallgittern. Die Gitterabstände müssen dazu im Bereich der Wellenlängen (0,01 – 10 nm) liegen. Aus den Beugungserscheinungen wird dann die räumliche Struktur der Kristalle abgeleitet, woraus wiederum auf den Kristall selbst rückgeschlossen werden kann.

Röntgenstrahlen unterliegen dabei den gleichen physikalischen Erscheinungen wie Licht bzw. elektromagnetische Strahlung im Allgemeinen. Trifft der Strahl auf ein Hindernis, wird er abgelenkt und gestreut. In Kristallen wird der einfallende Röntgenstrahl an den Atomen einer Netzebene, das ist eine Schnittebene durch den Kristall, die einen Gitterpunkt enthält, in viele Sekundärwellen zerlegt. Diese summieren sich durch Interferenz zur reflektierten Welle. Abb. 4-18 zeigt das Prinzip:

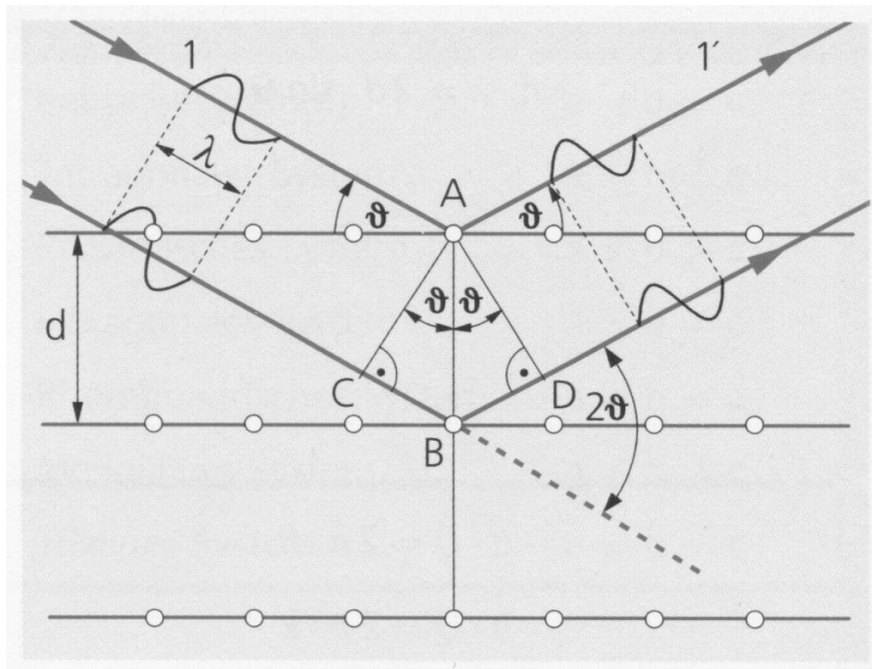


Abb. 4-18: Reflexion an Netzebenen eines Kristalls [aus SCHWEDT, 1995:414]]

Jede kristalline Substanz hat dabei ein charakteristisches Beugungsbild in Abhängigkeit der Netzebenenabstände im Kristall.

Die zugrunde liegende mathematische Beschreibung ist die Bragg-Gleichung:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

mit d – Netzebenenabstand

λ - Wellenlänge der einfallenden Strahlung

θ - Einfallswinkel

n – Ordnung des Beugungsmaximums (natürliche Zahl)

[Wikipedia, 07.03.05]

Unterschieden werden Einkristall- und Pulververfahren. Letztere dienen der quantitativen Analyse von Gemischen kristalliner Substanzen.

Die Analyse kann mit festem Einstrahlwinkel θ und variabler Wellenlänge λ erfolgen (Laue-Verfahren) oder mit fester Wellenlänge λ und variablem Winkel θ (Drehkristall-Verfahren und Debye-Scherrer-Verfahren). Für Analysen an Pulvergemischen wird letzteres Verfahren eingesetzt und, wie oben beschrieben, aus den Reflexionswinkeln auf die in der Probe enthaltenen Kristalle zurückgeschlossen.

Die zu untersuchende Substanz wird dazu mit einem Röntgenstrahl der Wellenlänge λ bestrahlt. Dabei wird der Einfallswinkel der Röntgenstrahlung kontinuierlich verändert. Bei dem Winkel, der die Bragg-Gleichung erfüllt, findet eine so genannte „konstruktive Interferenz“ statt, d. h. bei einem Netzebenenabstand d und einem Einfallswinkel θ wird der einfallende Strahl um 2θ abgelenkt. Alle anderen Strahlen werden ausgelöscht. Dabei tritt ein beobachtbares Röntgenbeugungsmaximum auf. Gemessen wird die Intensität der reflektierten Welle bei diesen Winkeln 2θ . Zur Identifizierung des Kristalls wird nun aus der Braggschen Gleichung der Netzebenenabstand d bestimmt. Dieser ist eine Mineralkonstante und führt zu den in der Probe enthaltenen Kristallen bzw. Mineralen. Im Spektrum einer RDA-Messung ist die gemessene Intensität in counts per second (cps) gegen den Winkel 2θ abgetragen. Mittels spezieller Software werden aus den Peaks der Kurve und den dazugehörigen Winkeln 2θ die Mineralkonstanten d und damit die in der Probe enthaltenen Minerale bestimmt.

Die Geräte sind prinzipiell aus:

- einer Strahlungsquelle (Röntgenröhre, Elektronen- oder Neutronenquelle)
- einer Blende, zur Ausrichtung der Primärstrahlung auf die Probe
- einem Monochromator (Analysatorkristall)
- und einem entsprechenden Detektor

aufgebaut [SCHWEDT, 1995].

Die primäre Röntgenstrahlung wird mit der Blende zu einem monochromatischen Röntgenstrahl gefiltert und trifft auf die Probe. Dort wird sie an den Atomen elastisch gestreut und gebeugt. Ist die Bragg-Gleichung erfüllt, wird ein Sekundärstrahl im Winkel 2θ von der Probe über einen Monochromator zum Detektor abgegeben. Der Detektor misst die Intensitäten in Abhängigkeit von der räumlichen Lage, d. h. vom Winkel 2θ . Das Prinzip zeigt Abb. 4-19:

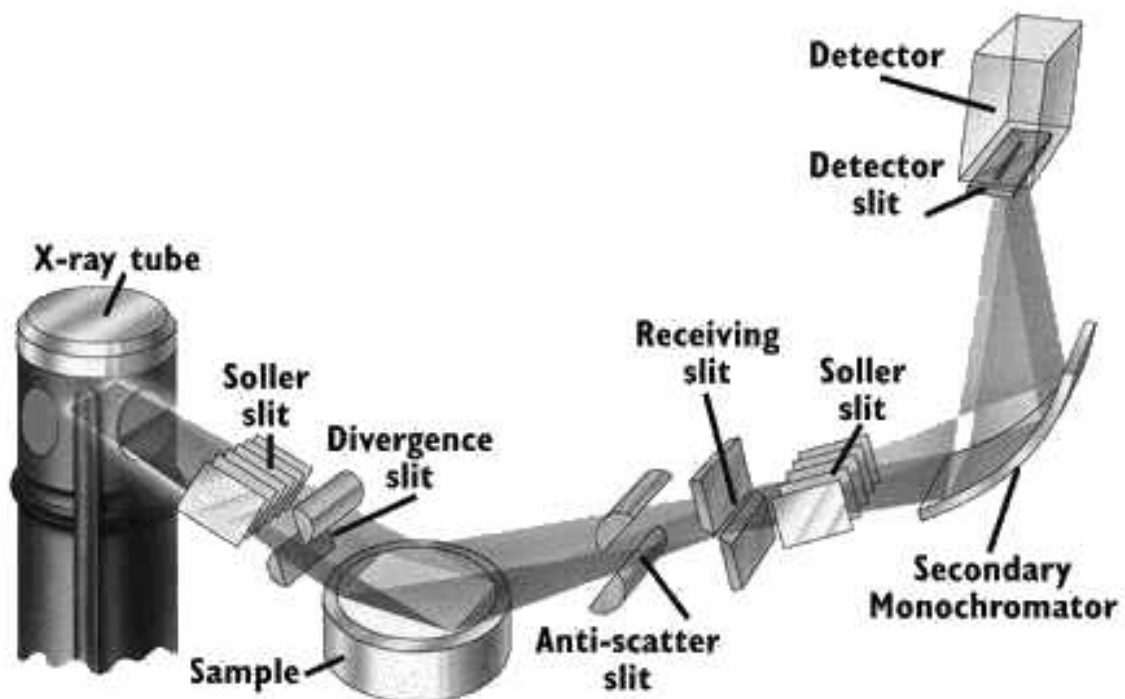


Abb. 4-19: Strahlengang in einem Bragg-Brentano-Röntgendiffraktometer [aus <http://kristall.uni-mki.gwdg.de>, 01.03.2005]

Probenvorbereitung und Messung

Die Feststoffproben der fünf regenerierten Brunnen wurden am Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz mit einem Pulverdiffraktometer des Typs Seifert XRD 3000 TT analysiert.

Hierfür wurden die Proben in Pulverform nochmals gut homogenisiert und anschließend auf spezielle runde Objektträger gepresst. Dabei handelte es sich um flache Metallzylinder mit ca. 2 cm Durchmesser, die nach unten mit einer metallischen Platte verschlossen waren. Darauf wurde das Probenpulver gegeben und mit einem Objektträger abgeflacht und verdichtet.

Das Gerät misst in vertikaler Bragg-Brentano-Geometrie, d. h. die Probe liegt eben im Gerät und die Messung erfolgt mit veränderlichen Einstrahlwinkeln und Messung der Intensitäten des Sekundärstrahls bei der Reflexion gemäß der Bragg-Gleichung bei 2θ . Dabei werden entweder das Präparat und der Detektor (θ - 2θ -Anordnung) oder Strahlungsquelle und Detektor (θ - θ -Anordnung) gedreht. Im XRD 3000 TT kommt die θ - θ -Anordnung zur Nutzung. Beide Anordnungen werden auch als Zwei-Kreis-Diffraktometer bezeichnet, da zwei Kreisbahnen die Bewegungen von Quelle und Detektor bzw. Probe und Detektor beschreiben (Abb. 4-20).

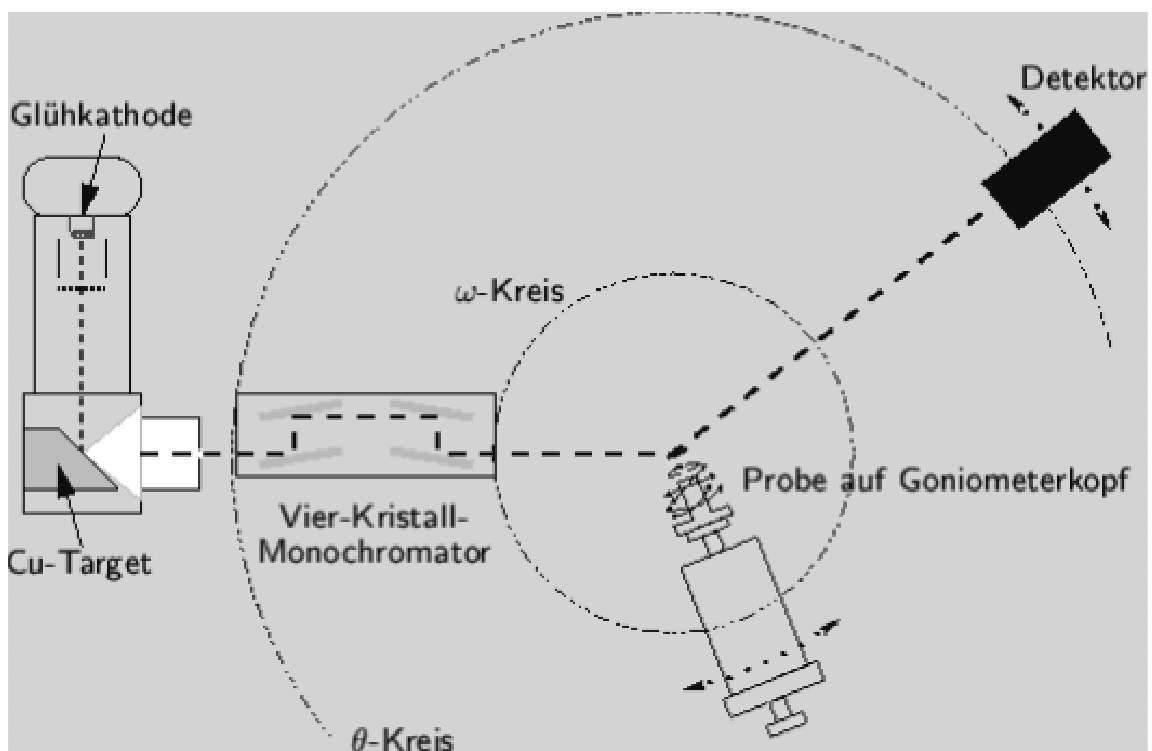


Abb. 4-20: Zwei-Kreis-Anordnung und Strahlengang im Pulverdiffraktometer XRD 3000TT [aus www.physik.uni-freiburg.de, 19.07.2005]

Strahlungsquelle war eine Kupfer-Röntgenröhre. Die Messung erfolgte mit Einstrahlwinkeln zwischen 5 und 80° mit jeweils 2 Sekunden Messzeit. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte als Spektrum, in dem die Intensitäten als cps gegen den Winkel 2θ abgetragen waren. Mittels der Analysensoftware des Gerätes wurden die Peaks erfasst und zugehörige mögliche Phasen angezeigt und Minerale zugeordnet.

Erwartungsgemäß konnten Eisen- oder Manganminerale nicht detektiert werden, d. h. es kann darauf zurückgeschlossen werden, dass sie nur in amorpher Form in den Proben enthalten waren. Diese können jedoch aufgrund des fehlenden Kristallgitters mit der Röntgenbeugungsanalyse nicht erfasst werden. Weitere Verfahren zur Bestimmung von Mineralphasen kamen im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Anwendung.

5 Überblick über die Eigenschaften der ausgewählten Brunnen

Wie bereits beschrieben, werden die Entnahmebrunnen des Wasserwerkes Wiesbaden-Schierstein in einer Entnahmegalerie betrieben. Alle Brunnen durchteufen denselben Grundwasserleiter und haben demzufolge ähnliche Ausbauten und Eigenschaften.

Für die Planung und Durchführung ist die Dokumentation der Altdaten eine Grundvoraussetzung. Daher soll im Folgenden versucht werden, gemäß Kap. 2.4.1 (vgl. S.40), die vorhandene Dokumentation aufzuarbeiten und die Angaben zu:

1) Brunnendaten

- Baujahr
- Tiefe
- Ausbaumaterial
- Lage und Länge der Filterstrecke(n)
- Ausbauzeichnung inkl. Schichtenverzeichnis
- Änderungen am Originalbauzustand, Sanierungsmaßnahmen und bauliche Veränderungen

2) Leistungsdaten

- Leistung des Brunnens nach seiner Fertigstellung
- derzeitige Leistung
- regelmäßige Aufnahme des Betriebs- und Ruhewasserspiegels
- Pumpdaten (Betriebsdauer und Stromaufnahme)

3) Regenerierungen

- Anzahl und Zeitpunkt der bisherigen Regenerierungen
- Intervall zwischen den Maßnahmen
- Zeitpunkt der letzten Regenerierung
- Verfahren, das dabei angewendet wurde
- Erreichte Leistungssteigerung

für die einzelnen fünf Brunnen darzustellen.

Anmerkung: Die Regenerierungsmaßnahme im Wasserwerk erfolgte beginnend im Westen bei Brunnen 54a. Die Brunnen werden hier jedoch der Einfachheit halber von Ost nach West, d. h. beginnend bei Brunnen 20a beschrieben. Diese Reihenfolge wird auch bei der Auswertung beibehalten werden.

Brunnen 20a

Der Brunnen wurde 1950 durch die Fa. Preußag gebaut. Er ist 12,80 m u OK Deckel (D-OK) tief und mit einem DN300-Steinzeugfilterrohr ausgebaut. Der Bohrdurchmesser beträgt über die gesamte Bohrung hinweg 1000 mm.

Er hat eine Filterstrecke bei 6,00 m bis 11,00 m u D-OK. Der Filterbereich befindet sich, laut Ausbauezeichnung, in einer Schicht aus Mittelkies mit Steinen und Geröllen über Grobsand, Feinsand und Steinen, überlagert von Feinkies. Die Filterkiesschüttung ist laut Ausbauezeichnung dreifach abgestuft aus Quarzkies mit den Körnungen 1,5-2/ 4-8/ 15-25 mm. Die erforderliche Körnung wurde anhand von drei Siebanalysen bestimmt.

Gemäß vorliegender Brunnenakte wurde der Brunnen zwischenzeitlich nicht saniert und befindet sich noch im originalen Ausbauzustand. Lediglich die Geländeoberfläche, d. h. der Abschluss der Brunnenstube wurde neu gestaltet. Da als Messpunkt immer die Oberkante des Einstiegsdeckels (D-OK) gewählt war, müssen einige Werte entsprechend korrigiert werden. Dies ist dann jeweils gekennzeichnet. Auf Grundlage des alten Ausbauplanes aus der Brunnenakte und aktualisierten Höhenplänen wurde mit Hilfe der Software AqualInfo eine neue Ausbauezeichnung erstellt. Diese ist dem Anhang beigefügt.

Der Ruhewasserspiegel lag zum Zeitpunkt des Brunnenbaus im Bereich des Feinkieses bei ca. 6,50 m u D-OK. Bei Messungen im Zuge einer Kamerabefahrung 1993 wurde er mit 4,50 m u D-OK angegeben. Dabei lag der Messpunkt nach Veränderungen an der Geländeoberkante 1,20m niedriger. Der Ruhewasserspiegel lag also, bezogen auf den Neubauwert, 0,80 m höher als beim Bau des Brunnens. Zum Zeitpunkt der Regenerierung lag er bei 3,43 m u D-OK, also nochmals um einen Meter höher.

Die Brunnenakte enthält die Neubauleistung, angegeben mit 47 m³/h. Hierbei ist jedoch zu beachten, in welchem Umfeld der Brunnen betrieben wurde und heute wird.

Die Pumpversuchsbedingungen und der hydrologische Hintergrund von 1950 sind mit Sicherheit nicht mit den heute herrschenden Bedingungen zu vergleichen, besonders hinsichtlich des Betriebes der Infiltrationsanlagen im Wasserwerk, des Betriebs der Nachbarbrunnen, der generellen Betriebsart mit einer Sammelleitung für eine gesamte Brunnengruppe im Vergleich zum Heberleitungsbetrieb sowie hinsichtlich des Wasserbedarfs selbst.

Die Brunnenleistung wurde im Zuge regelmäßiger Reinigungsmaßnahmen überwacht, d. h. der Brunnen wurde ca. alle zwei Jahre gebürstet und anschließend wurde ein Brunnentest durchgeführt. Daten liegen aus den Jahren 1995, 1997, 1999 und 2000 vor. Angaben über die Betriebsdauer, Pumpdauer usw. liegen nicht vor.

Abb. 5-1 zeigt den Ruhewasserspiegel und die erreichte Absenkung bei einer Förderleistung von $10 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$. Diese Förderrate entsprach der ersten Leistungsstufe des Brunnentests und wurde als Vergleichsbasis gewählt. Auf der Primärachse links sind Ruhewasserspiegel und Absenkung gegen die Zeit abgetragen, auf der Sekundärachse rechts die spezifische Ergiebigkeit. Die Achsen wurden gegenläufig angeordnet, d. h. Ruhewasserspiegel und Absenkung nehmen von oben nach unten zu und die spezifische Ergiebigkeit nimmt von oben nach unten ab.

Wie erwartet, hat die Absenkung im Laufe des Betriebes seit der letzten Regenerierung zugenommen und die spezifische Ergiebigkeit entsprechend abgenommen. Die Schwankungen des Ruhewasserspiegels ergeben sich aus jahreszeitlichen Schwankungen und in Abhängigkeit vom Infiltrationsbetrieb und von der Leistung der Nachbarbrunnen.

Der letzte Pumpversuch wurde, laut Brunnenakte, am 09.03.2000 als dreistufiger Brunnentest nach einer Reinigung mit Bürsten durchgeführt. Dabei wurde eine maximale Förderleistung von $20 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht, bei einer Absenkung von 4,76 m auf 13,48 m u D-OK ($\Delta 8,72 \text{ m}$). Das entspricht einer spezifischen Ergiebigkeit Q_s von $2,29 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$.

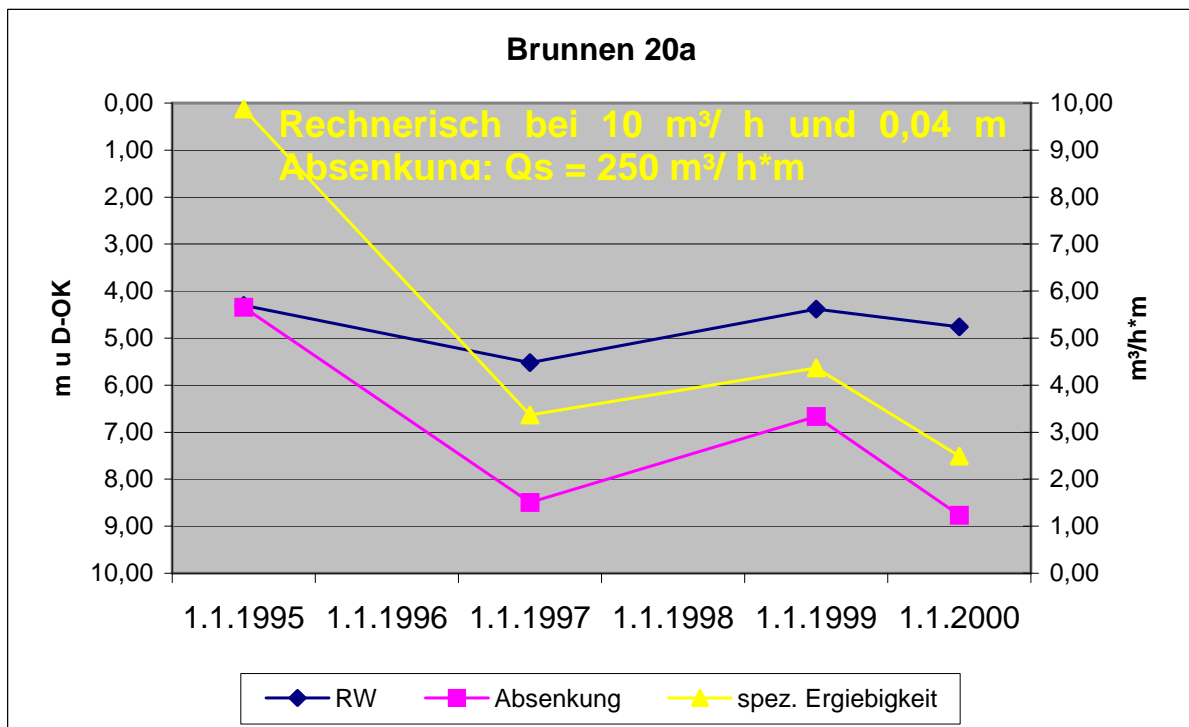


Abb. 5-1: Entwicklung der Leistungsdaten des Brunnens 20a bei der ersten Pumpstufe, Förderrate: 10 m³/h*m, Brunnentests von 1995 – 2000, gemäß Brunnenakte [Wiacek, 2004]

Die letzte chemische Regenerierung wurde im Juli 1993 durchgeführt. Dazu wurde im April eine Kamerabefahrung zur Diagnose durchgeführt. Laut Protokoll lag der Ruhewasserspiegel damals bei 5,70 m u D-OK, bezogen auf eine ca. 1,20 m höher liegende Geländeoberkante (GOK). Der gesamte Filterrohrabschnitt wies Ablagerungen und Bewuchs auf, zum größten Teil leicht, im mittleren Teil stärker.

Ein Brunnentest in Form eines dreistufigen Pumpversuchs wurde vor und nach der Regenerierung nicht durchgeführt. 1995 nach Bürsten lag die Absenkung bei einer Förderrate von 10 m³/h jedoch lediglich bei 4 cm. Die Ergiebigkeit war entsprechend hoch (vgl. Abb. 5-1).

Die Regenerierung wurde mit dem in Kap. 3.3 beschriebenen Online-Kieswäscher und einem salzsäurehaltigen Kiesgemisch von den Mitarbeitern des Wasserwerkes durchgeführt. Abschließend erfolgte im September 1993 eine zweite Kamerabefahrung. Dabei wurden lediglich im mittleren Filterabschnitt Restaufwüchse festgestellt, sonst war die gesamte Rohrtour „ohne Beanstandung“. Der Ruhewasserspiegel lag bei 4,60 m u D-OK, also 1,10 Meter höher als vor der Regenerierung. Ob dies auf die Regenerierung zurückzuführen ist, oder auf Einflüsse aus dem Brunnenumfeld kann im Nachhinein und ohne Pumpversuchsdaten nicht beurteilt werden.

Bei der chemischen Regenerierung wurden insgesamt 5715 g gelöstes Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium entfernt, davon 3486 g Eisen (61 %) und 686 g Mangan (12 %). Eine Belagsanalyse von Ablagerungen von der Pumpe und Steigleitung (ohne Datum, Gesamtzeitraum der Kampagne: 1993-1995) gibt für die Gehalte der vier genannten Kationen einen Anteil von 85,3 % Eisen an. Zu Mangan werden allerdings keine Angaben gemacht. Der Glühverlust lag bei 26,3 %. Die Alterungserscheinungen im Brunnen umfassen also die Ablagerung von chemisch oder biologisch ausgefällten Eisen- und untergeordnet Manganoxiden bzw. -oxihydraten. Aus Projekten zur biologischen Brunnenalterung im Wasserwerk kann geschlussfolgert werden, dass die Beläge mit hoher Wahrscheinlichkeit biologisch induziert sind, Versuche wurden hierzu jedoch aktuell nicht durchgeführt.

Der Brunnen wurde ausgewählt, da er seit über zehn Jahren nicht mehr regeneriert worden war. Die Eisen- und Mangangehalte sowohl bei den Analysen des Regenerats der letzten chemischen Regenerierung als auch der Belagsanalysen waren durchschnittlich (vgl. Abb. 4-2, S.109 und Abb.4-3, S.110).

Die letzte Wasseranalyse einer Rohwasseruntersuchung vom 31.03.2003 zeigte keine Auffälligkeiten. Der pH-Wert des Wassers lag bei 7,24, der Sauerstoffgehalt bei 3,6 mg/l, Eisen gesamt 0,12 mg/l und Mangan gesamt 0,40 mg/l. Im Vergleich zu Altdaten liegen Eisen- und Mangangehalt unverändert vor, die Gehalte an Natrium und Chlorid haben zwischen 1996 und 2003 abgenommen und Calcium sowie Hydrogencarbonat haben zugenommen. Abb. 5-2 zeigt die Ionengehalte der wichtigsten An- und Kationen, Abb. 5-3 die Änderungen der Leitparameter.

Die Leitparameter (Abb. 5-3) wurden dabei aus den Altdaten so zusammengestellt, dass, soweit vorhanden, ein Wert aus jedem Jahr gewählt wurde. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Probenahme im gleichen Jahreszeitenrahmen lag, d. h. es wurden immer Werte aus Probenahmen im Frühjahr gewählt.

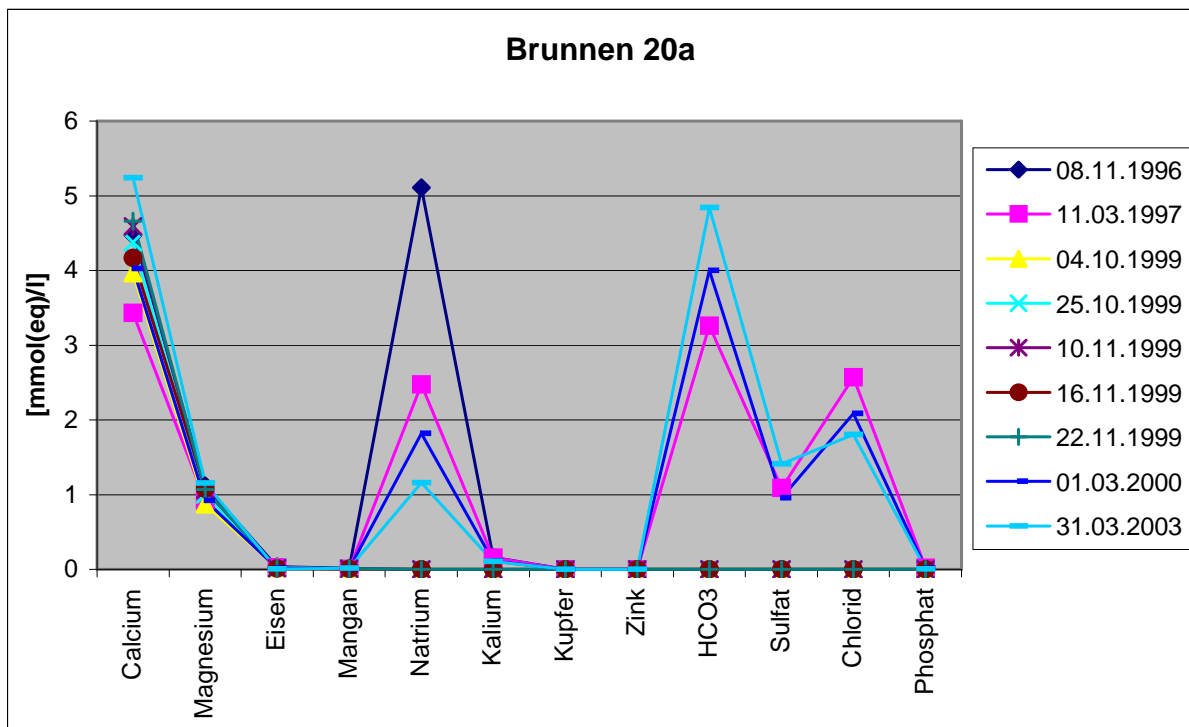


Abb. 5-2: Darstellung der Ionengehalte aus Rohwasseruntersuchungen des Wassers des Brunnen 20a nach SCHÖLLER [Wiacek, 2004]

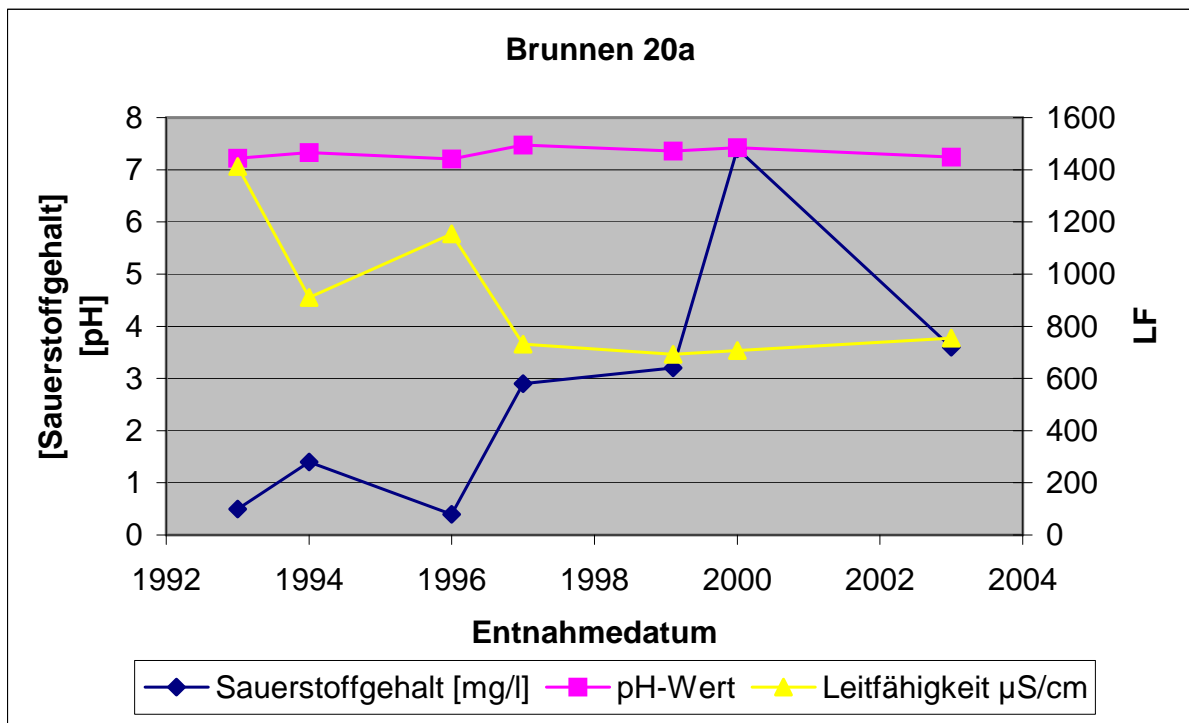


Abb. 5-3: Änderungen der Leitparameter zwischen 1993 und 2003 [Wiacek, 2004]

Brunnen 29a

Der Brunnen befindet sich im mittleren Teil der Galerie der 42 Entnahmebrunnen. Er wurde ebenfalls im Jahr 1950 durch Preußag gebaut.

Der Brunnen ist 12,90 m u D-OK tief und mit einer DN300-Steinzeugverrohrung mit einer Filterstrecke bei 7,00 m bis 12,00 m u D-OK ausgebaut. Der Bohrdurchmesser beträgt über die gesamte Tiefe der Bohrung 1000 mm.

Der Filterbereich befindet sich einer Schicht aus Mittelkies, im Liegenden in Mittelsand übergehend, die von Ton über- und unterlagert ist. Die Filterkiesschüttung ist dreifach abgestuft, von innen nach außen mit den Korngrößen 1,5-2/ 4-8/ 15-25 mm. Die gewählte Körnung wurde aus zwei Siebanalysen von jeweils einer Mischprobe aus dem Mittelkies und einer Probe aus dem darunter lagernden Sand bestimmt.

Gemäß vorliegender Brunnenakte wurde der Brunnen baulich nicht verändert. Aus Arbeiten an der Geländeoberfläche ergibt sich jedoch eine Differenz in den Tiefenangaben mit Bezug auf die Oberkante des Einstiegsdeckels, der heute tiefer liegt, von 1,05 m. Dies wurde wiederum in einer aktualisierten Ausbauzeichnung aufgenommen (vgl. Anhang).

Der Ruhewasserspiegel lag beim Bau des Brunnens laut Schichtenverzeichnis bei 3,60 m u GOK. Dies entspricht, auf den hier gewählten Messpunkt bezogen, aus den Angaben der Werte in m ü NN umgerechnet, 5,47 m u D-OK. Bei einer 1994 durchgeführten Kamerabefahrung lag der Ruhewasserspiegel, bezogen auf den jetzigen Messpunkt bei 3,95 m u D-OK, also nochmals ca. 1,50 m höher.

Die Regenerierungsmaßnahme wurde bei einem Ruhewasserspiegel von 3,14 m u D-OK begonnen. Dies entspricht der Tiefe des Brunnenkopfes, d. h. der Brunnen war artesisch. Dies änderte sich auch im Verlauf der Regenerierung nicht.

Die Neubauleistung des Brunnens ist in seiner Akte mit 45 m³/ h angegeben. Die Leistung wurde im Zuge regelmäßiger Reinigung mit Bürsten überwacht. Dazu wurden jeweils dreistufige Brunnentests durchgeführt. Solche Pumpversuchsdaten liegen aus den Jahren 1995, 1997 und 1999 vor. Abb. 5-4 zeigt die zeitliche Änderung des Absenkungsbetrages und der spezifischen Ergiebigkeit zwischen 1994 und 1999, jeweils bei der Pumpstufe mit einer Fördermenge von 10 m³/h.

Daraus hervor geht, dass der Ruhewasserspiegel im Lauf der letzten zehn Jahre kontinuierlich angestiegen ist und dass sich die Reinigung mit Bürsten 1997 und 1999 verschieden auf den Brunnen auswirkte.

Es ist erkennbar, dass das Bürsten 1997 wenig Einfluss auf die Brunnenleistung hatte, 1999 der Brunnen jedoch deutlich verbessert werden konnte.

Bei den Tests wurden v. a. unterschiedliche maximale Förderstufen erreicht. Eine Begründung hierfür kann aus den vorliegenden Daten jedoch nicht abgeleitet werden.

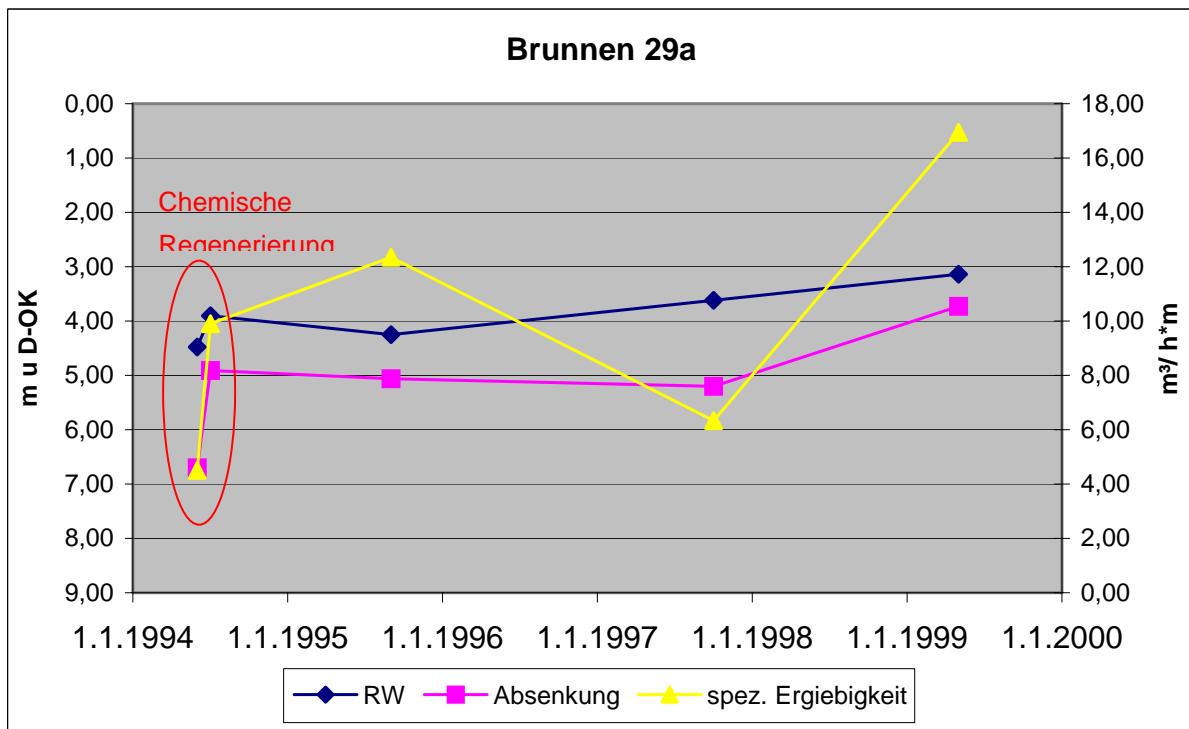


Abb. 5-4: Entwicklung der Leistungsdaten des Brunnens 29a bei der ersten Pumpstufe, Förderrate: $10 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$, Brunnentests von 1994 – 1999, gemäß Brunnenakte [Wiacek, 2004]

Bei beiden Brunnentests lag die maximal erreichte Fördermenge bei $30 \text{ m}^3/\text{h}$. Bei dieser Entnahmeleistung wurde 1999 eine größere Absenkung und damit eine schlechtere Ergiebigkeit als 1997 erreicht. In den Jahren 1995 und 1994 lag die maximale Fördermenge bei 36 bzw. $41 \text{ m}^3/\text{h}$, der Brunnen war also ergiebiger.

Die letzte chemische Regenerierung fand im Juli 1994 statt. Dies zeigt sich deutlich in der Leistungssteigerung in den Brunnentests vom 20.07.1994 im Vergleich zum 13.06.1994 in Abb. 5-4 mit deutlich höherer Ergiebigkeit und entsprechend niedrigerem Absenkungsbetrag. Der Brunnen wurde chemisch mit einem auf Salzsäure basierendem Regeneriermittel mit dem Online-Verfahren mit Kieswäscher regeneriert. Im Zuge der Regenerierung wurden eine Kamerabefahrung zur Diagnose vor der Regenerierung und ein Brunnentest vor und nach der Regenerierung durchgeführt.

Laut Protokoll der Kamerabefahrung vom 09.06.1994 zeigten sich die Verockerungserscheinungen im gesamten Teil des Filterbereiches. Hier waren die Filterschlitze z. T. verschlossen und die gesamte Rohrtour mit Ablagerungen überzogen. Die Stärke des Bewuchses war im mittleren Filterabschnitt zunehmend. Der Bewuchs ließ eine Zuströmrichtung erkennen.

Der Brunnentest vor der Regenerierung wurde am 13.06.1994 durchgeführt. Bereits bei der zweiten Pumpstufe von 15 m³/h zog die Pumpe Luft. Die erreichte Absenkung betrug 2,96 m, die spezifische Ergiebigkeit bei 10 m³/h lag bei 4,50 m³/h*m. Nach der Regenerierung am 20.07.1994 wurde eine maximale Pumpleistung von 36 m³/h erreicht. Hierbei lag die Absenkung bei 4,54 m. Die spezifische Ergiebigkeit bei einer Fördermenge von 10 m³/h (Absenkung um 1,01 m) lag bei 9,90 m³/h*m und damit mehr als doppelt so hoch wie vor der Regenerierung.

Bei der Regenerierung wurden insgesamt 7982 g gelöstes Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium entfernt, davon 3831 g Eisen (48 %) und 1916 g Mangan (24 %). Eine Belagsanalyse liegt vom 23.02.1993 vor. Dabei waren von 497 g Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium 90,2 % Eisen und 5,6 % Mangan. Der Glühverlust war nicht angegeben. Die Brunnenbeläge bestehen also laut Belagsanalyse im Wesentlichen aus Eisenoxiden.

Eine bohrlochgeophysikalische Kontrollmessung wurde im September 1995 durch die Fa. BLM, NL Gotha durchgeführt. Das Messprogramm umfasste ein Kaliberlog, die Messung der natürlichen Gamma-Strahlung, ein Gamma-Gamma-Log, Neutron-Neutron-Messung Packerflowmeter- und Flowmeter-Messungen sowie die Bestimmung von Salinität und Temperatur. Dabei zeigte sich, dass im unteren Filterbereich (ab ca. 9,00 m u D-OK) wahrscheinlich Ablagerungen toniger Partikel vorhanden waren. Im oberen Teil zeigten sowohl die Gamma-Gamma- als auch die Neutron-Neutron-Messung eine normale Packungsdichte [Bericht vom 04.10.95, S.5]. Die Packerflowmetermessung korreliert mit diesem Befund. Eine Bewertung dieser Ergebnisse wird bei der Auswertung und Diskussion der aktuellen Messungen vorgenommen (vgl. Kap.6.4, S.188ff).

Die letzte Rohwasseruntersuchung wurde am 31.03.1002 durchgeführt. Der pH-Wert lag bei 7,24, der Sauerstoffgehalt bei 4,6 mg/l. Es waren 0,077 mg/l Eisen gesamt und 0,018 mg/l Mangan gesamt im Wasser gelöst. Dies lag, gemäß vorliegenden Altdaten von 1997 und 2000 im Normalbereich, wie die Abbildungen Abb. 5-5 und Abb. 5-6 zeigen. Im Vergleich der Daten zeigt sich eine Zunahme des Salzgehaltes (Natrium und Chlorid) und des Kalkgehaltes (Calcium und Hydrogencarbonat).

Eisen- und Mangangehalt ändern sich wenig. Die Zunahme des Salzgehaltes korreliert mit der Zunahme der Leitfähigkeit.

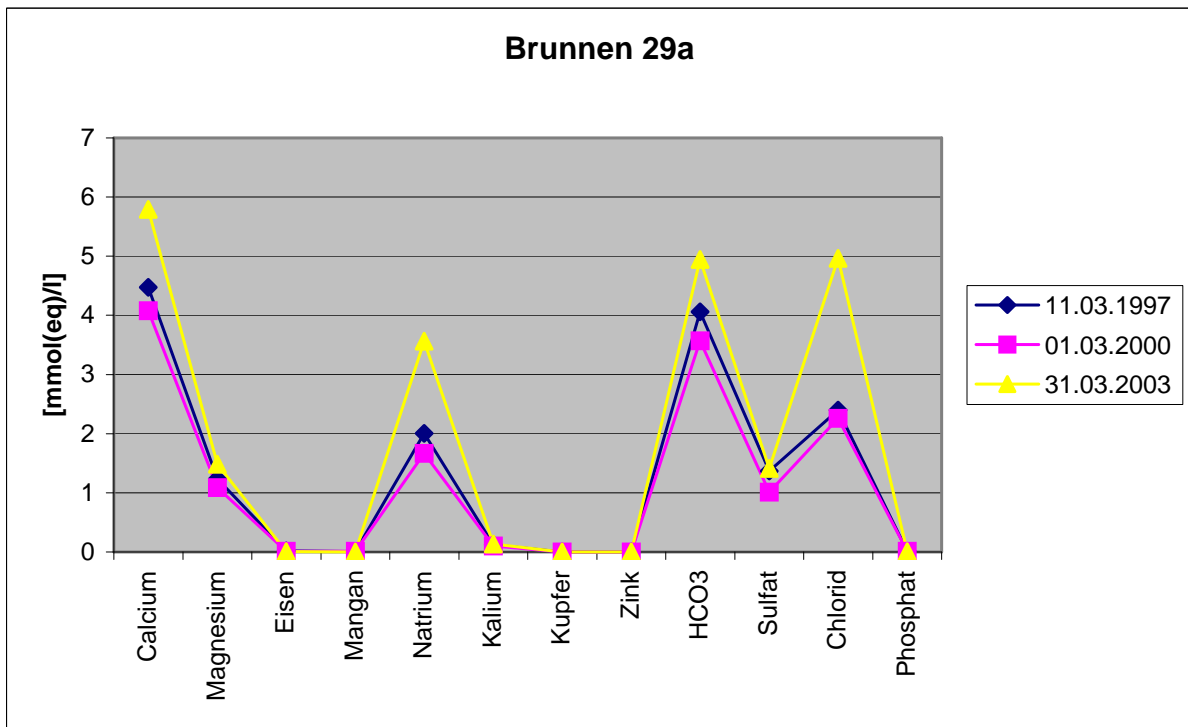


Abb. 5-5: Darstellung der Ionengehalte aus Rohwasseruntersuchungen des Wassers des Brunnen 29a nach SCHÖLLER [Wiacek, 2004]

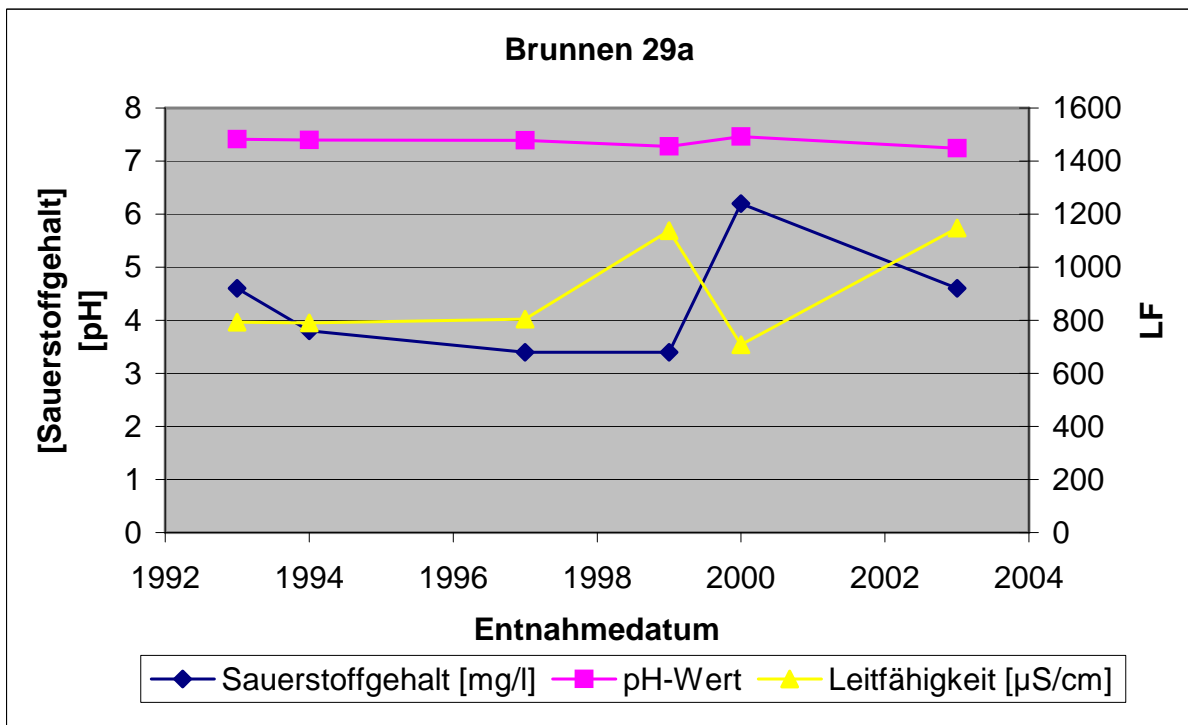


Abb. 5-6: Änderungen der Leitparameter zwischen 1993 und 2003 [Wiacek, 2004]

Brunnen 31a

Der Brunnen befindet sich im mittleren Teil der Entnahmebrunnengalerie direkt östlich eines Fahrweges zu den Infiltrationsbecken (vgl. Abb. 4-4, S.111).

Der Brunnen wurde im Sommer 1960 durch die Fa. Brechtel im Trockenbohrverfahren auf eine Tiefe von 11,75 m u D-OK abgeteuft. Der Enddurchmesser der Bohrung beträgt 800 mm, der Ausbau besteht aus einer DN300 Kupferverrohrung mit insgesamt 5,00 m Filterstrecke bei 5,90 m bis 10,90 m u D-OK. Eine Ausbauezeichnung ist in der Brunnenakte nicht enthalten. Dementsprechend sind keine Angaben zur Filterkiesschüttung bekannt. Auch die Sieblinien von zwei Mischproben gibt darauf keinen Hinweis. Aus dem Schichtenverzeichnis und den Ergebnissen der Kamerabefahrung im Rahmen des Projektes konnte ein Ausbauplan erstellt werden. Er befindet sich ebenfalls im Anhang.

Der Filterbereich liegt in einer Lage aus Mittel- und Grobsand und Fein- bis Grobkies, die mit einer Mächtigkeit von 4,20 m zwischen Feinsandlagen liegt. Der Ruhewasserspiegel bei Neubau lag 5,30 m u GOK im unteren Teil der Feinsandlage.

Eine Neubauleistung ist in der Brunnenakte nicht vermerkt, ebenso keine Angaben über die Durchführung eines Leistungspumpversuches.

Auswertungen von Pumpversuchen vor und nach Regenerierungen oder Reinigungen zeigen das folgende Bild:

Brunnentests nach dem Bürsten des Brunneninnenrohres wurden 1997 und 1999 als mehrstufige Pumpversuche durchgeführt. Dabei wurde eine maximale Fördermenge von 35 m³/h erreicht. Die spezifische Ergiebigkeit des Brunnens bei maximaler Förderleistung betrug 1997 bei einer Absenkung um 4,69 m 7,46 m³/h*m und 1999 bei einer Absenkung um 5,69 m 5,97 m³/h*m.

Der Ruhewasserspiegel lag bei Durchführung der Pumpversuche bei 4,14 m (1997) und bei 3,19 m (1999) und damit deutlich höher als bei Neubau des Brunnens.

Im Vergleich dazu sind die Brunnentests vor der letzten chemischen Regenerierung zu sehen (10.01.1996). Hier wurde eine maximale Förderleistung von 20 m³/h erreicht und der Brunnen von einem Ruhewasserspiegel bei 5,37 m um 0,73 m abgesenkt. Die spezifische Ergiebigkeit betrug also 27,40 m³/h*m.

Nach der chemischen Regenerierung (22.02.1996) wurde eine maximale Fördermenge von 35 m³/h*m erreicht, der Brunnen dabei um 6,24 m abgesenkt. Das entspricht einer spezifischen Ergiebigkeit bei maximaler Fördermenge von 5,61 m³/h*m.

Die Leistung nach chemischer Regenerierung liegt also unter der Leistung im Brunnentest vom 05.11.1997 nach dem Bürsten des Brunnens.

Inwieweit diese Werte plausibel sind und die tatsächliche Brunnenleistung bzw. das Resultat der chemischen Regenerierung widerspiegeln, kann anhand der Dokumentation nicht nachvollzogen werden.

Abb. 5-8 zeigt die Änderung der Brunnenleistung bei jeweils der ersten Pumpstufe mit 10 m³/h Fördermenge. Der Ruhewasserspiegel ist, wie bereits bei den anderen Brunnen festgestellt und demzufolge auf eine Änderung der hydrogeologischen Gegebenheiten zurückführbar, deutlich angestiegen. Der Absenkungsbetrag hat zugenommen und dementsprechend die spezifische Ergiebigkeit abgenommen.

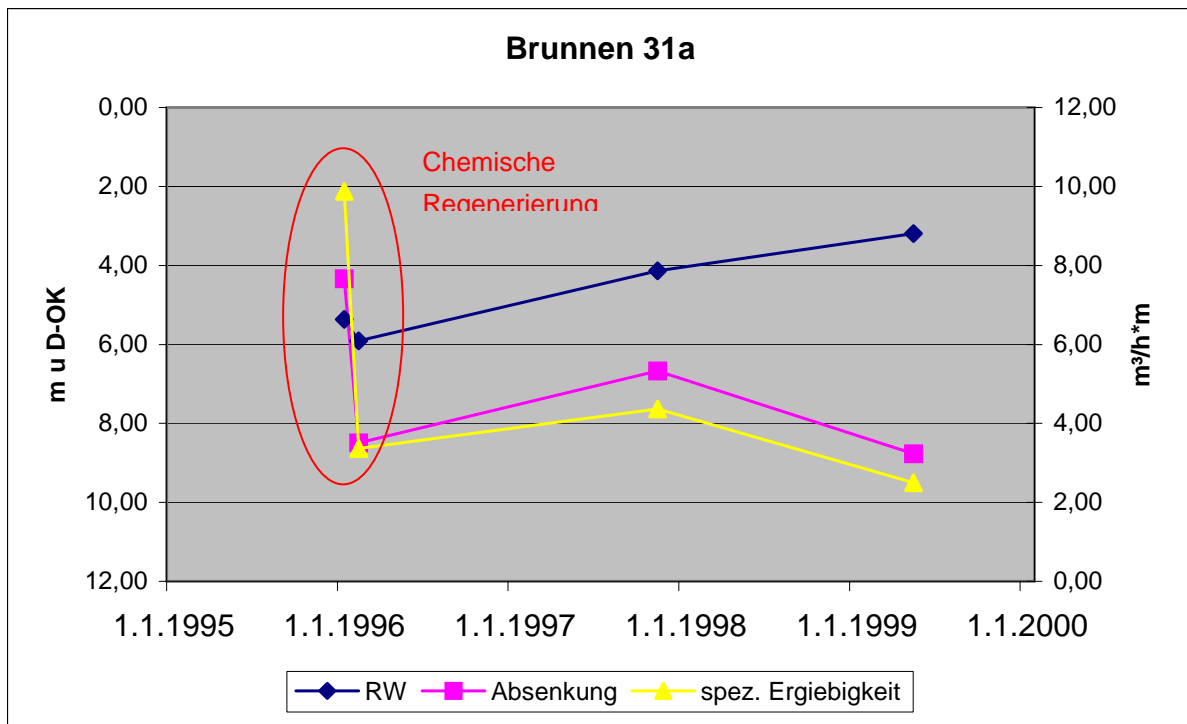


Abb. 5-7: Entwicklung der Leistungsdaten des Brunnens 31a bei der ersten Pumpstufe, Förderrate 10 m³/h*m, Brunnentests von 1996 bis 1999, gemäß Brunnenakte [Wiacek, 2004]

Der Brunnen wurde im Februar 1996 mit der bereits beschriebenen chemischen Online-Regenerierung behandelt. Im Zuge der Regenerierung wurden neben den Brunnentests auch geophysikalische Messungen vor und nach der Behandlung mit dem Salzsäure-Regeneriermittel durchgeführt. Im Protokoll ist der Ruhewasserspiegel vor Regenerierung am 12.12.1995 mit 1,10 m u Brunnenkopf angegeben, dies entspricht 4,15 m u D-OK.

Gemessen wurden, wie bei Brunnen 29a ein Kaliberlog, Gamma-Gamma, Neutron-Neutron, Salinität und Temperatur. Außerdem wurden Flowmeter- und Packerflowmetermessungen aufgenommen. Letztere Messungen zeigten deutlich verminderte Durchlässigkeiten im mittleren und unteren Filterbereich. Damit korrelierten auch die Gamma-Gamma- und Neutron-Neutron-Messung. Insgesamt zeigte sich ein sehr heterogenes Erscheinungsbild des Filterbereiches mit deutlich erkennbaren Abschnitten erhöhter Lagerungsdichte (und entsprechend verminderter Durchlässigkeit. Dies wurde auf Verockerungen unterschiedlichen Ausmaßes zurückgeführt.

Nach der Regenerierung wurde das Messprogramm am 18.04.1996 wiederholt, um den Regeneriererfolg zu dokumentieren. Dabei zeigte sich zwar insgesamt eine geringere Dichte im Ringraum in der Gamma-Gamma-Messung und auch die Packerflowmetermessung zeigte höhere Durchlässigkeiten des Filters insgesamt, es blieben jedoch die Filterabschnitte zwischen 7,50 m und 8,00 m u D-OK sowie zwischen 9,50 und 10,00 m u D-OK ohne Veränderung. Die Neutron-Neutron-Messung, d. h. die Bestimmung des Wassergehaltes im Ringraum, ergab hier sogar eine Verschlechterung nach Regenerierung im Vergleich zu den Werten vom 12.12.1995. Als mögliche Erklärung hierfür werden Materialumlagerungen im Filterkies angeführt.

Der Ruhewasserspiegel lag dabei bei 4,20 m u D-OK. Die Absenkung bei Durchführung der geophysikalischen Messungen mit Pumpbetrieb zeigte eine Erhöhung des Absenkungsbetrages von 0,50 m auf 0,55 m. Wie auch die Brunnentests zeigten, war die Regenerierung somit nicht erfolgreich.

Die chemische Bilanzierung der Analysen des Regenerats zeigten, dass insgesamt 12229 g gelöstes Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium entfernt wurden, davon 4525 g Eisen (37 %) und 2323 g Mangan (19 %) entfernt wurden. Den größten Anteil hatte jedoch Calcium mit 40 %. Belagsanalysen vom 10.01.1996 enthielten 67 % Eisen, 22 % Mangan und 11 % Calcium und bestätigte somit die hohen Eisen-, Mangan- und Calciumgehalte. Wasseranalysen von 1996, 1997, 1999 und 2002 liegen in ihren Werten insgesamt alle dicht beieinander. Die letzte Rohwasseruntersuchung wurde am 06.03.2002 durchgeführt. Der pH-Wert des Wassers aus Brunnen 31a lag bei 7,45, der Sauerstoffgehalt bei 5,8 mg/l. Der Gehalt an Eisen gesamt betrug 0,082 mg/l, Mangan gesamt 0,051 mg/l und Calcium 81 mg/l. Die Gehalte der wichtigsten Ionen sind in Abb. 5-9 zusammengestellt, Abb. 5-10 zeigt die Leitparameter.

Auffällig in Abb. 5-10 ist die große Schwankung in Sauerstoffgehalt und Leitfähigkeit im Jahr 1996.

Diese zeigen sich nicht in der Auswertung der Wasseranalysen nach Schöller in Abb. 5-9, wo alle Gehalte der jeweiligen Ionen dicht beieinander liegen. Inwieweit sie mit der chemischen Regenerierung zusammenhängen können, soll an späterer Stelle geprüft und diskutiert werden.

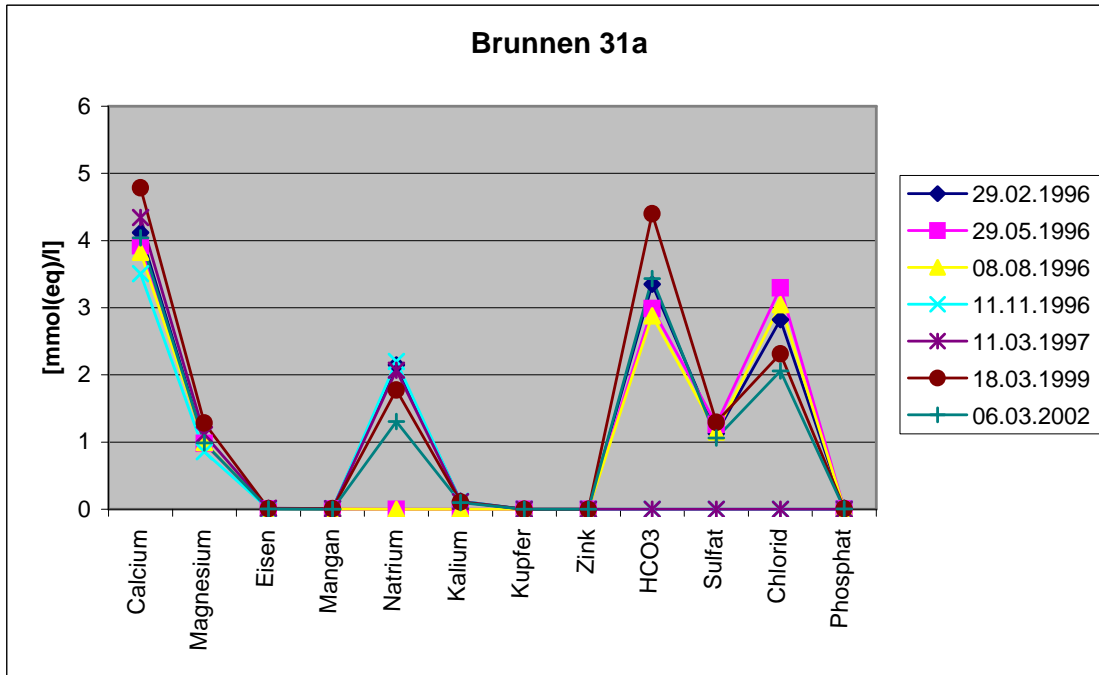


Abb. 5-8: Darstellung der Ionengehalte aus Rohwasseruntersuchungen des Wassers des Brunnen 31a nach Schöller [Wiacek, 2004]

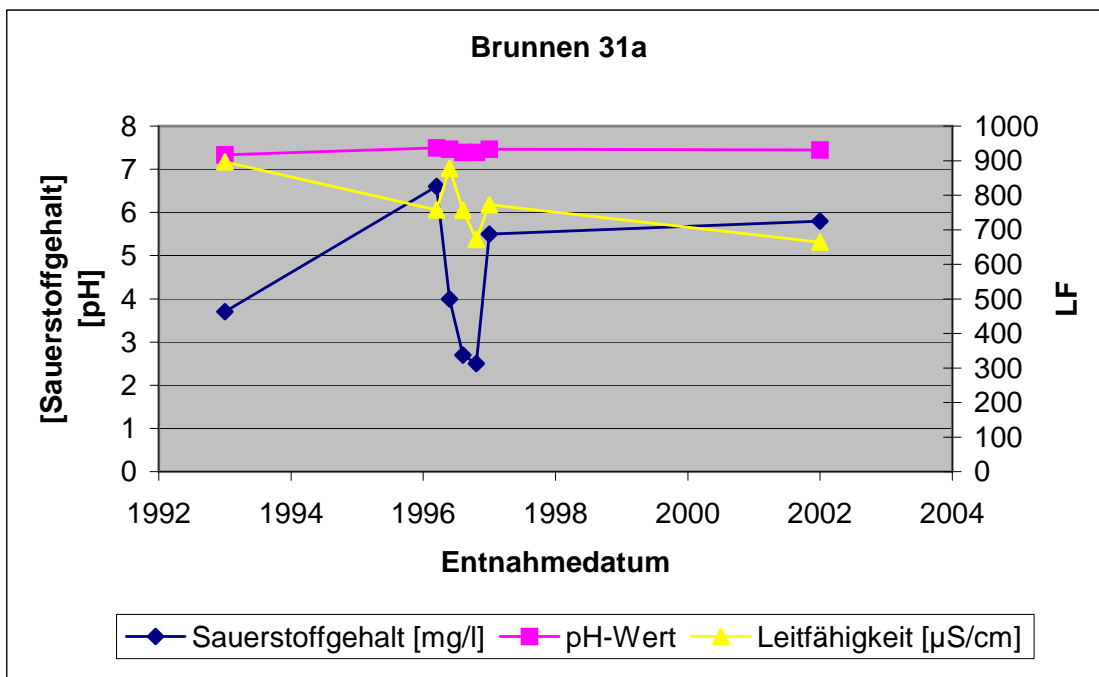


Abb. 5-9: Änderungen der Leitparameter zwischen 1993 und 2003 [Wiacek, 2004]

Brunnen 51a

Der Brunnen befindet sich im westlichen Teil der Entnahmebrunnengalerie (vgl. Abb. 4-4, S.111). Er wurde 1959 durch die Fa. Brechtel gebaut. Der Bohrendurchmesser beträgt 800 mm. Der Brunnen ist mit einem DN300 Kupferrohr ausgebaut. Die Tiefe beträgt 12,32 m mit Bezugspunkt D-OK. Der Filterbereich ist 6,00 m lang und liegt bei 5,32 m bis 11,32 m u D-OK. Er befindet sich, laut Schichtenverzeichnis, in Wechsellagen von Fein- bis Grobsand mit Fein- bis Grobkiesanteilen von 3,25 m bis 9,80 m u GOK (6,55 m Mächtigkeit). Diese werden überlagert von einer 0,55 m mächtigen Schicht Letten und unterlagert von einer 0,30 m mächtigen Schicht Kalkstein und blaugrauem Schlicksand. Es wurden insgesamt vier Mischproben entnommen und Siebanalysen durchgeführt. Zur Kiesschüttung sind jedoch keine Angaben gemacht.

Der Ruhewasserspiegel bei Brunnenbau ist nicht vermerkt. Die Brunnenakte enthält außerdem weder eine Ausbauzeichnung noch Angaben zur Neubauleistung. Eine aus Schichtenverzeichnis und Kameradaten neu erstellte Ausbauzeichnung ist dem Anhang beigelegt.

Pumpversuchsauswertungen liegen von 1998 und 1999 vor. Die Brunnentests wurden jeweils nach der Bürstenreinigung des Brunnens durchgeführt. Die maximale Fördermenge, die dabei erreicht wurde, beträgt jeweils 10 m³/h. Dabei wurde der Brunnen 1998 um 1,14 m abgesenkt und 1999 um 4,65 m. Bei der nächsten Pumpstufe von 15 m³/h zog die Pumpe jeweils Luft. Die spezifische Ergiebigkeit des Brunnens lag somit 1998 bei 8,77 m³/h*m und 1999 bei 2,15 m³/h*m. Dies zeigt auch Abb. 5-10.

Die letzte chemische Regenerierung wurde im März 2002 durchgeführt. Hierzu liegen keine Leistungsdaten, Kameraprotokolle oder Geophysikalische Messberichte vor.

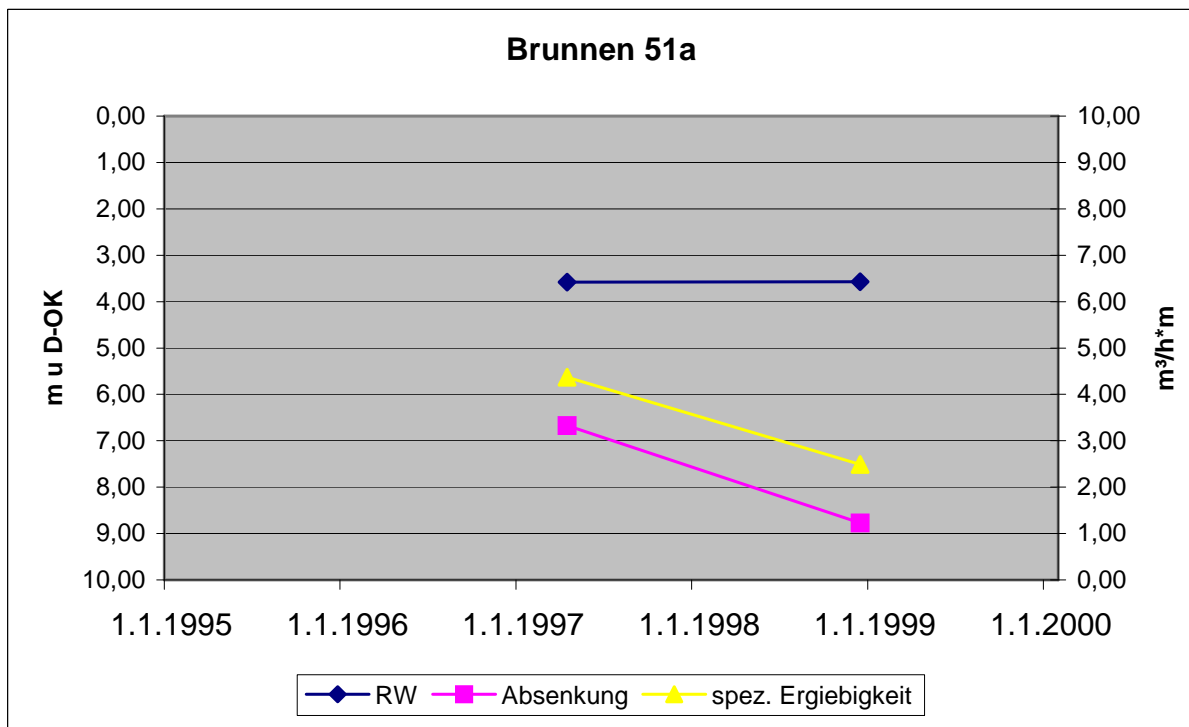


Abb. 5-10: Vergleich der Leistungsdaten aus Brunnentests 1998 und 1999 bei der ersten Pumpstufe, Förderrate 10 m³/h, gemäß Brunnenakte [Wiacek, 2004]

Die Bilanzierung der entfernten Summen an gelöstem Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium ergibt, dass insgesamt 3530 g der genannten Elemente entfernt wurden, davon 812 g Eisen (23 %), 847 g Mangan (24 %) und 1836 g Calcium.

Eine Belagsanalyse wurde am 10.04.1995 durchgeführt. Die entnommene Probe enthielt 51,3 % Eisen, 37,3 % Mangan und 10,9 % Calcium. Der Glühverlust betrug 27,3 %.

Sowohl das Regenerat der letzten chemischen Regenerierung als auch die Belagsanalyse weisen somit vergleichsweise hohe Mangangehalte auf, weshalb der Brunnen zur Regenerierung mit Ultraschall ausgewählt wurde.

Wasseranalysen liegen aus den Rohwasseruntersuchungen von 1997, 2000 und 2003 vor. In der letzten Rohwasseruntersuchung vom 31.03.2003 lag der pH-Wert bei 7,39 und der Sauerstoffgehalt bei 6,9 mg/l. Der Gehalt an Eisen gesamt betrug <0,01 mg/l und Mangan gesamt 0,09 mg/l. Der Calciumgehalt lag bei 91,8 mg/l

Auch bei diesem Brunnen ist der Salzgehalt gesunken und der Kalkgehalt gestiegen (vgl. Brunnen 20a und 29a). Die Werte für Eisen und Mangan liegen bei allen drei Messungen jeweils im selben Bereich, wie auch Abb. 5-11 zeigt:

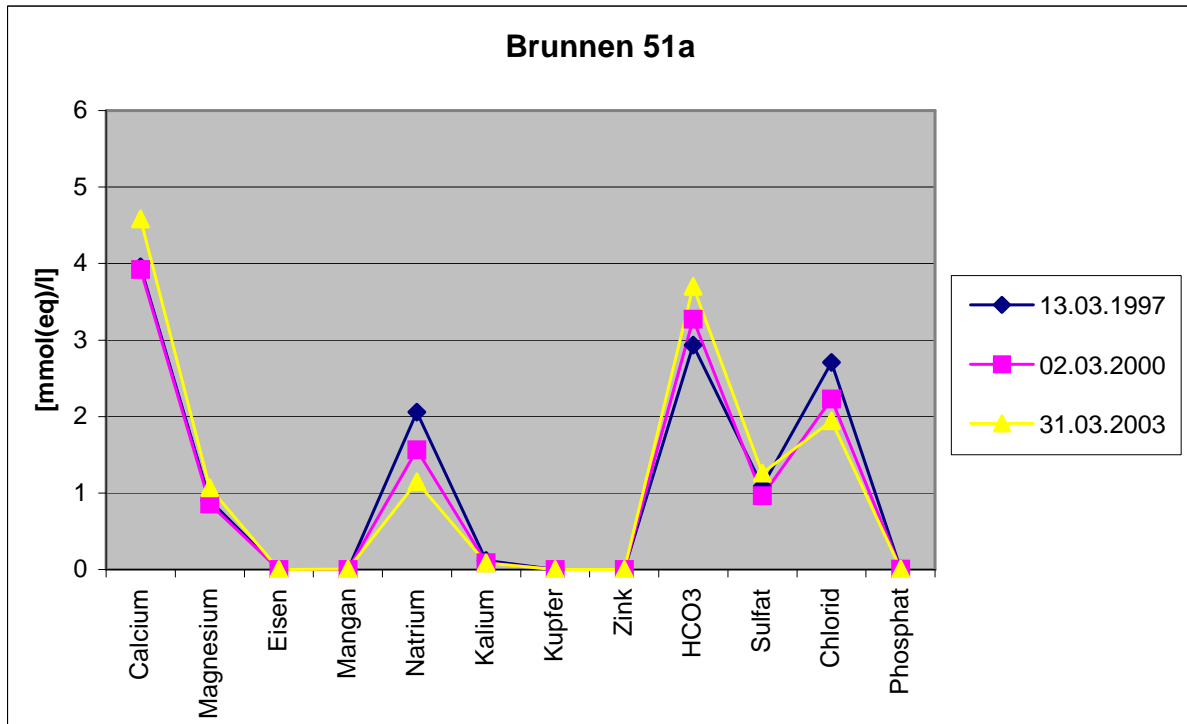


Abb. 5-11: Darstellung der Ionengehalte aus Rohwasseruntersuchungen des Wassers von Brunnen 51a nach Schöllner [Wiacek, 2004]

Abb. 5-12 zeigt den Verlauf der Schwankungen der Leitparameter des Wassers in Brunnen 51a: Am stärksten schwankt der Sauerstoffgehalt, während die Leitfähigkeit trotz des veränderten Salzgehaltes nahezu unverändert ist.

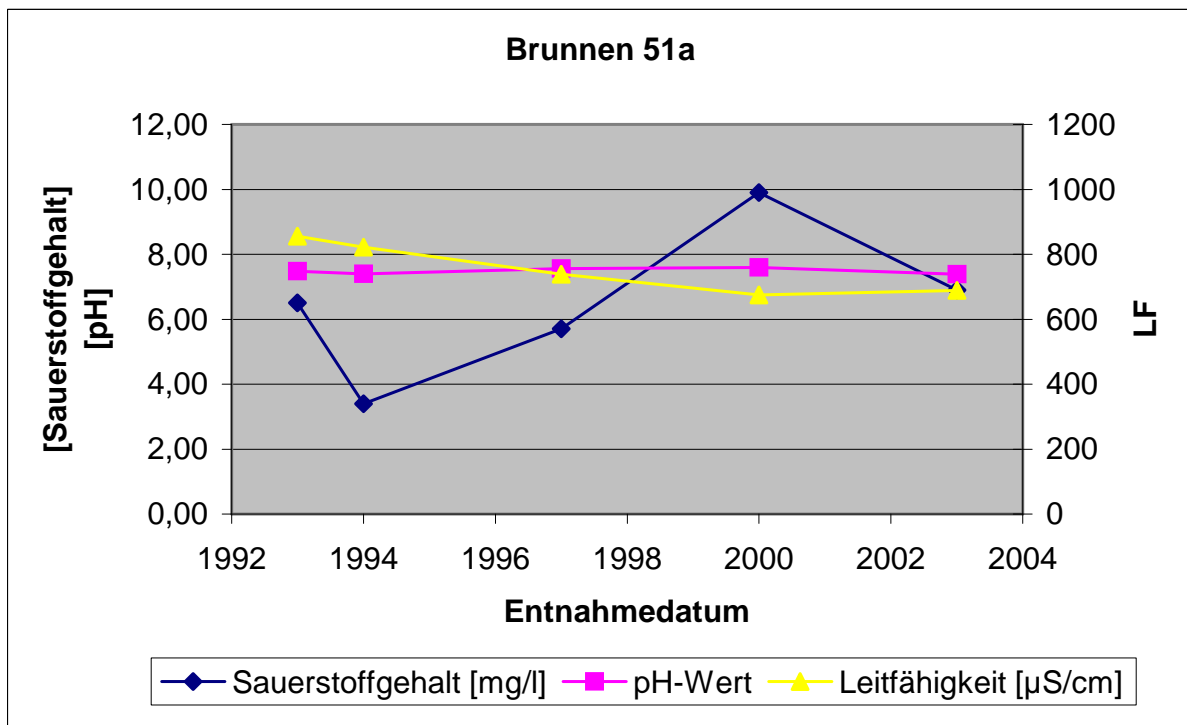


Abb. 5-12: Änderungen der Leitparameter zwischen 1993 und 2003 [Wiacek, 2004]

Brunnen 54a

Der Brunnen liegt am westlichen Ende der Entnahmebrunnengalerie. Er hat in dieser Richtung nur noch zwei Nachbarn.

Er wurde, wie Brunnen 51a, im Jahre 1959 von der Fa. Brechtel gebaut. Der Bohrendurchmesser beträgt 800 mm. Der Brunnen ist mit einer DN300 Kupferverrohrung bis zu einer Tiefe von 12,65 m u D-OK ausgebaut. Der Filterbereich ist sechs Meter lang und liegt zwischen 5,65 m und 11,65 m u D-OK im Bereich von Fein- und Mittelsandlagen mit wenig Kiesanteilen.

Laut Schichtenverzeichnis weist dieser Grundwasserleiter eine Mächtigkeit von 6,80 m auf. Er wird überlagert von 0,20 m Letten (unter Auffüllung) und unterlagert von 0,30 m Kalkstein und blaugrauem Schlicksand.

Der Ruhewasserspiegel bei Neubau ist nicht verzeichnet. Ebenso sind eine Ausbauezeichnung sowie Angaben zur Neubauleistung des Brunnens nicht in der Brunnenakte enthalten. Erstere wurde auf Basis des Schichtenverzeichnis und der Kamerabefahrung neu erstellt (vgl. Anhang).

Zur Bestimmung der Filterkiesschüttung wurden insgesamt sechs Siebanalysen durchgeführt mit Mischproben aus den Sand-Kies-Gemischen. Die ermittelte Körnung der Kiesschüttung ist jedoch ebenfalls nicht vermerkt.

Geophysikalische Messungen oder Kamerabefahrungen sind in der Brunnenakte ebenfalls nicht dokumentiert. Pumpversuche wurden regelmäßig im Zuge der Bürstenreinigung oder bei Regenerierungen durchgeführt.

Daten hierzu liegen für 1997 und 2000 für Brunnentests nach dem Bürsten vor. Dabei lag der Ruhewasserspiegel des Brunnens 1997 bei 3,73 m u D-OK. Die maximale Förderrate betrug $10 \text{ m}^3/\text{h}$, wobei der Brunnen um 3,47 m abgesenkt wurde. Das entspricht einer spezifischen Ergiebigkeit von $2,88 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$. Die Wideranstiegszeit lag über 40 Minuten und zeigte einen Regenerierbedarf an.

Im Jahr 2000 lag der Ruhewasserspiegel bei 3,85 m u D-OK. Die maximal erreichte Fördermenge betrug $20 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$, wobei der Brunnen um 3,41 m abgesenkt wurde, was einer spezifischen Ergiebigkeit von $5,87 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$ entspricht. Bei $10 \text{ m}^3/\text{h}$ Entnahmeleistung betrug die Absenkung 1,20 m, entsprechend einer spezifischen Ergiebigkeit von $8,33 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$.

Der Brunnen war zwischenzeitlich 1999 mit dem chemischen Online-Verfahren regeneriert worden. Dabei wurde die maximal mögliche Förderrate von $10 \text{ m}^3/\text{h}$ auf $45 \text{ m}^3/\text{h}$ angehoben. Die Absenkung bei $10 \text{ m}^3/\text{h}$ verringerte sich von 5,78 m auf 0,68 m u D-OK. Die spezifische Ergiebigkeit erhöhte sich dem gemäß von $1,73 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$ auf $16,67 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$.

Diese Werte sind noch einmal zusammenfassend in Abb. 5-13 dargestellt:

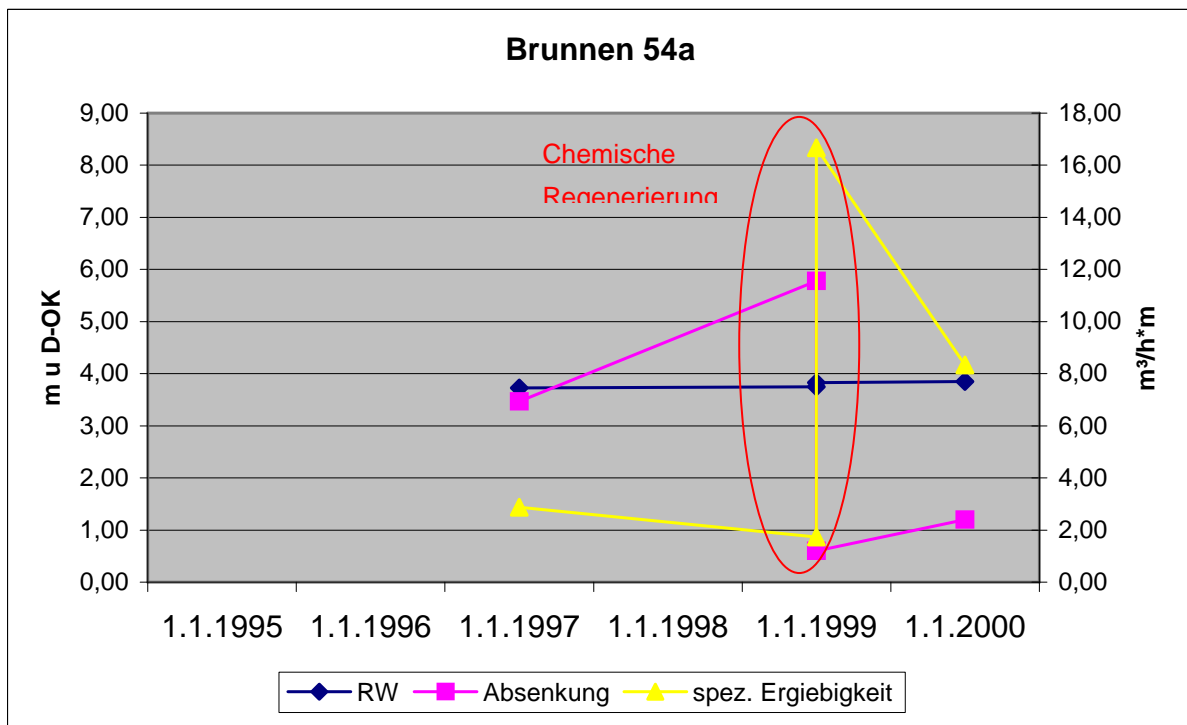


Abb. 5-13: Entwicklung der Leistungsdaten des Brunnens bei der ersten Pumpstufe, Förderrate: 10 m³/h*m, Brunnentests von 1995 – 2000 [Wiacek, 2004]

Bei der letzten chemischen Regenerierung, durchgeführt im Februar 1999, wurden insgesamt 21485 g gelöstes Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium entfernt. Davon waren 6230 g Eisen (29 %), 2793 g Mangan (13 %) und 11817 g Calcium (55%). Eine Belagsanalyse vom 08.02.1993 zeigte, dass in der Belagsprobe von den genannten vier Kationen fast nur Eisen vorlag (99,6 %). Der Glühverlust betrug 23,1 % der Probeneinwaage.

Die letzte Rohwasseruntersuchung wurde am 31.03.2003 durchgeführt. Dabei wies das Wasser einen pH-Wert von 7,28 auf und einen Sauerstoffgehalt von 5,7 mg/l. Der Gehalt an Eisen gesamt betrug 0,11 mg/l, Mangan gesamt 0,165 mg/l und Calcium 98,3 mg/l.

Die Analyse zeigte keine Auffälligkeiten, wie auch Abb. 5-14 und Abb. 5-15 zeigen.

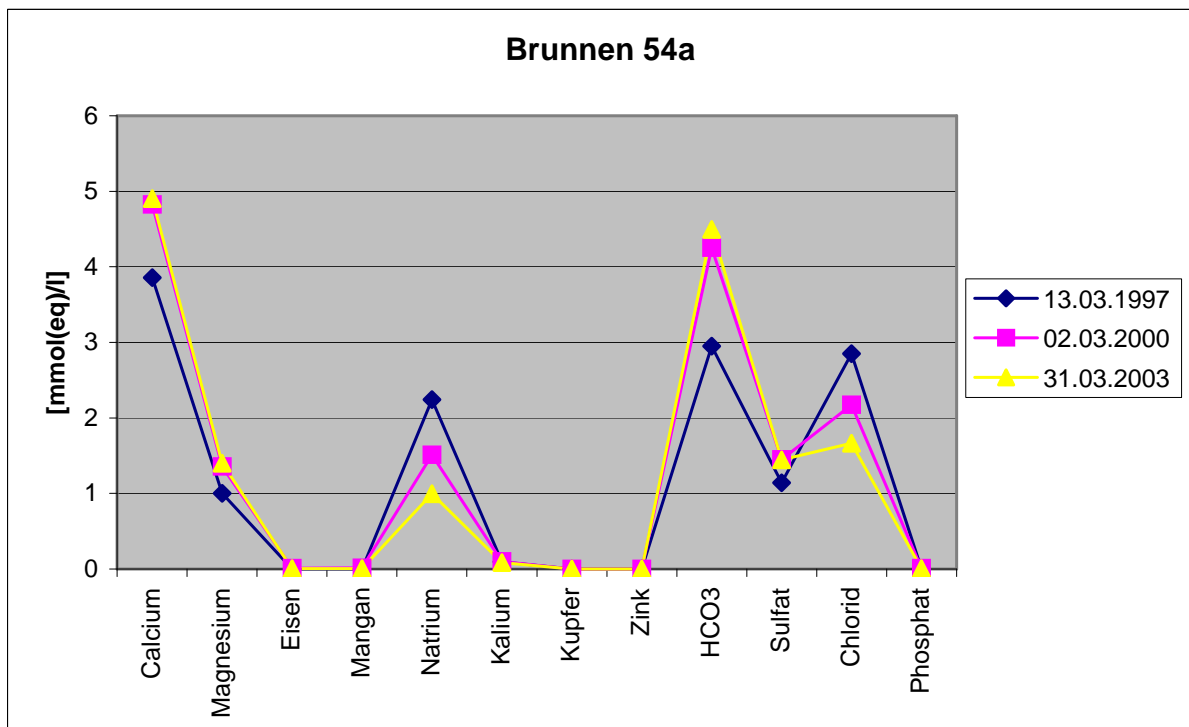


Abb. 5-14: Darstellung der Ionengehalte aus Rohwasseruntersuchungen des Wassers aus Brunnen 54a nach Schöllner [Wiacek, 2004]

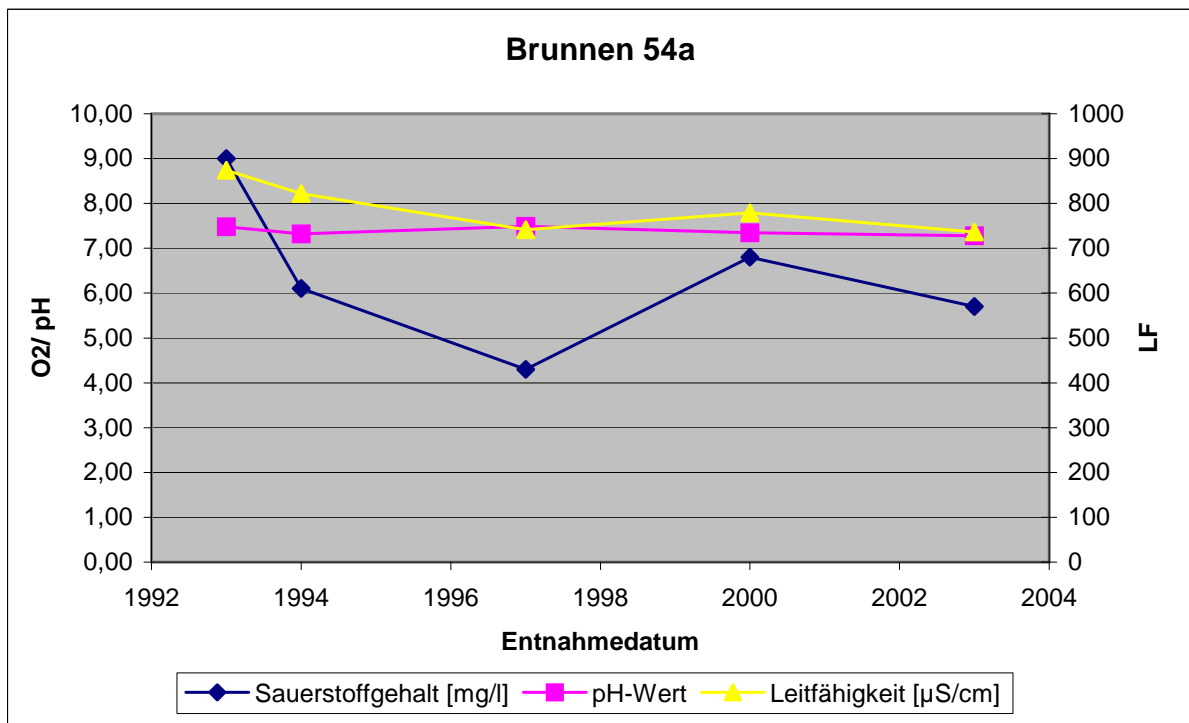


Abb. 5-15: Änderungen der Leitparameter in Brunnen 54a zwischen 1993 und 2003 [Wiacek, 2004]

6 Ergebnisse der Regenerierungen

Die fünf Brunnen wurden zwischen dem 19.04. und dem 06.05.2004 gemäß dem auf Seite 116 beschriebenen Ablauf regeneriert. Planmäßig wurden pro Brunnen zwei Tage benötigt, um das komplette Untersuchungsprogramm inklusive Voruntersuchungen, Regenerierung und begleitenden Messungen durchzuführen.

Die Kamerabefahrungen wurden auf einem Videoband aufgezeichnet und zusätzlich durch die Fa. BRM zu einem Kurzbericht für jede einzelne Aufzeichnung zusammengefasst, der schriftliche Angaben zum Brunnenausbau, zu Alterungserscheinungen oder Schäden sowie Fotoaufnahmen in drei verschiedenen Tiefen enthält. Der Vergleich der Messungen vor und nach Regenerierung erfolgt hier hauptsächlich aufgrund der Fotodokumentation und enthält die einfache optische Beurteilung des Reinigungseffektes im Filterinnenrohr.

Zu beachten ist, dass die Kamerabefahrung mit dem Null-Bezugspunkt „Oberkante Brunnenkopf“ durchgeführt wurde, die Tiefenangaben in der Auswertung jedoch auf den Messpunkt „Oberkante des Montagedeckels“ D-OK berechnet werden, da Altdaten, Pumpversuche und geophysikalische Messungen diesen Messbezugspunkt haben. Zu den Tiefenangaben auf den Fotos im Kurzbericht der Fa. BRM muss also jeweils der Abstand zwischen Deckeloberkante (D-OK) und Oberkante Brunnenkopf hinzuaddiert werden. Dieser ist von Brunnen zu Brunnen verschieden und wurde jeweils zu Beginn der Arbeiten gemessen und im Zuge aller Begleituntersuchungen dokumentiert. Die Beschriftungen der Abbildungen enthalten jeweils den Tiefenwert in m u D-OK, d. h. die Tiefenangabe des Fotos in m u Brunnenkopf plus den Abstand Brunnenkopf - Montagedeckel.

Für die Kurzpumpversuche wurden von der Fa. BRM ebenfalls Protokolle angefertigt. Sie enthalten die gemessenen Wasserstände für den Ruhewasserspiegel, den Verlauf der Absenkung und den Wiederanstieg. Aus dem Betrag der Differenz zwischen dem erreichten Wasserspiegel im quasistationären Zustand und dem Ruhewasserspiegel zu Beginn eines jeden Kurzpumpversuches sowie aus der Fördermenge Q wurde außerdem die spezifische Ergiebigkeit errechnet und auf dem Protokoll angegeben. Der Vergleich der Ergiebigkeit vor und nach Regenerierung erfolgt anhand der grafischen Darstellung und Auswertung der spezifischen Ergiebigkeit. Zusätzlich zu den Ergebnissen im Zuge der durchgeführten Regenerierung mit Ultraschall werden die Altdaten zur jeweiligen spezifischen Ergiebigkeit der Brunnen bei bisher durchgeführten chemischen Regenerierungen vergleichend mit einbezogen.

Die geophysikalischen Messungen wurden von der Fa. BLM in einem Kurzbericht für alle fünf Brunnen zusammenfassend beschrieben. Dieser enthält außerdem einen Vergleich der Messergebnisse vor und nach der Regenerierung für jeden der fünf Brunnen. Alle Messwerte sind in so genannten Messlogs abgebildet und dem Kurzbericht beigelegt. Zur Auswertung werden die Differenzen zwischen den Messungen vor und nach Ultraschalleinsatz berechnet und grafisch dargestellt, besonders hinsichtlich der aktiven Filterlänge. Das sind die am Zuflussgeschehen beteiligten Filterabschnitte.

Erwartungsgemäß wurden an allen Brunnen messbare Erfolge in Form einer sichtbaren Entfernung von Belägen, der Steigerung der spezifischen Ergiebigkeit und einer Verbesserung der Anströmung erreicht. Dies wird in Kap. 6.1 für die einzelnen Brunnen und in Kap. 6.2 zusammengefasst beschrieben.

Die während der Regenerierung zusätzlich entnommenen Proben des abgepumpten Wassers und der entfernten Feststoffe wurden, wie in Kap. 4.4 dargelegt, im ESWE-Labor und am Institut für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz analysiert. Die Ergebnisse in Form von Ionen-Gehalten wurden in Tabellen zusammengefasst und anschließend grafisch dargestellt und vergleichend ausgewertet. Die Darstellung der Ergebnisse folgt in Kap. 6.3. Dabei werden auch die Altdaten bisher durchgeführter chemischer Regenerierungen mit einbezogen. Die Zusammenfassung und Bewertung aller Ergebnisse gibt Kap. 6.4 ab S.225.

6.1 Begleituntersuchungen und Regeneriererfolg an den einzelnen Brunnen

Die erste, grundlegende Beurteilung des Erfolges der Regenerierung erfolgte bei allen fünf Brunnen grundsätzlich durch die einfache optische Beurteilung einerseits der Wassertrübung beim Abpumpen und andererseits der Innenansicht des Brunnenausbaus bei den Kamerabefahrungen. Diese Daten können nur deskriptiv ausgewertet werden. Gegenübergestellt wurden dann jeweils die Daten aus den einzelnen Messprotokollen der Pumpversuche und der geophysikalischen Bohrlochmessungen vor und nach der Ultraschallbehandlung. Daraus wurde rechnerisch die erzielte Leistungssteigerung ermittelt.

Für die einzelnen Brunnen ergaben sich folgende Ergebnisse:

Brunnen 20a

Die erste Kamerabefahrung fand am 05.05.2004 statt. Der Abstand zwischen Brunnenkopf und Oberkante Montagedeckel betrug 3,00 m. Der Ruhewasserspiegel lag 0,41 m u Brunnenkopf. Das entspricht 3,41 m u D-OK. Das Wasser war schwach trüb.

Bereits in dieser Tiefe begannen dünne, schwarzbraune Aufwüchse, die nach unten in ihrer Dichte und Dicke zunahmen. Am Filterbeginn zeigten sich schwarzbraune bis gelbbraune, flockige Aufwüchse. Abb. 6-1 zeigt links eine Aufnahme aus 3,77 m Tiefe unter Brunnenkopf, d. h. aus dem ersten Filtermeter und rechts aus 5,59 m unter Brunnenkopf aus dem mittleren Filterbereich:

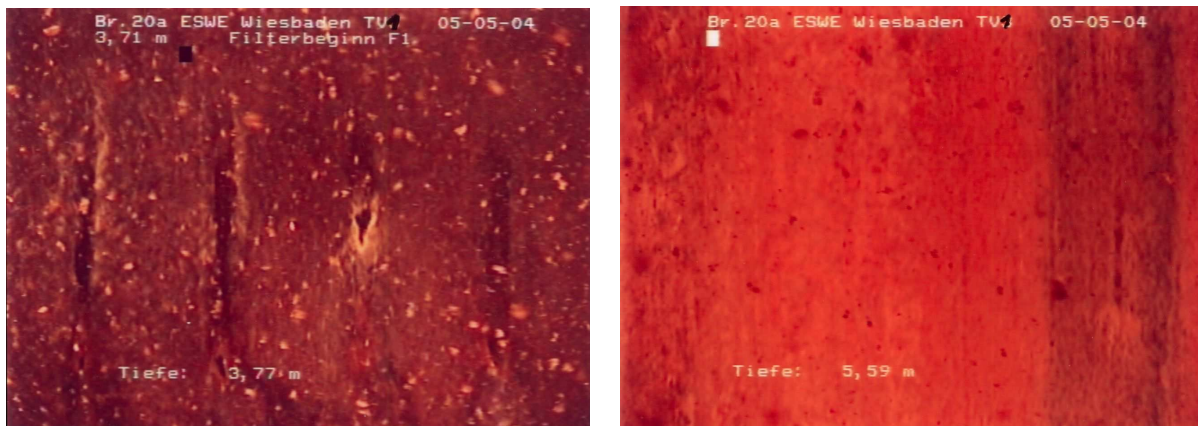


Abb. 6-1: Kamerabefahrung Brunnen 20a, 05.05.2004, Aktueller Bauzustand, Bild 1 (links) aus 3,77 m u D-OK und Bild 2 (rechts) aus 5,59 m u D-OK [BRM, 2004]

Ab ca. der Mitte der Filterstrecke wechselte die Farbe der Beläge der Rohrwandung von schwarz- bis gelbbraun zu rotbraun, wie auch in Abb. 6-1 zu sehen ist. Die Filterschlitzte waren dabei völlig geschlossen. In diesem Zustand zeigte sich der Brunnen bis zu seiner Endteufe.

Nach der mechanischen Vorreinigung und dem anschließenden Pumpversuch fand am Abend des 05.05.2004 die zweite Kamerabefahrung statt. Der Ruhewasserspiegel lag 0,48 m unter Brunnenkopf, entspricht 3,48 m u D-OK. Er lag damit tiefer als vorher.

Die Kamerabefahrung zeigte, dass durch das Bürsten ein Großteil der Aufwüchse entlang der Rohrwandung entfernt werden konnte. Die Filterschlitzte waren überwiegend offen. Lediglich im Bereich zwischen 5,50 und 6,00 m unter Brunnenkopf (8,50 bis 9,00 m u D-OK), d. h. im mittleren Filterbereich, wo auch der Farbwechsel der Beläge aufgetreten

war, zeigten sich ausgehärtete Restaufwüchse und die Filterschlitzte waren zum Teil geschlossen. Abb. 6-2 zeigt links als Beispiel wiederum die Aufnahme aus 5,59 m unter Brunnenkopf (entsprechend 8,59 m u D-OK).

Zum Zeitpunkt der dritten Kamerabefahrung, am 06.05.2004 nach der Ultraschallbehandlung und dem abschließenden Pumpversuch war der Brunnen artesisch. Die Filterschlitzte waren geöffnet und die Rohrwandung weitgehend sauber. Im mittleren Bereich des Filters verblieben stellenweise dünne, schwarzbraune Restaufwüchse (Abb. 6-2 rechts):

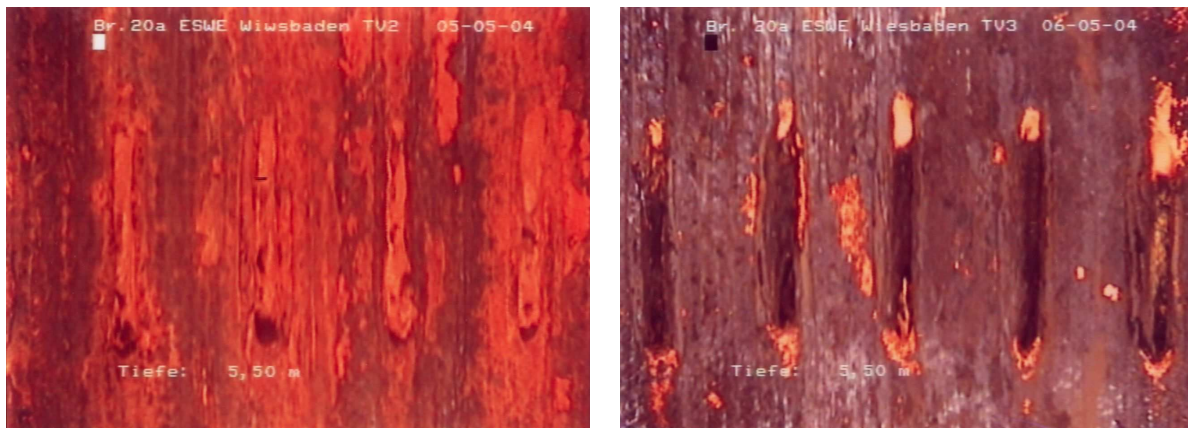


Abb. 6-2: Kamerabefahrung Brunnen 20a, 05.05.2004, links: nach mechanischer Vorreinigung, rechts: nach Ultraschall, Bild 2 aus 8,50 m u D-OK [BRM, 2004]

Inwieweit sich die Entfernung der Beläge aus der Rohrwandung und die Öffnung der Filterschlitzte auf die Leistungssteigerung auswirkte, sollte anhand von Pumpversuchen ermittelt werden.

Der erste Pumpversuch fand am 05.05.2004 vor dem Bürsten statt. Der Ruhewasserspiegel lag bei 3,43 m u D-OK. Die Förderrate wurde auf 0,95 l/s eingestellt und über die gesamte Dauer des Pumpversuches nicht geändert sowie für die folgenden Versuche beibehalten.

Der quasistationäre Zustand hatte sich nach 50 Minuten bei einem Wasserstand von 5,05 u D-OK eingestellt. Nach 90 Minuten wurde die Pumpe abgeschaltet und der Wiederanstieg gemessen. Der Ruhewasserspiegel war nach ca. 20 Minuten erreicht. Der Wasserstand stieg darüber hinaus auf 3,15 m u D-OK, also 0,28 m höher als vor dem Pumpversuch. Aus den Daten ergibt sich folgende Berechnung:

Fördermenge Q	=	0,95 l/s	entspricht 3,42 m ³ /h
Absenkung s	=	5,05 m – 3,43 m	entspricht 1,62 m
Spez. Ergiebigkeit	=	Q / s	entspricht 2,11 m ³ /h*m

Der zweite Pumpversuch, am Nachmittag des 05.05.2004, wurde unter den gleichen Grundbedingungen durchgeführt. D. h. alle verwendeten Geräte und Materialien, wie die Pumpe, Steigleitungen, Wasseruhr und Schieber zur Regulierung der Durchflussmenge, waren dieselben und die Förderrate wurde wiederum bei 0,95 l/s belassen.

Der Ruhewasserspiegel nach der mechanischen Vorreinigung lag bei 3,51 m u D-OK. Der quasistationäre Zustand stellte sich nach 75 Minuten bei einem Wasserstand von 4,96 m u D-OK ein. Nach 90 Minuten wurde die Pumpe abgeschaltet und der Wiederanstieg gemessen. Der Ruhewasserspiegel vom Start des Pumpversuches konnte nicht erreicht werden, sondern der Wasserstand kam bei 3,54 m u D-OK, also 0,03 m unter dem Startwert, zur Ruhe. Daraus ergeben sich folgende Berechnungen:

Fördermenge Q	=	0,95 l/s	entspricht 3,42 m ³ /h
Absenkung s	=	4,96 m – 3,51 m	entspricht 1,45 m
<i>Spez. Ergiebigkeit</i>	=	Q / s	entspricht 2,35 m ³ /h*m

Daraus ergibt sich eine Steigerung der spezifischen Ergiebigkeit allein durch das Bürsten um 0,24 m³/h*m.

Die Ultraschallbehandlung des Brunnens erfolgte am Vormittag des 06.05.2004 gemäß dem beschriebenen Ablauf und begleitet von geophysikalischen Messungen.

Der dritte Pumpversuch zur Ermittlung der Leistungssteigerung wurde im Anschluss daran am 06.05.2004 nachmittags durchgeführt.

Der Brunnen war zu dieser Zeit artesisch. Daher wurde mit der Messung der Wasserstände erst begonnen, nachdem die Brunnenstube leer gepumpt war und das Wasser 0,00 m u Brunnenkopf stand. Der Ruhewasserspiegel lag also rechnerisch bei 3,00 m u D-OK. Der quasistationäre Zustand wurde bereits nach 30 Minuten bei einem Wasserstand von 4,04 m u D-OK erreicht. Der Wiederanstieg dauerte 2 Minuten, danach war der Überlauf am Brunnenkopf erreicht. Daraus errechnet sich:

Fördermenge Q	=	0,95 l/s	entspricht 3,42 m ³ /h
Absenkung s	=	4,04 m – 3,00 m	entspricht 1,04 m
<i>Spez. Ergiebigkeit</i>	=	Q / s	entspricht 3,28 m ³ /h*m

Daraus ergibt sich eine Steigerung der spezifischen Ergiebigkeit durch die Beschallung um 0,93 m³/h*m.

Die grafische Auswertung der drei Kurzpumpversuche zeigt Abb. 6-3. Die durchgezogene dunkelblaue Kurve (Absenkung I) zeigt den ersten Pumpversuch vor der Maßnahme, die gestrichelte Kurve (Absenkung II) repräsentiert den zweiten Pumpversuch nach dem Bürsten und die

hellblaue dickere Kurve (Absenkung III) zeigt den Verlauf des Wasserstandes im abschließenden Pumpversuch nach der Beschallung. Die rote Punktlinie markiert den Ausgangsruhwasserspiegel aus dem ersten Pumpversuch. Dieses Schema wurde für die folgenden Abbildungen bei der Auswertung der anderen vier Brunnen beibehalten.

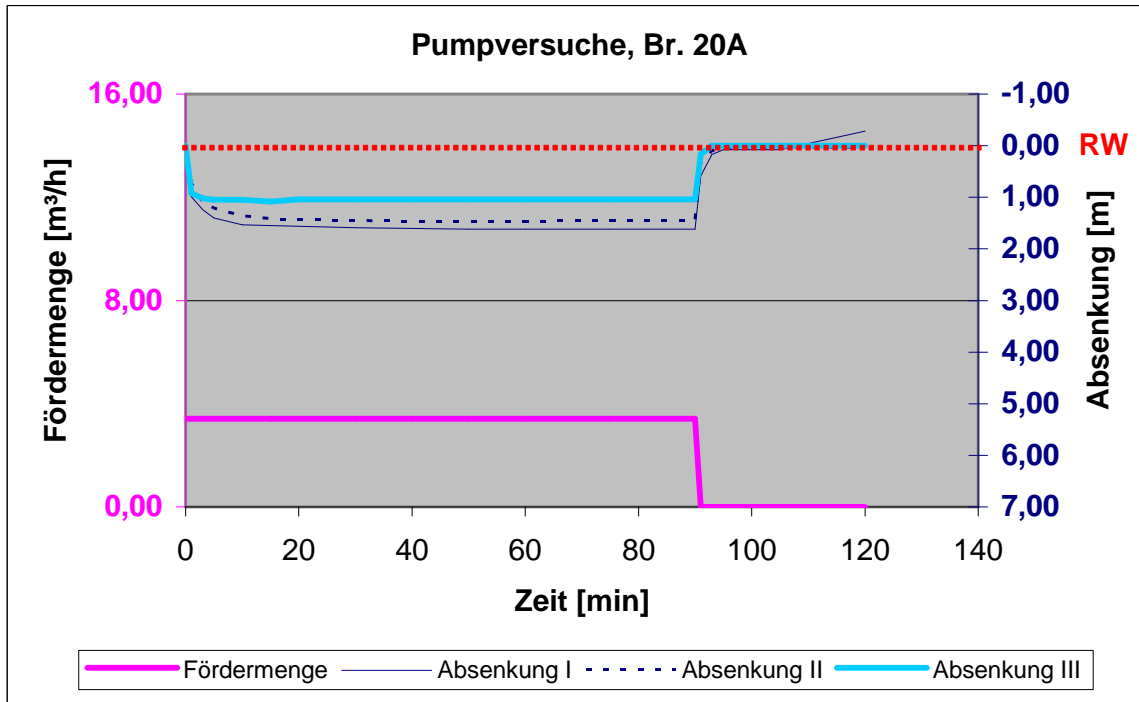


Abb. 6-3: Verlauf von Absenkung und Wiederanstieg während der drei Pumpversuche an Brunnen 20a [Wiacek, 2005 aus BLM 2004]

Sowohl die Kamerabefahrung als auch die Pumpversuche zeigten einen guten Regeneriererfolg. Die Beläge entlang der Rohrwandung konnten nahezu restlos entfernt werden und die Leistung um insgesamt 55 % im Vergleich erster und dritter Pumpversuch bzw. 39 % allein durch die Beschallung im Vergleich nach Bürsten und nach Ultraschall gesteigert werden. Inwieweit die Ultraschallbehandlung dabei in den Bereich des Filterkieses einwirken konnte, sollte anhand der geophysikalischen Messungen beurteilt werden.

Das Messprogramm wurde gemäß der Ablaufbeschreibung (vgl. Kap. 4.2, S.95) mit gleichem Inhalt vor und nach der Ultraschallbehandlung durchgeführt.

Die ersten geophysikalischen Messungen an Brunnen 20a fanden am 05.05.2004 nachmittags statt. Der Ruhewasserspiegel lag 3,50 m u D-OK. Bei den Versuchen mit Förderung betrug die Förderrate 3,42 m³/h und der Brunnen wurde auf 4,50 m u D-OK abgesenkt. Der zweite Messdurchgang erfolgte am 06.05.2004 nachmittags.

Bei gleicher Förderrate wurde der Wasserspiegel hierbei auf nur noch 4,00 m u D-OK abgesenkt.

Die Flowmeter-Messungen im Vergleich zeigten eine Vergrößerung des Anteils der aktiven Filterbereiche von 1,10 m auf 1,50 m. Die Zuflusshorizonte konnten erweitert und damit eine Vergleichmäßigung des Zustroms erreicht werden. Der mittlere Zuflusshorizont, der vor der Regenerierung den Hauptzufluss darstellte, war nach der Regenerierung allerdings nicht mehr aktiv, sondern hier befand sich der Hauptzufluss im oberen Filterbereich im ersten Filtermeter. Abb. 6-4 zeigt im rechten Teil die Gegenüberstellung der Flowmeter-Messungen sowie die Änderungen im Zuflussverhalten und im linken Teil den Vergleich der Gamma-Gamma-Dichtemessungen vor und nach der Ultraschallbehandlung mit einer durchgängig leichten Verringerung der Lagerungsdichte im Ringraum:

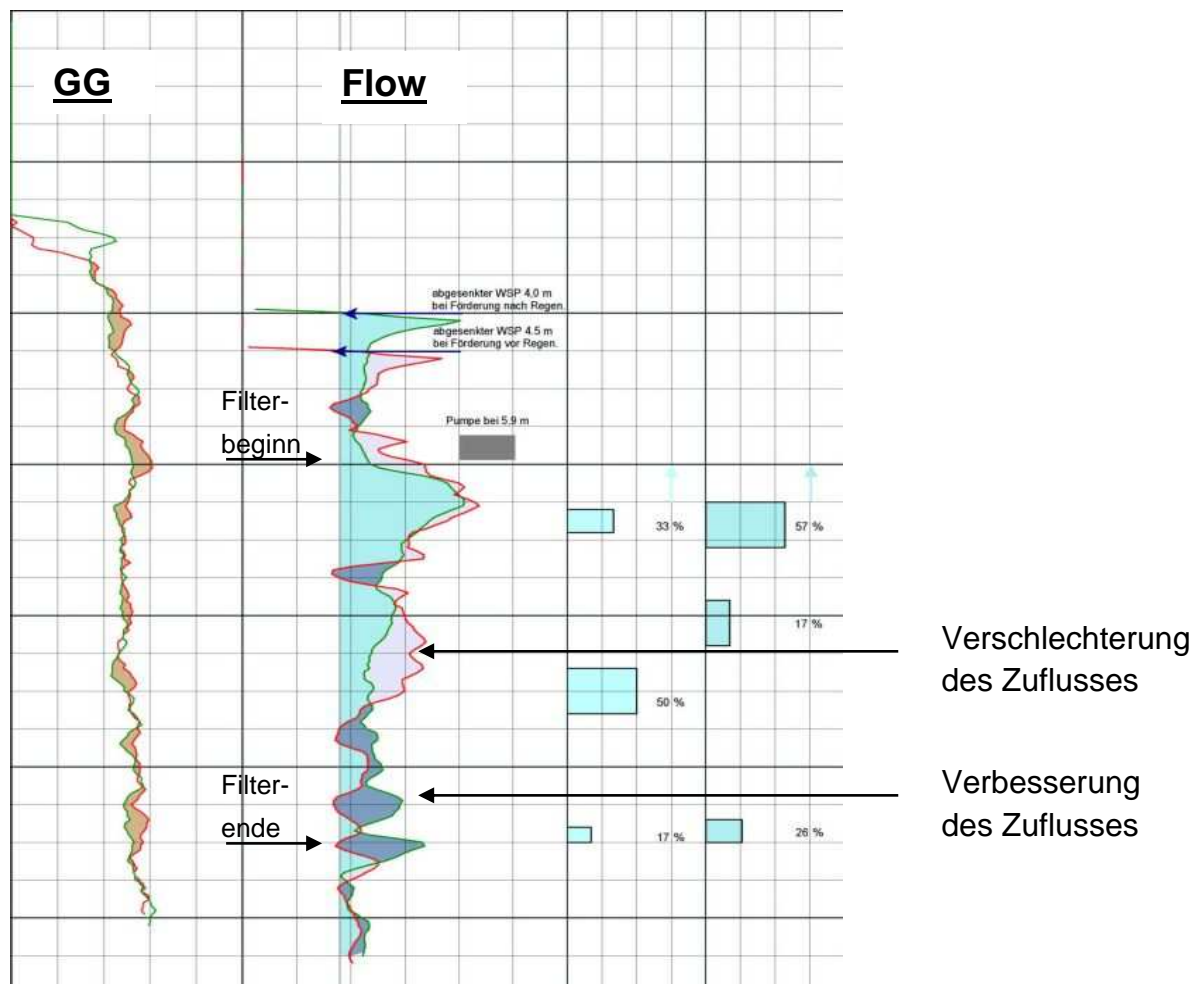


Abb. 6-4: Ausschnitt (ohne Maßstab) aus dem Ergebnisplot der Fa. BLM von Brunnen 20a; links: Gamma-Gamma-Dichtemessungen; rechts: Flowmeter vor (rot) und nach (grün) Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005)

Aus dem Vergleich geht hervor, dass die Verringerung der Lagerungsdichte nur zum Teil mit einer Verbesserung des Zuflusses einhergeht. Abzulesen ist, dass im oberen und unteren Filterbereich die Zuflussanteile erhöht werden konnten. In den unteren beiden Filtermetern korrelieren die Verringerung der Lagerungsdichte und die Erhöhung des Zuflusses in der Flowmeter-Messung nach der Beschallung.

Im mittleren Filtermeter ergab sich aus den geophysikalischen Messungen eine Verschlechterung der Anströmung. Der Filterbereich zwischen 8,00 und 9,00 m u D-OK ist gleichzeitig der Bereich, der bei der letzten Kamerabefahrung noch deutliche Restinkrustationen aufwies.

Brunnen 29a

Der Brunnen wurde am 03. und 04.05.2004 regeneriert. Er befand sich während der gesamten Regeneriermaßnahme in einem artesischen Zustand. Daher wurde als Ruhewasserspiegel immer die Oberkante des Brunnenkopfes angegeben, die bei 3,14 m u D-OK lag. Die Regenerierung begann gemäß Ablaufplan mit der ersten Kamerabefahrung.

Diese wurde am 03.05.2004 vormittags durchgeführt. Das Wasser war klar. Im Bereich des Aufsatzrohres, 4,00 bis 7,00 m u D-OK konnten stellenweise rotbraune bis schwarzbraune inkrustierte Aufwüchse beobachtet werden. Dies setzte sich in den ersten beiden Filtermetern, bis 8,75 m u D-OK fort. In diesem Bereich setzten zusätzlich halbseitig gelbbraune, flockige Beläge ein, wie auch Abb. 6-5 links zeigt.

Sowohl die Dichte als auch die Stärke der Beläge nahm dann im weiteren Tiefenverlauf zu. Die Filterschlitzte waren anfangs teilweise, ab ca. 11,00 m u D-OK völlig geschlossen. Die Beläge hatten eine rotbraune bis gelbbraune Färbung und waren weich und flockig (Abb. 6-5 rechts):

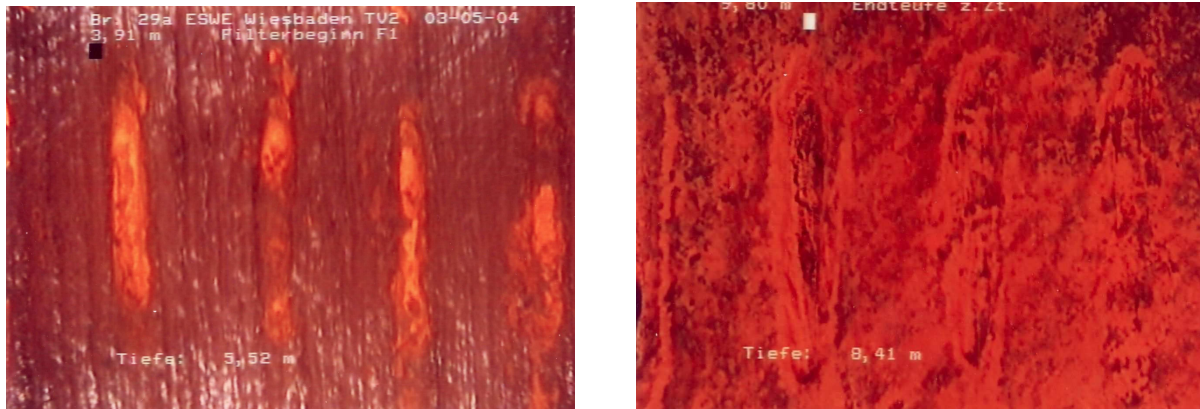


Abb. 6-5: Kamerabefahrung Brunnen 29a, 03.05.2004, Aktueller Bauzustand, Bild 1 (links) aus 8,66 m u D-OK (5,42 m + 3,14 m) und Bild 3 (rechts) aus 11,55 m u D-OK (8,41 m + 3,14 m) [BRM, 2004]

Bereits durch die Vorreinigung mit Bürsten konnte ein Großteil der weichen Beläge entlang der Rohrwandung entfernt werden.

In der zweiten Kamerabefahrung, vom 03.05.2004 nachmittags, zeigten sich das Aufsatzrohr und der erste Meter des Filterrohrs weitgehend sauber. Die Filterschlitzte waren offen. Ab 8,14 m u D-OK traten dünne, rotbraune Restaufwüchse auf, die auch die Filterschlitzte verschlossen. Diesen Tiefenbereich zeigt Abb. 6-6 links aus 8,66 m u D-OK.

Die letzten beiden Filtermeter, zwischen 10,10 und 12,00 m u D-OK zeigten zunehmende, deutliche rotbraune Beläge und geschlossene Filterschlitzte, beispielhaft dargestellt in Abb. 6-6 rechts:

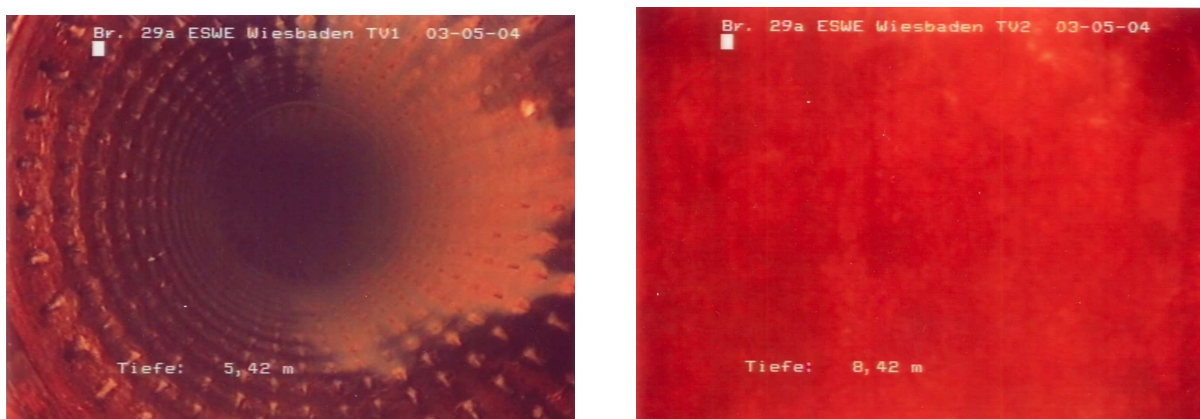


Abb. 6-6: Kamerabefahrung Brunnen 29a, 03.05.2004, nach mechanischer Vorreinigung, Bild 1 (links) aus 8,66 m u D-OK (5,42 m + 3,14 m) und Bild 3 (rechts) aus 11,55 m u D-OK (8,41 m + 3,14 m) [BRM, 2004]

Die abschließende Kamerabefahrung nach der Ultraschallbehandlung am Nachmittag des 04.05.2004 zeigte, dass die Beläge durch die Behandlung weitgehend entfernt und die Filterschlitzte geöffnet werden

konnten. Die Rohrwandung im Bereich des Aufsatzrohres und des ersten Filtermeters war sauber, im darunter liegenden Filterbereich verblieben lediglich dünne, schwarzbraune bis rotbraune inkrustierte Restbeläge. Die Filterschlitzte waren im gesamten Filterbereich geöffnet, wie auch Abb. 6-7, wiederum aus 11,56 m u D-OK, zeigt:

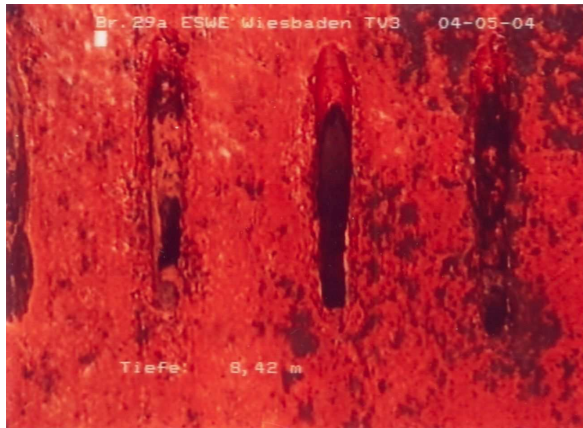


Abb. 6-7: Kamerabefahrung Brunnen 29a, 04.05.2004, nach Ultraschallregenerierung, Bild 3 aus 11,56 m u D-OK [BRM, 2004]

Wie sich die Entfernung der Beläge auf die Ergiebigkeit des Brunnens auswirkte, sollten auch hier die drei Pumpversuche zeigen.

Der erste Pumpversuch, zur Ermittlung des Zustandes vor der Regenerierung wurde am 03.05.2004 morgens durchgeführt. Angepasst an die Ergiebigkeit des Brunnens und die geschätzte Fördermenge bei Normalbetrieb wurde die Förderleistung auf 2,17 l/s eingestellt und im weiteren Verlauf nicht mehr geändert. Da der Brunnen artesisch war, wurde der Ruhewasserstand mit 3,14 m u D-OK angegeben. Der quasistationäre Zustand stellte sich nach 50 Minute bei einem Wasserstand von 4,77 m u D-OK ein. Daraus ergeben sich folgende Berechnungen:

Fördermenge Q	=	2,17 l/s	entspricht 7,82 m ³ /h
Absenkung s	=	4,77 m – 3,14 m	entspricht 1,63 m
Spez. Ergiebigkeit	=	Q / s	entspricht 4,79 m ³ /h*m

Nach Abschalten der Pumpe nach 90 Minuten Pumpdauer wurde der Wiederanstieg gemessen. Der Überlauf am Brunnenkopf trat nach 10 Minuten ein.

Der zweite Pumpversuch erfolgte am 03.05.2004 nach der mechanischen Vorreinigung und dem Abpumpen der gelösten Beläge. Auch zu diesem Zeitpunkt war der Brunnen artesisch. Die eingestellte Fördermenge wurde unter Verwendung der gleichen Pumpe, Wasseruhr und des Schiebers beibehalten.

Der quasistationäre Zustand wurde nach 60 Minuten erreicht. Der Wasserspiegel lag 5,09 m u D-OK, woraus sich errechnet:

Fördermenge Q	=	2,17 l/s	entspricht 7,82 m ³ /h
Absenkung s	=	5,09 m – 3,14 m	entspricht 1,95 m
Spez. Ergiebigkeit	=	Q / s	entspricht 4,01 m ³ /h*m

Der Wiederanstieg dauerte länger als 30 Minuten.

Durch das Bürsten wurde die Leistung des Brunnens um 0,78 m³/h*m verschlechtert. Die Gründe hierfür können nicht eindeutig bestimmt werden.

Der dritte Pumpversuch wurde nach der Ultraschallregenerierung am Nachmittag des 04.05.2004 durchgeführt. Als Ruhewasserspiegel galt weiterhin der Brunnenkopf bei 3,14 m u D-OK. Der quasistationäre Zustand wurde nach ca. 50 Minuten mit einem Wasserstand von 4,49 m u D-OK erreicht. Die Pumpe wurde nach 120 Minuten abgeschaltet und nach 10 Minuten war der Wiederanstieg auf den Ruhewasserspiegel bzw. der Überlauf erreicht. Daraus errechnen sich:

Fördermenge Q	=	2,17 l/s	entspricht 7,82 m ³ /h
Absenkung s	=	4,49 m – 3,14 m	entspricht 1,35 m
Spez. Ergiebigkeit	=	Q / s	entspricht 5,79 m ³ /h*m.

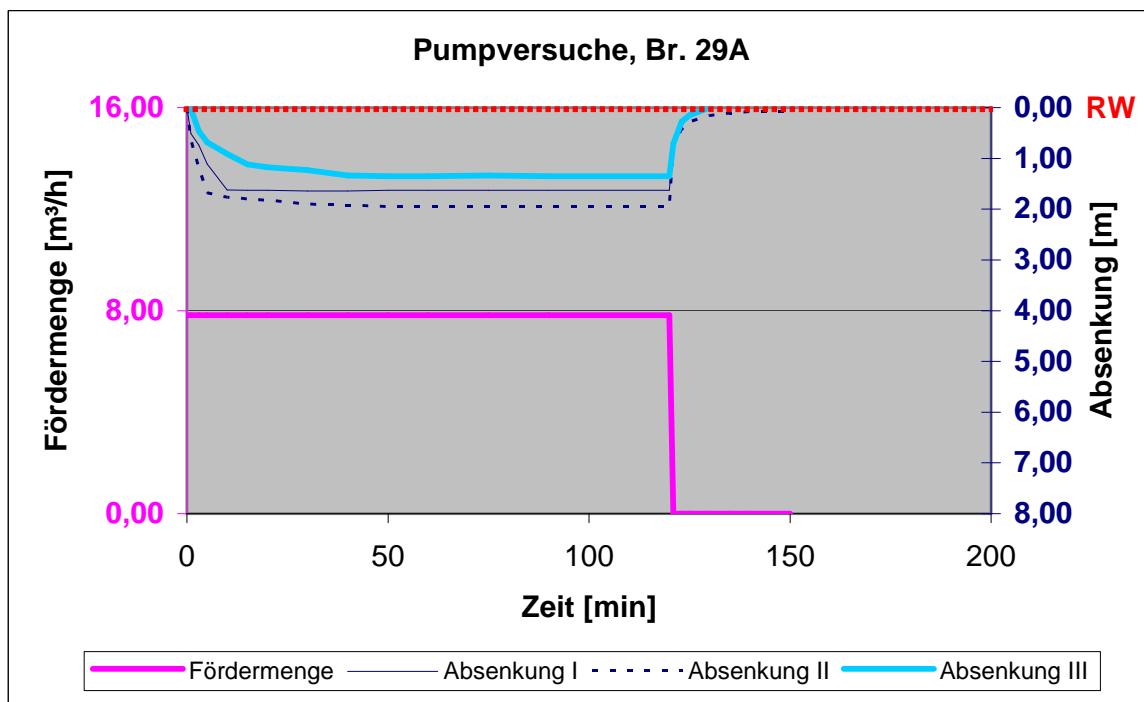


Abb. 6-8: Verlauf von Absenkung und Wiederanstieg während der drei Pumpversuche an Brunnen 29a (Wiacek, 2005)

Dies bedeutet eine Verbesserung der spezifischen Ergiebigkeit durch die Beschallung um $1,78 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$. Die Ergebnisse sind grafisch ausgewertet in Abb. 6-8. Die rote Punktlinie entspricht in diesem Fall der Höhe des Brunnenkopfes.

Insgesamt konnte die Leistung an Brunnen 29a um 20,8 % verglichen mit dem Wert zu Beginn der Maßnahme und um 44,4 % im direkten Vergleich der Leistung vor und nach Beschallung gesteigert werden.

Was die Behandlung mit Ultraschall im Ringraum des Brunnens bewirkte, sollte der Vergleich der geophysikalischen Messungen zeigen.

Die Daten der geophysikalischen Messungen müssen im Folgenden aufgrund einer fehlerhaften Interpretation des Brunnenausbaus aus den Messdaten seitens der Fa. BLM neu bewertet werden. Sie widersprechen damit hinsichtlich der Angaben zum Filterbeginn und Filterende dem Kurzbericht der Fa. BLM.

Die Messungen fanden am 04.05.2004 jeweils vor und nach der Ultraschallregenerierung gemäß dem beschriebenen Programm statt.

Für die Flowmeter-Messungen wurde eine Förderrate von $7,82 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$ gewählt, wobei sich vor der Beschallung ein Wasserstand von 4,80 m u D-OK und nach der Beschallung von 4,50 m u D-OK einstellte.

Der Vergleich der Messergebnisse vor und nach Ultraschall zeigt kaum Veränderungen. Besonders im unteren Filterabschnitt wurde der Zufluss teilweise deutlich verschlechtert. Der Brunnen wies allerdings sowohl vor als auch nach dem Ultraschalleinsatz Zuflussanteile von unterhalb des Filters auf. Die Zuflussanteile erhöhten sich nach der Beschallung vor allem im oberen und mittleren Filterbereich. Der untere Filtermeter und besonders der Abschnitt direkt am Filterende zeigte indifferentes Verhalten, was auf Basis der wenigen durchgeführten Messungen nicht ausreichend interpretiert werden kann.

Die Messungen zur Lagerungsdichte im Ringraum zeigten ebenfalls nur wenige Änderungen durch die Beschallung. In den oberen beiden Filtermetern und am Filterende konnte die Lagerungsdichte leicht verringert werden. Die Abschnitte mit verbesserter Lagerungsdichte korrelierten jedoch nicht mit den Bereichen mit erhöhtem Zufluss.

Die Ergebnisse sind in Abb. 6-9 grafisch zusammengefasst:

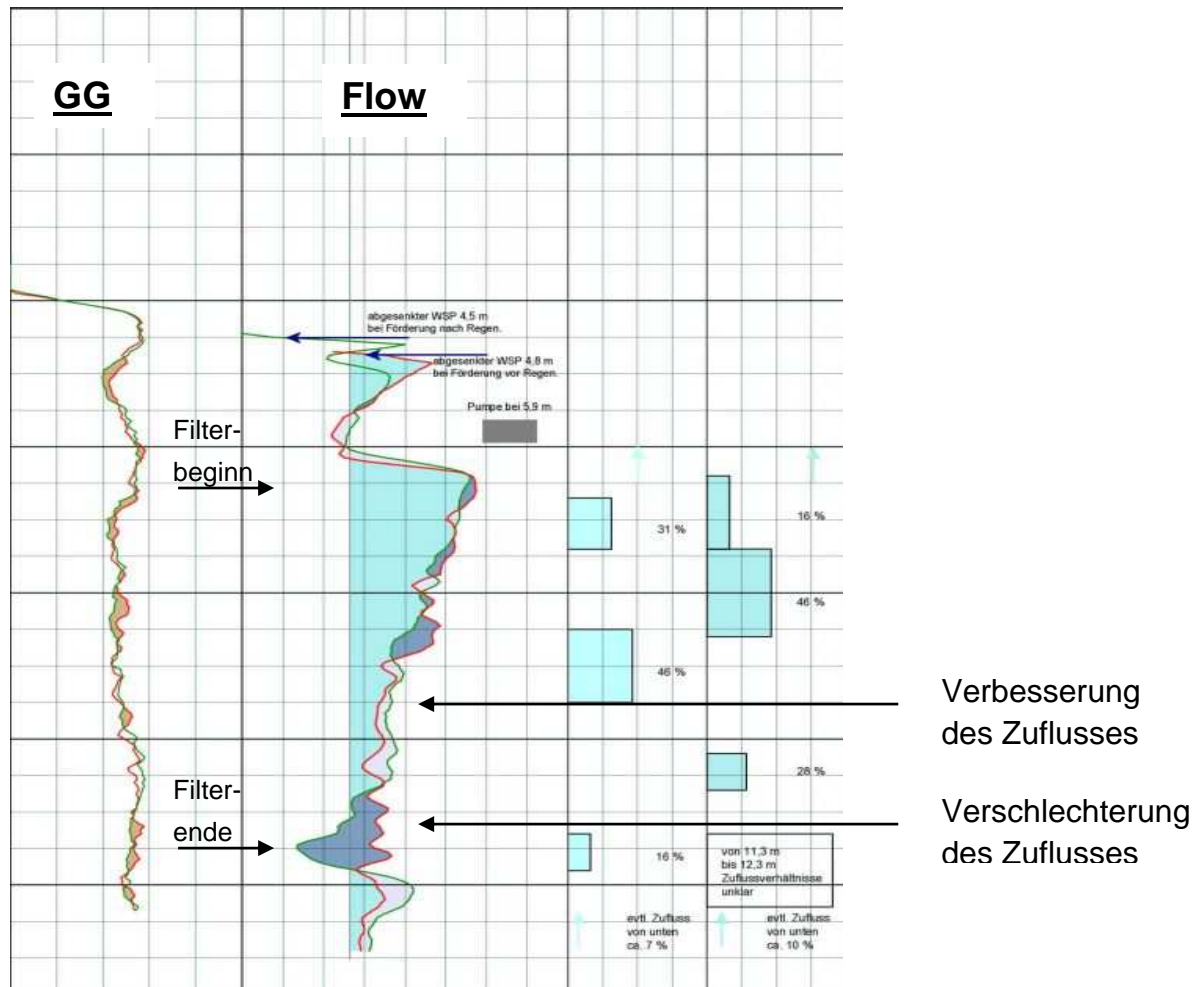


Abb. 6-9: Ausschnitt (ohne Maßstab) aus dem Ergebnisplot von Brunnen 29a der Fa. BLM; links: Gamma-Gamma-Dichtemessungen; rechts: Flowmeter vor (rot) und nach (grün) Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005)

Trotz der guten Entfernung der Beläge im Brunneninnenraum, die die Kamerabefahrung anzeigte, und der erzielten Leistungssteigerung in dem abschließenden Pumpversuch änderten sich die geophysikalischen Werte nur wenig und der Brunnen zeigte besonders im unteren Filterabschnitt irreguläres Verhalten.

Inwieweit dies in einem Zusammenhang mit bereits bekannten Stellen mit Aufstieg von hochmineralisiertem Tiefenwasser steht, was im Bereich des Brunnens 29a anhand von Chloridgehalt-Bestimmungen aufgezeigt wurde, soll an späterer Stelle in die Diskussion einbezogen werden.

Brunnen 31a

Die Regenerierung des Brunnens erfolgte am 23. und 26.04.2004. Die erste Kamerabefahrung des 1996 zum letzten Mal chemisch regenerierten Brunnens fand am 23.04.2004 statt.

Der Ruhewasserspiegel lag 3,46 m u D-OK und das Wasser war schwach trüb. Der Abstand zwischen Brunnenkopf und Montagedeckel betrug 3,05 m.

Das Aufsatzrohr und die ersten drei Meter des Filterbereiches wiesen lediglich dünne, rotbraune Beläge auf. Die Schlitzbrücken des Kupferfilterrohres waren i. d. R. offen, wie auch Abb. 6-10 links belegt.

In den beiden unteren Filtermetern, zwischen 8,85 und 10,90 m u D-OK nahmen Dicke und Dichte der Beläge zu und die Schlitzbrücken waren von rotbraunen Aufwüchsen geschlossen. Abb. 6-10 rechts zeigt ein Foto aus 10,65 m u D-OK Tiefe:

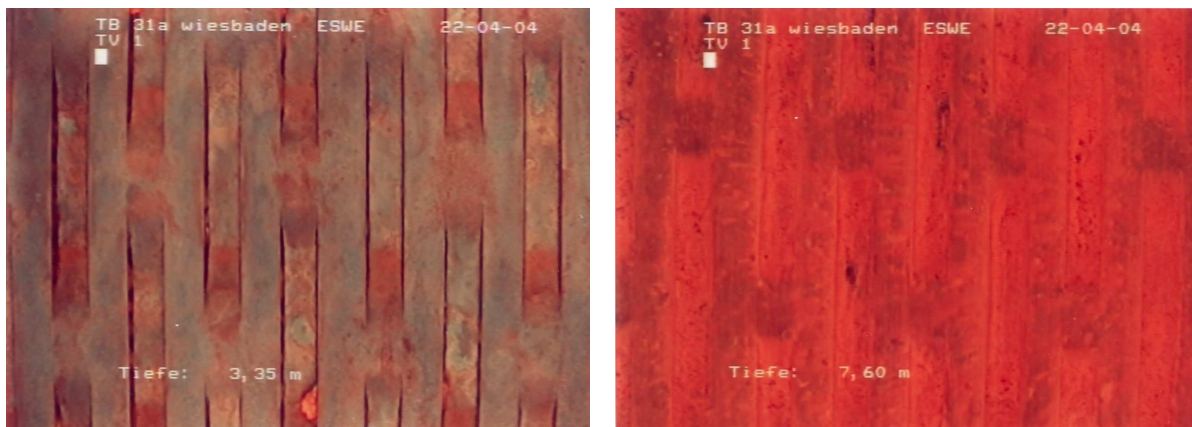


Abb. 6-10: Kamerabefahrung Brunnen 31a, 23.04.2004, Aktueller Bauzustand, Bild 1 (links) aus 6,40 m u D-OK (3,35 m + 3,05 m) und Bild 3 (rechts) aus 10,65 m u D-OK (7,60 m + 3,05 m) [BRM, 2004]

Nach der mechanischen Vorreinigung und dem anschließenden Pumpversuch fand die zweite Kamerabefahrung statt. Der Brunnen befand sich dabei in einem artesischen Zustand und das Wasser war trüb. Entlang der gesamten Rohrwandung traten stellenweise dünne, rotbraune Restbeläge auf. Die Filterschlitzbrücken waren jedoch weitgehend offen. Ab 10,20 m u D-OK waren die Schlitzbrücken teilweise mit Restaufwüchsen geschlossen. Dies zeigt auch Abb. 6-11.

Erkennbar war weiterhin eine beginnende Zersetzung der Filterschlitzbrücken im mittleren Filterbereich zwischen 7,50 und 8,50 m u D-OK mit z. T. eindringendem Filterkies durch die erweiterten Öffnungen.

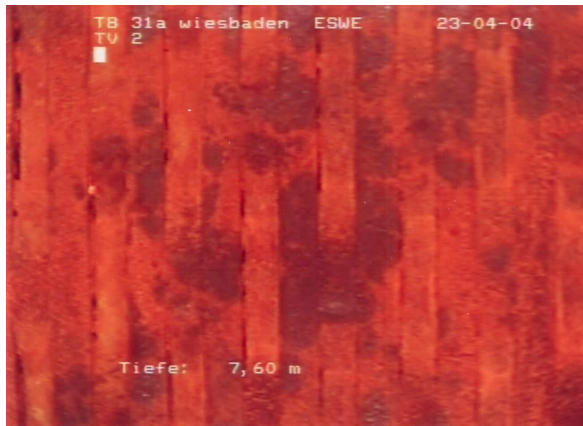


Abb. 6-11: Kamerabefahrung Brunnen 31a, 23.04.2004, Nach mechanischer Vorreinigung, Bild 3 aus 10,65 m u D-OK [BRM, 2004]

Nach der Ultraschallbehandlung wurde die abschließende Kamerabefahrung am 26.04.2004 durchgeführt. Der Brunnen war wiederum artesisch und das Wasser war klar. Die Aufnahmen zeigten, dass die Beläge bis auf stellenweise geringe, dünne, rotbraune Restaufwüchse entfernt werden konnten. Im letzten Filtermeter, ab 10,15 m u D-OK verbleiben rotbraune, stark inkrustierte Beläge an der Rohrwandung und teilweise in den Filteröffnungen.

Die Entfernung der Beläge wirkte sich positiv auf die Brunnenleistung aus, wie die Betrachtung der Ergebnisse der drei Pumpversuche zeigt.

Der Ist-Zustand vor Beginn der Arbeiten am Brunnen wurde am 23.04.2004 aufgenommen. Der Ruhewasserspiegel lag bei 3,57 m u D-OK und wurde bei einer Förderrate von 2,70 l/s auf 5,26 m u D-OK abgesenkt. Dieser quasistationäre Zustand stellte sich nach 40 Minuten ein. Die spezifische Ergiebigkeit des Brunnens errechnet sich zu:

Fördermenge Q	=	2,20 l/s	entspricht 9,72 m ³ /h
Absenkung s	=	5,26 m – 3,57 m	entspricht 1,69 m
Spez. Ergiebigkeit	=	Q / s	entspricht 5,75 m ³ /h*m

Die Pumpe wurde nach 90 Minuten abgeschaltet. Nach weiteren 20 Minuten war der Wasserspiegel auf 3,54 m u D-OK angestiegen und lag damit geringfügig über dem Ruhewasserspiegel zu Beginn des Pumpversuches.

Nach dem Bürsten des Brunnens wurde der nächste Pumpversuch am 23.04.2004 durchgeführt. Alle Randparameter blieben gleich.

Der Ruhewasserspiegel lag bei 3,54 m u D-OK. Der Beharrungszustand stellte sich nach 50 Minuten bei einem Wasserstand von 4,79 m ein, woraus sich folgende Berechnung ergibt:

Fördermenge Q	=	2,20 l/s	entspricht 9,72 m ³ /h
Absenkung s	=	4,79 m – 3,54 m	entspricht 1,25 m
<i>Spez. Ergiebigkeit</i>	=	Q / s	entspricht 7,77 m ³ /h*m

Nach Abschalten der Pumpe war der ursprüngliche Ruhewasserspiegel nach 10 Minuten erreicht und der Wasserspiegel stieg weiter bis auf einen neuen Wasserstand im Brunnen bei 3,20 m u D-OK.

Daraus, und aus den Angaben der zweiten Kamerabefahrung, gemäß derer der Brunnen im artesischen Zustand war, ergeben sich zwei mögliche Folgerungen. Entweder der Brunnen war nach dem Abpumpen nach der mechanischen Vorreinigung noch nicht im Ruhezustand, als der Pumpversuch begonnen wurde oder der Pumpversuch bewirkte nach dem Bürsten eine zusätzliche Anregung des Brunnens, wobei sich der Zustrom allein durch das Pumpen verbesserte. Aufgrund der Zeitangaben in den Messprotokollen ist jedoch erstere Erklärung wahrscheinlich und der Pumpversuch wurde mit einem verfälschten Ruhewasserspiegel durchgeführt, woraus sich ein größerer als der berechnete Absenkungsbetrag und demzufolge eine kleinere spezifische Ergiebigkeit nach dem Bürsten ergibt.

Mit der Korrektur des Ruhewasserspiegels errechnet sich die spezifische Ergiebigkeit nach dem Bürsten zu:

Fördermenge Q	=	2,20 l/s	entspricht 9,72 m ³ /h
Absenkung s	=	4,79 m – 3,05 m	entspricht 1,74 m
<i>Spez. Ergiebigkeit</i>	=	Q / s	entspricht 5,28 m ³ /h*m

Weitere Schlussfolgerungen daraus werden an späterer Stelle diskutiert.

Der dritte Pumpversuch wurde am Nachmittag des 26.04.2004 nach der Ultraschallregenerierung durchgeführt. Der Brunnen war zu diesem Zeitpunkt ebenfalls artesisch, d. h. der Ruhewasserspiegel entspricht dem Überlauf am Brunnenkopf 3,05 m u D-OK. Der quasistationäre Zustand war nach 30 Minuten bei einem Wasserstand von 4,12 m u D-OK erreicht und der Wiederanstieg nach dem Abschalten der Pumpe nach 90 Minuten erreichte nach 7 Minuten den Überlauf am Brunnenkopf. Daraus errechnen sich:

Fördermenge Q	=	2,20 l/s	entspricht 9,72 m ³ /h
Absenkung s	=	4,12 m – 3,05 m	entspricht 1,07 m
<i>Spez. Ergiebigkeit</i>	=	Q / s	entspricht 9,08 m ³ /h*m

Das bedeutet, die Leistung des Brunnens wurde durch die Regenerierung um insgesamt 3,33 m³/h*m gesteigert. Das entspricht einer prozentualen Leistungssteigerung durch die Gesamtmaßnahme um 58 %.

Die grafische Auswertung der drei Pumpversuche ist dargestellt in Abb. 6-12. Die rote Linie markiert den Brunnenkopf, d. h. der Ausgangsrühewasserspiegel von 3,57 m u D-OK lag darunter.

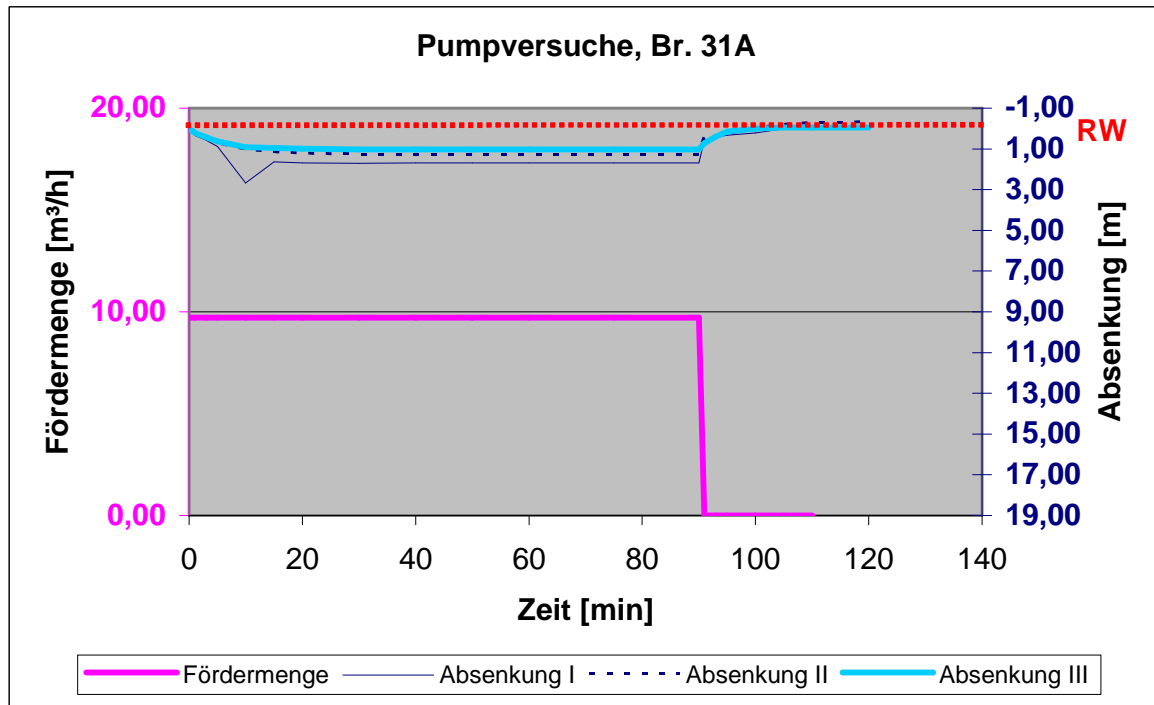


Abb. 6-12: Verlauf von Absenkung und Wiederanstieg während der drei Pumpversuche an Brunnen 31a (Wiacek, 2005)

Damit zeigten sowohl die letzte Kamerabefahrung als auch der dritte Pumpversuch bzw. der Vergleich der Leistung vor und nach der Regeneriermaßnahme einen guten Erfolg der Ultraschallbehandlung.

Der Vergleich der geophysikalischen Messungen sollte die Wirkung des Ultraschalls im Ringraum des Brunnens nachvollziehen. Beide Messeinsätze fanden am 26.04.2004 statt. Der Brunnen befand sich jeweils in artesischem Zustand.

Die Flowmeter-Messungen unter Anregung fanden jeweils bei einer Förderrate von 9,72 m³/h*m statt, wobei sowohl vor als auch nach der Beschallung der Wasserspiegel auf 4,10 m u D-OK abgesenkt wurde. Auch dies weist darauf hin, dass der zweite Pumpversuch fehlerbehaftet war, wobei hierbei zu beachten ist, dass zwischen dem Pumpversuch und den geophysikalischen Messungen das Wochenende vom 24. und 25.04.2004 lag, innerhalb dessen der Brunnen nicht zusätzlich bepumpt wurde, so dass die Strömungsverhältnisse zum Ausgleich kommen konnten.

Beide geophysikalischen Messdurchgänge zeigten nahezu deckungsgleiche Ergebnisse. Weder die aktive Filterlänge noch die

Verteilung der Anströmung und die Lagerungsdichte im Ringraum wurden durch die Beschallung geändert. Abb. 6-13 zeigt zusammengefasst das Ergebnis der Messungen:

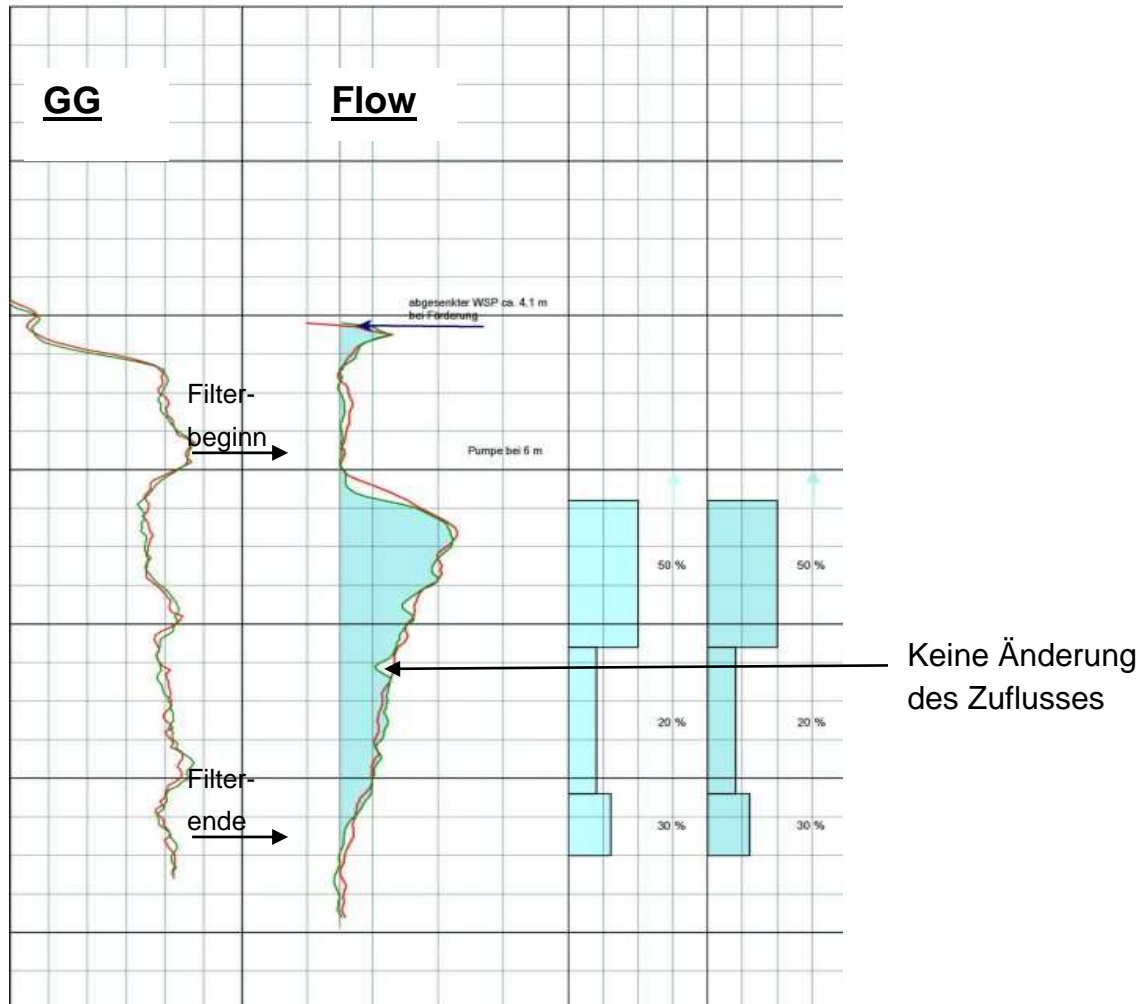


Abb. 6-13: Ausschnitt (ohne Maßstab) aus dem Ergebnisplot von Brunnen 31a der Fa. BLM; links: Gamma-Gamma-Dichtemessungen; rechts: Flowmeter vor (rot) und nach (grün) Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005)

Es bestehen somit keine Korrelationen zwischen den Ergebnissen aus Kamerabefahrung und Pumpversuchen und denen der geophysikalischen Messungen. Eine Interpretation ist aufgrund des beschränkten Umfangs der eingesetzten geophysikalischen Methoden schwierig. Der Vergleich mit älteren Untersuchungen und den Ergebnissen der Probenahme und Analytik sowie den Ergebnissen des Kurzpumpversuches aus dem Jahr 2005 sollte jedoch Schlussfolgerungen zulassen und folgt in Kap. 6.4.

Brunnen 51a

Die Regenerierung des Brunnens erfolgte am 21. und 22.04.2004 und begann mit der ersten Kamerabefahrung. Der Brunnen war artesisch und das Wasser war klar. Der Abstand Brunnenkopf zu Montagedeckel betrug 3,72 m, die entsprechend zu den Tiefenangaben auf den Fotos hinzuaddiert werden mussten.

Bereits das Aufsatzrohr wies dünne, gelbbraune bis rotbraune, flockige Beläge auf. Ab Filterbeginn waren die Beläge in Dichte und Dicke nach unten hin zunehmend. Ab 7,30 m u D-OK, im mittleren Filterbereich, waren die Schlitzbrücken teilweise, ab 11 m u D-OK, d. h. im unteren Filtermeter, waren sie vollständig geschlossen. Abb. 6-14 zeigt eine Aufnahme aus dem mittleren Filterabschnitt:

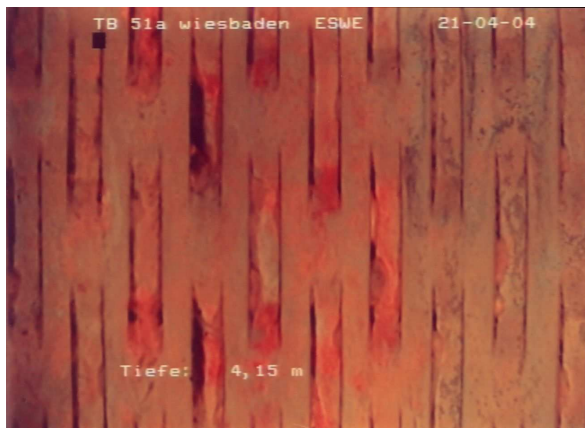


Abb. 6-14: Kamerabefahrung Brunnen 51a, 21.04.2004, aktueller Bauzustand, Bild 2 aus 7,87 m u D-OK [BRM, 2004]

Die zweite Kamerabefahrung vom 21.04.2004 zeigte gegenüber der ersten auf den ersten Blick kaum Veränderungen. Der Brunnen war weiterhin artesisch und das Wasser war klar. Durch das Bürsten des Brunnens konnten die flockigen Aufwüchse im Bereich des Aufsatzrohres weitgehend entfernt werden. Im Filterbereich verblieben stellenweise dünne Restaufwüchse gelbbrauner Farbe. Die Filterschlitzbrücken waren geöffnet. Ab 6,70 m u D-OK traten allseitig stellenweise Restaufwüchse auf. Die Farbe wechselte zu rotbraun und die Beläge erstreckten sich zum Teil auf die Filteröffnungen. Abb. 6-15 zeigt den gleichen Bildausschnitt wie aus der ersten Kamerabefahrung mit erkennbaren rotbraunen Restbelägen nach dem Bürsten (links).

Nach der Ultraschallregenerierung wurde am 22.04.2004 die abschließende Kamerabefahrung durchgeführt, ebenfalls bei artesischem Überlauf des Brunnens und klarem Wasser.

Nach der Ultraschallregenerierung wurde am 22.04.2004 die abschließende Kamerabefahrung durchgeführt, ebenfalls bei artesischem Überlauf des Brunnens und klarem Wasser.

Demnach verblieben lediglich in den unteren zwei Metern der Filterstrecke stellenweise stark inkrustierte Restbeläge, die sich zum Teil auch auf die Schlitzbrücken erstreckten.

Dies zeigt auch Abb. 6-15 rechts nach dem Ultraschalleinsatz:

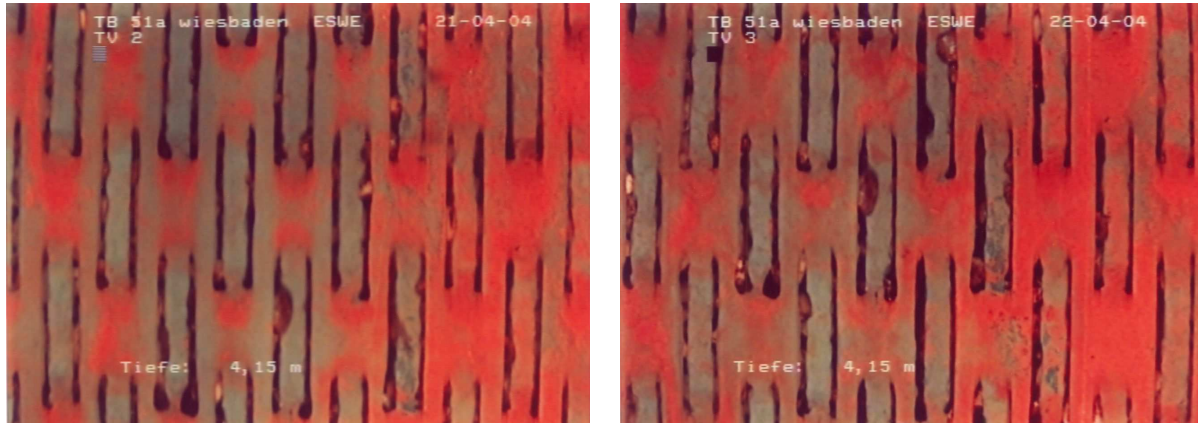


Abb. 6-15: Kamerabefahrung Brunnen 51a, 21.04.2004, links: Nach mechanischer Vorreinigung, rechts: nach Ultraschall, Bild 2 aus 7,87 m u D-OK (4,15 m + 3,72 m) [BRM, 2004]

Insgesamt spiegelten die Kamerabefahrungen wieder, dass der Brunnen erst zwei Jahre zuvor chemisch regeneriert worden war. Demzufolge waren generell nur dünne Beläge und stark inkrustierte Restaufwüchse vorhanden, die auch mit der Ultraschallbehandlung nicht restlos entfernt werden konnten.

Inwieweit sich die erzielten Resultate auf die Leistungssteigerung auswirkten, belegten die Pumpversuche und die geophysikalischen Messungen.

Der erste Pumpversuch erfolgte vor den Regeneriermaßnahmen am 21.04.2004. Als Ruhewasserstand wurde die Oberkante des Brunnenkopfes aufgenommen, da der Brunnen im artesischen Zustand war. Da die Brunnen im Westteil der Galerie der Entnahmebrunnen generell ergiebiger sind als im Ostteil wurde die Entnahmemenge für die Pumpversuche auf 20m³/h eingestellt. Der quasistationäre Zustand stellte sich nach 50 Minuten bei einem Wasserstand von 6,32 m u D-OK ein. Daraus errechnet sich:

Fördermenge Q	=	5,55 l/s	entspricht 20,00 m ³ /h
Absenkung s	=	6,32 m – 3,72 m	entspricht 2,60 m
Spez. Ergiebigkeit	=	Q / s	entspricht 7,69 m ³ /h*m

Nach Abschalten der Pumpe nach 90 Minuten dauerte es nur 5 Minuten, bis der artesische Zustand wieder erreicht war und das Wasser am Brunnenkopf überlief.

Der zweite Pumpversuch fand am Nachmittag des 21.04.2004 nach der mechanischen Vorreinigung statt. An den Grundparametern hatte sich nichts geändert. Der Beharrungszustand war nach 75 Minuten bei einem Wasserstand von 6,23 m u D-OK erreicht. Der Wiederanstieg nach Abschalten der Pumpe nach 120 Minuten dauerte vier Minuten. Durch das Bürsten wurde folgende spezifische Ergiebigkeit erreicht:

Fördermenge Q	=	5,55 l/s	entspricht 20,00 m ³ /h
Absenkung s	=	6,23 m – 3,72 m	entspricht 2,51 m
<i>Spez. Ergiebigkeit</i>	=	Q / s	entspricht 7,96 m ³ /h*m

was einer Leistungssteigerung allein durch das Bürsten um 0,27 m³/h*m entsprach.

Der dritte Pumpversuch, zur Bewertung des Erfolges der Beschallung, wurde am 22.04.2004 nach der Regenerierung und den geophysikalischen Messungen durchgeführt. Hierbei stellte sich der quasistationäre Zustand bereits nach 30 Minuten ein und der Wasserspiegel lag bei 6,12 m u D-OK, woraus sich ergibt:

Fördermenge Q	=	5,55 l/s	entspricht 20,00 m ³ /h
Absenkung s	=	6,12 m – 3,72 m	entspricht 2,40 m
<i>Spez. Ergiebigkeit</i>	=	Q / s	entspricht 8,33 m ³ /h*m

Im Vergleich zum zweiten Pumpversuch entsprach dies einer Steigerung der Ergiebigkeit um 0,37 m³/h*m.

Der Wiederanstieg im dritten Pumpversuch dauerte ebenfalls 4 Minuten. Alle Werte sind in Abb. 6-16 grafisch zusammengefasst. Die rote Markierungslinie entspricht dem Brunnenkopf und damit dem artesischen Überlauf.

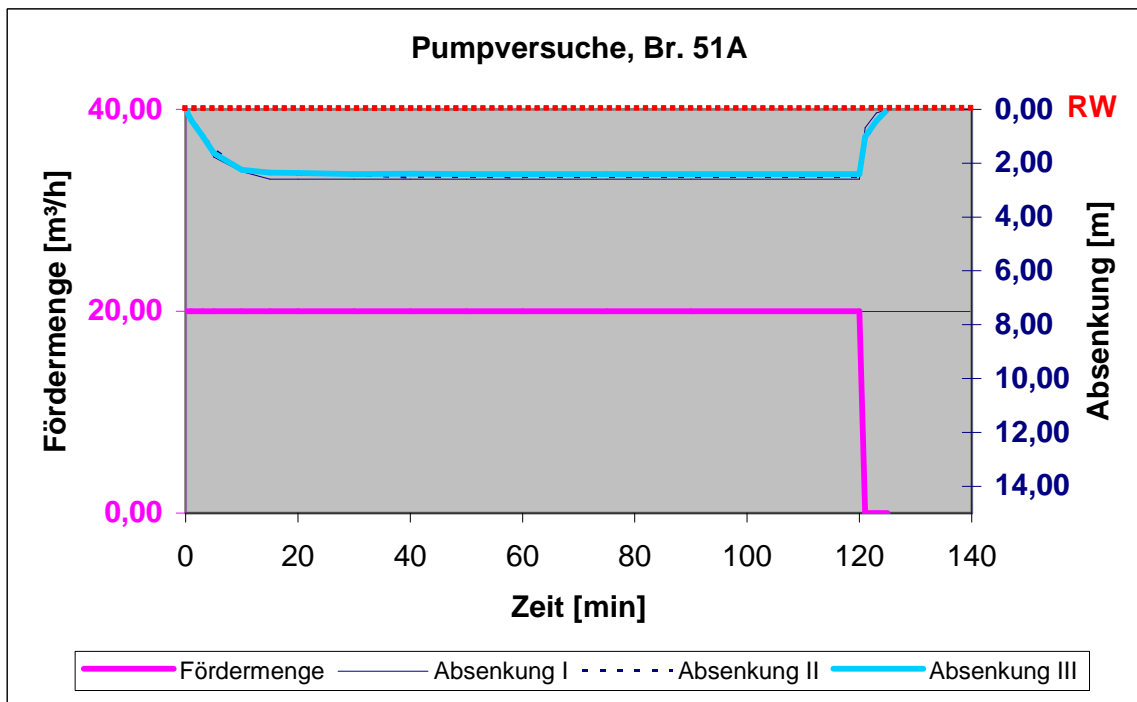


Abb. 6-16: Verlauf von Absenkung und Wiederanstieg während der drei Pumpversuche an Brunnen 51a (Wiacek, 2005)

Aus der Abbildung und den genannten Berechnungen ergab sich eine geringe Leistungssteigerung von 3,5 % nur durch das Bürsten und im Vergleich dazu von 4,6 % allein durch den Ultraschall. Insgesamt wurde die Leistung um 8,3 % im Vorher-Nachher-Vergleich gesteigert. Inwieweit dem Reinigungsvorgänge im Ringraum des Brunnens zugrunde lagen, zeigte der Vergleich der geophysikalischen Messungen.

Die Messungen vor der Ultraschallbehandlung wurden am 22.04.2004 morgens durchgeführt und verliefen gemäß dem dargestellten Ablaufplan. Der zweite Messdurchgang erfolgte am Nachmittag direkt im Anschluss an die Beschallung. Für die beiden Flowmeter-Messungen bei Förderung wurde mit einer Entnahmemenge von 20 m³/h gepumpt, wie sie auch schon bei den Pumpversuchen verwendet worden war. Dabei wurde der Wasserstand sowohl vor als auch nach dem Ultraschalleinsatz auf 5,10 m u D-OK abgesenkt.

Aus der Berechnung der Anteile der am Zufluss beteiligten Filterabschnitte ergab sich eine Verringerung der aktiven Filterlänge von 4,60 m auf 4,30 m. Der Bereich zwischen 7,90 m und 8,50 m u D-OK wurde deaktiviert, während der direkt darunter liegende Abschnitt von 8,50 m bis 10,30 m u D-OK geringfügig mehr zum Gesamtzufluss beitrug. Der Vergleich der Messwerte der Gamma-Gamma-Messungen zeigte eine durchgehende Verringerung der Lagerungsdichte an.

Diese hatte jedoch gemäß der Messlogs nur sehr wenig Einfluss auf die Verteilung der Zuflüsse. Hierbei verliefen die Kurven vor und nach Regenerierung nahezu deckungsgleich. Abb. 6-17 zeigt den entsprechenden Ausschnitt aus dem Abschlussbericht der Fa. BLM:

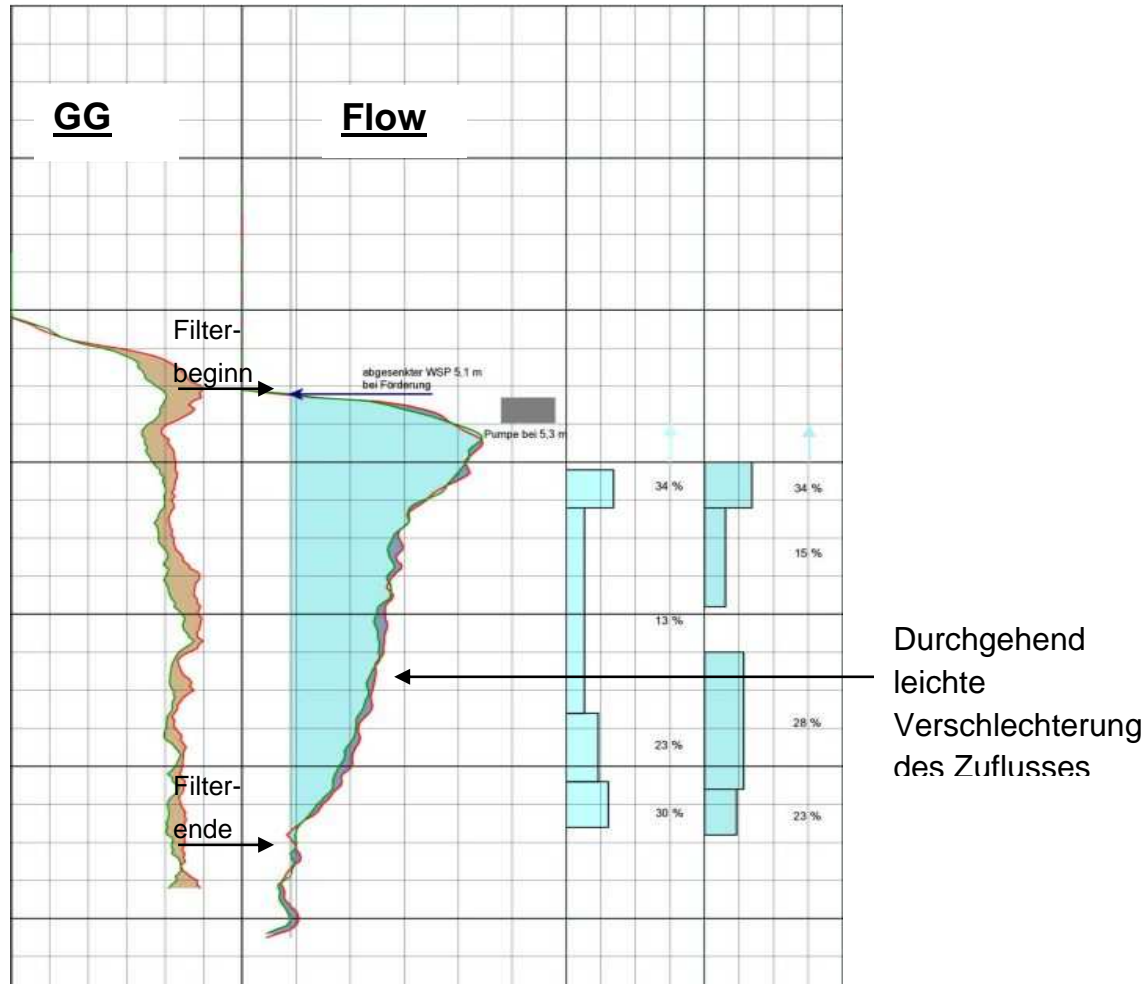


Abb. 6-17: Ausschnitt (ohne Maßstab) aus dem Ergebnisplot von Brunnen 51a der Fa. BLM; links: Gamma-Gamma-Dichtemessungen; rechts: Flowmeter vor (rot) und nach (grün) Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005)

Trotz der Verringerung der Lagerungsdichte zeigten die Flowmeter-Messungen genau wie die Ergebnisse der Kamerabefahrungen und der Pumpversuche nur einen geringen Einfluss des Ultraschalls und eine geringe Wirkung im Brunnen. Dies trägt erwartungsgemäß dem Unstand Rechnung, dass der Brunnen erst im Jahr 2002 chemisch regeneriert worden war. Er war, wie auch vor allem die Wiederanstiegszeiten in den Pumpversuchen zeigten, nicht wirklich regenerierbedürftig. Dennoch konnten eisen- und manganhaltige Beläge ausgetragen werden, wie im Kap. 6.3 noch dargestellt werden wird.

Brunnen 54a

Der Brunnen im Westteil der Galerie wurde als erster der fünf Brunnen am 19. und 20.04.2004 regeneriert. Er war während der gesamten Maßnahme im artesischen Zustand. Zur Berechnung der Absenkungsbeträge aus den Pumpversuchen wurden die Pumpversuchsprotokolle daher auf den Ruhewasserspiegel auf Höhe des Überlaufs am Brunnenkopf berechnet. Dies war notwendig, da bei diesem Brunnen zu Beginn des Pumpversuches die Absenkung im Brunnenschacht mitgemessen wurde.

Der erste Schritt der Regenerierung war jedoch die erste Kamerabefahrung. Sie fand am 19.04. morgens statt. Darin zeigten die Aufnahmen eine weitgehend saubere Rohrtour im Bereich der Aufsatzverrohrung. Im Bereich der Filterstrecke traten, nach unten stark zunehmend, rotbraune, flockige Beläge auf. Die Schlitzbrücken waren anfangs teilweise, im mittleren und unteren Filterbereich vollständig geschlossen. Anhand der Stärke und der Ausprägung der Beläge war eine Hauptzustromrichtung zu erkennen, wie auch der axiale Blick in Abb. 6-18 rechts zeigt:

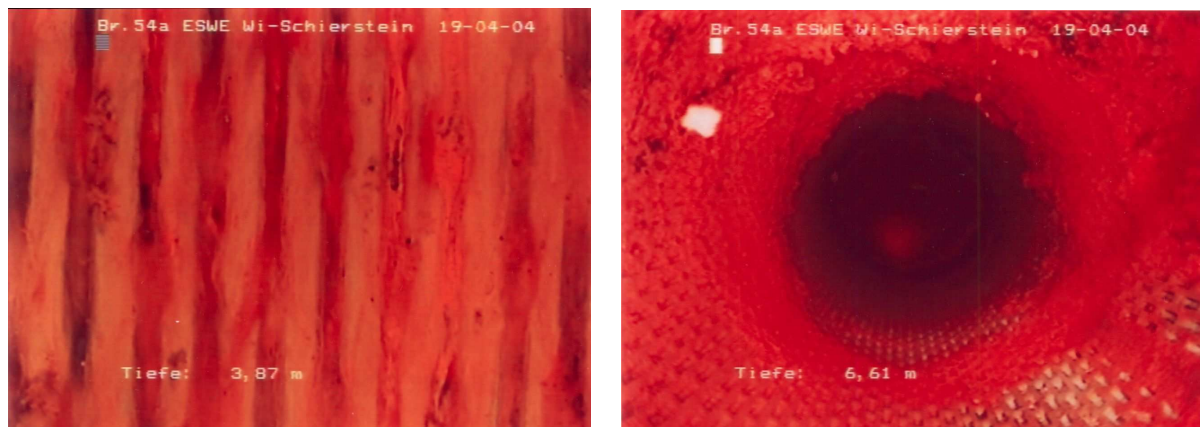


Abb. 6-18: Kamerabefahrung Brunnen 54a, 19.04.2004, aktueller Bauzustand, Bild 1 (links) aus 7,72 m u D-OK und Bild 2 (rechts) aus 10,46 m u D-OK [BRM, 2004]

Nach dem Bürsten wurde die zweite Kamera bei klarem Wasser am 19.04.nachmittags nach dem zweiten Pumpversuch durchgeführt. Im Vergleich zur ersten Befahrung zeigten sich sowohl Aufsatz- als auch Filterrohrtour weitgehend sauber. Ab ca. 7,35 m u D-OK wies die Filterstrecke rotbraune Restbeläge auf, die Schlitzbrücken waren jedoch meist offen. Dies zeigt auch Abb. 6-19:

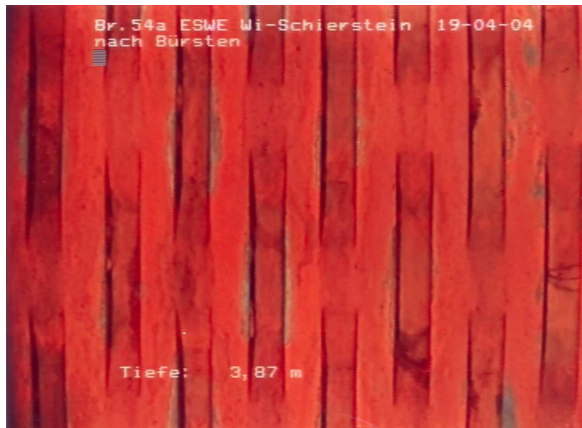


Abb. 6-19: Kamerabefahrung Brunnen 54a, 19.04.2004, Nach mechanischer Vorreinigung, Bild 1 aus 7,72 m u D-OK [BRM, 2004]

Die dritte Kamerabefahrung, durchgeführt am 20.04. nach der Ultraschallbehandlung, den geophysikalischen Messungen und dem letzten Pumpversuch zeigte, dass durch die Beschallung auch die Restaufwüchse zum großen Teil entfernt werden konnten. Die Rohrwandung war nun weitgehend sauber und die Schlitzbrücken konnten geöffnet werden.

Abb. 6-20 zeigt links vergleichend wiederum die Aufnahme aus 7,72 m u D-OK, mit nun offenen Filterschlitzbrücken und rechts den axialen Blick aus 10,46 m u D-OK Tiefe:



Abb. 6-20: Kamerabefahrung Brunnen 54a, 20.04.2004, Nach Ultraschallregenerierung, Bild 1 (links) aus 7,72 m u D-OK und Bild 2 (rechts) aus 10,46 m u D-OK [BRM, 2004]

Der Vergleich der drei Kameraaufnahmen zeigte, dass ein Großteil der weichen Beläge innerhalb der Rohrtour bereits durch das Bürsten entfernt werden konnte.

Die Behandlung mit Ultraschall konnte Restaufwüchse entfernen und die bis dato noch geschlossenen Filteröffnungen freimachen. Es verblieben lediglich dünne, inkrustierte Restbeläge.

Auch der Vergleich der Pumpversuchsergebnisse zeigte eine wesentliche Leistungssteigerung durch das Bürsten und eine weitere, jedoch geringe Steigerung der Ergiebigkeit durch den Ultraschall.

Der erste Pumpversuch fand am 19.04. nach der ersten Kamerabefahrung statt. Der Brunnen war artesisch und der Wasserspiegel lag 0,81 m über dem Brunnenkopf. Da dies der erste zu regenerierende Brunnen war, musste zuerst die optimale Fördermenge für die Pumpversuche geschätzt werden. Begonnen wurde mit 16 m³/h. Nach drei Minuten wurde auf 20 m³/h erhöht und dieser Wert für den weiteren Verlauf und die folgenden beiden Pumpversuche beibehalten.

Nach vier Minuten war der Brunnenschacht leergepumpt und die Absenkung im Brunnenrohr konnte gemessen werden. Der Beharrungszustand stellte sich nach 90 Minuten bei einem Wasserstand von 9,45 m u D-OK ein. Nach 180 Minuten wurde die Pumpe abgeschaltet und der Wiederanstieg gemessen, wobei das Wasser nach 10 Minuten überlief und der Ausgangswasserstand im Brunnenschacht nach 90 Minuten wieder erreicht war.

Die spezifische Ergiebigkeit wurde korrigiert auf den Ruhewasserspiegel am Brunnenkopf (3,85 m u D-OK) berechnet und nicht aus den Messprotokollen übernommen. Sie errechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Fördermenge } Q &= 5,55 \text{ l/s} && \text{entspricht } 20,00 \text{ m}^3/\text{h} \\ \text{Absenkung } s &= 9,45 \text{ m} - 3,85 \text{ m} && \text{entspricht } 5,60 \text{ m} \\ \text{Spez. Ergiebigkeit} &= Q / s && \text{entspricht } 3,57 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Im zweiten Pumpversuch wurde ebenfalls mit 20 m³/h gepumpt. Der Wasserstand lag zu Beginn ebenfalls 0,81 m über dem Brunnenkopf, so dass in den ersten sieben Minuten die Brunnenstube leergepumpt werden musste. Der deutlich längere, hierfür benötigte Zeitraum spiegelte bereits wieder, dass die Ergiebigkeit verbessert war, da mehr Wasser nachströmte. Der quasistationäre Zustand hatte sich nach 120 Minuten eingestellt. Der Wasserstand lag bei 8,35 m u D-OK. Daraus errechnete sich:

$$\begin{aligned} \text{Fördermenge } Q &= 5,55 \text{ l/s} && \text{entspricht } 20,00 \text{ m}^3/\text{h} \\ \text{Absenkung } s &= 8,35 \text{ m} - 3,85 \text{ m} && \text{entspricht } 4,50 \text{ m} \\ \text{Spez. Ergiebigkeit} &= Q / s && \text{entspricht } 4,44 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Die Pumpe wurde nach 150 Minuten abgeschaltet. Nach 8 Minuten war der Überlauf und nach 75 Minute der Ausgangswasserstand in der Brunnenstube erreicht.

Der Pumpversuch zeigte eine spezifische Leistungssteigerung des Brunnens allein durch das Bürsten des Rohrinners um $0,87 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$.

Nach der Ultraschallregenerierung wurde am 20.04. der dritte Pumpversuch durchgeführt. Nach sechs Minuten Pumpdauer erreichte der Wasserspiegel den Brunnenschacht, nach 120 Minuten war der quasistationäre Zustand erreicht. Der Wasserspiegel lag bei $8,28 \text{ m}$ u D-OK, woraus sich errechnete:

Fördermenge Q	=	5,55 l/s	entspricht	20,00 m^3/h
Absenkung s	=	8,28 m – 3,85 m	entspricht	4,43 m
Spez. Ergiebigkeit	=	Q / s	entspricht	4,51 $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$

Nach dem Abschalten der Pumpe nach 150 Minuten war der Überlauf nach 10 Minuten und der Ausgangswasserstand von $3,31 \text{ m}$ u D-OK nach 45 Minuten erreicht. Nach 90 Minuten lag der Wasserspiegel wieder bei $0,81 \text{ m}$ über dem Brunnenkopf.

Die spezifische Ergiebigkeit konnte noch um weitere $0,07 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$ und damit insgesamt durch die Maßnahme um $0,94 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$ verbessert werden.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der drei Pumpversuche zeigt Abb. 6-21. Die rote Linie markiert den Brunnenkopf als Ausgangsruhwasserspiegel.

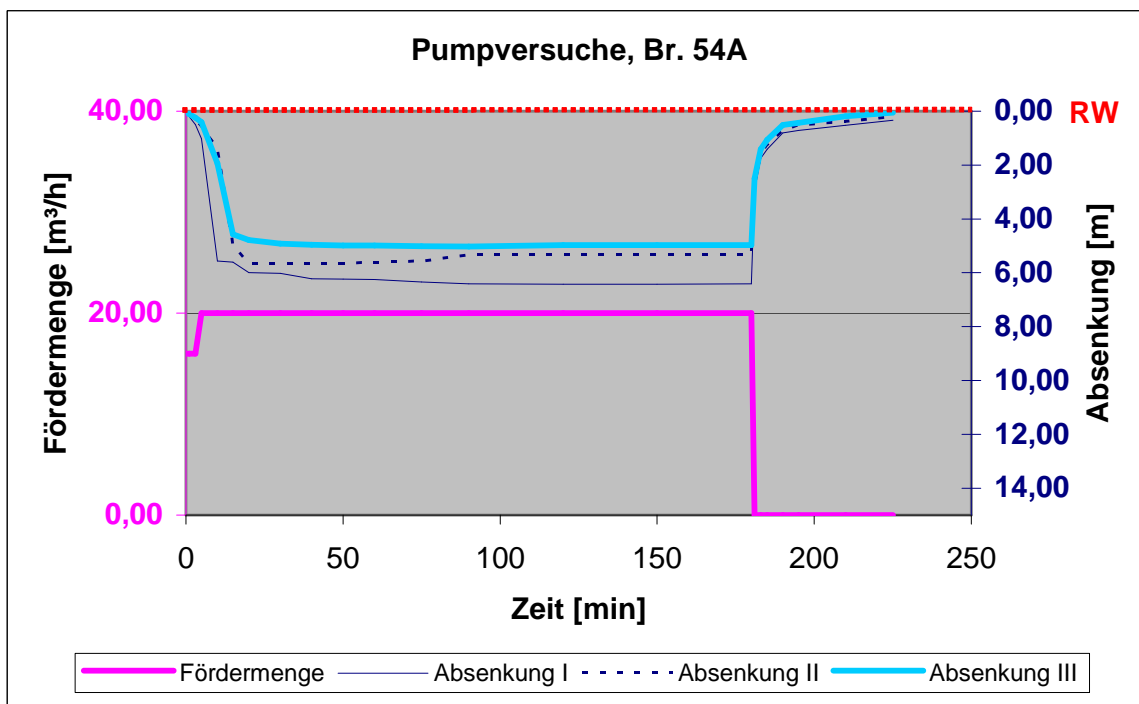


Abb. 6-21: Verlauf von Absenkung und Wiederanstieg während der drei Pumpversuche an Brunnen 54a (Wiacek, 2005)

Gemäß den Berechnungen konnte die spezifische Ergiebigkeit insgesamt von 3,57 auf 4,51 m³/h*m gesteigert werden. Das entspricht 26,3 %. Den Hauptanteil daran hatte jedoch mit 24,3 % die mechanische Vorreinigung mit der Entfernung der Beläge im Rohrinne. Die Ultraschallbehandlung steigerte die Leistung des Brunnens von 4,44 auf 4,51³/h*m, d. h. um lediglich 1,6 %.

Was die Beschallung im Ringraum des Brunnens bewirkte, sollte der Vergleich der geophysikalischen Messergebnisse zeigen. Beide Messdurchgänge erfolgten am 20.04.2004, direkt vor und direkt nach der Ultraschallregenerierung. Die Förderrate für die Flowmeter-Messungen bei Anregung wurde auf 10,9 m³/h festgelegt. Dabei wurde der Wasserstand, ausgehend vom artesischen Zustand, vor der Beschallung auf 5,40m und nach der Beschallung auf 5,50 m u D-OK abgesenkt. Abb. 6-22 zeigt die Messergebnisse:

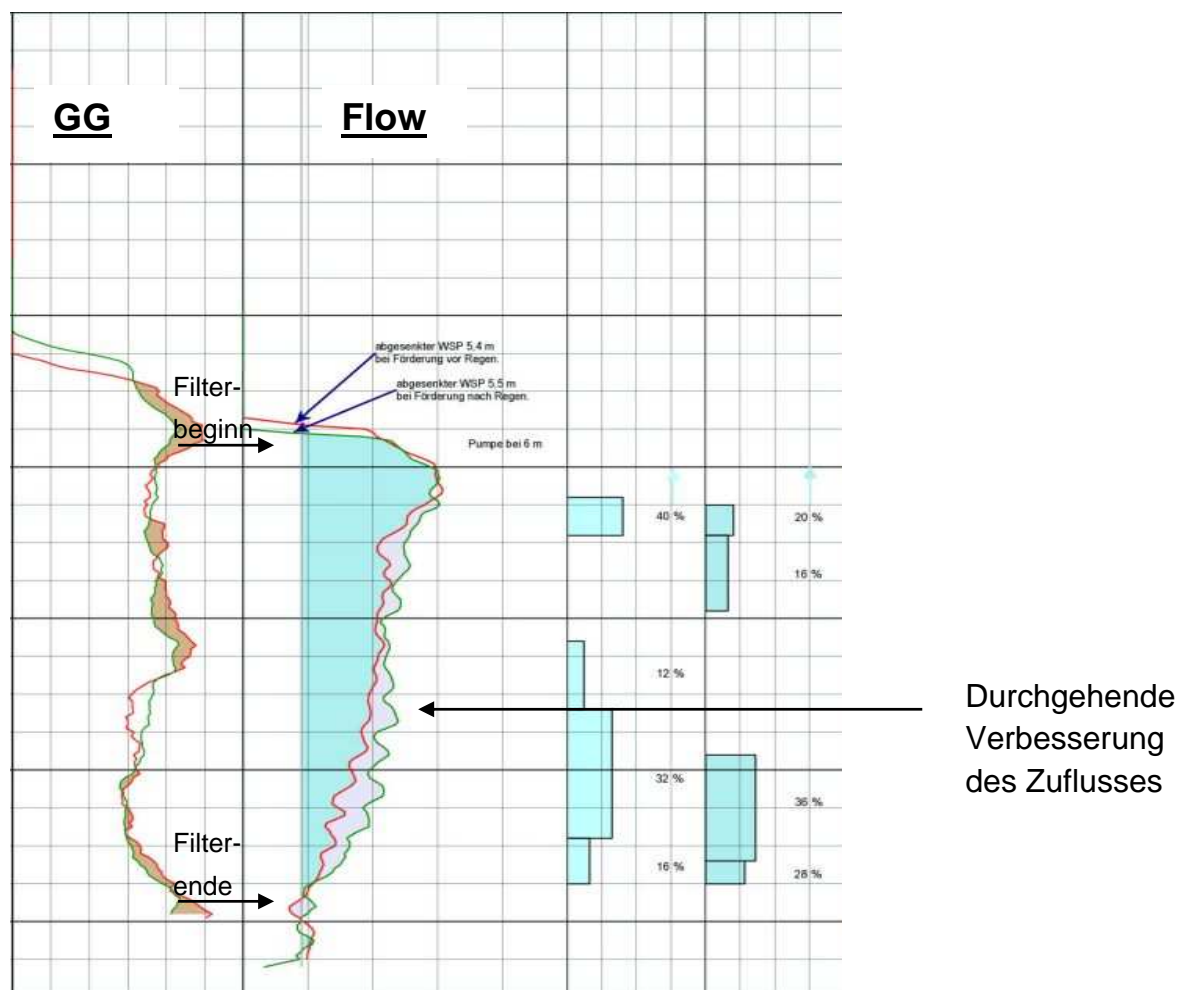


Abb. 6-22: Ausschnitt (ohne Maßstab) aus dem Ergebnisplot von Brunnen 54a der Fa. BLM; links: Gamma-Gamma-Dichtemessungen; rechts: Flowmeter vor (rot) und nach (grün) Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005)

Vor der Regenerierung waren die Zuflussverhältnisse deutlich von oben nach unten mehr oder weniger konstant abnehmend. Besonders in den unteren beiden Filtermetern, zwischen 9,60 und 11,10 m u D-OK konnte der Zufluss durch die Beschallung verbessert werden. Dies ging einher mit einer Verringerung der Lagerungsdichte in den beiden Gamma-Gamma-Messungen vor und nach Ultraschall unterhalb 10,00 m u D-OK. Teilweise im gleichen Abschnitt, zwischen 8,50 und 10,00 m u D-OK war jedoch die Lagerungsdichte im Ringraum nach Ultraschall höher als vorher. Im darüber liegenden Abschnitt, zwischen 7,50 und 8,50 m u D-OK konnte die Lagerungsdichte deutlich verringert werden, was sich jedoch nicht sichtbar auf die Anströmung auswirkte. Insgesamt wurde die aktive Filterlänge um 0,60 m verringert und der Hauptzufluss verlagerte sich in den unteren Filtermeter.

6.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Begleituntersuchungen

Die erste Kamerabefahrung, die den Zustand des Brunnens vor der jeweiligen Regenerierung dokumentierte, zeigte für alle fünf Brunnen das Vorhandensein von Ablagerungen. Die Filterschlitze waren größtenteils geschlossen.

Die horizontale Verteilung und die Dicke der Beläge spiegelte z. T. die Anströmrichtung des Grundwassers in den Brunnen wieder. Unterschiede zwischen den einzelnen Brunnen ergaben sich erwartungsgemäß aus:

- der chemischen Zusammensetzung der Beläge, besonders hinsichtlich des Eisen- und Mangangehaltes, der sich in der Farbe der Beläge zeigt
- dem Alter respektive dem Zeitpunkt der letzten Reinigung oder Regenerierung, das sich in Dichte und Dicke der Beläge zeigt
- dem Ausbaumaterial (Steinzeug für die Brunnen 20a und 29a und Kupfer für die Brunnen 31a, 51a und 54a)

Die beiden Brunnen mit Steinzeug-Ausbau waren generell in besserem Zustand als die Brunnen mit Kupferschlitzbrückenfilter, obwohl sie rund zehn Jahre älter sind.

Letztere zeigten deutliche Korrosionserscheinungen mit teilweiseem Auflösen der Schlitzbrückenstege und damit einhergehender Aufweitung der Filteröffnungen, so dass hier Filterkies eindringen konnte bzw. kann. Abb. 6-23 zeigt als Beispiel eine Aufnahme aus Brunnen 31a:

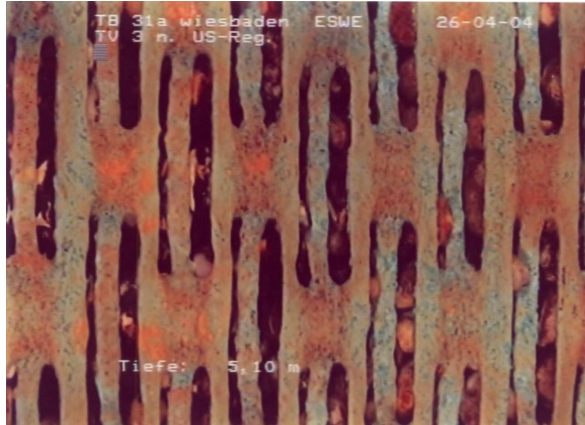


Abb. 6-23: Kamerabefahrung, Brunnen 31a, 26. April 2004, Nach Regenerierung; 5,10m unter Brunnenkopf (8,15 m u OK-D), Kupferschlitzbrückenfilter, Filterstege teilweise zersetzt, Filteröffnungen geweitet [BRM, 2004]

Unterschieden werden konnten in den fünf Brunnen rotbraune, schwarzbraune und gelbbraune Beläge. Erstere sind generell ein Indiz für das Vorhandensein von Eisen. Zweitere Färbung kann durch Mangan oder durch organische Bestandteile hervorgerufen werden. Eine Gelbfärbung kann auf den Einschluss von Sand in den Belägen hindeuten, was sich dann jedoch auch bei der Beurteilung der mitgeführten Partikel beim Abpumpen deutlich zeigt.

Für alle Brunnen konnte festgestellt werden, dass im untersten Filtermeter deutlich mehr Sedimentfracht ausgetragen werden konnte als in den darüber liegenden. Für alle Filtermeter und alle Brunnen galt weiterhin, dass die Trübung direkt nach dem Einschalten der Pumpe sehr hoch war, dann aber schnell nachließ. Normalerweise wird im Geländeeinsatz nur solange gepumpt, bis das Wasser klar ist. Im Rahmen der fünf Regenerierungen dieser Arbeit wurden jedoch jeweils alle Container gefüllt, soweit dies die Ergiebigkeit des Brunnens zuließ.

Die spezifische Ergiebigkeit konnte bei allen fünf Brunnen gesteigert werden, jedoch in unterschiedlichem Maß. Für die Bewertung wurden jeweils die drei durchgeführten Pumpversuche - vor Beginn der Arbeiten, nach dem Bürsten und Zwischenabpumpen sowie nach dem Ultraschalleinsatz - herangezogen und die spezifischen Ergiebigkeiten (Q_s), berechnet aus Fördermenge und Absenkungsbetrag, in Abb. 6-24 vergleichend grafisch dargestellt.

Die Höhe der Balken in der grafischen Darstellung zeigt die Höhe der spezifischen Ergiebigkeit. In der vorderen Reihe sind die Ausgangswerte vor der Regeneriermaßnahme dargestellt, dahinter die Ergebnisse des Zwischenpumpversuchs nach dem Bürsten und die erzielte spezifische Ergiebigkeit nach der Regenerierung. Je höher der Balken ist, desto besser ist die Leistung des Brunnens. Pro Brunnen wurde im abschließenden Pumpversuch der höchste Wert erreicht, woraus folgert, dass die Leistung aller Brunnen erkennbar gesteigert werden konnte.

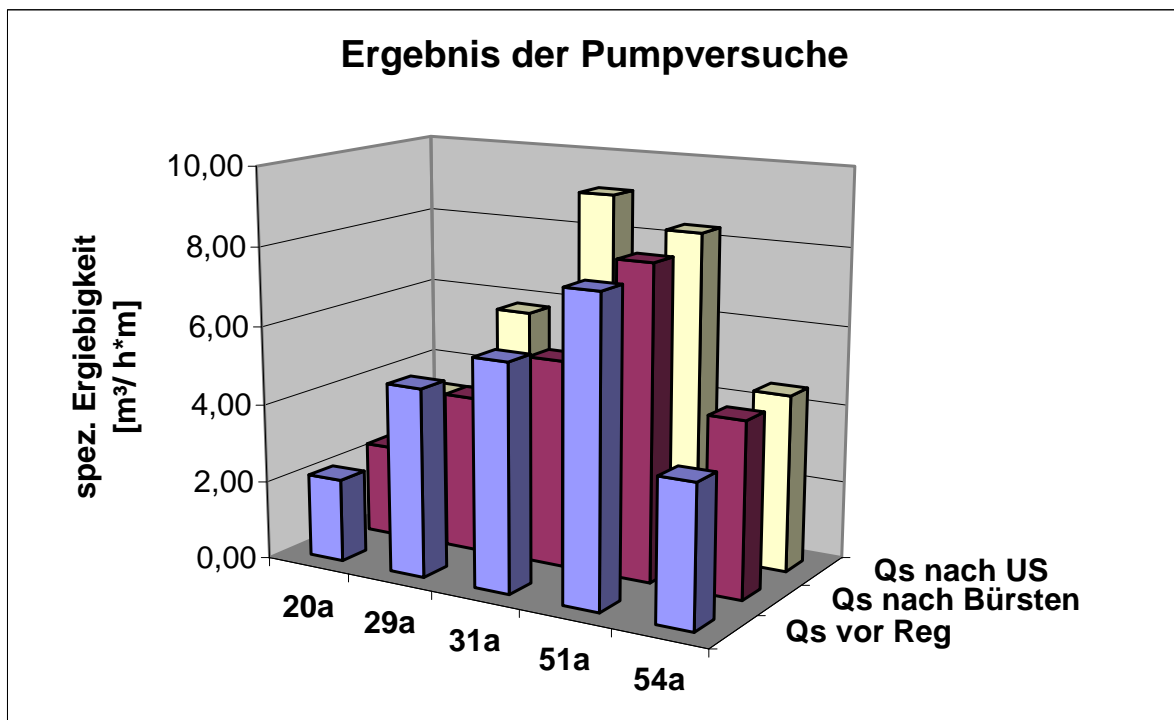


Abb. 6-24: Vergleich der spezifischen Ergiebigkeiten jeweils vor der Maßnahme, nach der mechanischen Vorreinigung und nach der Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005)

Ein Indiz zur Bewertung der Brunnenleistung waren weiterhin die Wiederanstiegszeiten in den einzelnen Pumpversuchen. Generell gilt, dass ein schneller Wiederanstieg eine gute Durchlässigkeit des Filters anzeigt. Das Wasser kann dem Brunnen hierbei ungehindert zuströmen.

Abb. 6-25 zeigt die Wiederanstiegszeit der einzelnen Pumpversuche im Vergleich. Dabei gilt, dass die Zeit möglichst kurz sein sollte bzw. nach der Beschallung kürzer als vorher:

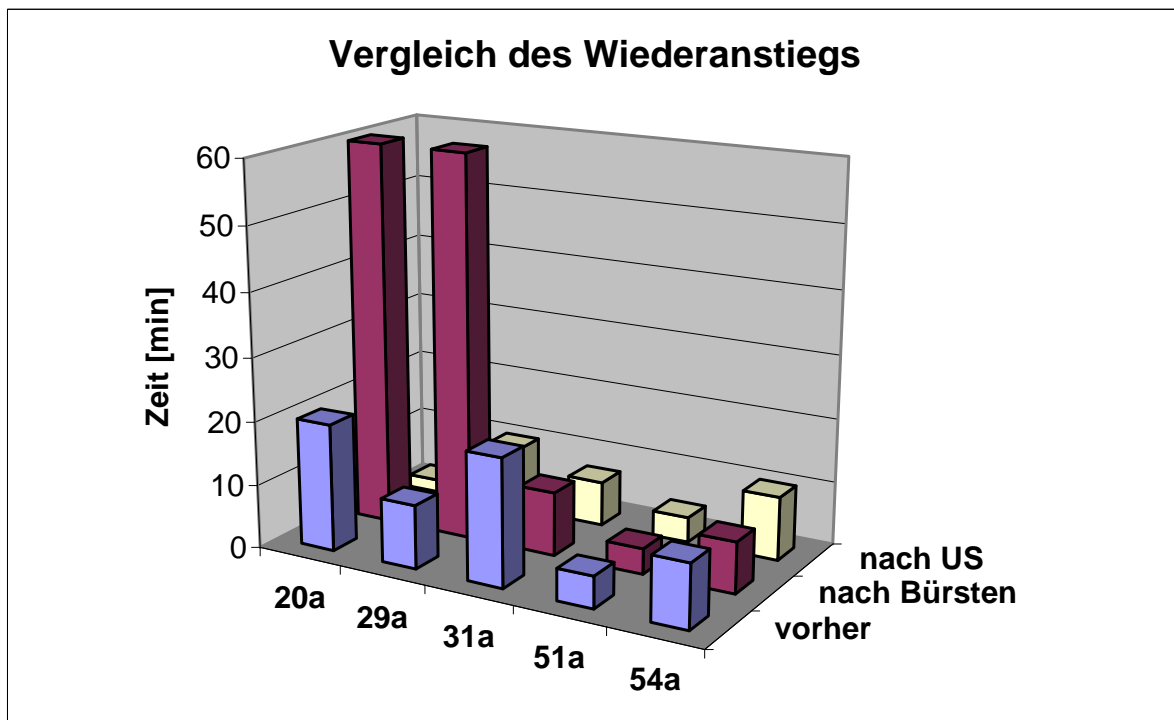


Abb. 6-25: Wiederanstiegszeiten in den Pumpversuchen jeweils vor der Maßnahme, nach der mechanischen Vorreinigung und nach der Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005)

Die Wiederanstiegszeit wurde für die Brunnen 20a und 31a durch die Regenerierung deutlich gesenkt. An Brunnen 51a ergab sich eine leichte Verbesserung und Brunnen 29a und 54a wiesen zwar nach dem Bürsten leicht bessere Wiederanstiegszeiten auf, nach der Beschallung waren sie jedoch wieder wie vor Beginn der Arbeiten.

Vergleicht man nur die Messungen vor und nach dem Ultraschalleinsatz, ergibt sich eine gute Korrelation zwischen der Verbesserung der Wiederanstiegszeiten und der Leistungssteigerung allein durch den Ultraschall, die für Brunnen 31a mit 58% am höchsten war, gefolgt von Brunnen 29a (44%) und 20a (39%), während an den Brunnen 51a und 54a die Steigerung nur wenige Prozent betrug.

Da der Wiederanstieg auf einer guten Filterdurchlässigkeit beruht, sollte er mit den Ergebnissen der geophysikalischen Untersuchungen zur Lagerungsdichte im Ringraum und zur Verteilung der Zuflüsse und der Länge der aktiven Filterabschnitte korrelieren. D. h. die Brunnen, an denen die beste Leistungssteigerung und die höchste Verbesserung des Wiederanstiegs erreicht werden konnte, sollten auch die deutlichsten Veränderungen in der Lagerungsdichte im Ringraum aufweisen.

Abb. 6-26 zeigt hierzu eine Gegenüberstellung der Auswertung der Gamma-Gamma-Messungen für alle fünf Brunnen:

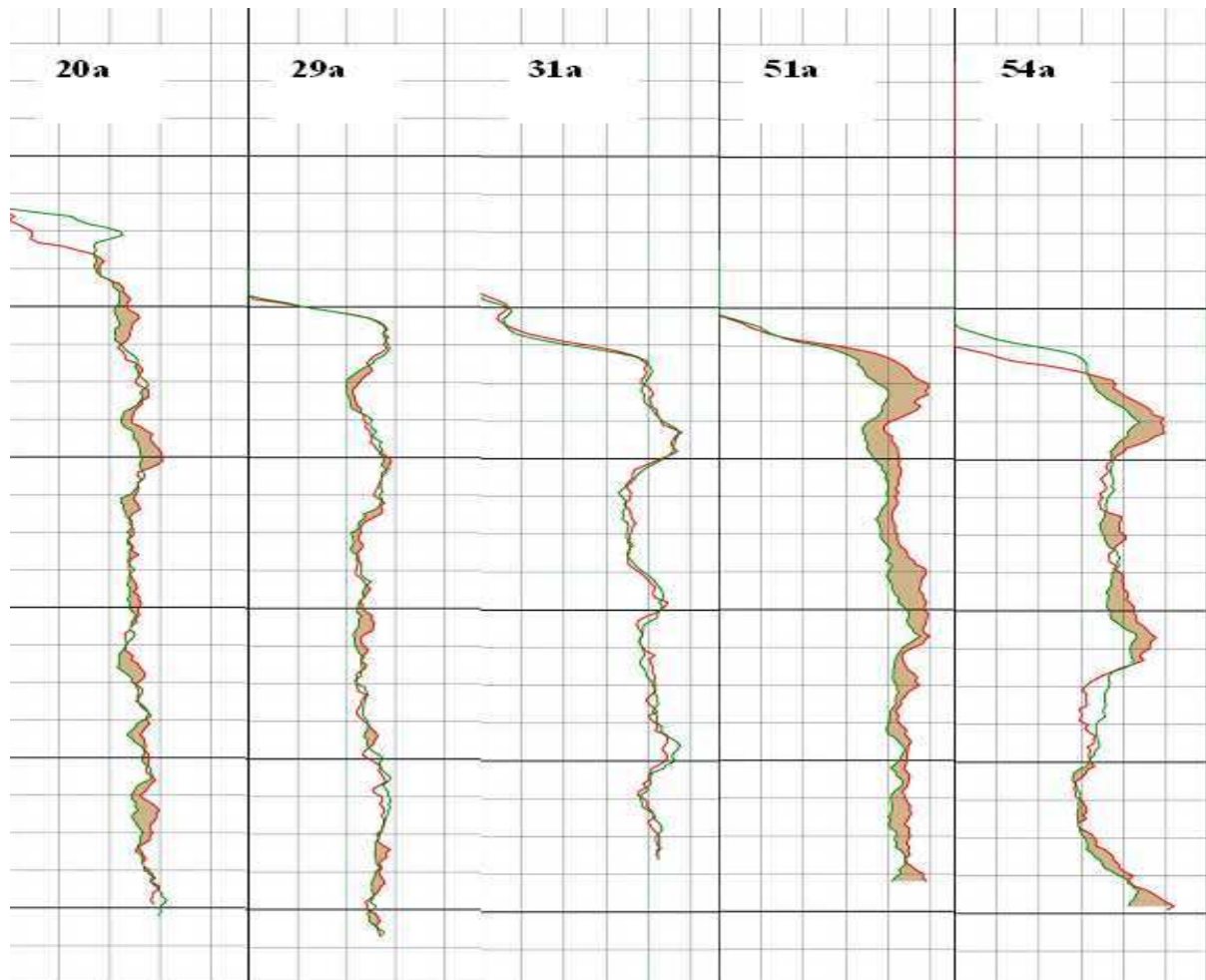


Abb. 6-26: Vergleich der Änderung der Lagerungsdichte (braun unterlegt) jeweils vor (rot) und nach (grün) der Ultraschallregenerierung, zusammengestellt aus dem Kurzbericht der BLM (Wiacek, 2005)

Die rote Linie zeigt jeweils die Lagerungsdichte im Ringraum vor der Regenerierung und die grüne Linie die Dichte nach der Beschallung. Ziel des Ultraschalleinsatzes sollte es sein, die Lagerungsdichte zu verringern, gleichbedeutend mit der Wiederherstellung der Durchlässigkeit, d. h. in den Abbildungen sollte die grüne Kurve möglichst links von der roten Kurve verlaufen. Dort, wo dies erreicht werden konnte, wurde die Differenz als Fläche markiert. Eine Korrelation mit der Steigerung der Brunnenleistung ist erkennbar, jedoch wider Erwarten. Die deutlichste Verringerung der Lagerungsdichte konnte an Brunnen 51a erreicht werden. Dieser wies jedoch nur eine Leistungssteigerung durch Ultraschall von 5 % auf. Demgegenüber wurde Brunnen 31a in seiner Leistung deutlich gesteigert, die geophysikalische Messung zeigte jedoch keine Änderungen der Lagerungsdichte.

Der Verlauf deutet also eine indirekte Proportionalität an, d. h. die Brunnen mit der deutlichsten Änderung der Lagerungsdichte – Brunnen 51a, 54a und 20a, waren diejenigen, mit der geringsten Leistungssteigerung (in gleicher Reihenfolge, wie genannt: 5 %, 2% und 39%). Ein Bezug zum Alter der Beläge bzw. dem Zeitraum seit der letzten chemischen Regenerierung oder zum Ausbaumaterial ließ sich nicht feststellen.

Neben der Lagerungsdichte änderte sich, bedingt durch die Verbesserung des Absenkungsbetrages, auch die Höhe der Wassersäule im Brunnen. Inwieweit sich eine verringerte Lagerungsdichte auch positiv auf die Anströmung im Filterbereich auswirkte, sollte die Auswertung der Flowmeter-Messungen ergeben. Gegenübergestellt wurden zum einen die Zuflüsse jeweils vor und nach der Regenerierung und zum anderen die Anteile aktiver Filterabschnitte zum Gesamtzufluss (Abb. 6-27) sowie die Summe der Längen der aktiven Filterabschnitte (Abb. 6-28):

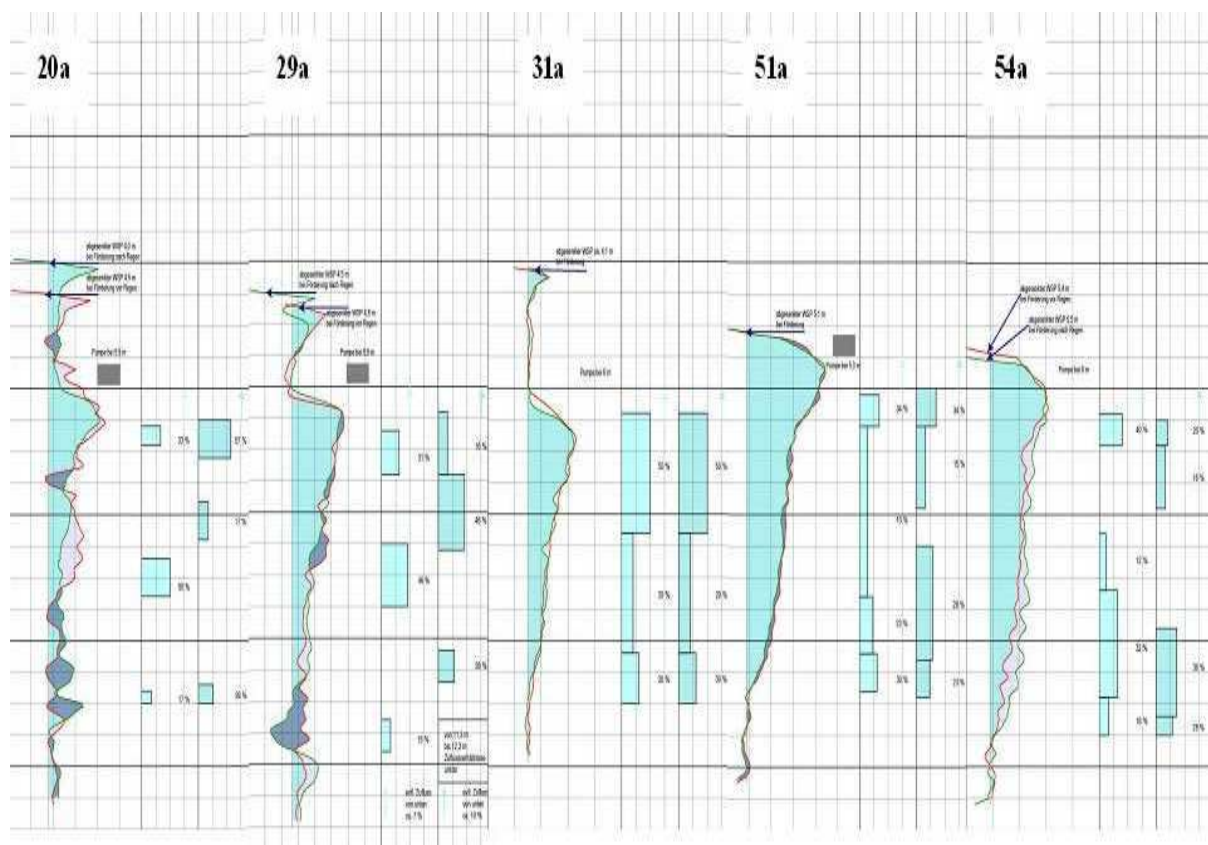


Abb. 6-27: Vergleich der Änderung der Zuflussanteile und –verteilung jeweils vor (rot) und nach (grün) der Ultraschallregenerierung, zusammengestellt aus dem Kurzbericht der BLM (Wiacek, 2005)

Wie schon in den Ergebnissen der einzelnen Brunnen beschrieben, zeigten die Daten der Flowmeter-Messung keine Korrelation mit den beschriebenen Änderungen der Lagerungsdichte oder den Leistungssteigerungen aus den Pumpversuchen.

Lediglich Brunnen 31a zeigte auch hier, dass sich die geophysikalischen Parameter durch die Beschallung nicht geändert hatten, aber dennoch eine hohe Leistungssteigerung erzielt wurde.

Brunnen 51a, mit der deutlichsten Verbesserung der Lagerungsdichte, wies in den Flowmeter-Kurven ebenfalls wenig Änderung auf, hier war jedoch auch die Leistungssteigerung gering.

Die auffälligsten Änderungen der Zuflussverteilung wiesen die Brunnen 20a und 29a auf. Hier unterlagen auch die Messkurven in sich selbst starken Schwankungen.

Inwieweit sich das Ergebnis auf Brunneneigenschaften oder das Alter der Beläge zurückführen lässt, sollte erst nach der Auswertung der Ergebnisse der chemischen Analysen beurteilt werden und folgt in Kap. 6.4.

Der Vergleich der Länge der aktiven Filterabschnitte vor und nach dem Ultraschalleinsatz ist für die fünf Brunnen in Abb. 6-28 grafisch dargestellt:

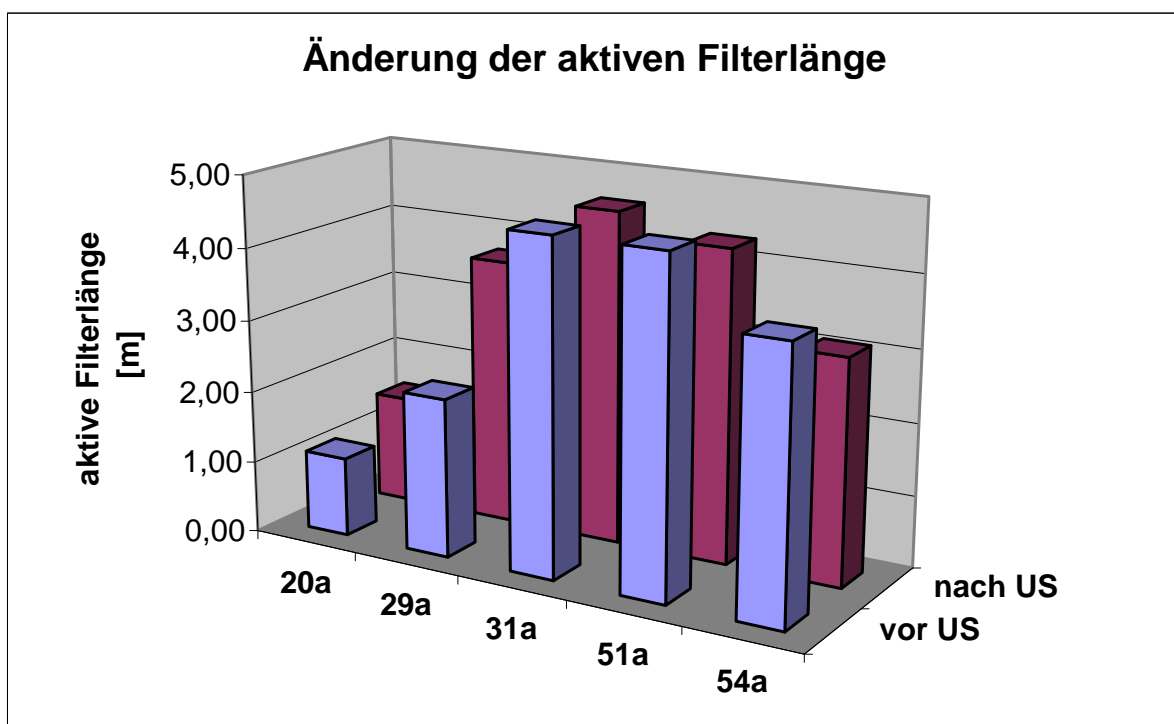


Abb. 6-28: Vergleich der aktiven Filterlänge, berechnet aus den Flowmeter-Messungen jeweils vor und nach der Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005)

Deutlich erkennbar ist eine Zunahme der aktiven Filterlänge für die Brunnen 20a und 29a und eine leichte Abnahme für die Brunnen 51a und 54a. An Brunnen 31a ergab sich wiederum trotz der höchsten Leistungssteigerung keine Änderung im Vergleich der Flowmeter-Auswertungen.

Als Ursachen der beschriebenen Änderungen und Ergebnisse der Ultraschallregenerierungen konnten an dieser Stelle bereits erstens das Alter der Beläge und zweitens das Ausbaumaterial des Brunnens vermutet werden. Die Bewertung sollte anhand der Auswertung der chemischen Daten erfolgen.

6.3 Ergebnisse der Analytik

In der chemischen Analyse des abgepumpten Wassers und der mitgeführten Feststoffe zeigten alle fünf Brunnen ähnliche Ergebnisse.

Im ersten Teil sollen die Analysen der angesäuerten Misch-Wasserproben ausgewertet werden. Diese wurden, wie in Kap. 4.3.1 beschrieben, im Labor der Stadtwerke Wiesbaden (ESWE) mittels ICP-OES auf die Gehalte an Calcium, Magnesium, Eisen gesamt, Mangan gesamt sowie Kupfer analysiert. Letzteres wurde hinzugenommen, da drei der Brunnen mit Kupferschlitzbrückenfiltern verrohrt sind und geprüft werden sollte, ob durch die Beschallung höhere Kupfergehalte des Wassers auftraten. Für die Beurteilung der Brunnenregenerierung interessant waren aber hauptsächlich die Mengen Eisen und Mangan, die durch die Beschallung entfernt werden konnten, da die Brunnenalterung in Schierstein durch die chemische und biologische Verockerung bestimmt wird (vgl. Kap. 3.2.2), d. h. die leistungsmindernden Ablagerungen im Ringraum der Brunnen im Wesentlichen aus Eisen oder Mangan bestehen sollten.

Die Brunnen wurden abschnittsweise beschallt und abgepumpt. Pro Filtermeter wurde eine Probe analysiert. Die Ergebnisse wurden als Konzentration in mg/l pro Filtermeter gemessen.

Dies entspricht der Konzentrationsangabe g/m³ (1 mg/l = 1 g/m³) und da jeweils eine Probe aus genau einem Kubikmeter Wasser entnommen wurde, waren die Konzentrationen gleichzeitig die Absolutgehalte der entfernten Ionen im abgepumpten Wasser.

D. h. in der nachfolgenden Darstellung und Auswertung wurden die Gehalte der einzelnen Proben pro Brunnen aufsummiert und gaben damit die Gesamtmenge [g gesamt] des löslichen Eisens und Mangans wieder, das durch die Beschallung entfernt werden konnte. Die Ergebnisse der ICP-OES Messungen gibt Tab. 6-1 wieder.

Hierbei sind die Analysenergebnisse für jede einzelne Probe pro Brunnen gelistet. Die erste Spalte gibt die Probennummer an, welche die Brunnenbezeichnung und die Nummer des Containers enthält. Da die Brunnen von unten nach oben abgepumpt wurden, enthält der erste Container, der jeweils gefüllt wurde, das Wasser aus dem unteren Filtermeter. Die zweite Spalte „Container“ gibt noch einmal die Nummer des Containers und entsprechend den Filtermeter an. Nachfolgend sind die Ionengehalte der fünf o. g. Elemente angegeben. Die Mengen in g/m^3 der einzelnen Container wurden außerdem pro Brunnen zur Gesamtmenge entfernten gelösten Eisens, Mangans usw. aufsummiert und jeweils in der Zeile „Summe“ angegeben. Für die Brunnen 20a und 29a wurden zusätzlich die Glasfaserfilter mit dem jeweiligen Filterrückstand ausgewogen und als „Säureunlöslich g/m^3 “ für die einzelnen Container bzw. Filtermeter angegeben. Bei der Regenerierung von Brunnen 20a konnten aufgrund der geringen Gesamtergiebigkeit nicht alle Container gefüllt werden, da der Brunnen vorher schon kein Wasser mehr führte. Hier wurden die ersten beiden Container mit dem abgepumpten Wasser aus dem ersten (unteren) Filtermeter gefüllt, der dritte Container aus dem zweiten Filtermeter und der vierte aus dem dritten. Für die oberen beiden Filtermeter konnte keine Probe entnommen und analysiert werden.

Tab. 6-1: Ergebnisse der Analyse der Wasserproben aus den 1000Liter-Containern, entnommen als Mischprobe nach der Beschallung [WIACEK, 2004]

Vom abgepumpten Wasser (jeweils ca. 1 m³) wurde eine Probe genommen, angesäuert auf Ph 0,8 bis 1,0 (entsprechend der chemischen Regenerierung), über Nacht stehen lassen, filtriert und der Ionengehalt bestimmt.
Angegeben ist die **Gesamtmenge** gelöster Stoffe im abgepumpten Wasser in **g/m³**.

	Probe Nr.	Container		EISEN	MANGAN	CALCIUM	MAGNESIUM	KUPFER
BRUNNEN	54A / 1	(unten)	1	34	3,9	128	25,4	9,0
	54A / 2		2	3,9	0,6	120	23,0	2,3
	54A / 3		3	5,3	0,8	129	24,1	2,8
	54A / 4		4	2,4	0,4	129	24,4	2
	54A / 5		5	1,5	0,3	119	22,7	1,5
	54A / 6	(oben)	6	1,6	0,3	123	22,8	1,0
		SUMME			48,7	6,3	748	142,4
BRUNNEN	51A / 1	(unten)	1	13	1,6	101	17,0	5,1
	51A / 2		2	5,3	0,6	99	16,5	2,1
	51A / 3		3	3,2	0,4	96	16,1	1,2
	51A / 4		4	5,8	0,6	99	16,3	1,8
	51A / 5		5	2,8	0,4	98	15,8	1,6
	51A / 6	(oben)	6	1,9	0,2	99	16,4	1,1
		SUMME			32,0	3,8	592	98,1
BRUNNEN	31A / 1	(unten)	1	28,5	4,8	97	16,4	5,1
	31A / 2		2	10,5	1,1	96	16,0	2,1
	31A / 3		3	11,0	1,1	100	17,4	1,2
	31A / 4		4	8,2	1,0	101	17,3	1,8
	31A / 5	(oben)	5	5,2	0,6	93	16,5	1,6
		SUMME			63,4	8,6	487	83,6
BRUNNEN	29A / 1	(unten)	1	32,7	15,0	100	15,4	0,25
	29A / 2		2	11,9	6,4	92,3	14,2	1,42
	29A / 3		3	23,4	10,0	93,9	13,6	3,42
	29A / 4		4	20,1	8,1	94	13,6	2,67
	29A / 5	(oben)	5	5,8	3,3	89,4	13,5	1,14
		SUMME			93,9	42,8	469,6	70,3
	Säureunlöslich	g/m ³		(1) 103	(2) 92	(3) 38	(4) 4,7	(5) 27
BRUNNEN	20A / 1	(unten)	1	36,1	19,0	89,4	11,4	0,98
	20A / 2		1,5	5,1	2,9	85,2	11,4	0,11
	20A / 3		2	6,4	3,3	86,6	11,5	0,35
	20A / 4		3	5,9	3,0	86,8	11,5	0,36
		SUMME			53,5	28,2	348	45,8
	Säureunlöslich	g/m ³		(1) 83	(2) 21	(3) 15	(4) 10	

Generell war in allen Brunnen in den Wasserproben der Anteil an Calcium in der Analyse am höchsten. Er lag zwischen 70 und 80 % von der Gesamtmenge entfernter Eisens, Mangans, Magnesiums und Calciums.

Weiterhin lagen die Gehalte entfernter löslicher Eisens deutlich über den Mangan - Gehalten.

Die prozentuale Verteilung der Elemente in der Gesamtmenge zeigt Abb. 6-29:

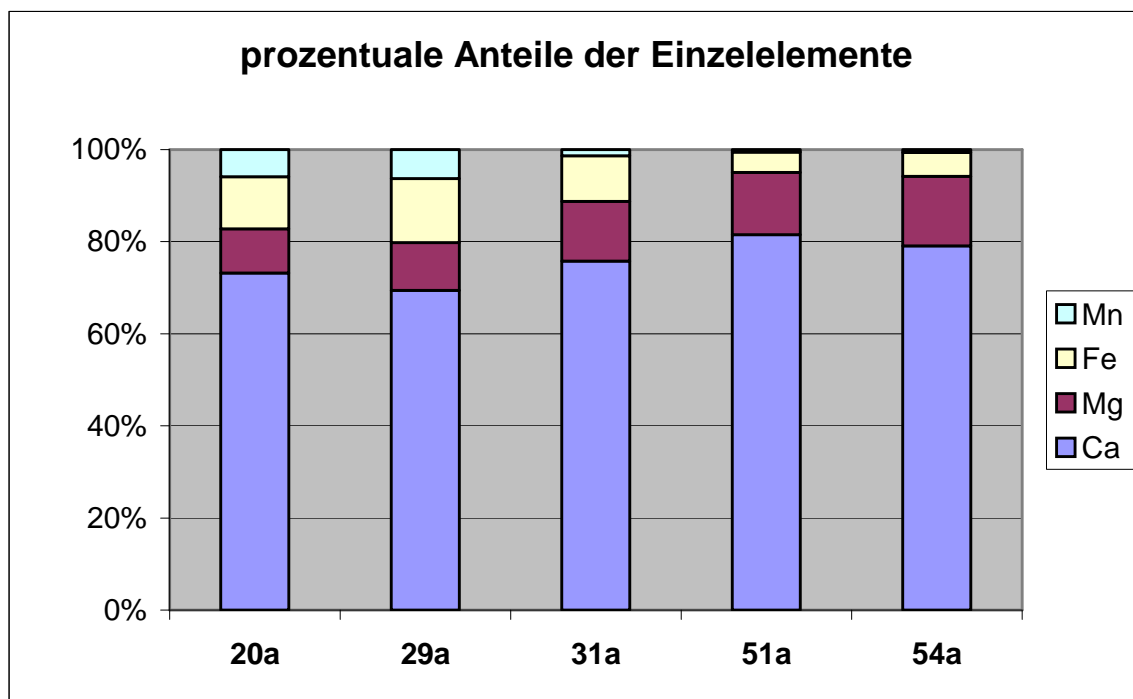


Abb. 6-29: Prozentuale Anteile der Elemente Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan in den Wasserproben der Ultraschallregenerierungen bezogen auf die Summe der genannten Elemente (Wiacek, 2005)

Tab. 6-1 zeigt, dass jeweils der untere Filtermeter die höchsten Mengen der genannten Ionen aufwies. Dies hatte sich auch bereits in der Trübung des Wassers beim Abpumpen gezeigt. Das Wasser im jeweils ersten Container wies, wie beschrieben, die stärkste Partikelführung auf.

Die Messungen des Kupfergehaltes zeigten erwartungsgemäß große Unterschiede zwischen den beiden Ausbaumaterialien. Die Brunnen mit Kupferschlitzbrückenfilter, Brunnen 20a, 29a und 31a führten vergleichsweise hohe Kupfermengen im abgepumpten Wasser, besonders im unteren Filtermeter.

Die höchsten Mengen an gelöstem Eisen und Mangan wurden in den Proben der Brunnen 20a und 29a nachgewiesen.

Abb. 6-30 zeigt hierzu die Gesamtmengen des ausgetragenen löslichen Eisens und Mangans, abgetragen gegen die Zeit [Jahre] seit der letzten chemischen Regenerierung, entsprechend von links nach rechts für Brunnen 51a, 54a, 31a, 29a und 20a:

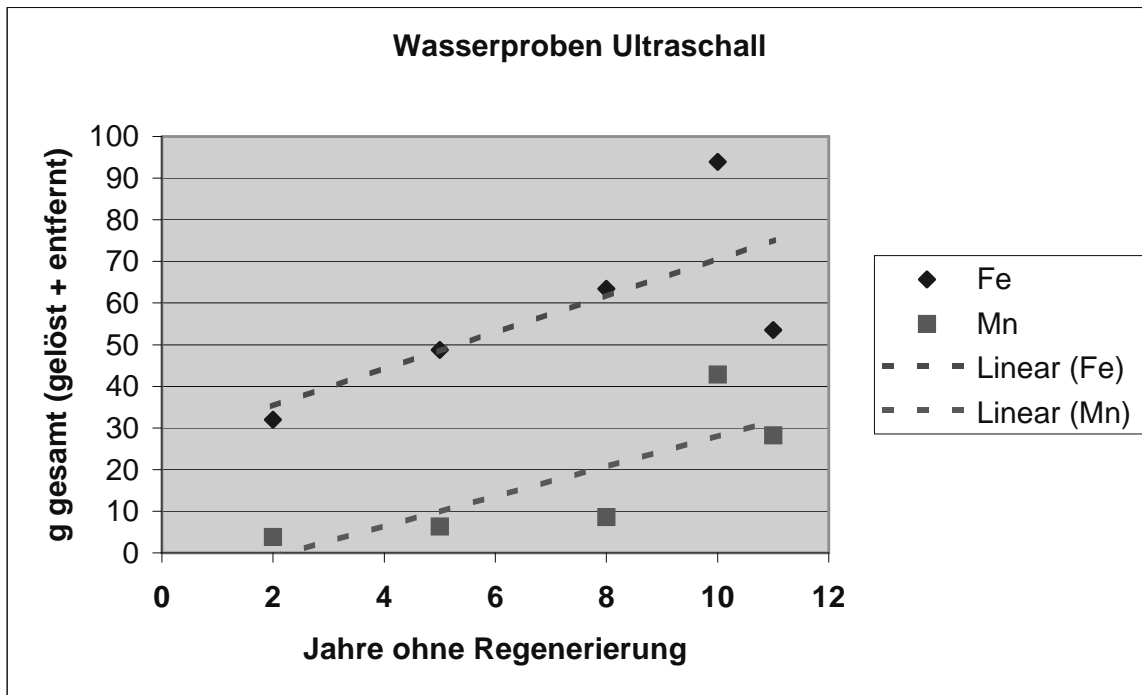


Abb. 6-30: säurelösliches Eisen und Mangan in den Wasserproben des abgepumpten Wassers nach der Beschallung, abgetragen gegen den Zeitraum seit der letzten chemischen Regenerierung (Wiacek, 2005)

Demnach konnte in den älteren Brunnen deutlich mehr Eisen und Mangan entfernt werden, als in den jüngeren. Die Trendlinien verlaufen hierbei nahezu parallel.

Dies bestätigte auch die prozentuale Verteilung aus Abb. 6-29, die die höheren Anteile Eisen und Mangan für die Brunnen mit den längeren Standzeiten, also für 20a, 29a und 31a aufwies.

Im Vergleich dazu wurden die Daten über die entfernten Mengen Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium bei der jeweils letzten chemischen Regenerierung betrachtet. Analog zu Abb. 6-30 wurden die Analyseergebnisse für Eisen und Mangan im abgepumpten Wasser gegen die Zeit bis zur vorhergehenden chemischen Regenerierung aufgetragen. Dazu wurden aus den Angaben der prozentualen Anteile Eisen, Mangan usw. und der Gesamtmasse [g] der vier Elemente die insgesamt entfernten Massen Eisen und Mangan berechnet.

Das Ergebnis zeigt Abb. 6-31, mit von links nach rechts den Brunnen 20a, 29a, 31a, 54a und 51a.

Zu beachten ist die Skalierung der Ordinate. Für die chemische Regenerierung lagen die Mengen entfernten gelösten Eisens und Mangans im Bereich des einhundertfachen von der Ultraschallregenerierung.

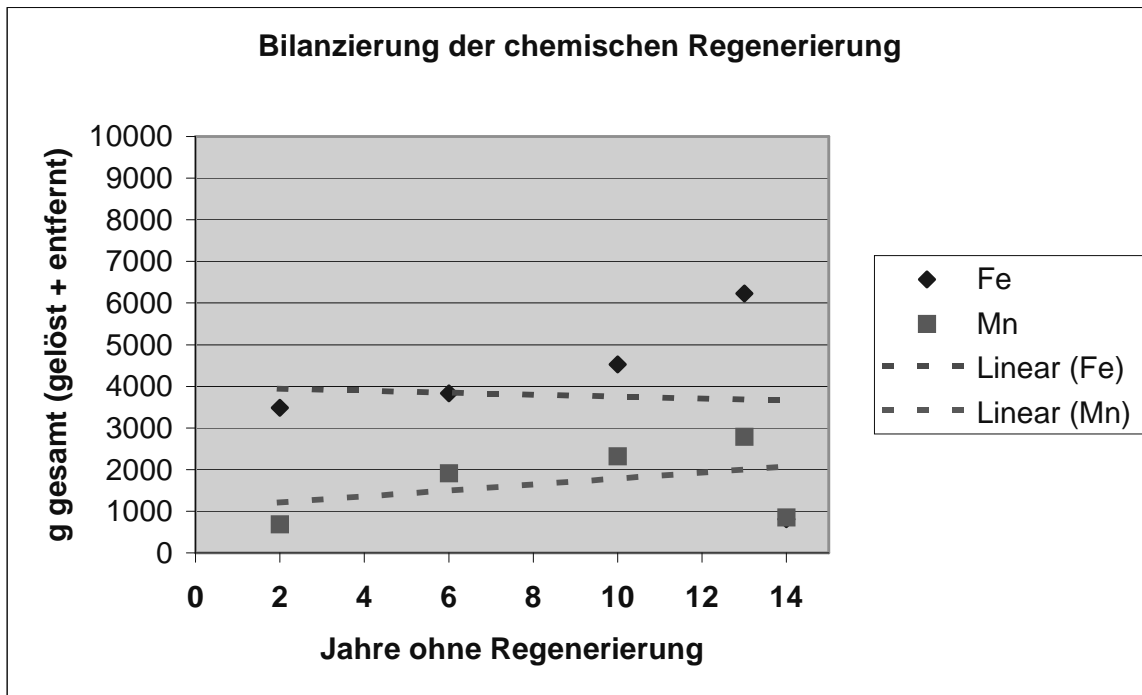


Abb. 6-31: Eisen und Mangan im abgepumpten Wasser der letzten chemischen Regenerierung, abgetragen gegen den Zeitraum seit der vorhergehenden chemischen Regenerierung (WIACEK, 2005)

Beide Auswertungen weisen folgende Gemeinsamkeiten auf:

Die Menge entfernten Mangans stieg mit der Dauer ohne Regenerierung, d. h. mit dem Alter der Beläge. Sie lag bei beiden betrachteten Regenerierverfahren deutlich unter der Menge entfernten löslichen Eisens. Eisen stieg ebenfalls mit dem Alter der Beläge.

Ein Optimum für die Entfernung von Eisen und Mangan lag im Bereich zwischen 8 und 11 bzw. 8 und 13 Jahren ohne Regenerierung.

Brunnen 51 a, ganz links in Abb. 6-30 und ganz rechts in Abb. 6-31 wies jeweils die niedrigsten Werte auf. Dafür war dort der Anteil entfernten Calciums am höchsten (vgl. Abb. 6-29).

Unterschiede zeigte vor allem das Verhältnis von Eisen zu Mangan, zusammengestellt in Tab. 6-2.

Während das Verhältnis bei der Auswertung der chemischen Regenerierungen eher brunnenspezifisch erschien und weder vom Alter der Beläge noch vom Ausbaumaterial abhing, deutete sich bei den Ultraschallregenerierungen ein Unterschied zwischen den Ausbaumaterialien an. Hier lagen für die mit Steinzeugfiltern ausgebauten Brunnen die Manganwerte deutlich höher und entsprechend ist das Verhältnis zwischen Eisen und Mangan niedriger.

Für die chemische Regenerierung lagen die Mengen entfernter Eisens und Mangans dichter beieinander. Hierbei ist jedoch auch zu beachten, dass vor chemischen Regenerierungen ein Lösemitteltest durchgeführt wird, um die optimale Regeneriermittelzusammensetzung und -konzentration zu bestimmen.

Tab. 6-2: berechnete Verhältnisse der Mengen Eisen : Mangan, oben für die jeweils letzte dokumentierte Chemische Regenerierung und unten für die Ultraschallregenerierung 2004 der fünf ausgewählten Brunnen (Wiacek, 2005)

STATISTIK		Brunnen 20a	Brunnen 29a	Brunnen 31a	Brunnen 51a	Brunnen 54a
Fe gelöst CHEM	g gesamt	3486,150	3831,360	4524,730	811,900	6230,650
Mn gelöst CHEM	g gesamt	685,800	1915,680	2323,510	847,200	2793,050
Verhältnis Fe : Mn		5,1	2,0	1,9	1,0	2,2
Fe gelöst US	g gesamt	53,500	93,900	63,400	32,000	48,700
Mn gelöst US	g gesamt	28,200	42,800	8,600	3,800	6,300
Verhältnis Fe : Mn		1,9	2,2	7,4	8,4	7,7

Zum direkten Vergleich der Ultraschallregenerierung mit den Erfolgen der letzten chemischen Regenerierungen wurden für beide Verfahren die entfernten Mengen Eisen und Mangan gegeneinander abgetragen. Das Ergebnis zeigt Abb. 6-32:

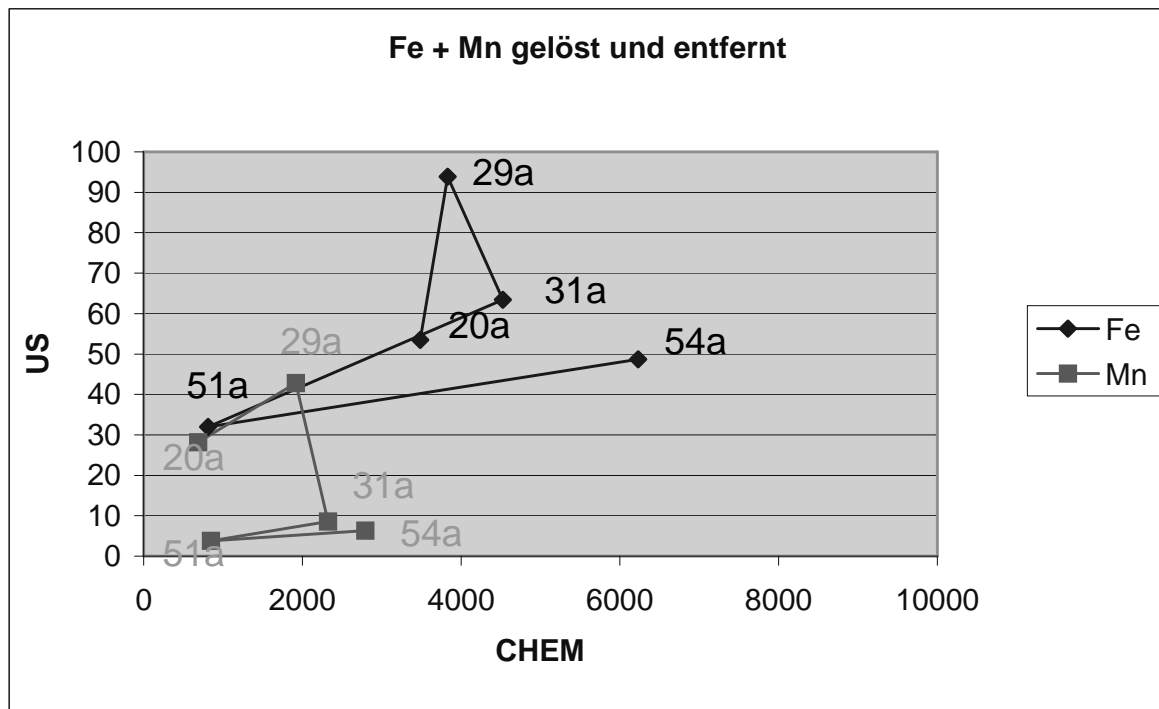


Abb. 6-32: gelöste Mengen Eisen und Mangan aus der Ultraschallregenerierung, abgetragen gegen die Werte aus der letzten chemischen Regenerierung (WIACEK, 2005)

Für Eisen konnte daraus abgelesen werden, dass die Brunnen mit mittleren Gehalten bei der chemischen Regenerierung die höchsten Werte bei der Ultraschallregenerierung erreichten (vgl. Abb. 6-32, Brunnen 20a, 29a und 31a).

Dies war nicht nur mit dem Alter der Ablagerungen begründbar, wie Tab. 6-3 auch noch einmal verdeutlichen soll:

Tab. 6-3: Intervalle ohne Regenerierung, oben für die Ultraschallregenerierung 2004 und unten für die jeweils letzte Chemische Regenerierung, zusammengestellt aus den Brunnenakten der fünf Brunnen (WIACEK, 2005)

STATISTIK		Brunnen 20a	Brunnen 29a	Brunnen 31a	Brunnen 51a	Brunnen 54a
letzte Chem. Reg.	(Jahr)	1993	1994	1996	2002	1999
Intervall US 2004 - letzte CHEM	[Jahre]	11	10	8	2	5
Intervall letzte CHEM - CHEM vor	[Jahre]	2	6	10	14	13

Besonders die Brunnen 29a und 31a wiesen ähnliche Standzeiten vor den beiden verglichenen Regenerierungen auf, während die Brunnen 51a und 54a jeweils ähnliche Intervalle zwischen den Regenerierungen, jedoch sehr stark verschiedene Ergebnisse zeigten.

Die Kurve für Mangan in Abb. 6-32 zeigte einen ähnlichen Verlauf wie die des Eisens. Brunnen 54a zeigte die besten Ergebnisse für die chemische Regenerierung und Brunnen 29a für die Ultraschallregenerierung. Auch hier deutete sich wiederum eine Abhängigkeit vom Ausbaumaterial für das Ultraschallverfahren hinsichtlich der Manganentfernung an.

Bilanziert wurden die Gesamtmengen entfernten, löslichen Eisens, Mangans, Calciums und Magnesiums. Zusammengefasst lässt sich aus den Ergebnissen der Analysen des abgepumpten Wassers nach Ansäuern und Filtrieren und dem Vergleich mit den Werten der jeweils letzten chemischen Regenerierungen folgendes feststellen:

- Die Gesamtmenge der genannten Elemente lag deutlich unter der aus Bilanzierungen von chemischen Regenerierungen. Letztere wies bis einhundertfach höhere Mengen auf.
- Für alle Brunnen war der Anteil Calcium in der Bilanzierung der Beschallung am höchsten.
- Das meiste Ablagerungsmaterial wurde aus dem jeweils unteren Filtermeter ausgetragen.
- Die besten Ergebnisse wurden durch die Beschallung von Brunnen 29a erzielt.
- Das meiste Eisen und Mangan wurde aus den Brunnen 20a und 29a entfernt.
- Die Eisengehalte stiegen mit zunehmender Standzeit des Brunnens seit der letzten chemischen Regenerierung. Sie erreichten ein Optimum bei zehn Jahren ohne Regenerierung (Brunnen 29a).
- Die Mangangehalte stiegen ebenfalls mit der Standzeit. Deutlicher waren jedoch die Unterschiede zwischen den Ausbaumaterialien der Brunnen, denn Brunnen 20a und 29a, die beiden Brunnen mit Steinzeugfilter, wiesen die vier- bis zehnfache Menge Mangan im Vergleich zu den Kupferschlitzbrückenfilter-Brunnen auf. Auch beim Mangangehalt in den Wasserproben lag das Optimum bei einer Standzeit ohne Regenerierung von zehn Jahren (Brunnen 29a).

- Der Vergleich mit der Bilanzierung der, jeweils letzten chemischen Regenerierung zeigte auch für diese eine Abhängigkeit vom Alter der Ablagerungen, die insgesamt weniger stark ausgeprägt war, jedoch keine mögliche Beeinflussung aus dem Brunnenausbau.

Die weitere Bewertung sollte unter Berücksichtigung des nicht löslichen Anteils der durch die Beschallung ausgetragenen Partikel vorgenommen werden. Hierzu wurde zuerst der Filterrückstand aus den angesäuerten Wasserproben optisch beurteilt.

Die Glasfaserfilter aus der Filtration aller Wasserproben wurden mit der Probennummer beschriftet, unter dem Auflichtmikroskop hinsichtlich ihrer Hauptbestandteile bewertet und fotografiert. Für die Brunnen 20a und 29a wurde außerdem der Filterrückstand der 1l-Wasserprobe ausgewogen und auf g/m^3 (d. h. pro Container) hochgerechnet.

Die einzelnen Filter enthielten dabei stark unterschiedliche Mengen unlöslichen Rückstands. Auch hier waren im unteren Filtermeter die höchsten Massen messbar. Aus Tab. 4-1 wurden die Ergebnisse zusammengestellt:

Die fünf Wasserproben aus Brunnen 20a enthielten insgesamt 129 g unlösliche Partikel, davon 104 g aus dem ersten Filtermeter.

In den Wasserproben aus Brunnen 29a waren insgesamt 264,7 g Filterrückstand, davon 103 g im unteren Filtermeter und 92 g im direkt darüber liegenden Filterabschnitt.

Mit einer der Proben des Filterrückstandes wurde versucht, ob sich die organische Masse durch Abbrennen bestimmen ließ. Dies wurde jedoch verworfen und die Filterrückstände mit Hilfe des Mikroskops bewertet.

Die optische Beurteilung ergab für alle Filterrückstände einen hohen Anteil an Quarzpartikeln (Sand) sowie schwarzen organischen Bestandteilen.

Für die Brunnen 51a und 54a waren die Sandanteile deutlich höher, für die Proben 20a und 29a die organischen Bestandteile. Dies zeigte sich auch in den unterschiedlichen Farben der Proben, d. h. die Proben 51a und 54a waren deutlich gelb, während 20a und 29a schwarzbraun waren.



Abb. 6-33: Fotografische Aufnahme des Filtrerrückstandes der Wasserprobe aus dem unteren Filtermeter aus Brunnen 51a (WIACEK, 2004)

Die Zusammensetzung der Filtrerrückstände der Wasserproben sollte der der Sedimentproben entsprechen. Diese wurden nach dem Absedimentieren pro Brunnen aus dem jeweils unteren Container entnommen (vgl. Kap. 4.3.2) und mit den in Kap. 4.4 beschriebenen Verfahren analysiert.

Der erste Schritt war die Übersichtsanalyse der Proben aus Brunnen 20a und 29a mittels der Infrarot-Spektroskopie. Dabei sollte qualitativ bestimmt werden, inwieweit organisches Material in den Proben enthalten war. Die Spektren der Messung sind dem Anhang beigefügt und sollen hier nur kurz zusammengefasst werden:

Beide Spektren zeigten nur vier charakteristische Peaks. Diese konnten von links nach rechts den Bestandteilen Wasser, Organik und Phosphaten zugeordnet werden. Das Führen hoher Anteile organischer Bestandteile wurde somit bestätigt. Carbonate waren nicht enthalten. Das Phosphat wurde als Calciumphosphat eingestuft.

Die Proben beider Brunnen waren nahezu gleich. Die genaue Bestimmung der organischen Phasen wurde nicht vorgenommen.

Im zweiten Schritt wurde die Zusammensetzung der Proben qualitativ und quantitativ mittels der Röntgenfluoreszenzmethode bestimmt.

Hierbei zeigten sich im Vergleich zu den Werten gelösten Eisens und Mangans deutliche Unterschiede, die Brunnen untereinander waren sich jedoch wiederum ähnlich.

Die Ergebnistabelle der RFA ist im Anhang wiedergegeben, ebenso die Berechnungen zur Korrektur der verdünnten Proben, zur Umrechnung aus den prozentualen Anteilen auf Gramm sowie die Umrechnung der Elementgehalte aus den Oxiden und der Bezug auf die Einwaage. Hier sollen nur noch die Endergebnisse, berechnet auf g/kg TS nach Glühverlust, betrachtet werden.

Die Bestimmung des Glühverlustes bestätigte noch einmal die hohen Anteile organischer Masse, die sich bereits im Filtrerrückstand und der IR-Spektroskopie gezeigt hatten. Sie lagen in allen fünf Brunnen um 75 % und damit sehr hoch, vor allem auch deutlich höher als die Bestimmung aus den Belagsanalysen von 1993-1996 aus den Altdaten. Tab. 6-4 zeigt die aus den Einwaagen berechneten prozentualen Gewichtsverluste durch das Glühen. Inwieweit die große Differenz auf einen Restwassergehalt zurückgeführt werden kann oder auf unterschiedlich langes Trocknen, kann im Nachhinein nicht mehr beurteilt werden.

Tab. 6-4: Vergleich der Glühverluste aus den Altanalysen der Belagsproben und der Probenaufbereitung der Sedimentproben aus den fünf Brunnen (WIACEK, 2005)

STATISTIK		Brunnen20a	Brunnen29a	Brunnen31a	Brunnen51a	Brunnen54a
Glühverlust Belagsanalyse	%	26,3	11,8	24,1	27,3	23,1
Glühverlust RFA	%	76,1	77,0	74,0	78,3	75,1

Analog zur Auswertung der Wasserproben wurden auch für die Sedimentproben detailliert nur die Gehalte an Eisen und Mangan und ergänzend Calcium und Magnesium, sowie ergänzend wegen möglicher Sandführung Silizium und Aluminium und wegen des Ausbaumaterials Kupfer betrachtet.

Die Ergebnisse der RFA für die genannten Elemente zeigten für die fünf Brunnen folgendes Bild (Abb. 6-34):

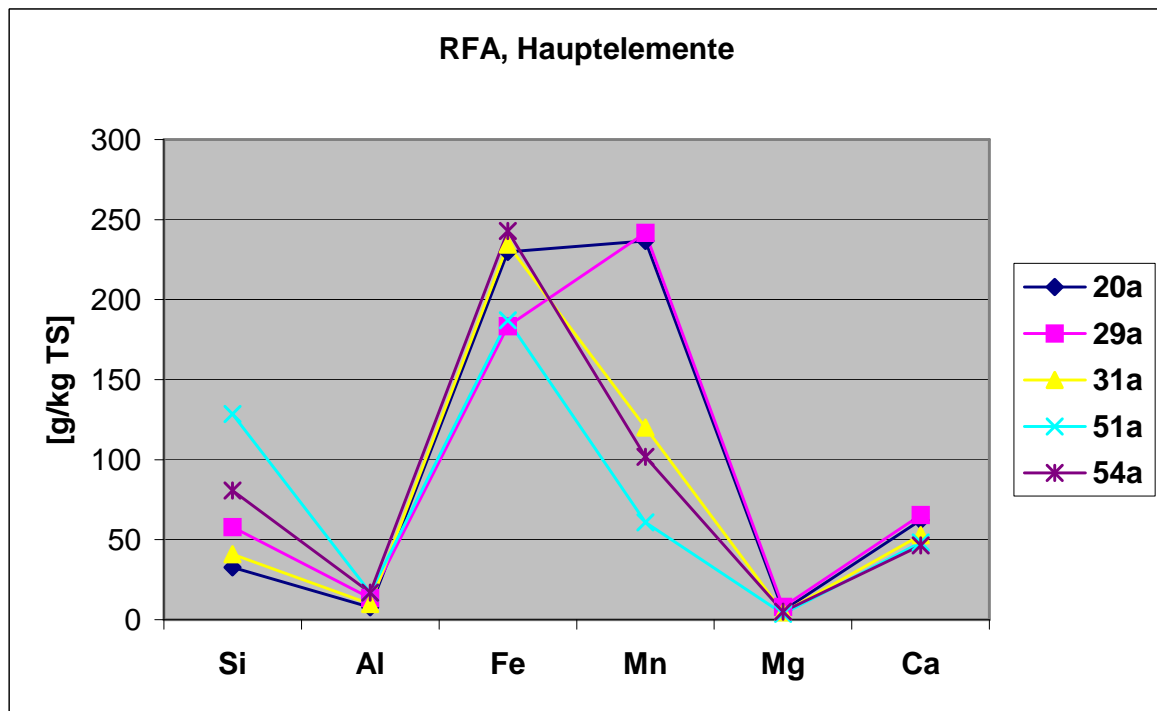


Abb. 6-34: Gehalte ausgewählter Hauptelemente aus der RFA-Bestimmung nach Berechnung auf g/kg TS (WIACEK, 2004)

Am höchsten waren in allen Brunnen die Anteile Eisen und Mangan. Für die Brunnen 20a und 29a lagen die Mangangehalte sogar geringfügig über den Eisengehalten. Deutlich zeigte sich auch, dass die Beschallung der Kupferfilterrohre einen erhöhten Kupfergehalt in den mitgeführten Partikeln zur Folge hatte. Besonders traf dies auf Brunnen 31a zu.

Die Gesamtmengen entfernten Eisens, Mangans, Calciums und Magnesiums gibt Tab. 6-5 wieder. Die Werte lagen, genau wie bei der Analyse der Wasserproben auf lösliche Anteile der Elemente, wiederum deutlich unter den Bilanzierungen der letzten chemischen Regenerierungen.

Tab. 6-5: Bilanzierung der Elementgehalte der genannten Elemente aus der RFA [WIACEK, 2004]

		20a	29a	31a	51a	54a
Fe	[g/kg]	229,808	183,497	234,355	187,064	242,890
Mn	[g/kg]	236,708	241,665	120,058	60,726	101,778
Mg	[g/kg]	5,610	8,083	4,585	3,619	5,067
Ca	[g/kg]	62,189	65,478	52,825	48,179	46,320
Summe		534,315	498,722	411,823	299,589	396,055

Abb. 6-35 zeigt die prozentuale Verteilung von Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium in den Feststoffproben, analog zu Abb. 6-29 für die Wasserproben:

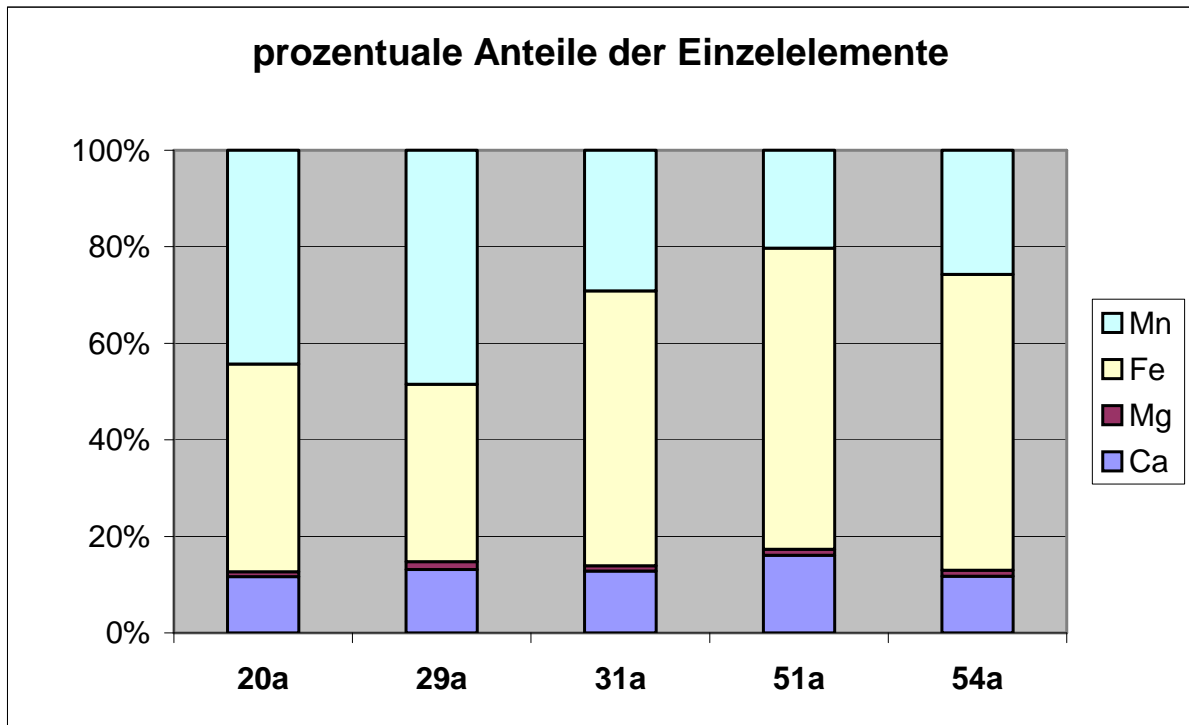


Abb. 6-35: Prozentuale Anteile der Elemente Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan in den Sedimentproben der Ultraschallregenerierung bezogen auf die Summe der genannten Elemente (WIACEK, 2005)

Es zeigte sich auch in dieser Darstellung noch einmal, dass deutlich mehr Eisen und Mangan als Calcium in den Sedimentproben analysiert werden konnte.

Den höchsten Calcium-Gehalt wies Brunnen 51a auf, genau wie auch schon das Ergebnis der Wasserproben zeigte. Anteilsmäßig die höchsten Eisen- und Mangangehalte zeigte Brunnen 54a. In den Brunnen 20a und 29a wurde anteilig mehr Mangan als Eisen entfernt.

Tab. 6-6 zeigt den Vergleich der Gesamtsummen Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium aus der Analyse der Wasserproben, der RFA der Sedimentproben und der Bilanzierung der letzten chemischen Regenerierung.

Tab. 6-6: Vergleich der Bilanzierungen der Analysen der letzten chemischen Regenerierung, der Wasserproben und der Sedimentproben aus den Ultraschallregenerierungen [WIACEK, 2004]

STATISTIK		Brunnen 20a	Brunnen 29a	Brunnen 31a	Brunnen 51a	Brunnen 54a
gelöst CHEM	g gesamt	5715,0	7982,0	12229,0	3530,0	21485,0
gelöst US	g gesamt	475,5	676,6	642,6	725,9	945,4
Feststoff US	g/kg TS	623,3	616,3	638,1	533,3	599,1

Zu beachten ist, dass sich die Bilanzierungen der gelösten entfernten Elementmengen jeweils auf den gesamten Brunnen bezog, während die Feststoffproben nur aus einem Filtermeter entnommen und analysiert wurden. Da dieser aber, wie bereits angeführt, den Hauptteil der Sedimentfracht enthielt, konnten die Werte vergleichend betrachtet werden.

Tab. 6-5 auf Seite 182 deutete in der Bilanzierung der einzelnen Elemente bereits einen Trend bezüglich des Alters der Ablagerungen an. Zur grafischen Veranschaulichung wurde die folgende Abbildung (Abb. 6-36) erstellt. Die Reihenfolge der Brunnen ist wie zuvor von links nach rechts Brunnen 51a, 54a, 31a, 29a und 20a.

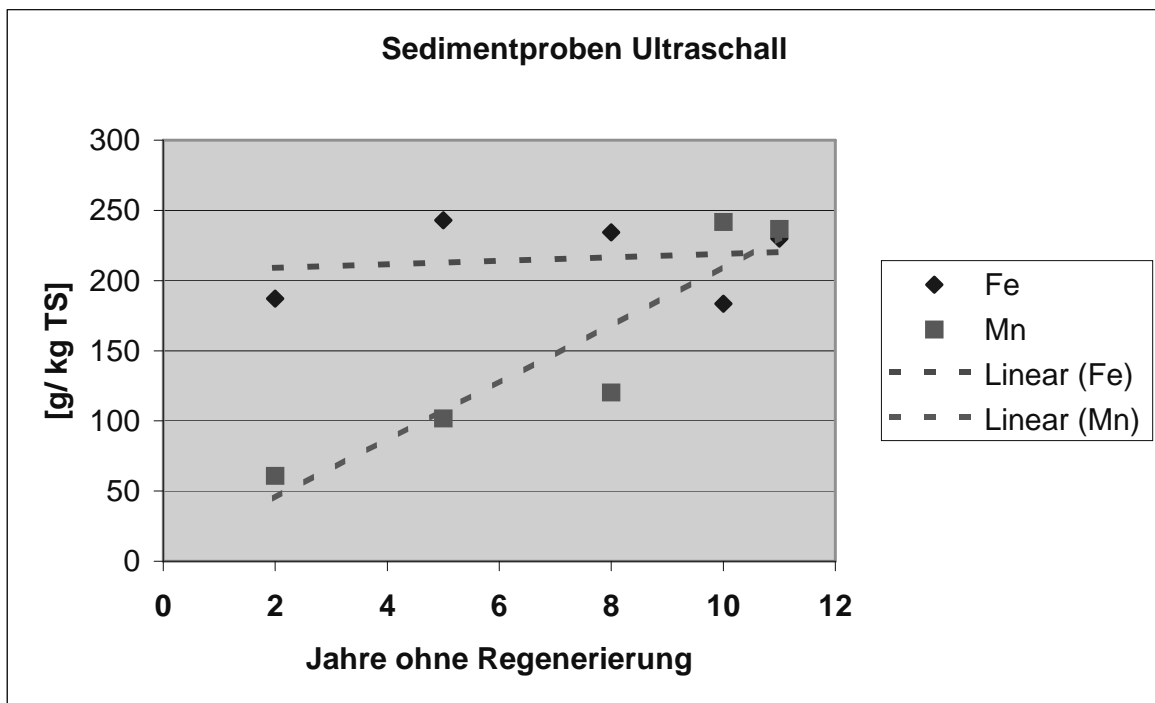


Abb. 6-36: Eisen und Mangan in den Sedimentproben des abgepumpten Wassers nach der Beschallung, abgetragen gegen den Zeitraum seit der letzten chemischen Regenerierung (WIACEK, 2005)

Während die Eisengehalte in den Proben keine Abhängigkeit zur Standzeit seit der letzten Regenerierung zeigten, ist der Mangangehalt mit zunehmendem Alter der Ablagerungen deutlich höher. Der höchste Mangangehalt wurde in der Probe aus Brunnen 29a gemessen, gefolgt von Brunnen 20a. Der Eisengehalt hingegen war in den Proben 51a und 31a am höchsten und in 29a am niedrigsten.

Trotz der unterschiedlichen Probeaufbereitungs- und Analyseverfahren (vgl. Kap. 4.1.2 für die Belagsanalysen und Kap. 4.4.3 für die RFA) wurden die RFA-Ergebnisse mit denen der Belagsanalysen verglichen.

Hierzu wurden, analog zu Abb. 6-35 die prozentualen Anteile der vier Hauptelemente berechnet und in Abb. 6-37 dargestellt.

Für Brunnen 20a war der Mangangehalt nicht angegeben. Er ist daher in der Abbildung, mit einem Fragezeichen versehen, nachträglich eingefügt worden.

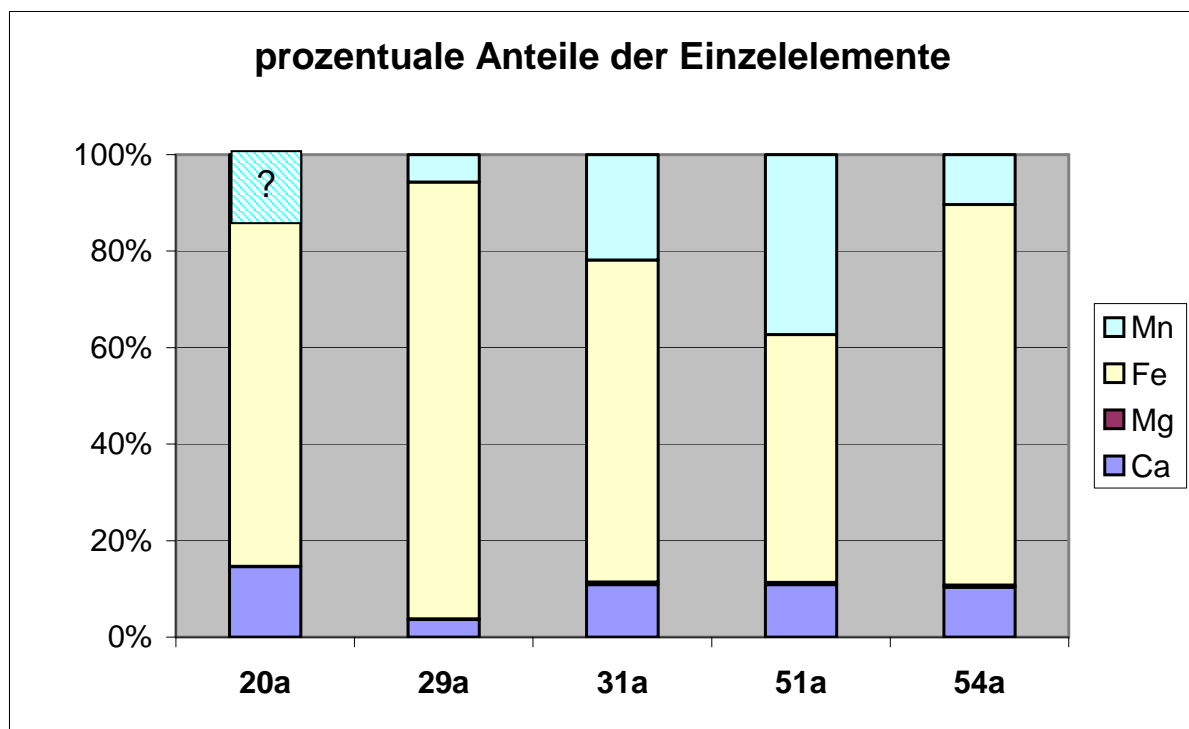


Abb. 6-37: Prozentuale Anteile der Elemente Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan in den Belagsproben bezogen auf die Summe der genannten Elemente (WIACEK, 2005)

Abb. 6-37 zeigt für alle fünf Brunnen einen sehr hohen Eisenanteil, für Brunnen 51a außerdem einen hohen Mangananteil.

Die Proben aus Brunnen 29a und 31a wurden jeweils zum Zeitpunkt der letzten chemischen Regenerierung gewonnen. Für die Probe aus 20a ist das Datum nicht in der Brunnenakte vermerkt und für 51a und 54a bestand kein Zusammenhang zu einer chemischen Regenerierung.

Tab. 6-7 zeigt Zeitpunkt und Ergebnisse für Eisen und Mangan der Belagsanalysen:

Insgesamt sind die Analysen acht bis zehn Jahre vor den Ultraschallregenerierungen durchgeführt worden, so dass generelle Änderungen der hydrogeologischen Grundbedingungen nicht ausgeschlossen sind.

Tab. 6-7: Zeitpunkt der Entnahme der Belagsproben, Ergebnisse der Analyse für Eisen und Mangan und berechnetes Verhältnis Eisen : Mangan (WIACEK, 2005)

STATISTIK		Brunnen 20a	Brunnen 29a	Brunnen 31a	Brunnen 51a	Brunnen 54a
Zeitpunkt Belagsanalyse	Monat/Jahr	?	07/1994	01/1996	04/1995	04/1996
Belagsanalyse Fe	g/kg TS	309,0	453,0	263,0	212,0	342,0
Belagsanalyse Mn	g/kg TS	k.A.	78,0	86,0	154,0	45,0
Verhältnis Fe: Mn		nb.	5,8	3,1	1,4	7,6

Auf die Gegenüberstellung der Eisen- und Mangangehalte aus der Ultraschallregenerierung mit den Belagsproben, analog zu Abb. 6-32, wurde aufgrund der oben erwähnten möglichen Änderungen der Grundbedingungen im Grundwasserleiter des Wasserwerkes verzichtet.

Im Anhang finden sich für jeden der fünf Brunnen noch einmal die prozentualen Anteile Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium der Belagsanalysen, der Bilanzierung der chemischen Regenerierung und der RFA der Sedimentproben in Form von Kreisdiagrammen gegenübergestellt.

Zusammengefasst lässt sich für die Analyse der Sedimentproben folgendes feststellen:

- Bilanziert und ausgewertet wurden vor allem die Gesamtmengen entfernten, Eisens, Mangans, Calciums und Magnesiums im Feststoffanteil des jeweils unteren Filtermeters.
- Die Gesamtmenge der genannten Elemente lag deutlich unter der aus Bilanzierungen von chemischen Regenerierungen. Letztere wiesen auch für die Betrachtung der Feststoffe zehnfach bis fünfzigfach höhere Mengen auf.

- Ergebnisse -

- Die besten Ergebnisse wurden durch die Beschallung von Brunnen 29a erzielt.
- Das meiste Eisen und Mangan wurde aus den Brunnen 20a und 29a entfernt. Für diese beiden Brunnen lag der Mangangehalt der Proben über deren Eisengehalt.
- Die Eisengehalte zeigten keine ausgeprägte Abhängigkeit von der Standzeit des Brunnens seit der letzten chemischen Regenerierung. Anteilig wurde in den Brunnen 31a, 51a und 54a, also den Brunnen mit den jüngeren Belägen mehr Eisen entfernt.
- Die Mangangehalte stiegen mit der Standzeit stark an und lagen in den Brunnen 20a und 29a, die 11 bzw. 10 Jahre zuvor das letzte Mal chemisch regeneriert wurden, am höchsten. Hierbei trat jedoch eine Überlagerung der beiden Effekte „Alter der Ablagerungen“ und „Ausbaumaterial“ auf, denn diese Brunnen waren gleichzeitig die Steinzeugfilter-Brunnen. Unter Berücksichtigung der Altdaten wird die Abhängigkeit vom Ausbau favorisiert.
- Der Vergleich mit der Bilanzierung der jeweils letzten chemischen Regenerierung zeigte für diese keine Abhängigkeit vom Alter der Beläge oder vom Ausbau.
- Brunnen 51a wies bei beiden Verfahren die schlechtesten Ergebnisse auf.
- Der Vergleich mit den Belagsanalysen aus den Jahren 1994 bis 1996 zeigte keine Übereinstimmungen in der prozentualen Verteilung der vier Elemente. In den Belagsproben war prozentual das meiste Eisen in Brunnen 29a und das wenigste in Brunnen 51a und das meiste Mangan in 51 a und das wenigste in 29a. Für die Sedimentproben galt umgekehrt, dass der höchste Anteil Eisen in Brunnen 51a vorlag und der niedrigste in Brunnen 29a und der höchste Anteil Mangan in Brunnen 29a sowie der niedrigste in Brunnen 51a.

Ergänzend wurden die Feststoffproben qualitativ mittels der Röntgendiffraktometrie-Analyse (RDA) auf das Vorhandensein kristalliner Mineralphasen untersucht. Es interessierten dabei besonders Eisen- und Manganoxide.

Goethit konnte in Brunnen 29a dem Spektrum zugeordnet werden.

Goethit hat die Formel $\alpha\text{-FeO(OH)}$. Es ist ein braunes, rhombisch kristallines Eisenmineral. Es kommt vorwiegend in Gemengen mit anderen Eisenoxihydroxiden vor, zum Beispiel mit Limonit.

Das ist kein Mineral im eigentlichen Sinn, sondern bezeichnet ein ebensolches Gemisch aus nicht näher bestimmten Eisenoxihydroxiden mit wechselndem Wassergehalt.

In anderen Brunnen konnten keine kristallinen Eisenoxide oder -hydroxide gemessen werden.

Die Proben 20a, 31a und 54a wiesen im Spektrum einen Peak auf, der dem Mangan-Mineral-Gemisch „Wad“ zugeordnet werden konnte. Dabei handelt es sich um eine weiche, erdige, braun bis braunschwarze Masse aus Braunstein (MnO_2) und anderen Manganoxiden mit oft hohem Wassergehalt.

In allen Proben lagen außerdem eindeutig zuordenbar Quarz und Tonminerale (Illit, Kaolinit in Probe 29a und Hydrobiotit in Probe 54a) vor.

Insgesamt ergibt sich aus den chemischen Analysen also folgendes Bild:

- Anteilig an der Summe der vier betrachteten Elemente wurde aus Brunnen 29a das meiste Eisen und Mangan entfernt.
- Während der Eisengehalt in den Proben eher brunnenspezifisch war, zeigte der Mangangehalt eine klare Abhängigkeit vom Ausbaumaterial. Der Mangangehalt war in den Proben aus den Steinzeugfilter-Brunnen vier- bis zehnfach höher als in den Kupferschlitzbrückenfilter-Brunnen.
- Hinsichtlich der insgesamt entfernten Massen zeigten sich keine solchen Trends oder Abhängigkeiten.
- In den Brunnen der Ost-Gruppe (20a und 29a) war viel organisches Material enthalten.
- Die Brunnen der West-Gruppe (51a und 54a) zeigten Sandführung.

Die Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der chemischen Analysen und dem Regeneriererfolg werden im nächsten Kapitel ausgewertet:

6.4 Bewertung des Regeneriererfolges und Schlussfolgerungen

Inwieweit sich Zusammensetzung und Alter der Beläge sowie das Ausbaumaterial des Brunnens auf den Regeneriererfolg auswirkte, sollte der Bezug der erzielten Leistungssteigerung auf die Daten des Brunnens und vor allem die Analyseergebnisse zeigen.

Generell eine gute Übereinstimmung zeigten die Kamerabefahrung und die Zusammensetzung der durch Ultraschall entfernten Feststoffe. Tab. 6-8 gibt hierzu noch einmal eine Zusammenstellung der prozentualen Anteile von Eisen und Mangan an der Summe der vier betrachteten Elemente aus der RFA der Sedimentproben:

Tab. 6-8: Prozentualer Anteil von Eisen (Fe) und Mangan (Mn) an der Summe der entfernten Massen Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium aus der RFA (Wiacek, 2005)

RFA		20a	29a	31a	51a	54a
Fe	%	43	37	57	62	61
Mn	%	44	48	29	20	26

Ausgehend von den Kamerabefahrungen spiegelten die RFA und damit die Sedimentproben nach Beschallung die Zusammensetzung der Beläge gut wieder. Der hohe Mangananteil in den Proben der Brunnen 20a und 29a entsprach der schwarzbraunen und z. T. gelbbraunen Farbe der Beläge in den beiden Brunnen. Entsprechend wiesen die Brunnen mit rot gefärbten Belägen höhere Eisenanteile auf (vgl. Abb. 6-38).

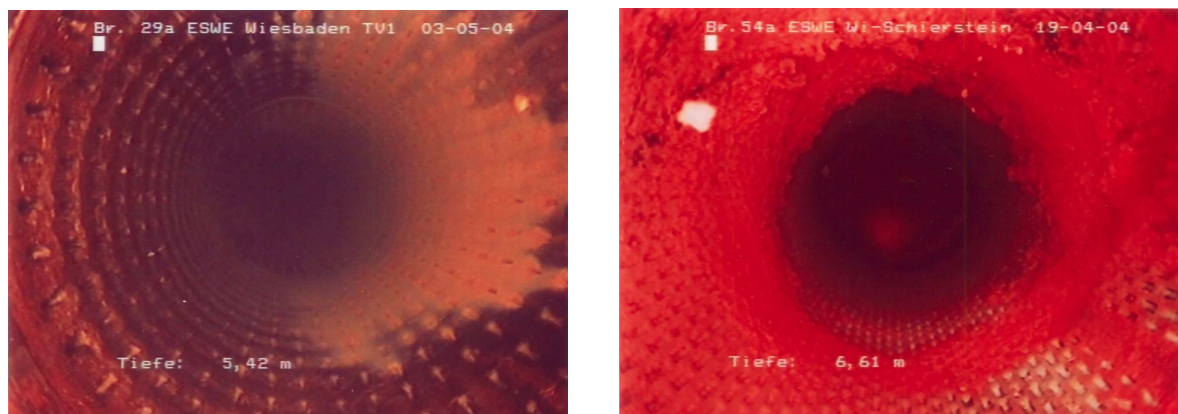


Abb. 6-38: Die Farbe der Beläge im Vergleich: links: Br. 29a, 48 % Mangan, rechts: Brunnen 54a, 61 % Eisen [BRM, 2004]

In Brunnen 29a wurden die am stärksten inkrustierten Beläge beobachtet. Dieser Brunnen war auch der einzige, in dem mit der RDA kristallines Eisenoxihydroxid, nämlich Goethit, detektiert werden konnte. Eher flockige Aufwüchse hatten die Brunnen, in denen die RDA das Mineral-Gemisch Wad anzeigte.

Die Bilanzierung der entfernten Gesamtmengen löslicher Anteile in den Wasserproben zeigte eine klare Abhängigkeit von der Pumprate (Abb. 6-39). Die höchste Masse löslicher Stoffe konnte bei hoher Pumprate in den Brunnen der West-Gruppe (51a und 54a) ausgetragen werden. Für die Sedimentproben galt dieser direkte Zusammenhang nicht. Hierbei muss jedoch erneut angemerkt werden, dass die Sedimentproben auf g/kg Trockensubstanz umgerechnet und die Gesamtmasse entfernter Feststoffe pro Container bzw. pro Brunnen nicht ermittelt wurde. Erwartungsgemäß, und da die Wasserproben mit den löslichen und unlöslichen Bestandteilen eine Teilmenge der Sedimentproben darstellten, sollten in den Brunnen 51a und 54 a mit den hohen Pumpraten auch höhere Gesamtmassen Feststoffe entfernt worden sein.

Abb. 6-39 zeigt die Summen der Masse entfernten Eisens, Mangans, Calciums und Magnesiums pro Brunnen, die aus den Analysen der Wasserproben und der Sedimentproben berechnet wurden, im Zusammenhang mit der Fördermenge der Pumpversuche und damit indirekt der Ergiebigkeit der Brunnen und der erzielten Leistungssteigerung allein durch die Beschallung:

Brunnen 31a, an dem die beste Leistungssteigerung erreicht werden konnte, war gleichzeitig derjenige, in dem die Bilanzierung der vier Hauptelemente in den Sedimentproben bzw. der RFA den höchsten Wert erreichte (vgl. Tab. 2-1, S. 183).

Brunnen 20a und 29a enthielten trotz geringer Förderraten beim Abpumpen ebenfalls in der Bilanzierung der Sedimentproben hohe Summen ausgetragenen Eisens und Mangans. Hierbei war der Anteil Mangan prozentual höher als der Eisengehalt. Es zeigte sich für diese beiden Brunnen weiterhin eine Korrelation mit den Flowmeter-Messungen, bei denen sich deutliche Änderungen in der Zustromverteilung ergeben hatten (vgl. Abb. 6-27 S. 170). Die Leistungssteigerung lag zwar mit 39 und 44 % unter den erreichten 72 % aus Brunnen 31a, war damit jedoch auch um ein Vielfaches höher als an den Brunnen 51a und 54a.

Brunnen 51a, der die deutlichste Verringerung der Lagerungsdichte im Ringraum im Gamma-Gamma-Ringraum-Scan zeigte (vgl. Abb. 6-26, S. 169), jedoch auch die insgesamt geringste Leistungssteigerung (8 %),

wies in der Bilanzierung die niedrigste Masse ausgetragener Feststoffanteile Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium auf. Es war gleichzeitig der Brunnen mit dem prozentual höchsten Eisenanteil im Sediment und dem niedrigsten Wert für die Masse ausgetragenen Mangans. Der Brunnen zeigte besonders anhand der Farbe der Sedimentprobe eine hohe Sandführung, so dass die Verringerung der Lagerungsdichte möglicherweise auf eine Entsandungswirkung des Ultraschalls zusammen mit dem Abpumpen zurückzuführen ist.

Die geringste Leistungssteigerung durch die Beschallung wies Brunnen 54a auf. Er konnte zwar insgesamt durch die Maßnahme um 26 % gesteigert werden, den Hauptanteil daran hatten jedoch das Bürsten und das anschließende Abpumpen. Bei diesem Brunnen ergab die Bilanzierung des mit Salzsäure löslichen Eisens und Mangans in den Wasserproben das höchste Ergebnis und der Vergleich der Ringraum-Scans zeigte ebenfalls eine gute Verringerung der Lagerungsdichte durch die Beschallung an, die Leistungssteigerung durch Ultraschall lag jedoch nur bei 2 %.

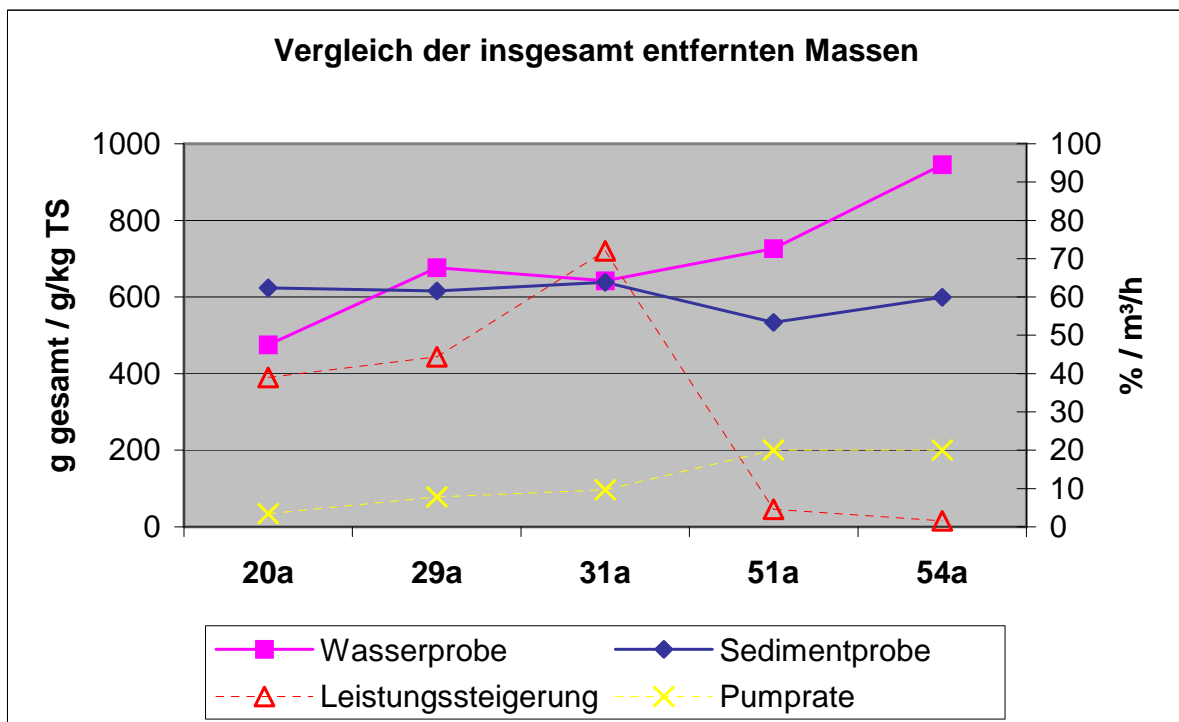


Abb. 6-39: Bezug zwischen Pumprate, insgesamt entfernter Masse Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium in der Wasserprobe und der Sedimentprobe und prozentuale Leistungssteigerung vor / nach Ultraschall (WIACEK, 2005)

Die prozentualen Anteile von Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium aus der RFA sind in Abb. 6-40 zusammen mit der Leistungssteigerung in % durch die Beschallung und dem Alter der Beläge, d. h. den Jahren seit der letzten chemischen Regenerierung abgetragen:

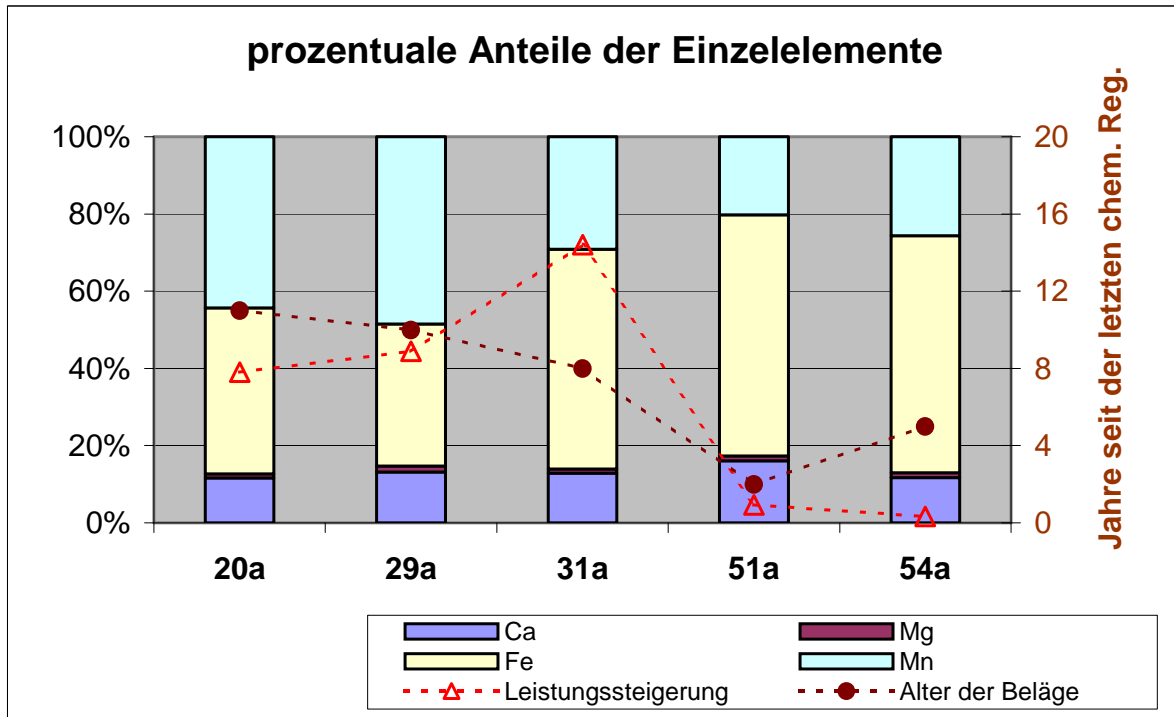


Abb. 6-40: Prozentuale Anteile der Elemente Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan in den Sedimentproben (RFA) bezogen auf die Summe der genannten Elemente sowie erreichte Leistungssteigerung (Δ) und Alter der Beläge (\bullet) (Wiacek, 2005)

Die Brunnen, bei denen die letzte chemische Regenerierung schon weiter zurücklag, d. h. Brunnen 20a und 29a, wiesen einen deutlich höheren und 31a einen leicht höheren Mangananteil auf, d. h. der Mangananteil folgte dem Alter der Beläge. Mit Ausnahme von Brunnen 31a folgte auch die Leistungssteigerung dem Mangananteil.

Letzterer Trend ließ sich jedoch nicht eindeutig von dem klaren Zusammenhang zwischen dem Mangangehalt in den Proben und dem Ausbaumaterial der Brunnen trennen, d. h. es konnte nicht bestimmt werden, ob die Leistungssteigerung auf dem guten Austrag des Mangans beruhte oder der Manganaustrag auf dem Ausbaumaterial oder beides zusammenwirkte.

Abb. 6-41 zeigt hierzu noch einmal die Leistungssteigerung aus den spezifischen Ergiebigkeiten Q_s der Pumpversuche, die Gesamtsumme der vier Hauptelemente und die Massen Eisen und Mangan aus der RFA der Sedimentproben in g/kg TS:

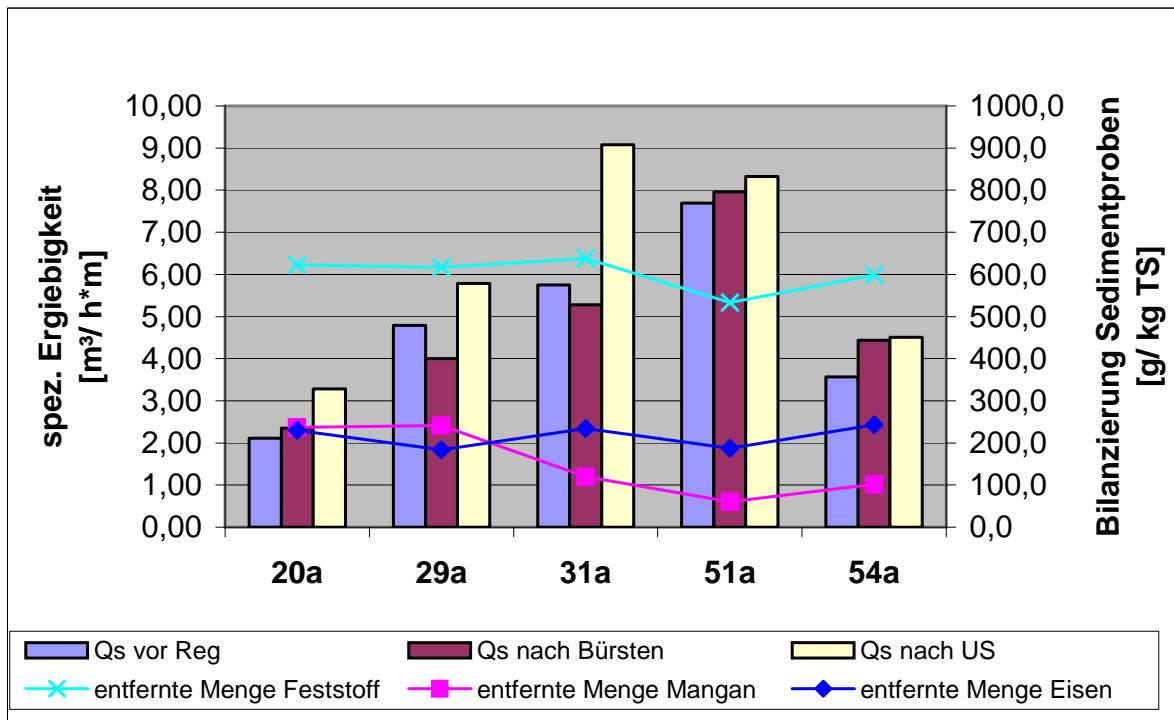


Abb. 6-41: Ergebnis der Pumpversuche (Balken) sowie die Bilanzierung von Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium in den Sedimentproben nach RFA(x) und Masse Mangan (■) sowie Eisen (◆) aus RFA (WIACEK, 2005)

Darin bestätige sich noch einmal der Zusammenhang zwischen der Leistungssteigerung und der insgesamt entfernten Masse in den Sedimentproben und zwischen dem Ausbaumaterial und dem Mangangehalt. Die jüngeren Ablagerungen (Brunnen 51a und 54a) ergaben weniger ausgetragene Feststoffe und eine geringere Leistungssteigerung. Der Mangangehalt war in den beiden Steinzeugbrunnen generell höher als in den Kupferbrunnen, ohne Zusammenhang zur insgesamt entfernten Menge der vier Hauptelemente.

Insgesamt zeigte sich in der Regenerierung der fünf Brunnen an

- Brunnen 20a eine Gesamtsteigerung der spezifischen Ergiebigkeit um 55 % und durch Ultraschall um 39 %. Die Lagerungsdichte wurde abschnittsweise verringert. In den gleichen Abschnitten erhöhte sich der Zustrom und die aktive Filterlänge wurde gesteigert. Die Hauptanströmung verlagerte sich aus dem mittleren in den oberen Filterbereich. Ausgetragen wurde dabei zu fast gleichen Anteilen Eisen und Mangan. Die Gesamtmasse der ausgetragenen Hauptelemente in der Sedimentprobe war die zweithöchste und entsprach damit der Gesamtsteigerung der Ergiebigkeit. In der Wasserprobe wurde der geringste Wert für gelöstes Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium gemessen. Wie in allen weiteren Proben überwog dabei der Calciumanteil.
- Brunnen 29a eine Gesamtsteigerung der spezifischen Ergiebigkeit um 21 % und durch Ultraschall im direkten Vorher-Nachher-Vergleich um 44 %. Die Lagerungsdichte wurde ebenfalls abschnittsweise verringert. In diesen Abschnitten, im mittleren und oberen Filterbereich, verringerte sich jedoch auch der Zustrom. Im Gegensatz dazu wurde in Bereichen, in denen die Lagerungsdichte nach der Beschallung einen höheren Wert anzeigte, die Zuströmung verbessert. Dies betraf besonders den zweiten Filtermeter von oben. Die aktive Filterlänge konnte insgesamt ebenfalls gesteigert werden. Der Brunnen wies einen indifferenten Zustrom von unten auf. Ausgetragen wurde mit den Sedimentproben die drittbeste Menge der vier Hauptelemente. Dabei überwog in der Probe der Mangananteil mit 48 % gegenüber dem Eisenanteil mit 37 %. Die Wasserprobe wies einen mittleren Gehalt löslichen Eisens, Mangans, Calciums und Magnesiums auf. In der Sedimentprobe konnte außerdem Goethit nachgewiesen werden. Dies entsprach den Befunden der Kamerabefahrungen, in denen sich im Vergleich zu den anderen vier Brunnen die ausgeprägtesten Restinkrustationen zeigten.
- Brunnen 31a eine Gesamtsteigerung der Ergiebigkeit um 58 % und eine Steigerung durch Ultraschall um 72 %. Die geophysikalischen Messungen zeigten demgegenüber keine Veränderungen vor und nach der Beschallung. Aus dem Brunnen konnte die höchste Menge Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium gesamt ausgetragen werden. Die Masse löslicher Anteile der vier Elemente lag im mittleren Bereich, vergleichbar mit der in der Probe aus Brunnen 29a. In der Feststoffprobe überwog der Eisenanteil mit 57 % den Mangananteil (29 %) deutlich. Die Probe wies mit 74,0 % den niedrigsten Glühverlust auf.

- Ergebnisse -

- Brunnen 51a eine Gesamtsteigerung um nur 8 %, davon bei der Beschallung eine Steigerung um 5 %. Auch bei diesem Brunnen wiesen die Bereiche mit durch die Beschallung verringerter Lagerungsdichte weniger Zustrom auf als vor der Beschallung. Die Lagerungsdichte konnte insgesamt am besten und durchgehend verringert werden, aber die aktive Filterlänge verkürzte sich, da im mittleren Filterbereich ein vorher aktiver Zuflusshorizont inaktiv wurde. Der Brunnen wies die niedrigste Masse der vier Hauptelemente in der Sedimentprobe auf. Es überwog dabei deutlich das Eisen mit 62 % gegenüber Mangan mit 20 %. Der Glühverlust lag mit 78,3 % am höchsten. In der Wasserprobe wurde die zweithöchste Masse der löslichen Anteile der vier genannten Elemente erreicht. Hierbei zeigte sich ein Zusammenhang mit der höheren Pumprate beim Abpumpen.
- Brunnen 54a eine Gesamtsteigerung um 26 %, davon eine Steigerung durch die Beschallung jedoch nur um 2 %. Besonders in den oberen beiden Filtermetern und im unteren konnte die Lagerungsdichte verringert und entsprechend der Zustrom verbessert werden. Der mittlere Filterbereich, zwischen drei und fünf Metern unter Brunnenkopf wurde infolge einer Erhöhung der Lagerungsdichte inaktiviert, so dass sich auch an diesem Brunnen die aktive Filterlänge verkürzte. Trotz der höheren Pumprate wies der Brunnen eine vergleichsweise niedrige Masse in der Bilanzierung der Analyse der Sedimentprobe auf. In der Wasserprobe wurde die höchste Masse der löslichen Anteile der Hauptelemente ausgetragen.

Das optimale Ergebnis zeigte somit Brunnen 31a mit der höchsten Leistungssteigerung und der größten Masse entfernter Feststoffe.

Es folgte Brunnen 20a, der am längsten nicht mehr regeneriert worden war und die zweithöchste Masse entfernter Feststoffe sowie in der Probe hohe Anteile organischen Materials aufwies.

Die Brunnen mit der geringsten Leistungssteigerung, bei denen durch Ultraschall eine Verringerung der aktiven Filterlänge bewirkt wurde, waren gleichzeitig diejenigen, die in der Sedimentprobe eine hohe Sandführung anzeigten. So zeigte Brunnen 54a zwar die drittbeste Gesamtsteigerung der Ergiebigkeit. Dies beruhte aber hauptsächlich auf dem Bürsten und dem Abpumpen, also vermutlich vor allem auf einem Entsanden des Filterbereiches. Brunnen 51a und 29a, bei denen eine verringerte Lagerungsdichte mit einer schlechteren Anströmung in den entsprechenden Abschnitten einherging, wiesen die höchsten Glühverluste auf.

Brunnen 29a konnte zwar insgesamt nicht viel in seiner Ergiebigkeit gesteigert werden, der Ultraschall zeigte dennoch eine gute Wirkung. Hier konnte das drittbeste Ergebnis für die Masse entfernter Feststoffe erreicht werden. Die organischen Bestandteile in der Probe waren hoch.

Der Vergleich der verschiedenen Proben zeigte, dass sie aufgrund der sehr unterschiedlichen Verfahren bei der Probenahme, Aufbereitung und Analyse keine Übereinstimmungen aufwiesen. Besonders die Wasserproben waren durch die großen Anteile gelösten Calciums verfälscht. Aufgrund der völlig verschiedenen Bedingungen konnten sie daher auch nur bedingt mit den Bilanzierungen vorangegangener chemischer Regenerierungen verglichen werden. Die Belagsproben hingegen gaben zwar den Calciumgehalt vergleichsweise gut wieder, zeigten dafür sehr hohe Eisenanteile, die in den Sedimentproben nicht bestätigt wurden. Hierbei fehlten auch z. T. Angaben zum Alter der Beläge zum Zeitpunkt der Probenahme. Zur Auswertung wurde daher davon ausgegangen, dass die durch die Beschallung ausgetragenen Feststoffe in den Sedimentproben die Zusammensetzung der Ablagerungen im Brunnen widerspiegelte.

Aus den Ergebnissen wurden bezüglich der Ultraschallregenerierungen im Wasserwerk Schierstein die folgenden Hypothesen abgeleitet:

1. Die Leistungssteigerung bei älteren Ablagerungen ist höher, als wenn der Brunnen kürzlich erst regeneriert wurde.
2. Die Verbesserung der Ergiebigkeit steigt mit der Gesamtmasse ausgetragener Feststoffe.
3. Je älter die Beläge sind, desto höher ist der Mangangehalt.
4. Die Steinzeugfilterbrunnen weisen stärker manganhaltige Beläge auf.
5. Ultraschall löst Mangan besser als Eisen.
6. Ultraschall wirkt bei Steinzeug-Ausbau besser als bei Kupfer-Ausbau.

Aus den Verhältnissen und dem hydrogeologischen sowie betrieblichen Hintergrund im Wasserwerk Schierstein folgten einige Besonderheiten, die nicht eindeutig interpretiert werden können. So zeigten alle Brunnen nach Regenerierungen zum Beispiel Änderungen im Sauerstoffgehalt und in der Leitfähigkeit im Rohwasser (vgl. die Abbildungen in Kap. 5 und im Anhang), die jedoch unterschiedlich ausfielen.

Der weitere Verlauf der Kurven zeigte in sich selbst starke Schwankungen, so dass dies wohl eher auf die Hintergrundbedingungen als auf mögliche Einflüsse aus Regeneriermaßnahmen zurückgeführt werden musste.

Auch aus der Betriebsweise der Brunnen ergeben sich Besonderheiten. So ist zum Beispiel eine Absenkung des Wasserspiegels in den Filterbereich hinein nicht auszuschließen.

Die veränderlichen Anstrombedingungen im Untergrund und Mischungsverhältnisse der unterschiedlichen Wässer aus den Infiltrationsbecken, den Sickergalerien und Infiltrationsbrunnen, Uferfiltratanteilen und echtem taunusseitigen Grundwasser (vgl. Kap.3) je nach den entsprechenden Wasserständen in Becken und Rhein oder nach Betriebsweise der Infiltrationsanlagen machten eine hydrochemische Modellierung auf Basis der Rohwasseruntersuchungen und der Ergebnisse aus RFA und RDA schwierig, so dass aufgrund der schlechten Interpretierbarkeit darauf verzichtet wurde.

Die generellen Auswirkungen und Folgerungen im Hinblick auf ein zielführendes Brunnenmonitoring zur optimalen Brunnennutzung und -pflege werden im nachfolgenden Kapitel diskutiert.

7 Diskussion

7.1 Interpretation der Ergebnisse

Die fünf Regeneriermaßnahmen bestätigten die uneinheitlichen und zum Teil schwierig interpretierbaren Verhältnisse im Wasserwerk Schierstein. Erwartungsgemäß wiesen die Brunnen entsprechend ihrer Eigenschaften und ihres Standortes verschiedene Ergebnisse auf. Es zeigten sich unterschiedliche, den Regeneriererfolg bestimmende Faktoren und hydrochemische Einflüsse bzw. Zusammenhänge zwischen der Brunnenalterung und den Ergebnissen der Analytik. Diese überschritten sich zum Teil.

So waren die beiden Steinzeugfilterbrunnen, 20a und 29a, gleichzeitig die Brunnen, die am längsten nicht mehr regeneriert worden waren.

Generell bestimmt erwartungsgemäß das Alter der Beläge bzw. die Betriebsdauer seit der letzten Regenerierung, wie viel Feststoff ausgetragen werden kann. In den länger nicht mehr regenerierten Brunnen 20a, 29a und 31a konnten sich, allein entsprechend der längeren Standzeit, mehr Ablagerungen bilden und dann auch ausgetragen werden. Der Sachverhalt zeigte sich auch bei den vergleichsweise mit einbezogenen chemischen Regenerierungen mit Ausnahme von Brunnen 51a, bei dem, trotz des hohen Alters der Ablagerungen, nur sehr geringe Mengen ausgetragen wurden. Dies stellte sich aber auf Nachfrage bei den Wasserwerksbetreibern als Fehler bei der Durchführung der damaligen Regenerierung heraus, bei der der pH-Wert falsch eingestellt und damit zu hoch war und entsprechend die Lösevorgänge nicht optimal abliefen [mdl. Mitteilung, 07.07.2005].

Die Zuordnung „durchschnittlich eisen- und manganhaltig“ für Brunnen 20a und „hoher Eisengehalt“ für Brunnen 29a aus den Alt-Belagsanalysen (vgl. Tab. 4-3, S.91) wurde in der Analyse des abgepumpten Feststoffmaterials nicht bestätigt. Diese beiden Brunnen wiesen darin überdurchschnittlich hohe Mangangehalte auf. Hier überschritten sich bereits die Einfluss nehmenden Größen des Ausbaus und des Alters der Beläge. Es war anhand der Ergebnisse und Altdaten nicht feststellbar, welcher Effekt letztendlich zu den Befunden führte. Diskutiert werden müssen die folgenden Möglichkeiten:

- Bilden sich in den Steinzeug-Brunnen generell verstärkt manganhaltige Verockerungen?
- Steigt der Mangangehalt in den Belägen mit dem Alter?

- Bedingen die physikalischen Eigenschaften des Steinzeugs und des Mangans das Ergebnis durch ihre Reaktion auf die Beschallung?

Die schwarz- oder gelbbraune Farbe der Beläge in den Kamerabefahrungen und des Probenmaterials bestätigt die erste Möglichkeit. Die Steinzeugfilterbrunnen wiesen eher manganhaltige Beläge auf und die Kupferschlitzbrückenfilter eher rotgefärbte, eisenhaltige Beläge (vgl. Abb. 6-38). Einschränkend muss bemerkt werden, dass auch hohe organische Anteile eine entsprechende Färbung bewirken. Aufgrund der Ergebnisse der Berechnung der Glühverluste kann jedoch für alle Brunnen von hohen Gehalten an organischem Material ausgegangen werden. So weist nach HÄSSELBARTH (zitiert in SCHIEMANN, 1997) ein Eisengehalt von ca. 40 % in der Trockenmasse, wie er auch in den Proben aus den Brunnen vorlag (vgl. Tab. 6-8), auf den biogenen Ursprung der Verockerungserscheinungen hin.

Die Betrachtung aller fünf Brunnen bestätigt auch die zweite Möglichkeit, denn mit steigendem Alter der Beläge steigt der Anteil Mangan in der Feststoffprobe. Dies zeigt einen klaren Bezug zur Redox-Abfolge und zu Untersuchungen des zeitlichen und räumlichen Ablaufs der Bildung der Eisen- und Manganverockerungen, wonach diese beiden getrennt voneinander stattfinden, und zwar zuerst die Bildung der Eisenoxide und dann die Bildung der Manganoxide entsprechend ihres Redoxpotenzials (vgl. Kap. 2.3.1).

Die dritte Möglichkeit, eine generell bessere Wirkung des Ultraschalls bei Steinzeug bzw. Mangan kann weder belegt noch ausgeschlossen werden. Laborversuche aus vorangegangenen Projekten am ESWE-Institut belegen eine bessere Wirkung des Ultraschalls auf Mangan im Vergleich zu Eisen (vgl. WILKEN & WIACEK, 2004 und WIACEK, 2003). Dies kann aber immer nur den schon vorhandenen Sachverhalt der hohen Mangananteile in der jeweiligen Verockerung verstärken. Ein geeignetes Filterstück aus Steinzeug-Material stand nicht zur Verfügung, so dass es im Laborversuch hinsichtlich der Schalldurchlässigkeit nicht untersucht werden konnte. Aus früheren Projekten ist jedoch bekannt, dass quergeschlitzte Filter generell eine bessere Schalldurchlässigkeit aufweisen als Schlitzbrückenfilter, bei denen die Form der Filteröffnungen die Schallbeugung und dementsprechend Interferenzerscheinungen verstärkt und dadurch die Schallenergie im Ringraum stärker abgeschwächt wird (vgl. SMOLIANSKIS, 2002 und WILKEN & WIACEK, 2004].

Eine bessere Schallwirkung hinter dem quergeschlitzten Steinzeugfilter ist also wahrscheinlich. Inwieweit das Steinzeugmaterial selbst die Manganverockerung begünstigen kann, konnte ebenfalls nicht bestimmt werden, da weder ein Filterstück noch Daten über die chemische Zusammensetzung des Filtermaterials vorlagen. Steinzeug kann Manganbeimengungen enthalten. Ein Filter ist jedoch hartgebrannt und glasiert. Eine Wirkung des Mangans an der Oberfläche oder die Abgabe von Mangan in das Wasser bzw. der Einbau in Verockerungen ist nicht wahrscheinlich.

Auffällig war für Brunnen 20a der Eisen- und Mangangehalt in der letzten Rohwasseruntersuchung. Dieser Brunnen zeigte in den Wasseranalysen der letzten zehn Jahre einen zunehmenden Mangangehalt und einen, zwar hohen, aber abnehmenden Eisengehalt. Der Sauerstoffgehalt war ebenfalls steigend, jedoch im Vergleich zu den anderen Brunnen niedrig.

Bezüglich der Eisen- und Mangangehalte und der Sauerstoffsättigung des Wassers lassen sich die Brunnen ganz klar entsprechend ihrer Lage den drei Gruppen der Entnahmebrunnen zuordnen. Brunnen 20a im Osten der Galerie wies sowohl den höchsten Eisengehalt als auch den deutlich höchsten Mangangehalt im Rohwasser auf. Der Wert für den gelösten Sauerstoff war am niedrigsten. Brunnen 29a und 31a aus der Mittel-Gruppe der Entnahmebrunnen-Galerie weisen sinkende Eisen- und Mangangehalte im Rohwasser auf und einen zwar schwankenden, aber nicht deutlich zu- oder abnehmenden Sauerstoffgehalt und die Brunnen 51a und 54a im Westteil der Galerie zeigen steigende Eisen- und Mangangehalte in den Rohwasseruntersuchungen der letzten zehn Jahre und der Sauerstoffgehalt bleibt hoch. Letzterer deutet dabei generell einen Zusammenhang mit dem Alter der Beläge an, d. h. aus den wenigen, zur Verfügung stehenden Werten ergibt sich ein, im Laufe des Betriebes ohne Regenerierung oder Reinigung des Brunnens sinkender Sauerstoffgehalt. Hierbei lässt sich jedoch kein Zusammenhang allein zwischen der Sauerstoffsättigung und dem Eisen- bzw. Mangangehalt herstellen, sondern dies entspricht eher der Lage der Brunnen und dem entsprechenden hydrogeologischen und geochemischen Hintergrund. Zu beachten ist, dass durch den Infiltrationsbetrieb ständig sauerstoffreiches Wasser zugeführt wird und auch hier die Lage der Brunnen zu den Infiltrationsorganen einen Einfluss hat.

Für die biologische Eisenverockerung durch Eisenbakterien, wie *Gallionella* oder *Leptothrix* (vgl. Kap. 2.3.1) ist der Sauerstoffgehalt in den Brunnen i. d. R. zu hoch (vgl. CARLSON et al., 1980), so dass die chemische Oxidation des Eisens im Vordergrund und an erster Stelle der ablaufenden Brunnenalterungsprozesse steht.

Unabhängig davon kann natürlich, aufgrund der Vermischung mit nährstoffreichem Wasser eine Biofilmbildung durch die Massenentwicklung schleimbildender Bakterien auftreten, wie sie für die Brunnen der Ost-Gruppe des Wasserwerkes u. a. bei BERGER et al. (1992) beschrieben ist. Hierauf deutet auch, wie bereits beschrieben, der hohe relative Eisengehalt hin. Dies wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter untersucht.

Generell und unter Einbeziehung des standortgegebenen Hintergrundes wies der Brunnen mit dem niedrigsten Sauerstoffgehalt zwar den höchsten Eisen- und Mangangehalt auf und auch umgekehrt der Brunnen mit dem höchsten Sauerstoffgehalt (Brunnen 51a) den niedrigsten Eisengehalt. Dies belegte noch einmal die Abfolge der chemischen Oxidation des Eisens in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt. Für den Mangangehalt galt dies jedoch nicht. Auf Basis der eingeschränkten Datenmenge aus den fünf Brunnen lässt sich also kein Zusammenhang zwischen dem Alter der Beläge im Brunnen und ihrer Zusammensetzung einerseits und den Rohwasseranalysen auf der anderen Seite herstellen. Auch hier spielen die besonderen Betriebsbedingungen des Wasserwerkes eine Rolle.

Alle beschriebenen Daten sind im Anhang noch einmal für die einzelnen Brunnen grafisch dargestellt (vgl. Anhang 16 bis Anhang 20).

Zur Bestimmung der Brunnenalterung und des richtigen Zeitpunktes für eine Regenerierung müssen daher immer auch Leistungsdaten des Brunnens erfasst werden, d. h. neben dem qualitativen Brunnenmonitoring ist eine quantitative Überwachung unerlässlich. Hierin zeigen die vorliegenden Daten aus dem Wasserwerk Lücken. Da die Brunnen zwar einzeln mit Unterwasserpumpen bewirtschaftet werden, aber die Entnahmelleistung für zwei Gruppen in jeweils einer Sammelleitung vorgegeben wird, ist die Einzelleistung der Brunnen aus dem Normalbetrieb nicht bekannt (vgl. Kap. 3.2.2). Entsprechend wird ein Nachlassen der Ergiebigkeit erst im Zuge von gezielten Wartungsarbeiten oder manuellen Messungen des Betriebswasserspiegels erkannt. Die Basis für die Durchführung solcher Arbeiten sind nur die Erfahrungswerte der Mitarbeiter. Kamerabefahrungen und Daten aus geophysikalischen Messungen liegen nur vereinzelt vor. Pumpversuche wurden zwar vor und nach Reinigungen oder Regenerierungen durchgeführt, aber nicht regelmäßig und die Dokumentation erfolgt nicht in geeigneter Form. Höhenbezüge der Messungen sind z. T. veraltet und damit die Messungen nur bedingt vergleichbar und Angaben zum Brunnenausbau, z. B. in Form von Ausbauezeichnungen fehlen teilweise völlig.

Dies erschwerte auch die Auswertung der hier gewonnenen Ergebnisse und Werte, da sie zum Teil nicht auf Altdaten bezogen und mit ihnen verglichen werden konnten. Erschwerend hinzu kommt die Betriebsweise des Wasserwerkes mit der künstlichen Grundwasseranreicherung über Sickergalerien und Infiltrationsbrunnen, wodurch der hydrogeologische Hintergrund veränderlich ist. Eine Bewertung des Erfolges der im Rahmen der Arbeit durchgeführten Regenerierungen und ein Vergleich mit zuvor angewandten Methoden sind daher auf Basis der Daten nicht möglich.

Die Pumpversuche zeigten eine Leistungssteigerung und es konnten Zusammenhänge zum Brunnenausbau, zum Zeitraum ohne Regenerierung und zur Zusammensetzung der Beläge hergestellt werden. Für die Einzelbewertung des brunnenspezifischen Erfolges fehlten jedoch der Vergleich der Brunnenleistung und deren regelmäßige Aufzeichnung im Brunnenbetrieb und geeignete Messungen zur besseren Interpretation der geophysikalischen Verhältnisse. Hierzu hätten vor allem Packer-Flowmeter-Messungen zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Filterbereiches und die Messung der natürlichen Gamma-Strahlung zur Bestimmung der Sandverteilung im Ringraum gehört, die jedoch aus Kostengründen nicht Bestandteil des stark eingeschränkten geophysikalischen Messprogramms waren. Aus den erhaltenen Daten zur Lagerungsdichte ließ sich so kein Zusammenhang zur Änderung der Anströmung herstellen und die Wirkung des Ultraschalls in den Brunnen mit Sandführung konnte nicht bildlich erfasst werden.

Für zukünftige Regeneriermaßnahmen, bei denen begleitend geophysikalische Messungen durchgeführt werden können, sollten die o. g. Messungen unbedingt Bestandteil sein. Die Brunnenleistung sollte darüber hinaus im laufenden Betrieb regelmäßig erfasst und dokumentiert werden.

Basierend auf den beschriebenen Ergebnissen und deren Interpretation lassen sich die Fragestellungen der Zielsetzung (vgl. Kap. 1.2) wie folgt beantworten:

Generell vorliegen müssen von einem Brunnen im Zuge eines ausreichenden und zielführenden Brunnenmonitorings die grundlegenden Ausbaudaten. Hierzu zählen Angaben zum Ausbaumaterial, zur Endteufe des Brunnens, zum Bohrdurchmesser, zu Lage, Länge und Durchmesser der Filterstrecken und zur Filterkiesschüttung. Diese Angaben sollten durch geophysikalische Messungen bestätigt und belegt sein, die dann gleichzeitig die Grundlage für die Bewertung später gewonnener Daten aus dem direkten Vergleich mit den Neubauwerten darstellen.

Alle Daten müssen bei Veränderungen entsprechend dokumentiert werden, am besten auch hier wieder mit geophysikalischen Belegmessungen. Fehlende Werte sind zweckmäßigerweise im Zuge durchzuführender Wartungsarbeiten nachzuarbeiten.

Aus der Interpretation des Brunnenausbaus und der Betriebsweise können sich bereits Hinweise auf mögliche Alterungsabläufe im Brunnen ergeben (vgl. Kap. 2.3.2), ebenso aus dem laufenden Vergleich aktueller Messungen mit den Altdaten.

Sowohl der Ausbau als auch die Betriebsweise müssen den geologischen Verhältnissen angepasst sein, wie bereits im Grundlagenteil der Arbeit und an anderer Stelle in der entsprechenden Fachliteratur ausgeführt ist. Die Geologie des Brunnens bestimmt die chemischen Parameter des Umfelds. So werden je nach durchflossenem Untergrund verschiedene Mengen löslicher Stoffe in das Wasser aufgenommen. Die geologischen Verhältnisse, d. h. die Art des Aquifermaterials, die Form des Grundwasserleiters, Poren- oder Kluftgrundwasserleiter, und die Tiefe und Mächtigkeit desselben bestimmen damit die hydrochemischen Parameter. Bedeutsam für die Wassergewinnung selbst sind hierbei die Wasserqualität beeinträchtigende Grundwasserinhaltsstoffe, wie z. B. Nitrat oder anthropogene Verschmutzungen. Für die Brunnenalterung spielen vor allem Eisen und Mangan im Zusammenhang mit dem Sauerstoffgehalt bzw. dem Redoxpotenzial eine wesentliche Rolle. Die genannten Parameter stehen in direktem Zusammenhang zur Schnelligkeit der Brunnenalterung und Zusammensetzung der entstehenden Ablagerungen. Letztere sind allgemein Reaktionsprodukte, die sich durch die Vermischung unterschiedlicher Wässer bilden. Hierbei spielt der Sauerstoffgehalt die entscheidende Rolle. Kommt sauerstoffhaltiges Wasser in Kontakt mit solchem, das gelöstes Eisen oder Mangan enthält, wird letzteres oxidiert und fällt als unlösliches Oxihydrat aus. Aufgrund der Anströmung und der chemischen und mikrobiellen Vorgänge im Grundwasserleiter tritt in Brunnen mit längeren Filterstrecken oft eine vertikale hydrochemische Zonierung aufgrund des Redoxpotenzials auf. Entsprechend dieser sind die entstehenden Ablagerungen nach dem die Reaktion bestimmenden Redoxpotenzial und der Reaktionskinetik verteilt.

Ein reduzierendes Milieu, d. h. ein sehr geringer Sauerstoffgehalt, kann ebenfalls die Brunnenalterung stark begünstigen und auch anzeigen, nämlich dann, wenn sich der niedrige Sauerstoffgehalt aus der Zehrung des Sauerstoffs durch Mikroorganismen ergibt, die ihrerseits, z. B. in Form von Biofilmen eine Brunnenalterungsart darstellen.

Die Schnelligkeit der Brunnenalterung ergibt sich vor allem aus der Menge der zur Verfügung stehenden Reaktionspartner. Je mehr z. B. Eisen und Sauerstoff enthalten sind, desto schneller bilden sich die unlöslichen Oxihydrate. Die Reaktion verläuft dabei autokatalytisch, d. h. die weitere Bildung der Eisenoxihydrate verläuft nach der Initialphase beschleunigt. Auch die mikrobielle Eisenumsetzung ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Nährstoffmenge und wird autokatalytisch beschleunigt.

Die Zusammensetzung der Beläge entspricht dem geologischen Hintergrund und den ablaufenden hydrochemischen Reaktionen. Aus ihr wird die vorliegende Alterungsart bestimmt. Eine Analyse von Belagsproben sollte somit zweckmäßigerweise immer mindestens die Bestimmung des pH-Wertes, des Sauerstoffgehaltes und des biologischen Sauerstoffbedarfs oder des TOC (Total Organic Carbon) in einer korrespondierenden Wasserprobe und der Gehalte Eisen, Mangan und Calcium und evt. Aluminium im Belag umfassen. Ergänzend geben mineralogische Untersuchungen Aufschluss über das Alter und die Kristallinität, z. B. die RDA oder die IR-Spektroskopie. Das Vorliegen kristalliner Strukturen zeigt dabei die Alterung respektive die Aushärtung der Beläge an. Für die Eisenoxihydrate gilt zum Beispiel der folgende Reaktionsablauf: Amorphes Eisenhydroxid ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, „Ferrihydrit“) wird schnell gebildet und kristallisiert dann unter Wasserabgabe um zu Goethit ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$). Dabei nehmen die Fläche ab und die Dichte zu [HOUBEN & TRESKATIS, 2003].

Bezüglich der Brunnenpflege gilt, dass nicht ausgehärtete Beläge generell leichter zu entfernen sind als umkristallisierte, so genannte Inkrustationen. Letztere bleiben dann oft am Brunnenfilterrohr zurück und können die Wiederverockerung aufgrund der beschriebenen autokatalytischen Wirkung beschleunigen. In solchen Fällen bietet sich die Kombination verschiedener Regenerierverfahren, d. h. mechanischer oder hydromechanischer und chemischer Methoden, zur vollständigen Entfernung der Beläge an.

Aus überbohrten Brunnen ist bekannt und aus der Reaktionskinetik folgt, dass sich die Ablagerungsprodukte initial an den Stellen bilden, an denen sich die Fließgeschwindigkeit des Wassers ändert. In Brunnen ist dies der Übergang von der Filterkiesschüttung in den Brunneninnenraum, d. h. direkt am Filterrohr. Von dort wachsen die Beläge in die Filterkiesschüttung hinein [HOUBEN & WEIHE, 2004]. Auch hieraus folgt, dass der richtige Brunnenbau und die entsprechende Bemessung des Brunnen- bzw. Filterdurchmessers und der Körnung der Kiesschicht ganz entscheidenden Einfluss auf die Brunnenalterung hat.

Durch die Abstimmung der Filterkieskörnung auf den anstehenden Untergrund, die Wahl eines geeigneten Bohrverfahrens und das fachgerecht ausgeführte Entwickeln des Brunnens (vgl. Kap. 2.2.1) kann eine initiale Brunnenalterung im Bereich des Übergangs vom Aquifermaterial in die Kiesschüttung weitestgehend vermieden werden.

Die vertikale Verteilung der Brunnenalterungserscheinungen ergibt sich somit aus der hydrochemischen Schichtung und die horizontale Verteilung aus der Fließgeschwindigkeit des einströmenden Wassers.

Zur Bestimmung der räumlichen Ausbildung der Beläge sind die Instrumente des quantitativen Brunnenmonitorings unerlässlich. Wasserstandsmessungen im Brunnen und im Peilrohr in der Filterkiesschüttung und die nachlassende Brunnenleistung in Pumpversuchen bzw. ein sinkender Betriebswasserspiegel ohne Änderung hydrogeologischer Grundgegebenheiten zeigen in ihrer Differenz und im Vergleich mit entsprechend dokumentierten Altdaten das Vorhandensein von Ablagerungen im Filterkies an. Ergänzend sollte mittels geophysikalischer Methoden die Durchlässigkeit des Filters bestimmt werden. Einfachste Methode hierzu ist die Packer-Flowmeter-Messung, die direkt die Durchlässigkeit des nahen Filterbereichs erfasst und anzeigt. Zweckmäßig ist außerdem die Messung der natürlichen Gamma-Strahlung, die die Verteilung von Sand und Ton im Ringraum anzeigt und somit sowohl die Tonsperren kontrolliert als auch das Versanden anzeigt.

Auf dieser Grundlage lässt sich dann auch der Erfolg von Regenerierungen erfassen und beurteilen. Auf Basis regelmäßiger Messungen muss außerdem die Betriebsweise ständig kontrolliert und bei Bedarf angepasst werden. Das geeignete Brunnenmonitoring umfasst somit generell:

- das qualitative Monitoring, d. h. die regelmäßige Entnahme von Wasser- und Belagsproben und Analyse auf die relevanten hydrochemischen Parameter, wie oben beschrieben pH-Wert, Sauerstoffgehalt, TOC, Eisen, Mangan, Calcium;
- das quantitative Monitoring mit regelmäßigen Wasserstandsmessungen und Bestimmung der Brunnenleistung in Pumpversuchen;

zur Feststellung fortschreitender Brunnenalterung und im Zuge von Regeneriermaßnahmen dann ergänzend:

- die Entnahme von Belagsproben, Bilanzierung entfernter Mengen und Analyse des Mineralbestandes, vor allem auf den Gehalt an Eisen, Mangan und Calcium;

- die Anpassung der zukünftigen Betriebsweise, z. B. Verringerung der Entnahme, um die Absenkung in den Filterbereich oder in dessen Nähe und damit den Sauerstoffzutritt zu verhindern oder Umstellung auf durchgehenden Betrieb statt intermittierender Fahrweise des Brunnens je nach Wasserbedarf;
- geophysikalische Messungen, zur Beschreibung des Brunnenzustandes über das Filterrohrinnere hinaus, besonders Packer-Flowmeter-Messung und Messung der natürlichen Gamma-Strahlung;
- Kamerabefahrungen zur Kontrolle des Brunnenausbaus

und die geeignete Dokumentation der Ergebnisse.

Bei konsequenter Durchführung, Aufarbeitung der Lücken in der vorhandenen Dokumentation und Umsetzung im Zuge des Betriebes gründet sich auf den so gewonnenen und übertragbaren Erfahrungswerten gemäß des in Kap. 1.3 entwickelten Schemas (vgl. Abb. 1-2, S.10) das geeignete Brunnenmanagement. Das, um die notwendigen Parameter ergänzte, Schema zeigt Abb. 7-1:

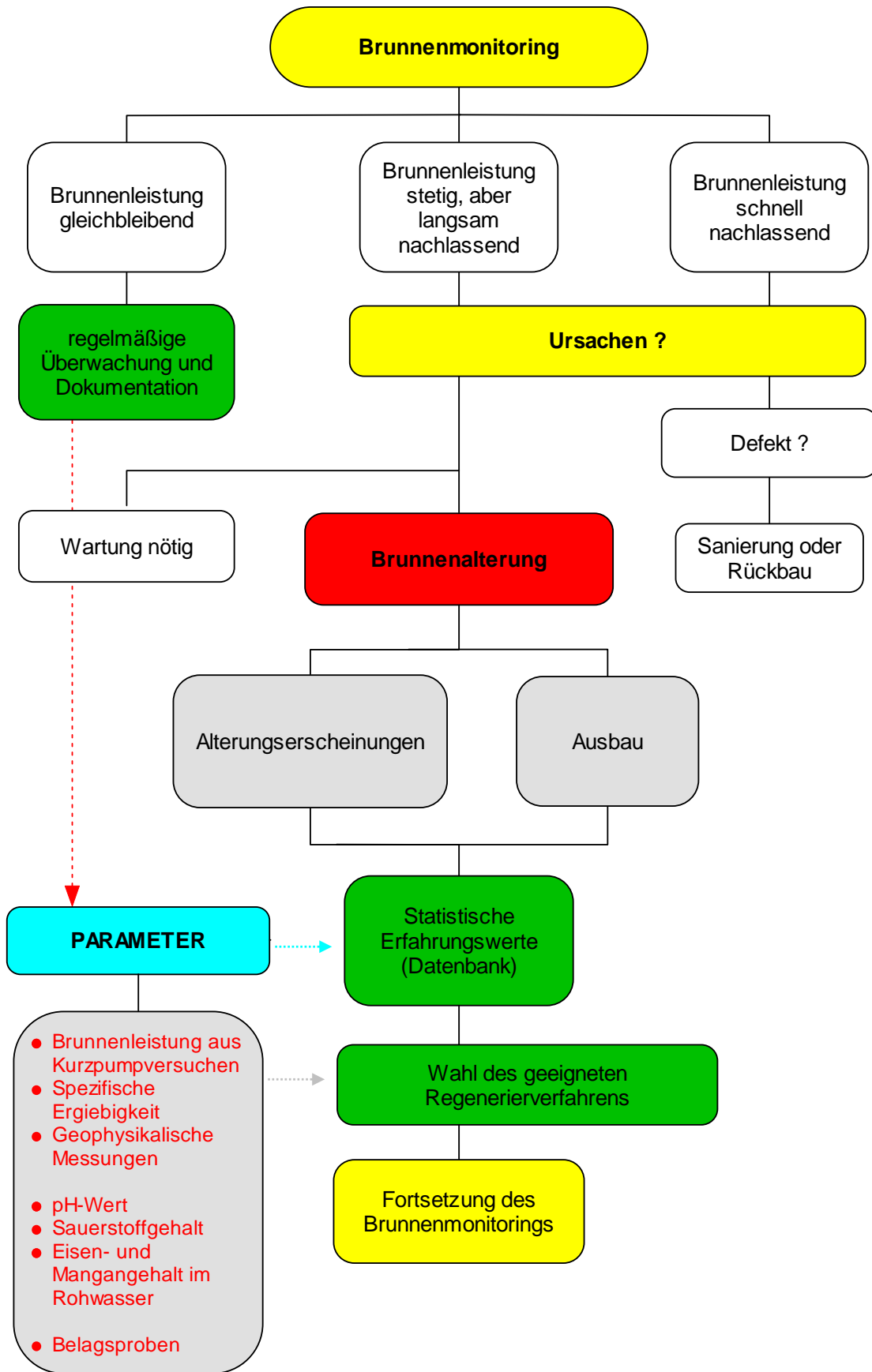


Abb. 7-1: Schema eines geeigneten Brunnenmonitorings (Wiacek, 2005)

Wichtigstes Instrument des Brunnenmonitorings ist die Beobachtung der Brunnenleistung. Aus dem Vergleich der kontinuierlichen Messwertaufzeichnung, wie z. B. des Betriebswasserspiegels, und der Schnelligkeit des Nachlassens der Ergiebigkeit lassen sich bereits wesentliche Hinweise auf die ablaufende Brunnenalterung oder einen Defekt von Pumpe oder Brunnenausbau ableiten. Eine plötzliche Abnahme der Ergiebigkeit zeigt dabei i. d. R. einen Pumpenausfall oder einen Bruch der Verrohrung an. In diesem Fall umfasst das nachfolgende Brunnenmonitoring eine Pumpenüberprüfung und gegebenenfalls eine Kamerabefahrung zur Feststellung von Schäden am Ausbau. Die stetige Abnahme der Brunnenleistung deutet hingegen auf das Vorliegen von Brunnenalterung hin. Nach Überschreiten eines kritischen Punktes ist die Schnelligkeit der Leistungsabnahme wie beschrieben oft gesteigert. Wurde das Vorliegen von Brunnenalterungserscheinungen erkannt, ist das qualitative Monitoring, d. h. die Entnahme von Wasser- und Belagsproben unerlässlich. Hieraus lassen sich die Art der Alterung und die Zusammensetzung der Beläge ermitteln. Dies ist eine Grundlage zur Wahl des am besten geeigneten Regenerierverfahrens.

In der Praxis erfolgt das Brunnenmonitoring auf zwei verschiedenen Wegen. Beiden liegen im Allgemeinen die Erfahrungswerte der Betreiber zugrunde. Die erste Möglichkeit beinhaltet das Erstellen fester Wartungspläne. Dabei werden die Brunnen in vorgegebenen Intervallen gereinigt, die Pumpen gewechselt und Kurzpumpversuche zur Feststellung der spezifischen Ergiebigkeit durchgeführt. Dieses Verfahren findet, mit betriebsbedingten Ausnahmen, Anwendung im Wasserwerk Schierstein. Der zweite Weg ist sehr bedarfsorientiert. Hierbei werden die notwendigen Messungen erst durchgeführt, wenn sich die Brunnenleistung im Betrieb deutlich verringert hat. Dies dient dann rein der Ursachenforschung, um geeignete Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Zu bevorzugen ist generell ersteres Vorgehen, um den Leistungsabfall unter den kritischen Punkt vermeiden zu können.

Die sinnvolle Umsetzung des vorgeschlagenen Schemas soll nachfolgend anhand des Beispiels der, in Schierstein bearbeiteten Brunnen 31a und 20a erläutert werden.

Die vorliegenden Daten für Brunnen 31a umfassten Pumpversuche in unregelmäßigen Abständen im Zuge von Wartungsarbeiten (1996, 1997 und 1999) und das Protokoll geophysikalischer Messungen vor und nach der letzten chemischen Regenerierung (1996). Die regelmäßige Überwachung der Einzelleistung des Brunnens findet nicht statt. Die Kurve der Brunnenleistung (vgl. Anhang 18) stützt sich somit auf Einzelwerte und die Betrachtung einer mittleren Fördermenge

von 10m³/h zur Berechnung der spezifischen Ergiebigkeit. Dabei ist zu beachten, dass im Wasserwerk Schierstein die Pumpversuchsdaten aus der Ermittlung der so genannten maximalen spezifischen Ergiebigkeit bestehen [NORMANN-SCHMIDT, 1992]. Hierbei wird die Förderleistung ermittelt, bei welcher der Betriebswasserspiegel die Filteroberkante erreicht. Zusätzlich wird i. d. R. die maximale Förderleistung des Brunnens ermittelt, d. h. die Wassermenge Q, bei der die Unterwasserpumpe Luft zieht (vgl. Tab. 7-1).

Tab. 7-1: Pumpversuchsdaten aus der Brunnenakte von Brunnen 31a (Wiacek, 2005)

Zeitpunkt	01/ 1996	02/1996	11/1997	05/1999	05/2005
RW m u D-OK	5,37	5,91	4,14	3,19	artesisch
Qmax	20 m ³ /h	35 m ³ /h	35 m ³ /h	35 m ³ /h	27,5 m ³ /h
Wiederanstieg	45 min	5 min	5 min	> 20 min	k.A.

Aus den nur punktuell vorliegenden Daten konnten keine Hinweise auf die Brunnenalterung abgeleitet werden. Diese Form des Brunnenmonitorings wird als "eingeschränkt geeignet" bewertet. Sowohl die Neubauleistung als auch die Leistung im Normalbetrieb waren nicht bekannt. Ein Zusammenhang zwischen der maximal erreichbaren Förderleistung und der spezifischen Ergiebigkeit bestand laut Anhang 18 und Tab. 7-1 nicht.

Ausgehend vom Punkt „Brunnenalterung“ in Abb. 7-1 lagen die Eckdaten des Brunnenausbaus vor, d. h.

- Filtermaterial (Kupferschlitzbrücken)
- Tiefe und Durchmesser des Brunnens
- Länge und Lage der Filterstrecke.

Die Bestimmung der vorliegenden Alterungsart stützte sich im Wesentlichen auf eine Belagsanalyse und die Auswertung der letzten chemischen Regenerierung sowie auf Literaturangaben in Veröffentlichungen der Stadtwerke Wiesbaden AG. Erst die Einbeziehung der Auswertung der chemischen Regenerierung vom Januar 1996, der Wasseranalysen im Rahmen von Forschungsprojekten (1996) und der gesetzlich vorgeschriebenen Rohwasseruntersuchungen im Abstand von drei Jahren sowie die Begleituntersuchungen der Ultraschallregenerierung 2004 ergaben Grundlagendaten im Sinne des

Schemas in Abb. 7-1. Die Altdaten umfassten einen Bericht zu bohrlochgeophysikalischen Kontrollmessungen und eine Belagsanalyse im Zuge der letzten chemischen Regenerierung. Diese ist damit vergleichsweise gut dokumentiert. Zusammen mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit liegen nun vor:

- Kurzpumpversuche vor und nach der Regenerierung zur Ermittlung der spezifischen Ergiebigkeit
- Messprotokolle geophysikalischer Untersuchungen aus dem Jahre 1996 vor und nach der chemischen Regenerierung und aus 2004 vor und nach der Ultraschallregenerierung
- die Dokumentation von Kamerabefahrungen im Zuge der Ultraschallregenerierung 2004
- eine aktuelle Ausbauzeichnung, erstellt auf Grundlage der Geophysik- und Kameraprotokolle

Die ermittelten Daten können nun als Basis für das weitere Brunnenmonitoring genutzt werden. Ein Vergleich der Verfahren der chemischen On-Line-Regenerierung mit dem Kieswäscher und der Ultraschallmethode kann und soll auf Grundlage der wenigen Daten nicht gegeben werden. Die Bewertung der generellen Eignung eines der Verfahrens bzw. der Vergleich des Erfolges stand ebenso nicht im Mittelpunkt der Arbeit, sondern dies war die Erarbeitung der Empfehlungen für das weitere Brunnenmonitoring inklusive der brunnen- bzw. wasserwerksspezifischen Bestimmung der zu überwachenden Parameter.

Ein ähnliches Bild hinsichtlich der Altdaten ergab sich an Brunnen 20a. Für den Brunnen lagen vor:

- die o. g. Eckdaten des Brunnenausbau
- eine Abrechnungszeichnung vom Brunnenbau
- die Neubauleistung aus dem Jahre 1950
- die maximale Förderleistung bei Pumpversuchen im Zuge von Wartungsarbeiten aus den Jahren 1995, 1997, 1999, 2000, 2004 (ca. 4 Monate nach der Ultraschallregenerierung) und 2005
- Wasseranalysen aus einem Projekt (1999) und den gesetzlich vorgeschriebenen Rohwasseruntersuchungen
- eine Belagsanalyse ohne Datum
- das Protokoll jeweils einer Kamerabefahrung vor und nach der letzten chemischen Regenerierung.

Anhand der Einzelwerte zur maximal erreichten Ergiebigkeit aus der Brunnenakte konnte die Brunnenalterung bzw. die Notwendigkeit zur Regenerierung nicht eindeutig festgestellt werden, d. h. die Brunnenleistungskurve konnte nicht bestimmt werden. Auch hier ergibt erst die Einbeziehung der Begleituntersuchungen der Ultraschallregenerierung, d. h. die Ermittlung der spezifischen Ergiebigkeit und die geophysikalische Untersuchung, die Basis für das weitere Brunnenmonitoring.

Die Bilanzierung entfernter Gesamtmengen für die Erfolgsbeurteilung wird abgelehnt, da allein die Berechnung der entfernten Mengen keine Rückschlüsse auf das tatsächlich im Brunnenraum vorhandene Ablagerungsvolumen zulässt [BOTT & WIACEK, 2004]. Diese Daten müssen also nicht zusätzlich ausgewertet werden.

Aufbauend auf den erarbeiteten Erkenntnissen wurde für beide als Beispiel gewählte Brunnen deutlich, dass die Alterungserscheinungen bekannt waren und die Daten zum Brunnenausbau vorlagen, auf dieser Basis jedoch keine Angaben zum Verlauf der Brunnenalterung und der Empfehlung eines Regenerierverfahrens gegeben werden konnten. Hierzu ist das regelmäßige quantitative Brunnenmonitoring, d. h. die Durchführung von Kurzpumpversuchen zur Ermittlung der spezifischen Ergiebigkeit in festen Intervallen unerlässlich. Die Beurteilung der Brunnenleistung bildet also, wie auch in Abb. 7-1 dargestellt ist, den Ausgangspunkt des Brunnenmonitorings. Die Begleituntersuchungen, Wasseranalysen und Belagsproben ergänzen das quantitative Brunnenmonitoring, indem sie die Bestimmung der Alterungsart und der räumlichen Verteilung der Alterungserscheinungen erlauben und die Vergleichsbasis für die Erfolgskontrolle geben.

Zusammen bilden diese Daten die Grundlage für ein geeignetes, individuell auf den jeweiligen Brunnen abgestimmtes Brunnenmanagement im Sinne der optimalen Nutzung und Pflege.

Im nächsten Schritt müssen diese Daten für weitere der zahlreichen, auf dem Regenerier-Markt konkurrierenden, Verfahren erarbeitet werden, um den Aufbau einer genügend großen Erfahrungsmenge mit individuellem Bezug zu den Schiersteiner Brunnen zu erhalten. Dabei müssen wiederum neben der alleinigen Angabe einer Leistungssteigerung, bezogen auf einen Vorher-Nachher-Vergleich, Begleitmessungen durchgeführt und dokumentiert werden. Aufbauend auf dem bisherigen Datenumfang sind dies chemische Analysen des abgepumpten Wassers auf die Gehalte an löslichem und unlöslichem Eisen und Mangan, sowie Calcium und eine Bilanzierung der Gesamtmenge und ergänzend evt. Pumpversuche nach dem im Wasserwerk üblichen Schema zur besseren Einhängung der Ergebnisse

in die Gesamtdokumentation. Auf Grundlage dieser Daten kann dann zukünftig für jeden Brunnen oder für die Brunnen mit gleichen Eigenschaften hinsichtlich des Ausbaumaterials und der Alterungserscheinungen sowie der Rohwasserqualität sowohl das Wartungsintervall als auch ein geeignetes Regenerierverfahren empfohlen werden.

7.2 Exkurs: Anwendung anderer Regenerierverfahren im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein

Im Sommer 2005 wurden im Wasserwerk Schierstein zehn der insgesamt 42 Entnahmebrunnen nach einer bundesweiten Ausschreibung hydromechanisch regeneriert. Hierzu wurden von der wasserwerksinternen Brunnenkolonne Pumpversuche durchgeführt, bei denen die Ergiebigkeit des jeweiligen Brunnens bei einem vorgegebenen Wasserspiegel bestimmt wurde. Anschließend wurden zehn aufeinander folgende Brunnen aus dem mittleren Bereich der Entnahmegalerie festgelegt und regeneriert. Aufgrund der Pumpversuchsergebnisse wurden die Brunnen, die im Jahr zuvor mit Ultraschall regeneriert worden waren, nicht ausgewählt, da die Brunnenleistung zeigte, dass kein erneuter Regenerierbedarf vorlag.

Die Regenerierungen sollten mit dem Wasserhochdruck-Verfahren Well-Jet® durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um eine Hochdruckinnenspülung. Ein Rotationsdüsenkopf mit zwei gegenüberliegenden Düsen spritzt Wasser mit einem Betriebsdruck zwischen 50 und 500 bar auf das Filterrohr. Dadurch werden Ablagerungen gelöst und die Filterschlitze freigespült. Das Wasser dringt in den Ringraum ein und bewirkt auch dort eine Spülung, wodurch Ablagerungen gelöst werden. Der Betriebsdruck wird individuell festgelegt, um Beschädigungen am Ausbau zu verhindern.

Nachdem das Verfahren nach Anwendung an den ersten drei Brunnen nicht den gewünschten Erfolg zeigte, wurden diese Brunnen zusätzlich nachträglich und die weiteren sieben Brunnen zuerst mit Hochdruck und dann gleich anschließend mit einem Impuls-Verfahren mit drucklufferzeugten Wasserhochdruck-Impulsen, dem Well-Jet®Puls behandelt. Dieses Verfahren arbeitet in zwei Schritten. Zuerst wird in einem Druckbehälter außerhalb des Brunnens ein auf den Ausbau abgestimmter Überdruck aufgebaut.

Dazu wird ein Gas, z.B. Luft oder Stickstoff komprimiert. Im Brunnen befindet sich der Regenerierzylinder. Dieser besteht aus einem Magnetventil und Packermanschetten. Durch die schlagartige Öffnung des Ventils wird das Wasser im Brunnen durch das Gas verdrängt und es breitet sich eine Druckwelle in den Ringraum aus. Dadurch werden Ablagerungen gelöst und können im anschließenden Schritt abgepumpt werden.

Die zusätzliche Anwendung des Impulsverfahrens zeigte an den Brunnen des Wasserwerkes Schierstein unterschiedlichen Erfolg. An den mit Steinzeugfiltern ausgebauten Brunnen fiel die Leistungssteigerung wesentlich geringer aus als an den Brunnen mit Kupferschlitzbrückenfilter. Dies belegten Pumpversuche im September 2005, durchgeführt von den Mitarbeitern der Brunnenkolonne des Wasserwerkes Wiesbaden-Schierstein.

Daran wird nochmals deutlich, dass jeder Brunnen individuell zu betrachten ist und dass nur gesammelte Erfahrungswerte zukünftige Entscheidungen erleichtern können. So kann nun sinnvollerweise geplant werden, die Steinzeugfilter eher mit dem Ultraschallverfahren und die Kupferschlitzbrückenfilter eher mit dem Hochdruckverfahren zu regenerieren, wenn man sich auf diese beiden Regeneriermethoden beschränkt, um optimale Ergebnisse zu erhalten.

Ebenso können nach und nach weitere Verfahren vergleichend mit einbezogen und für die Anwendung an den Schiersteiner Brunnen wissenschaftlich untersucht werden. Darauf aufbauend kann die systematische Erarbeitung und Betrachtung auf andere Standorte übertragen werden.

7.3 Wirtschaftliche Aspekte am Beispiel Wiesbaden-Schierstein

Besonders für die Betreiber von Brunnen und Wasserwerken stehen auch wirtschaftliche Aspekte im Mittelpunkt. Zu untersuchen ist hierbei, welche Kosten die verschiedenen Wege der Brunnenbewirtschaftung tatsächlich und über einen längeren Zeitraum betrachten, verursachen.

Hierbei müssen

1. die Brunnenuntersuchung nur bei Bedarf und daraus die Ableitung notwendiger Maßnahmen

2. das Monitoring nach Standard-Wartungsplan, z. B. Wartung und Bürsten alle „x“ Jahre
3. das individuell erstellte und auf den Brunnenbetrieb abgestimmte Brunnenmonitoring

miteinander verglichen werden. Dabei ist das gesamte Betriebsleben eines Brunnens zu berücksichtigen und nicht nur einzelne Kostenpositionen des Monitorings oder von werterhaltenden Maßnahmen am Brunnen.

Für das Wasserwerk Wiesbaden Schierstein sollen an dieser Stelle beispielhaft die folgenden Annahmen für eine theoretische Fallbetrachtung getroffen werden:

Das Verfahren, den Brunnen erst kurz vor dem Totalausfall zu untersuchen und Notfallmaßnahmen einzuleiten, ist bereits veraltet. In der Vergangenheit des Wasserwerkes wurden mit dieser Betriebsweise etwa drei Brunnen pro Jahr als „nicht mehr wirtschaftlich“ aufgegeben und Ersatzbrunnen gebohrt. Die reinen Baukosten beliefen sich auf ca. 100.000 € pro Brunnen, also 300.000 € pro Jahr. Hhzu kamen Personalkosten, Fremdleistungen und Gebühren für die Brunnenplanung und die jeweiligen wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren sowie den Rückbau der aufgegebenen Brunnen.

Angestrebt ist derzeit die Wartung und chemische Regenerierung eines jeden Brunnens alle drei Jahre. Eine Brunnenkolonne zieht Jahr für Jahr von einem zum jeweils dritten Brunnen und setzt den Kieswäscher ein. Dessen Anschaffungskosten werden, aufgrund der sehr guten Auslastung des Gerätes, vernachlässigt.

NORMANN-SCHMIDT (1992) kalkuliert die Kosten einer Brunnenregenerierung bei ESWE mit einer Summe von 25.000 DM. Das entspricht heute wohl 20.000 bis 25.000 €. Darin enthalten sind der Pumpenausbau, Probennahme und Lösungsmitteltest, ein Kurzpumpversuch, die mechanische Vorreinigung, die chemische On-Line-Regenerierung inklusive Regeneriermittel, das Abpumpen sowie ein zweiter Kurzpumpversuch zur Erfolgskontrolle. Der Personalbedarf liegt bei 2 Mitarbeitern in der Brunnenkolonne. Laborkosten werden vernachlässigt. Bei Vollaustung des Gerätes und Regenerierung jeden dritten Brunnens werden pro Jahr 14 der 42 Brunnen regeneriert. Die reinen Regenerierkosten belaufen sich also auf mindestens 280.000 € pro Jahr. Das Erstellen individueller Wartungspläne für die einzelnen Brunnen kostet kein zusätzliches Personal. Die notwendige Ausstattung umfasst Durchflussmengenähler für die einzelnen Brunnen und eine tägliche Wasserstandsmessung per Lichtlot und Mitarbeiter oder elektronisch und online.

Ein Programm errechnet daraus die Brunnenleistungskurve, die für jeden Brunnen per Mausklick abrufbar ist. Die Anforderungen des quantitativen Brunnenmonitorings sind damit grundsätzlich erfüllt. Vorhandene Daten aus TV- oder geophysikalischen Untersuchungen unterstützen die Erfolgsbeurteilung und Auswahl geeigneter Methoden. Die Anschaffungskosten zur Überwachung der Ergiebigkeit werden hier pro forma mit den Wartungskosten für den Kieswäscher gleichgesetzt.

Die Brunnenleistungskurven zeigen nun, dass die Brunnen der West-Gruppe nur alle fünf Jahre regeneriert werden müssen. Aufgrund der guten Ergebnisse wird die chemische Regenerierung empfohlen. Für die insgesamt 15 Brunnen der West-Gruppe ergibt sich, dass drei Brunnen pro Jahr chemisch zu regenerieren sind. Die Brunnen der Mittel-Gruppe weisen insgesamt die höchste Ergiebigkeit auf. Die Brunnenleistung ist sehr stabil. Die Erfahrungswerte zeigen, dass für diese zehn Brunnen die Pumpenwartung in Abhängigkeit der Betriebsstunden und eine jährliche mechanische Reinigung genügen. Die Kosten hierfür liegen hypothetisch bei 5000 € pro Brunnen bei einem Personalbedarf von 2 Mitarbeitern in der Brunnenkolonne. Im Gegensatz dazu zeigen die siebzehn Brunnen der Ost-Gruppe die stärkste Verockerungsneigung. Entsprechend dem Leistungsverlauf werden sie alle zwei Jahre regeneriert. Dabei hat sich das Ultraschall-Verfahren für die mit Steinzeugfiltern ausgebauten Brunnen als am besten geeignet erwiesen. Pro Jahr werden acht Brunnen regeneriert. Die Kosten hierfür betragen etwa 10.000 € pro Brunnen. Insgesamt betragen für dieses Szenario die jährlichen Regenerierkosten

1. 3x 20.000 € für chemische Regenerierungen innerhalb der West-Gruppe
2. 10x 5.000 € für Pumpenwartung und Bürsten der Brunnen der Mittel-Gruppe
3. 8x 10.000 € für Ultraschall-Regenerierungen innerhalb der Ost-Gruppe

also insgesamt 190.000 € .

Der individuell abgestimmte Betrieb erhöht die Lebensdauer des Brunnens. Die Wahl des jeweils am besten geeigneten Regenerierverfahrens sichert den maximalen Erfolg bei minimalen Kosten. Von den eingesparten 90.000 € im Vergleich zur Regenerierung nach Standard-Wartungsplan können eine promovierte Hydrogeologin und ein Techniker eingestellt werden, die das quantitative Monitoring durchführen und für das zeitgemäße Brunnenmanagement auswerten und aufbereiten. Das richtige Brunnenmanagement sichert damit den verlässlichen Betrieb, spart Kosten und bildet die Basis für die optimale Brunnennutzung und -pflege.

8 Forschungsempfehlungen

Zur Ableitung von Empfehlungen aus Erfahrungswerten ist es unerlässlich, die individuellen Daten von Brunnen geeignet zu sammeln und aufzubereiten. Über das Führen eines „Brunnenpasses“ oder „Brunnencheckheftes“ hinaus, wird das Anlegen einer gemeinsamen Datenbank empfohlen, die für jeden Brunnen mindestens die folgenden Inhalte umfassen muss:

- Brunnenalter
- Brunnenausbau
- Neubauleistung und regelmäßige Leistungswerte, am besten in Form einer Brunnenleistungskurve
- Angaben zur Alterungsart (chemisch/ biologisch, Eisen/ Mangan usw.)
- Dokumentation aller Brunnenuntersuchungen
- Regenerierungen und Erfolgsbeurteilung derselben.

Darauf stützt sich ein Brunnenmanagement in Form eines Decision Support Systems (DSS).

Ein DSS ist ein datenbankgestütztes System zur Hilfe bei Entscheidungsfindungen. Es besteht aus einer Datenbank und Programmen und Daten zur Formulierung bestimmter Problemstellungen, zur Analyse und ggf. zur Simulation alternativer Entscheidungen [nach www.lexitron.de, 10.08.2005].

Je mehr Material zur Anlage der Datenbank zur Verfügung steht, desto besser gelingt die Ableitung von Korrelationen und entsprechenden Erfahrungswerten bzw. Empfehlungen. Einen ganz wesentlichen Beitrag zur optimierten Brunnenbewirtschaftung wird daher auch weiterhin die Kooperation zwischen Betreibern, Ingenieurbüros, Forschungsinstituten und dem DVGW sein.

Vorstellbar ist, unter Zugrundelegung der Daten und der erarbeiteten Parameter sowie des vorgeschlagenen Schemas eines geeigneten Brunnenmonitorings (Abb. 7-1), die automatisierte Empfehlung für Regenerierungsmaßnahmen und Wartungsintervalle auf Basis der Brunneneigenschaften und statistischer Werte.

Hierzu gibt der Betreiber zukünftig lediglich die Daten zum Brunnenausbau ein. Die Online-Brunnenüberwachung greift auf die Brunnenleistungskurve zurück und gleicht die chemischen Analysewerte ab, um die Alterungsart zu bestimmen.

Aus der Datenbank werden dann ähnliche Brunnen ermittelt und statistisch erhoben, welches Regenerierverfahren am erfolgreichsten eingesetzt wurde. Der Brunnenbetreiber erhält als Ergebnis einen Vorschlag, wann er welches Verfahren einsetzen sollte, um die Brunnenleistung zu verbessern oder auf optimalem Niveau zu halten. Das Programm empfiehlt somit für jeden einzelnen Brunnen Zeitpunkt, Intervall und Verfahren für werterhaltende Maßnahmen.

Nach dem Brunnenbau und der Entwicklung einer Vielzahl von Verfahren zur Brunnenregenerierung rückt damit die richtige Bewirtschaftung und Werterhaltung in Form eines umfassenden Brunnenmanagements in den Mittelpunkt und dient der optimalen Brunnennutzung und -pflege.

9 Zusammenfassung

Die Trinkwassergewinnung erfolgt in Deutschland zu großen Teilen direkt aus dem Grundwasser. Die unmittelbare Schnittstelle zwischen dem Grundwasser als Ressource und der Nutzung zur Trinkwasserbereitstellung stellen Bohrbrunnen dar. Da deren Leistung mit fortschreitendem Alter infolge komplexer chemischer und biologischer Vorgänge immer weiter abnimmt, müssen sie ständig überwacht und gewartet werden. Man bezeichnet dies als Brunnenmonitoring. Nur ein geeignetes und auf den Betrieb und die Standortbedingungen ausgelegtes Überwachungsprogramm gewährleistet die Werterhaltung und eine lange Lebensdauer und kosteneffektive Nutzung des Bauwerkes und der Investition „Brunnen“.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden aus den Ergebnissen von Regeneriermaßnahmen und dem Bezug auf Altdaten beispielhaft für die Standortbedingungen des Wasserwerkes Wiesbaden-Schierstein Zusammenhänge zwischen der Brunnenalterung und dem Regeneriererfolg einerseits und der Probenahme, chemischen Analytik und der Dokumentation und Überwachung eines Brunnens andererseits abgeleitet. Inhalt waren Feldversuche und Datenauswertung zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen hydrochemischen Parametern und den ablaufenden Prozessen der Brunnenalterung und der Brunnenregenerierung. Sie bauten auf den Grundlagen und Ergebnissen vorangegangener Projekte des ESWE-Institutes auf dem Gebiet der Brunnenregenerierung mit hochenergetischem Ultraschall auf und wurden im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein (ehemals ESWE Versorgung, jetzt Hessenwasser GmbH & Co. KG) durchgeführt. Das Hauptaugenmerk lag auf dem Alter und der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der Alterungserscheinungen, d. h. abgelagerter Beläge im Brunnen, die durch die Regenerierung ausgetragen wurden. Das Wasserwerk Schierstein bot hierzu 42 Entnahmebrunnen mit ähnlichen Eigenschaften hinsichtlich des Ausbaus und des Grundwasserleiters, was gewährleistete, dass die Alterungserscheinungen im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen konnten.

Beginnend mit der Aufarbeitung des vorhandenen Datenmaterials wurden Analysen von Belagsproben, die den Brunnen zwischen 1993 und 1996 im Zuge verschiedener Projekte oder Wartungsarbeiten entnommen worden waren, in einen Bezug zu Daten von Rohwasseranalysen und der Bilanzierung chemischer Regenerierungen gesetzt. Daraus wurden auffällige Brunnen ausgewählt und zusätzlich der Zeitpunkt der jeweils letzten chemischen Regenerierungen erfasst.

Anhand der Daten konnten so fünf Brunnen mit verschiedener Zusammensetzung der Beläge hinsichtlich des Eisen- und Mangangehaltes und mit unterschiedlichem Alter, bedingt durch die Standzeit seit der letzten Regenerierung, bestimmt werden. Für die fünf Brunnen wurden aus den Brunnenakten alle Ergebnisse durchgeführter Pumpversuche, Messungen und Analysen zusammengestellt und beschrieben. Anschließend wurden die Brunnen mit dem Ultraschallverfahren regeneriert. Jede der Regeneriermaßnahmen umfasste dabei zusätzliche Begleituntersuchungen und die Entnahme und Analyse von Wasser- und Partikelproben zur wissenschaftlichen Bewertung des Regeneriererfolges und Beschreibung der Vorgänge in Brunnen.

Aufbauend auf den Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten dienten Kamerabefahrungen der direkten Beurteilung der Reinigungswirkung der Maßnahme. Mit Hilfe von geophysikalischen Verfahren wurde außerdem die Wirkung hinter dem Filterrohr ausgewertet. Pumpversuche belegten die erzielte Leistungssteigerung. Der Vergleich der Kamerabilder, der Absenkungen vor und nach Ultraschall in den Pumpversuchen und der Verhältnisse im Ringraum anhand der geophysikalischen Messungen zeigte die Wirkung der Regenerierung in den fünf Brunnen. Es zeigten sich Abhängigkeiten zwischen der Ultraschallwirkung und dem hydrogeologischen Hintergrund der Brunnen einerseits und zwischen der Leistungssteigerung bzw. dem Regeneriererfolg und dem Alter der Beläge andererseits.

Die Proben von dem abgepumpten Wasser und den ausgetragenen Feststoffen wurden aufbereitet und chemisch analysiert. Dabei interessierten im Zusammenhang mit der Brunnenalterung vor allem die Eisen- und Mangangehalte.

Die Wasserproben wurden mit der Bilanzierung der chemischen Regenerierungen verglichen. Die Sedimentproben wurden mit verschiedenen Verfahren analysiert und die Ergebnisse in einen Zusammenhang zur Wirkung des Ultraschalls gesetzt und mit den Belagsanalysen, die zur Brunnenauswahl verwendet worden waren, verglichen.

Die Analyse-Verfahren waren

1. die Infrarot-Spektroskopie zur qualitativen Bestimmung des Gehaltes an organischen Inhalten
2. die Röntgenfluoreszenzanalyse zur quantitativen Bestimmung der Gehalte an Eisen Mangan u. a.

3. die Röntgendiffraktometrie-Analyse zur qualitativen Bestimmung des Mineralbestandes.

Die Ergebnisse zeigten Zusammenhänge zwischen dem Brunnenausbau und der Zusammensetzung der entfernten Ablagerungen. Aus den Steinzeugfilterbrunnen konnte deutlich mehr Mangan ausgetragen werden. Außerdem bestand eine Korrelation zwischen dem Alter und der Zusammensetzung der Beläge. Der Mangangehalt nahm mit steigendem Alter zu. Die Leistungssteigerung hing von den insgesamt entfernten Mengen Feststoffe ab. Aus den Brunnen mit längerer Standzeit seit der letzten Regenerierung konnten höhere Massen ausgetragen werden. Des Weiteren zeigten sich aus Arbeiten zum Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein bekannte Zusammenhänge zwischen den Brunnenstandorten und den aufgefundenen Zusammensetzungen der Ablagerungen.

Die Zusammenstellung und Interpretation der Ergebnisse führte zum Erkennen von standortspezifischen Zusammenhängen zwischen den hydrochemischen Parametern der Brunnen und der Brunnenalterung. Unter Berücksichtigung der Schlussfolgerungen für das Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein, der Empfehlungen des DVGW und anderer Autoren und Einbeziehung der Erfahrungen aus der wissenschaftlichen Begleitung von Regenerierungen mit Ultraschall konnte eine Empfehlung für ein individuell auf die Brunnen des Wasserwerkes abgestimmtes Monitoring zur optimalen Brunnennutzung und -pflege abgeleitet werden.

Zusammen mit dem vorgeschlagenen Leitfaden eines Brunnenmonitorings, der Ableitung der relevanten hydrochemischen Parameter und der Empfehlung zur Entwicklung einer Datenbank mit Erfahrungswerten für andere Regeneriermethoden sowie Standorte, und daraus der datenbankgestützten Korrelationsanalyse, erhalten zukünftig die Brunnenbetreiber eine Hilfestellung zur Umsetzung eines geeigneten Brunnenmanagements.

10 Literatur

1. **Auen, A., Berger, H., Drews, M., Edler, H., Normann-Schmidt, S., Weil, H.:** Wasser für Wiesbaden – Von der Gewinnung bis zur Verteilung. Informationsschrift der Stadtwerke Wiesbaden AG, 1991
2. **Balke, K.-D. et. al.:** Grundwassererschließung: Grundlagen, Brunnenbau, Grundwasserschutz, Wasserrecht. – Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 4. 740S. Gebrüder Bornträger. Berlin 2000.
3. **Barnes, I. & Clarke, F.E.:** Chemical Properties of Ground Water and Their Corrosion and Encrustation Effects on Wells. Geological Survey Professional Paper 498-D. United States Government Printing Office. Washington 1969.
4. **Bartetzko, A.:** Chemische und biologische Vorgänge im Grundwasserleiter – Ursachen der Brunnentalterung. – *In:* Wicklein, A. & Steussloff, S.: Brunnen – ein komplexes System: Wege und Möglichkeiten zur effizienten Grundwassergewinnung. Kontakt & Studium, Bd. 616. S. 67 –101. expert-Verlag Renningen-Malmsheim 2002.
5. **Berger, H. et. al. :** Brunnenregenerierung in Wiesbaden — *In:* Stadtwerke Wiesbaden AG (Hrsg.): Brunnenregenerierung - Grundsätzliche Aspekte und neue Entwicklungen. Berichtsheft zum 3. ESWE-Forum im September 1990. ESWE-Schriftenreihe, Bd. 4. 300S. Wiesbaden 1992.
6. **Berger, H.:** Optimierte Brunnenbewirtschaftung. GWF Wasser . Abwasser 145. 2004. S.89-93.
7. **Bergmann, L.:** Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik. 1114S. Stuttgart 1954.
8. **Bieske, E. Jr.:** Horizontalfilterbrunnen, ihre Herstellungsverfahren und Bauformen. GWF Wasser/ Abwasser 100, München 1959.
9. **Bieske, E. Jr.:** Zur Schüttkornbestimmung bei Kiesschüttungsbrunnen. bbr 12, S.407-411. Köln 1961
10. **Bieske, E. et. al.:** Bohrbrunnen, 8. Auflage. 455S. R. Oldenbourg Verlag. München 1998.
11. **Blasche, R.:** Aus der Praxis des Horizontalbrunnenbaus.- Schweiz. Bauzeitung, 87. Zürich 1969.

12. **Bott, W., Wiacek, H. & Wilken, R.-D.:** Brunnenregenerierung mittels hochenergetischem Ultraschall. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt Entwicklung eines Verfahrens zur Brunnen-Regenerierung mittels einer Ultraschall-Einheit. Sonderdruck des ESWE-Institutes. Wiesbaden, 2003 (unveröffentlicht).
13. **Bott, W. & Wiacek, H.:** Brunnenregenerierungen. Datengrundlage und Dokumentation. bbr 3/ 2004. S.26-30.
14. **Brookins, D.G.:** Eh-pH-Diagrams for Geochemistry. 176S. Springer Verlag Berlin 1988.
15. **Carlson, L., Vuorinen, A., Lahermo, P, Tuovinen, O. H.:** Mineralogical, geochemical, and microbiological Aspects of Iron Deposition from Groundwater. *In:* Trudinger, E. (Ed.): Biogeochemistry of ancient and modern Environments. S.355-364. Springer Verlag. 1980.
16. **Conrad, R.:** Brunnenbau. *In:* Wicklein, A. & Steussloff, S.: Brunnen – ein komplexes System: Wege und Möglichkeiten zur effizienten Grundwassergewinnung. Kontakt & Studium, Bd. 616. S. 30-67. expert-Verlag Renningen-Malmsheim 2002.
17. **DVGW-Forschungsvorhaben W 55/99:** Untersuchungen zur Bewertung von Gerätetechnik auf die Wirksamkeit in der Kiesschüttung. Ergebnisbericht Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V. 108S. Dresden 2003.
18. **Drews, M. & Gerdes, H.:** Überprüfung der Möglichkeit zur Gewinnung von Uferfiltrat aus dem Rhein im Bereich der Wassergewinnung Wiesbaden-Schierstein. Sonderdruck aus GWF – Wasser/Abwasser 143 (2002) Heft 2, S.104-111.
19. **Düx, P. & Eichenbusch, H.:** Von der Kavitation zur Sonotechnologie. Technologiefrüherkennung Bd. 32. VDI Technologiezentrum. Im Auftrag des BMBF. 2000.
20. **Ehrlich, H.L.:** Geomicrobiology. 4. Edition, revised and expanded. 768S. Marcel Dekker. New York 2002.
21. **Esche, R.:** Untersuchung der Schwingungskavitation in Flüssigkeiten. Acustica Akustische Beihefte 2. S.208-218. Stuttgart 1952.
22. **Fricke, S. & Schön, J.:** Praktische Bohrlochgeophysik. 254S. Enke-Verlag Stuttgart 1999.

23. **Grimm, B. et al.:** Das große Tafelwerk. Ein Tabellen- und Formelwerk für den mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht in Gymnasien. 2. durchgesehene Auflage. Volk und Wissen Verlag GmbH Berlin 1994.
24. **Grossmann, J.:** Regeneration von Trinkwasserbrunnen: Literaturstudie. GWF – Wasser/ Abwasser 141 (2000) Heft 9, S. 86-593.
25. **Haberer, K.:** Über die Strömungsverhältnisse im Rhein bei Wiesbaden. *In:* Künstliche Grundwasseranreicherung am Rhein – Festschrift der Stadtwerke Wiesbaden AG zum 50jährigen Betrieb der künstlichen Grundwasseranreicherung in Wiesbaden-Schierstein. S. 43-49. Wiesbaden 1974.
26. **Hahn-Weinheimer, P.:** Röntgenfluoreszenzanalytische Methoden. 283S. Braunschweig 1995.
27. **Halbertsma, & Spieser, :** Die Wasserversorgung Wiesbadens. Sonderdruck aus „Die öffentliche Gesundheitspflege Wiesbadens. Wiesbaden 1908.
28. **Hässelbart, U. & Lüdemann, D.:** Die biologische Verockerung von Brunnen durch Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien. Bericht aus dem DVGW-Fachausschuss „Wasserfassung und Wasseranreicherung“. bbr Wasser und Rohrbau 18. H.10 und H.11. 1967.
29. **Henningsen, D. & Katzung, G.:** Einführung in die Geologie Deutschlands, 6. Auflage. 214S. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg • Berlin 2002.
30. **Herzberg, H.:** Die Grundwasseranreicherungsanlagen im Wasserwerk Wiesbaden-Schierstein. GWF 22. S. 617-625. München 1965.
31. **Hölting, B.:** Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 5. Auflage. 441S. Ferdinand-Enke-Verlag Stuttgart 1996.
32. **Houben, G. J., Merten, S. & Treskatis, C.:** Entstehung, Aufbau und Alterung von Brunneninkrustationen. bbr 50. 10/1999. S.29-35
33. **Houben, G. J.:** Iron oxide incrustations in wells. Part I: Genesis, mineralogy and geochemistry. Applied Geochemistry 18 (2003). S.927-939.
34. **Houben, G. J.:** Iron oxide incrustations in wells. Part II: chemical dissolution and modelling. Applied Geochemistry 18 (2003). S. 941-954.

35. **Houben, G.J. & Treskatis, C.:** Regenerierung und Sanierung von Brunnen. 280S. München 2003.
36. **Houben, G. J. & Weihe, U.:** Räumliche Verteilung von Inkrustationen in Brunnen. bbr 55. 7+8/ 2004. S.34-39.
37. **Hug, N.:** Brunnenregenerierung durch Ultraschall. Experimentelle Untersuchungen zu Wirkungsweise und Einflussfaktoren. Diplomarbeit am Institut für Geowissenschaften der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz. 155S. 1997 (unveröffentlicht)
38. **Hüpfer, G.:** Erfahrungen bei der Errichtung von Horizontalbrunnen. – 1. Friedrichshafener Brunnenbautage. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn 1997.
39. **Kämmerer, D.:** Hydrogeologische Untersuchungen zur Grundwasserversauerung im südlichen Taunus – Geologische Abhandlungen Hessen, Band 103. 125S. Hessisches Landesamt für Bodenforschung. Wiesbaden 1998.
40. **Kaulitzky, J.:** Untersuchungen zur Regeneration herkömmlicher und neuartiger Filtermaterialien zur Tiefenfiltration trübstoffbelasteter Wässer. Dissertation. 169S. Gerhard-Mercator-Universität – Gesamthochschule Duisburg 1999.
41. **Kleeberger, U.:** Die Neuerungen im DVGW-Regelwerk. *In:* WAR Schriftenreihe 158: 72. Darmstädter Seminar Wasserversorgung – Qualitätssicherung bei Wassergewinnungsanlagen. Umsetzung und aktuelle Entwicklung im Regelwerk. S. 5-10. Darmstadt 2004.
42. **Kopp, K.:** Wasser von Taunus, Rhein und Ried: Aus zwei Jahrtausenden Wiesbadener Wasserversorgung. 327S. Stadtwerke Wiesbaden 1986.
43. **Krautkrämer, J.:** Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 2., neubearb. Auflage. 522S. Springer-Verlag Berlin / Heidelberg 1966.
44. **Krems, G.:** Regenerierung und Leistungssteigerung von Rohrbrunnen. Vortrag zur wassersprachlichen Aussprachetagung 1958 in Goslar. *In:* DVGW-Broschüre: Leistungssteigerung im Wasserwerksbetrieb. S.51-62. 1958
45. **Kuttruff, H.:** Physik und Technik des Ultraschalls. 415S. Stuttgart 1988.
46. **Lauterborn, W.:** Acoustic Turbulence. Proc. Intern. School of Physics „Enrico Fermi“. Course XCIII: “Frontiers in Physical Acoustics”. Amsterdam 1986.
47. **Lotz, K.:** Einführung in die Geologie des Landes Hessen. 267S. Hitzeroth, Marburg 1995.

48. **Mehlhorn, H. & Thews, J.-D.:** Die Gestalt des Grundwasserleiters im Bereich des Wasserwerkes Wiesbaden-Schierstein. *In:* Künstliche Grundwasseranreicherung am Rhein – Festschrift der Stadtwerke Wiesbaden AG zum 50jährigen Betrieb der künstlichen Grundwasseranreicherung in Wiesbaden-Schierstein. S. 65-67. Wiesbaden 1974.
49. **Merkel, B.J. & Planer-Friedrich, B.:** Grundwasserchemie. Praxisorientierter Leitfaden zur numerischen Modellierung von Beschaffenheit, Kontamination und Sanierung aquatischer Systeme. 219S. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002.
50. **Meyer, W. & Stes, J.:** Das Rheintal zwischen Bingen und Bonn – Sammlung geologischer Führer 89. 386S. Gebrüder Bornträger Berlin • Stuttgart 1996.
51. **Normann-Schmidt, S.:** Brunnenregenerierung – Chemische Verfahren. *In:* WAR Schriftenreihe 65: 27. Wassertechnisches Seminar – Optimierung der Grundwassergewinnung über Filterbrunnen, Neue Bau- und Betriebserkenntnisse. S. 223-438. Darmstadt 1992.
52. **Paul, K. F.:** Instandhaltung von Trink- und Brauchwasserbrunnen. bbr Wasser und Rohrbau 36. 6/1985. S. 238-241.
53. **Paul, K.F.:** Brunnenregenerierung: Überblick über Aufgaben, Methoden, Überwachung und Neutralisation. bbr Wasser und Rohrbau 44. 5/1993. S.251-263.
54. **Paul, K.F.:** Zusammenhänge zwischen Brunnenbau und den verschiedenen Arten der Brunnenalterung. Teil 1. bbr Wasser und Rohrbau 45. 6/1994. S.26-37.
55. **Paul, K.F.:** Zusammenhänge zwischen Brunnenbau und den verschiedenen Arten der Brunnenalterung. Teil 2. bbr Wasser und Rohrbau 45. 7/1994. S.18-25.
56. **Paul, K.-F.:** Kontrolle und Qualitätssicherung nach dem DVGW-Merkblatt W 130: Brunnenregenerierung. bbr 3/ 2003. S.45-52.
57. **Patzner, N.:** Die Wirkungsweise des Ultraschalls im Brunnen. (unveröffentlicht).
58. **Rogalsky et. al.:** Untersuchungen zur Brunnenalterung – Analyse von Brunnenbelägen. Sonderdruck aus bbr 41. 6/ 1990. 7S.
59. **Rothausen, K. & Sonne, V.:** Mainzer Becken – Sammlung geologischer Führer 79. 203S. Gebrüder Bornträger Berlin • Stuttgart 1984.

60. **Schiemann, T., Hofmann, B. & Maier, D.:** Neue Erkenntnisse im Zusammenhang mit der Brunnenalterung und –regenerierung bei den Stadtwerken Karlsruhe. bbr 48. 8/1997. S.24-30.
61. **Schwedt, G.:** Analytische Chemie – Grundlagen, Methoden und Praxis. 442S. Georg Thieme Verlag Stuttgart 1995.
62. **Selle, C.:** Brunnenalterung / Brunnenregenerierung – Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der Verockerung an Brunnenfilterrohr unter Berücksichtigung hydrogeologischer Aspekte. Diplomarbeit am Institut für Geowissenschaften der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz. 86S. 1998 (unveröffentlicht)
63. **Sichardt, W.:** Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für größere Absenkungstiefen. 89S. Springer-Verlag Berlin 1928.
64. **Smolianskis, N.:** Brunnenreinigung durch Ultraschall: Experimentelle Untersuchungen des Ultraschallfeldes in einem Modell-Trinkwasserbrunnen. Diplomarbeit an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 2002 (unveröffentlicht).
65. **Stadtwerke Wiesbaden AG (Hrsg.):** Die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung Wiesbadens: Festschrift zum 100jährigen Bestehen der Wiesbadener Trinkwasserversorgung – Wissenschaftliche Berichte über Untersuchungen und Planungen der ESWE Stadtwerke Wiesbaden AG, Bd. 1. Wiesbaden 1971.
66. **Stadtwerke Wiesbaden AG (Hrsg.):** Künstliche Grundwasseranreicherung: Festschrift zum 50jährigen Betrieb der künstlichen Grundwasseranreicherung in Wiesbaden-Schierstein – Wissenschaftliche Berichte über Untersuchungen und Planungen der ESWE Stadtwerke Wiesbaden AG, Bd. 2. 223S. Wiesbaden 1974.
67. **Stadtwerke Wiesbaden AG (Hrsg.):** Forschung und Entwicklung in der Wasserwerkspraxis – Wissenschaftliche Berichte über Untersuchungen und Planungen der ESWE Stadtwerke Wiesbaden AG, Bd. 3. 191S. Wiesbaden 1976.
68. **Stadtwerke Wiesbaden AG (Hrsg.):** Brunnenregenerierung - Grundsätzliche Aspekte und neue Entwicklungen. Berichtsheft zum 3. ESWE-Forum im September 1990. ESWE-Schriftenreihe, Bd. 4. 300S. Wiesbaden 1992.
69. **Steussloff, S. & Steinbrecher, A.:** Langzeiterfahrung mit Impulsverfahren. bbr 10/2001. S.20-27.

70. **Steussloff, S. & Steinbrecher, A.:** Grundlagen und Möglichkeiten der Brunnenregenerierung und Brunnensanierung. *In:* Wicklein, A. & Steussloff, S.: Brunnen – ein komplexes System: Wege und Möglichkeiten zur effizienten Grundwassergewinnung. Kontakt & Studium, Bd. 616. S. 144-187. expert-Verlag Renningen-Malmsheim 2002.
71. **Suslick, K.:** The chemical effects of Ultrasound. *Scientific American* 2/1989. S.62-68.
72. **Sutilov, V.A.:** Physik des Ultraschalls. 274S. Springer-Verlag Wien 1984.
73. **Thews, J.-D.:** Die hydrogeologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet und Infiltrationsgelände des Wasserwerks Schierstein. *In:* Künstliche Grundwasseranreicherung am Rhein – Festschrift der Stadtwerke Wiesbaden AG zum 50jährigen Betrieb der künstlichen Grundwasseranreicherung in Wiesbaden-Schierstein. S. 55-63. Wiesbaden 1974.
74. **Thews, J.-D.:** Zur Typologie der Grundwasserbeschaffenheit im Taunus und Taunusvorland - Abhandlungen des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung. Heft 63. 42S., Wiesbaden 1972.
75. **Timmer, H., Verdel, J.-D. & Jongmans, A.G.:** Well clogging by particles in Dutch well fields. *Journal AWWA* 95:8, 2003. S. 112-118.
76. **Uhlmann, D.:** Hydrobiologie – Ein Grundriss für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 2., bearbeitete Auflage. 315S. Gustav Fischer Verlag Stuttgart 1982.
77. **Wiacek, H.:** Brunnenregenerierung mittels Ultraschall – Validierung von Laborergebnissen im Praxiseinsatz. Diplomarbeit am Institut für Geowissenschaften der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz. 127S. 2003 (unveröffentlicht)
78. **Wicklein, A. & Steussloff, S.:** Brunnen – ein komplexes System: Wege und Möglichkeiten zur effizienten Grundwassergewinnung. Kontakt & Studium, Bd. 616. 233S. expert-Verlag Renningen-Malmsheim 2002.
79. **Wilken, R.-D. & Wiacek, H.:** Ergebnisse der Regenerierungen an fünf ausgewählten Brunnen des Wasserwerkes Wiesbaden-Schierstein im Rahmen des Projektes „Ultraschall – ein umweltfreundliches Verfahren zur Brunnenregenerierung“. 39S. Sonderdruck des ESWE-Institutes, Wiesbaden. 2004 (unveröffentlicht).

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1-1:	Verknüpfung der für den optimalen Brunnenbetrieb relevanten Fachgebiete der Wasserwirtschaft [aus WICKLEIN & STEUSSLOFF, 2002:2].....	2
Abb. 1-2:	Schema eines möglichen Leitfadens zur Wahl geeigneter Regenerierverfahren. (Wiacek, 2005).....	10
Abb. 2-1:	Schnitt durch einen Vertikalfilterbrunnen [aus BIESKE, 1998:17].....	12
Abb. 2-2:	gesättigte und ungesättigte Zone im Schema der Grundwasserneubildung. Die Pfeile zeigen den oberirdischen und unterirdischen Abfluss [aus HÖLTING, 1996:79].....	14
Abb. 2-3:	links: ungespannter Grundwasserleiter mit freier Grundwasseroberfläche; rechts: gespannter Grundwasserleiter mit Grundwasserdruckfläche in der überdeckenden wasserstauenden Schicht [aus BIESKE, 1998:174].....	14
Abb. 2-4:	Brunnen im gespannten Grundwasserleiter, Absenkung des Wasserspiegels proportional zum Wasserandrang [aus BIESKE, 1998:181].....	17
Abb. 2-5:	Absenkungs- und Entnahmebereich um einen Brunnen im natürlichen Grundwasserstrom [aus DIN 4049, Ausgabe 1979, zitiert in HÖLTING, 1996:107].....	18
Abb. 2-6:	Schematische Darstellung von vollkommenen und unvollkommenen Brunnen und der Anströmung [aus KRUSEMAN & DE RIDDER, 1970, zitiert in HÖLTING, 1996:104].....	19
Abb. 2-7:	Entsandungswirkung bei richtig bemessener Kiesschüttung, oben (A) vor dem Entsanden; unten (B) nach dem Entsanden [SCHNEIDER, 1961, zitiert in BALKE et al., 2000:432].....	24
Abb. 2-8:	$E_H - pH$ – Diagramm von Eisenspezies in Wasser [aus BROOKINS, 1988].....	28
Abb. 2-9:	E_H -pH-Diagramm für Manganspezies in Wasser [aus BROOKINS, 1988].....	31
Abb. 2-10:	Abnahme der relativen Brunnenleistung in Abhängigkeit von der Betriebsdauer und einsetzender Brunnenalterung [nach BOTT, WIACEK & WILKEN, 2003:6].....	33
Abb. 2-11:	Biofilm auf einer Oberfläche [aus BARTETZKO, 2002:89].....	36

Abb. 2-12: Schematisch und im mikroskopischen Maßstab dargestellter, struktureller Aufbau von Brunneninkrustationen im Filterraum direkt hinter dem Filterrohr [nach HOUBEN, 1999:33]	38
Abb. 2-13: Beispielhafte Brunnenleistungskurve bei z. B. jährlicher Aufzeichnung von Pumpversuchsdaten und Erfassung der Regenerierungen [nach BOTT & WIACEK, 2004:27].....	42
Abb. 2-14: Schema eines Pumpversuches mit Erfassung der Entnahmemenge Q (unten) und der Absenkung im Brunnen (oben) [nach DVGW W111, 1997:9]	47
Abb. 2-15: Q-s-Kurve im gespannten und freien Grundwasser [aus DVGW W11, 1997:25]	47
Abb. 2-16: Q-s-Kurve nach verschiedenen Betriebszeiten t1 bis t3 eines Brunnens. t0 ist die Neubauleistung. [aus DVGW W111, 1997:26].....	49
Abb. 2-17: Abgrenzung der Frequenzen und Wahrnehmungsbereiche [aus www.Palkan.de, 27.06.2005]	59
Abb. 2-18: Wellenflächen und Ausbreitungsrichtung von a: Ebene Welle und b: Kugelwelle [aus KUTTRUFF, 1988 zitiert in WIACEK, 2003:17].....	60
Abb. 2-19: Ausbreitung des Ultraschalls als Longitudinalwelle mit Verdichtungs- und Verdünnungszonen [aus PATZNER, 26.08.2003]	61
Abb. 2-20: Interferenz hinter einem Doppelspalt durch Überlagerung von Primär- und Beugungswelle [aus www.mbaselt.de/licht/interf.htm, 19.07.2005]	65
Abb. 3-1: Geologischer Aufbau im Raum Wiesbaden [aus THEWS, 1972:9].....	76
Abb. 3-2: Geologische Übersichtskarte des Rheinischen Schiefergebirges [aus HENNINGSEN & KATZUNG, 2002:44]....	77
Abb. 3-3: Geologische Verhältnisse im Devon im Gebiet des Rheinischen Trogs [MEYER & STES, 1996]	79
Abb. 3-4: Übergang vom paläozoischen Taunusquarzit zu den tertiären Ablagerungen entlang Verwerfungslinien im Nordwesten [aus THEWS, 1974:57]	81
Abb. 3-5: Geologische Übersicht Wiesbadens und Grundwasserfließrichtung (Pfeil) [aus THEWS, 1974:56]	83
Abb. 3-6: Kartographische Darstellung des Wasserwerkes Wiesbaden-Schierstein [aus DREWS & GERDES, 2002:105]	87

Abb. 3-7:	Schema der ersten Stufe (RAW) der Wasseraufbereitung [nach BERGER et al., 1992:89].....	89
Abb. 3-8:	Schema der Bodenpassage [nach BERGER et al., 1992:89].	90
Abb. 3-9:	Schema der zweiten Stufe (GAW) der Wasseraufbereitung [nach BERGER et al., 1992:89].....	91
Abb. 3-10:	Schnitt durch einen Entnahmebrunnen [aus BERGER, 1992:104].....	94
Abb. 3-11:	Messung des Eisengehaltes im Rohwasser der Brunnen, Beispiel für eine Messkampagne vom 17.01.1990 [aus BERGER, 1992:112]	96
Abb. 3-12:	Der Kieswäscher KW 3G [aus BERGER, 1992:146]	100
Abb. 4-1:	Eisengehalte im Rohwasser und den Altdaten der chemischen Regenerierungen und Belagsuntersuchungen, angegeben als prozentuale Anteile an der Bilanzierung der Summen Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium [WIACEK, 2004].....	108
Abb. 4-2:	Mangangehalte im Rohwasser und den Altdaten der chemischen Regenerierungen und Belagsuntersuchungen, angegeben als prozentuale Anteile an der Bilanzierung der Summen Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium [WIACEK, 2004].....	109
Abb. 4-3:	Belagsanalysen und Daten der Chemischen Regenerierungen für die Gehalte an gelöstem Eisen und Mangan. Die roten Linien markieren die fünf, für die Versuche ausgewählten Brunnen. [Wiacek, 2004]	110
Abb. 4-4:	Lage der fünf ausgewählten Brunnen innerhalb der Entnahmebrunnengalerie des Wasserwerkes [nach Abb. 3-6]	111
Abb. 4-5:	links: Ultraschallsonde der Fa. BRM GmbH, Biebergemünd [WIACEK, 2003]; rechts schematische Darstellung eines magnetostriktiven Blockschwingers [aus KRAUTKRÄMER, 1966 zitiert in WIACEK, 2003]	117
Abb. 4-6:	Prinzipskizze des Verfahrens [nach www.Sonic-Umwelttechnik.de, zitiert in WILKEN & WIACEK, 2004]	118
Abb. 4-7:	Prinzipskizze des Compton-Effekts [aus www.med.uni-marburg.de, 19.07.2005].....	121
Abb. 4-8:	Prinzip der Gamma-Gamma-Messung [aus www.calice.igt.ethz.ch, 29.06.2005].....	122

Abb. 4-9: Prinzipieller Aufbau eines Impellerflowmeters [aus www.terraplus.ca , 29.06.2005]	124
Abb. 4-10: Messprinzip der Flowmeter-Messung [aus DVGW W110, 1990:28].....	126
Abb. 4-11: Schematische Darstellung der Plasma-Flamme mit Kennzeichnung der Temperaturbereiche [aus www.wikipedia.de , 01.03.2005]	133
Abb. 4-12: Prinzip des Simultanspektrometers für Multi-Element-Analysen [aus SCHWEDT, 1995:205].....	134
Abb. 4-13: Beispiel eines Emissionsspektrums aus einer Multi-Element-Analyse [aus SCHWEDT, 1995:207].....	135
Abb. 4-14: Elektromagnetisches Spektrum [aus SCHWEDT, 1995:219]	136
Abb. 4-15: Prinzip eines Doppelstrahlspektrometers [nach SCHWEDT, 1995:242].....	138
Abb. 4-16: Prinzip der Anregung von charakteristischer Fluoreszenzstrahlung [aus SCHWEDT, 1995:210].....	140
Abb. 4-17: Strahlengang in einem wellenlängendispersiven Röntgenspektrometer [aus www.uni-mainz.de , 01.03.2005]	142
Abb. 4-18: Reflexion an Netzebenen eines Kristalls [aus SCHWEDT, 1995:414]].....	144
Abb. 4-19: Strahlengang in einem Bragg-Brentano-Röntgendiffraktometer [aus http://kristall.uni-mki.gwdg.de , 01.03.2005].....	146
Abb. 4-20: Zwei-Kreis-Anordnung und Strahlengang im Pulverdiffraktometer XRD 3000TT [aus www.physik.uni-freiburg.de , 19.07.2005].....	147
Abb. 5-1: Entwicklung der Leistungsdaten des Brunnens 20a bei der ersten Pumpstufe, Förderrate: 10 m ³ /h*m, Brunnentests von 1995 – 2000, gemäß Brunnenakte [Wiacek, 2004].....	152
Abb. 5-2: Darstellung der Ionengehalte aus Rohwasseruntersuchungen des Wassers des Brunnens 20a nach SCHÖLLER [Wiacek, 2004].....	154
Abb. 5-3: Änderungen der Leitparameter zwischen 1993 und 2003 [Wiacek, 2004].....	154

- Abb. 5-4: Entwicklung der Leistungsdaten des Brunnens 29a bei der ersten Pumpstufe, Förderrate: $10 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$, Brunnentests von 1994 – 1999, gemäß Brunnenakte [Wiacek, 2004]..... 156
- Abb. 5-5: Darstellung der Ionengehalte aus Rohwasseruntersuchungen des Wassers des Brunnen 29a nach SCHÖLLER [Wiacek, 2004]..... 158
- Abb. 5-6: Änderungen der Leitparameter zwischen 1993 und 2003 [Wiacek, 2004]..... 158
- Abb. 5-7: Entwicklung der Leistungsdaten des Brunnens 31a bei der ersten Pumpstufe, Förderrate $10 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$, Brunnentests von 1996 bis 1999, gemäß Brunnenakte [Wiacek, 2004]..... 160
- Abb. 5-8: Darstellung der Ionengehalte aus Rohwasseruntersuchungen des Wassers des Brunnens 31a nach Schöller [Wiacek, 2004]..... 162
- Abb. 5-9: Änderungen der Leitparameter zwischen 1993 und 2003 [Wiacek, 2004]..... 162
- Abb. 5-10: Vergleich der Leistungsdaten aus Brunnentests 1998 und 1999 bei der ersten Pumpstufe, Förderrate $10 \text{ m}^3/\text{h}$, gemäß Brunnenakte [Wiacek, 2004]..... 164
- Abb. 5-11: Darstellung der Ionengehalte aus Rohwasseruntersuchungen des Wassers von Brunnen 51a nach Schöller [Wiacek, 2004] 165
- Abb. 5-12: Änderungen der Leitparameter zwischen 1993 und 2003 [Wiacek, 2004]..... 166
- Abb. 5-13: Entwicklung der Leistungsdaten des Brunnens bei der ersten Pumpstufe, Förderrate: $10 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$, Brunnentests von 1995 – 2000 [Wiacek, 2004] 168
- Abb. 5-14: Darstellung der Ionengehalte aus Rohwasseruntersuchungen des Wassers aus Brunnen 54a nach Schöller [Wiacek, 2004] 169
- Abb. 5-15: Änderungen der Leitparameter in Brunnen 54a zwischen 1993 und 2003 [Wiacek, 2004] 169
- Abb. 6-1: Kamerabefahrung Brunnen 20a, 05.05.2004, Aktueller Bauzustand, Bild 1 (links) aus $6,77 \text{ m}$ u D-OK und Bild 2 (rechts) aus $8,89 \text{ m}$ u D-OK [BRM, 2004] 173
- Abb. 6-2: Kamerabefahrung Brunnen 20a, 05.05.2004, links: nach mechanischer Vorreinigung, rechts: nach Ultraschall, Bild 2 aus $8,50 \text{ m}$ u D-OK [BRM, 2004] 174

- Abb. 6-3: Verlauf von Absenkung und Wiederanstieg während der drei Pumpversuche an Brunnen 20a [Wiacek, 2005 aus BLM 2004]..... 176
- Abb. 6-4: Ausschnitt (ohne Maßstab) aus dem Ergebnisplot der Fa. BLM von Brunnen 20a; links: Gamma-Gamma-Dichtemessungen; rechts: Flowmeter vor (rot) und nach (grün) Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005) 177
- Abb. 6-5: Kamerabefahrung Brunnen 29a, 03.05.2004, Aktueller Bauzustand, Bild 1 (links) aus 8,66 m u D-OK (5,42 m + 3,14 m) und Bild 3 (rechts) aus 11,55 m u D-OK (8,41 m + 3,14 m) [BRM, 2004]..... 179
- Abb. 6-6: Kamerabefahrung Brunnen 29a, 03.05.2004, nach mechanischer Vorreinigung, Bild 1 (links) aus 8,66 m u D-OK (5,42 m + 3,14 m) und Bild 3 (rechts) aus 11,55 m u D-OK (8,41 m + 3,14 m) [BRM, 2004 179
- Abb. 6-7: Kamerabefahrung Brunnen 29a, 04.05.2004, nach Ultraschallregenerierung, Bild 3 aus 11,56 m u D-OK [BRM, 2004]..... 180
- Abb. 6-8: Verlauf von Absenkung und Wiederanstieg während der drei Pumpversuche an Brunnen 29a (Wiacek, 2005) 181
- Abb. 6-9: Ausschnitt (ohne Maßstab) aus dem Ergebnisplot von Brunnen 29a der Fa. BLM; links: Gamma-Gamma-Dichtemessungen; rechts: Flowmeter vor (rot) und nach (grün) Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005) 183
- Abb. 6-10: Kamerabefahrung Brunnen 31a, 23.04.2004, Aktueller Bauzustand, Bild 1 (links) aus 6,40 m u D-OK (3,35 m + 3,05 m) und Bild 3 (rechts) aus 10,65 m u D-OK (7,60 m + 3,05 m) [BRM, 2004]..... 184
- Abb. 6-11: Kamerabefahrung Brunnen 31a, 23.04.2004, Nach mechanischer Vorreinigung, Bild 3 aus 10,65 m u D-OK [BRM, 2004]..... 185
- Abb. 6-12: Verlauf von Absenkung und Wiederanstieg während der drei Pumpversuche an Brunnen 31a (Wiacek, 2005) 187
- Abb. 6-13: Ausschnitt (ohne Maßstab) aus dem Ergebnisplot von Brunnen 31a der Fa. BLM; links: Gamma-Gamma-Dichtemessungen; rechts: Flowmeter vor (rot) und nach (grün) Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005) 188
- Abb. 6-14: Kamerabefahrung Brunnen 51a, 21.04.2004, aktueller Bauzustand, Bild 2 aus 7,87 m u D-OK [BRM, 2004] 189

- Abb. 6-15: Kamerabefahrung Brunnen 51a, 21.04.2004, links: Nach mechanischer Vorreinigung, rechts: nach Ultraschall, Bild 2 aus 7,87 m u D-OK (4,15 m + 3,72 m) [BRM, 2004]..... 190
- Abb. 6-16: Verlauf von Absenkung und Wiederanstieg während der drei Pumpversuche an Brunnen 51a (Wiacek, 2005) 192
- Abb. 6-17: Ausschnitt (ohne Maßstab) aus dem Ergebnisplot von Brunnen 51a der Fa. BLM; links: Gamma-Gamma-Dichtemessungen; rechts: Flowmeter vor (rot) und nach (grün) Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005) 193
- Abb. 6-18: Kamerabefahrung Brunnen 54a, 19.04.2004, aktueller Bauzustand, Bild 1 (links) aus 7,72 m u D-OK und Bild 2 (rechts) aus 10,46 m u D-OK [BRM, 2004]..... 194
- Abb. 6-19: Kamerabefahrung Brunnen 54a, 19.04.2004, Nach mechanischer Vorreinigung, Bild 1 aus 7,72 m u D-OK [BRM, 2004]..... 195
- Abb. 6-20: Kamerabefahrung Brunnen 54a, 20.04.2004, Nach Ultraschallregenerierung, Bild 1 (links) aus 7,72 m u D-OK und Bild 2 (rechts) aus 10,46 m u D-OK [BRM, 2004]..... 195
- Abb. 6-21: Verlauf von Absenkung und Wiederanstieg während der drei Pumpversuche an Brunnen 54a (Wiacek, 2005) 197
- Abb. 6-22: Ausschnitt (ohne Maßstab) aus dem Ergebnisplot von Brunnen 54a der Fa. BLM; links: Gamma-Gamma-Dichtemessungen; rechts: Flowmeter vor (rot) und nach (grün) Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005) 198
- Abb. 6-23: Kamerabefahrung, Brunnen 31a, 26. April 2004, Nach Regenerierung; 5,10m unter Brunnenkopf (8,15 m u OK-D), Kupferschlitzbrückenfilter, Filterstege teilweise zersetzt, Filteröffnungen geweitet [BRM, 2004]..... 200
- Abb. 6-24: Vergleich der spezifischen Ergiebigkeiten jeweils vor der Maßnahme, nach der mechanischen Vorreinigung und nach der Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005) 201
- Abb. 6-25: Wiederanstiegszeiten in den Pumpversuchen jeweils vor der Maßnahme, nach der mechanischen Vorreinigung und nach der Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005) 202
- Abb. 6-26: Vergleich der Änderung der Lagerungsdichte (braun unterlegt) jeweils vor (rot) und nach (grün) der Ultraschallregenerierung, zusammengestellt aus dem Kurzbericht der BLM (Wiacek, 2005) 203

- Abb. 6-27: Vergleich der Änderung der Zuflussanteile und –verteilung jeweils vor (rot) und nach (grün) der Ultraschallregenerierung, zusammengestellt aus dem Kurzbericht der BLM (Wiacek, 2005) 204
- Abb. 6-28: Vergleich der aktiven Filterlänge, berechnet aus den Flowmeter-Messungen jeweils vor und nach der Ultraschallregenerierung (Wiacek, 2005)..... 205
- Abb. 6-29: Prozentuale Anteile der Elemente Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan in den Wasserproben der Ultraschallregenerierungen bezogen auf die Summe der genannten Elemente (Wiacek, 2005)..... 209
- Abb. 6-30: säurelösliches Eisen und Mangan in den Wasserproben des abgepumpten Wassers nach der Beschallung, abgetragen gegen den Zeitraum seit der letzten chemischen Regenerierung (Wiacek, 2005) 210
- Abb. 6-31: Eisen und Mangan im abgepumpten Wasser der letzten chemischen Regenerierung, abgetragen gegen den Zeitraum seit der vorhergehenden chemischen Regenerierung (WIACEK, 2005)..... 211
- Abb. 6-32: gelöste Mengen Eisen und Mangan aus der Ultraschallregenerierung, abgetragen gegen die Werte aus der letzten chemischen Regenerierung (WIACEK, 2005) 213
- Abb. 6-33: Fotografische Aufnahme des Filtrerrückstandes der Wasserprobe aus dem unteren Filtermeter aus Brunnen 51a (WIACEK, 2004)..... 216
- Abb. 6-34: Gehalte ausgewählter Hauptelemente aus der RFA-Bestimmung nach Berechnung auf g/kg TS (WIACEK, 2004) 218
- Abb. 6-35: Prozentuale Anteile der Elemente Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan in den Sedimentproben der Ultraschallregenerierung bezogen auf die Summe der genannten Elemente (WIACEK, 2005)..... 219
- Abb. 6-36: Eisen und Mangan in den Sedimentproben des abgepumpten Wassers nach der Beschallung, abgetragen gegen den Zeitraum seit der letzten chemischen Regenerierung (WIACEK, 2005)..... 220
- Abb. 6-37: Prozentuale Anteile der Elemente Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan in den Belagsproben bezogen auf die Summe der genannten Elemente (WIACEK, 2005) 221

- Abb. 6-38: Die Farbe der Beläge im Vergleich: links: Br. 29a, 48 % Mangan, rechts: Brunnen 54a, 61 % Eisen [BRM, 2004]...225
- Abb. 6-39: Bezug zwischen Pumprate, insgesamt entfernter Masse Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium in der Wasserprobe und der Sedimentprobe und prozentuale Leistungssteigerung vor / nach Ultraschall (WIACEK, 2005)227
- Abb. 6-40: Prozentuale Anteile der Elemente Calcium, Magnesium, Eisen und Mangan in den Sedimentproben (RFA) bezogen auf die Summe der genannten Elemente sowie erreichte Leistungssteigerung (Δ) und Alter der Beläge (\bullet) (Wiacek, 2005).....228
- Abb. 6-41: Ergebnis der Pumpversuche (Balken) sowie die Bilanzierung von Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium in den Sedimentproben nach RFA(x) und Masse Mangan (\blacksquare) sowie Eisen (\blacklozenge) aus RFA (WIACEK, 2005).....229
- Abb. 7-1: Schema eines geeigneten Brunnenmonitorings (Wiacek, 2005).....244

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 2-1:	Standardpotenzial für Eisen und Mangan [aus DAS GROßE TAFELWERK, Volk und Wissen Verlag, 1994].....	27
Tab. 2-2:	Leitparameter von Wasseranalysen als Indikatoren zur Beurteilung von Regenerier- und Sanierungserfordernissen [nach HOUBEN & TRESKATIS, 2003, S.47].....	51
Tab. 4-1:	Anzahl der vorhandenen Datensätze in der Labordatenbank für die fünf, später ausgewählten Brunnen (Wiacek, 2005)	104
Tab. 4-2:	Erfassung der Altdaten, Ausschnitt (nur die später ausgewählten Brunnen) aus den Belagsanalysen der Brunnen (Wiacek, 2005).....	107
Tab. 4-3:	Übersicht über die Eigenschaften der ausgewählten Brunnen [Wiacek, 2004].....	110
Tab. 4-4:	technische Spezifikationen eines Blockschwingers bei einer Wassertemperatur von 10°C [nach www.Sonic-Umwelttechnik.de].....	118
Tab. 6-1:	Ergebnisse der Analyse der Wasserproben aus den 1000Liter-Containern, entnommen als Mischprobe nach der Beschallung [WIACEK, 2004].....	208
Tab. 6-2:	berechnete Verhältnisse der Mengen Eisen : Mangan, oben für die jeweils letzte dokumentierte Chemische Regenerierung und unten für die Ultraschallregenerierung 2004 der fünf ausgewählten Brunnen (Wiacek, 2005).....	212
Tab. 6-3:	Intervalle ohne Regenerierung, oben für die Ultraschallregenerierung 2004 und unten für die jeweils letzte Chemische Regenerierung, zusammengestellt aus den Brunnenakten der fünf Brunnen (WIACEK, 2005).....	213
Tab. 6-4:	Vergleich der Glühverluste aus den Altanalysen der Belagsproben und der Probenaufbereitung der Sedimentproben aus den fünf Brunnen (WIACEK, 2005)	217
Tab. 6-5:	Bilanzierung der Elementgehalte der genannten Elemente aus der RFA [WIACEK, 2004].....	218
Tab. 6-6:	Vergleich der Bilanzierungen der Analysen der letzten chemischen Regenerierung, der Wasserproben und der Sedimentproben aus den Ultraschallregenerierungen [WIACEK, 2004].....	220

Tab. 6-7:	Zeitpunkt der Entnahme der Belagsproben, Ergebnisse der Analyse für Eisen und Mangan und berechnetes Verhältnis Eisen : Mangan (WIACEK, 2005).....	222
Tab. 6-8:	Prozentualer Anteil von Eisen (Fe) und Mangan (Mn) an der Summe der entfernten Massen Eisen, Mangan, Calcium und Magnesium aus der RFA (Wiacek, 2005)	225
Tab. 7-1:	Pumpversuchsdaten aus der Brunnenakte von Brunnen 31a (Wiacek, 2005).....	246

ANHANG

11 Anhang

Verzeichnis des Anhangs

- Anhang 1: Für den Brunnenbau, -betrieb, Wartung und Pflege relevante Normen und technisches Regelwerk des DVGW iii
- Anhang 2: Geländeoberkante aus dem dreidimensionalen Grundwassermodell des Wasserwerks Schierstein, mit freundlicher Genehmigung der Brandt • Gerdes • Sitzmann Umweltplanung GmbH [BGS Umweltplanung GmbH, 2003] vi
- Anhang 3: Mächtigkeit der Auenlehmschicht aus dem dreidimensionalen Grundwassermodell des Wasserwerks Schierstein, mit freundlicher Genehmigung der Brandt • Gerdes • Sitzmann Umweltplanung GmbH [BGS Umweltplanung GmbH, 2003] vii
- Anhang 4: Mächtigkeit des quartären Aquifers aus dem dreidimensionalen Grundwassermodell des Wasserwerks Schierstein, mit freundlicher Genehmigung der Brandt • Gerdes • Sitzmann Umweltplanung GmbH [BGS Umweltplanung GmbH, 2003].....viii
- Anhang 5: Basis des Aquifers aus dem dreidimensionalen Grundwassermodell des Wasserwerks Schierstein, mit freundlicher Genehmigung der Brandt • Gerdes • Sitzmann Umweltplanung GmbH [BGS Umweltplanung GmbH, 2003] ix
- Anhang 6: kf-Werte im quartären Aquifer aus dem dreidimensionalen Grundwassermodell des Wasserwerks Schierstein, mit freundlicher Genehmigung der Brandt • Gerdes • Sitzmann Umweltplanung GmbH [BGS Umweltplanung GmbH, 2003] . x
- Anhang 7: aktualisierte Ausbauzeichnung von Brunnen 20a, auf Basis der Abrechnungszeichnung von 1950 und der Kamerabefahrungen 2004, erstellt mit AqualInfo (Wiacek, 2005)..... xi
- Anhang 8: aktualisierte Ausbauzeichnung von Brunnen 29a, auf Basis der Abrechnungszeichnung von 1950 und der Kamerabefahrungen 2004, erstellt mit AqualInfo (Wiacek, 2005)..... xii

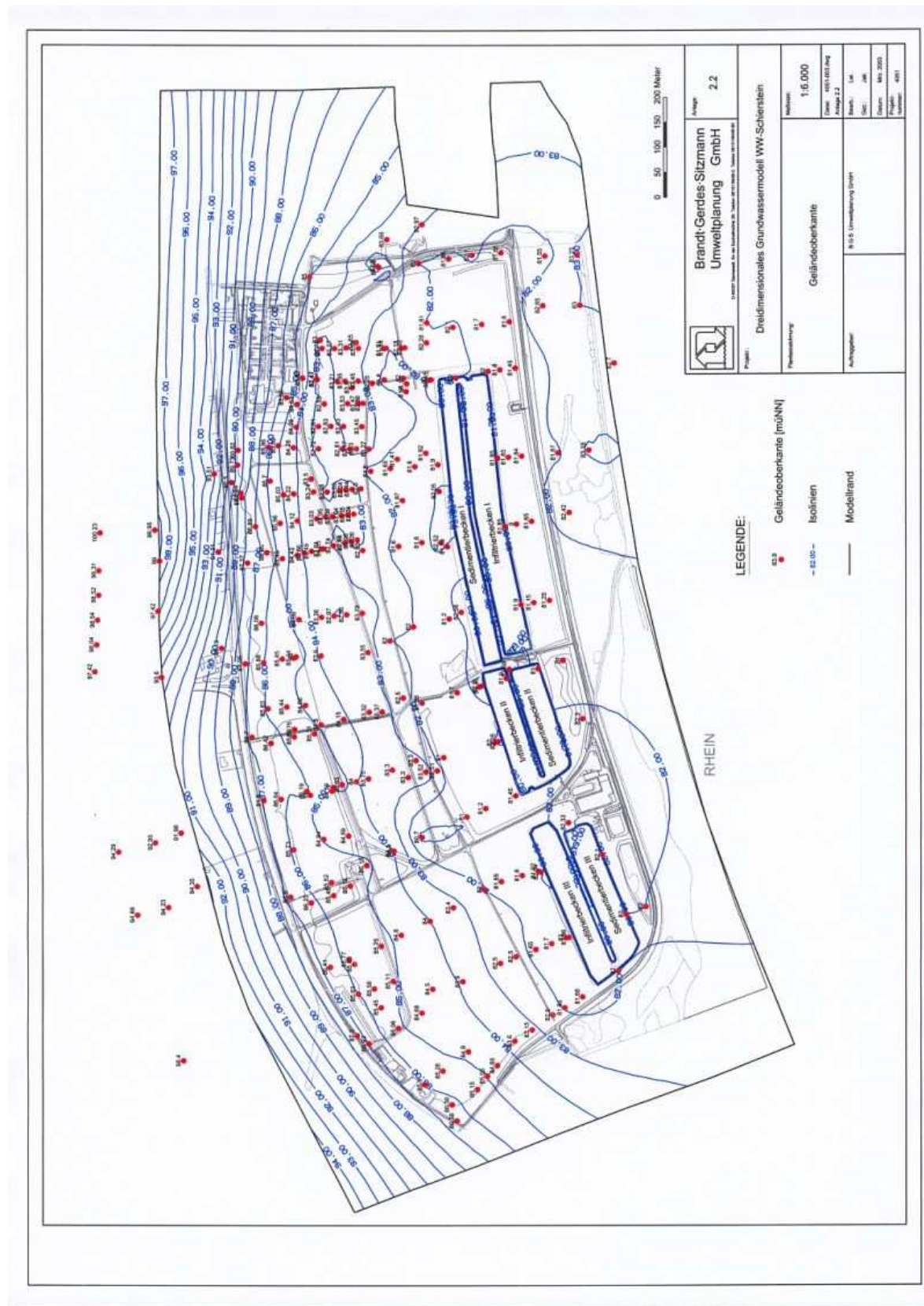
Anhang 9: aktualisierte Ausbauzeichnung von Brunnen 31a, auf Basis des Schichtenverzeichnisses von 1960 und der Kamerabefahrungen 2004, erstellt mit AqualInfo (Wiacek, 2005).....	xiii
Anhang 10: aktualisierte Ausbauzeichnung von Brunnen 51a, auf Basis des Schichtenverzeichnisses von 1959 und der Kamerabefahrungen 2004, erstellt mit AqualInfo (Wiacek, 2005).....	xiv
Anhang 11: aktualisierte Ausbauzeichnung von Brunnen 54a, auf Basis des Schichtenverzeichnisses von 1959 und der Kamerabefahrungen 2004, erstellt mit AqualInfo (Wiacek, 2005).....	xv
Anhang 12: Infrarot-Spektrum der Sedimentprobe aus Brunnen 20a	xvi
Anhang 13: Infrarot-Spektrum der Sedimentprobe aus Brunnen 29a	xvi
Anhang 14: Tabelle zu den Ergebnissen und Umrechnungsschritten der RFA (Wiacek, 2004).....	xvii
Anhang 15: Spektren der RDA-Messung der Sedimentproben der fünf Brunnen (Wiacek, 2004)	xix
Anhang 16: Brunnen 20a	xx
Anhang 17: Brunnen 29a	xxii
Anhang 18: Brunnen 31a	xxiv
Anhang 19: Brunnen 51a	xxvi
Anhang 20: Brunnen 54a	xxviii
Anhang 21: Tabellarische Zusammenstellung der verglichenen Ergebnisse (Wiacek, 2005).....	xxx

Anhang 1: Für den Brunnenbau, -betrieb, Wartung und Pflege relevante Normen und technisches Regelwerk des DVGW

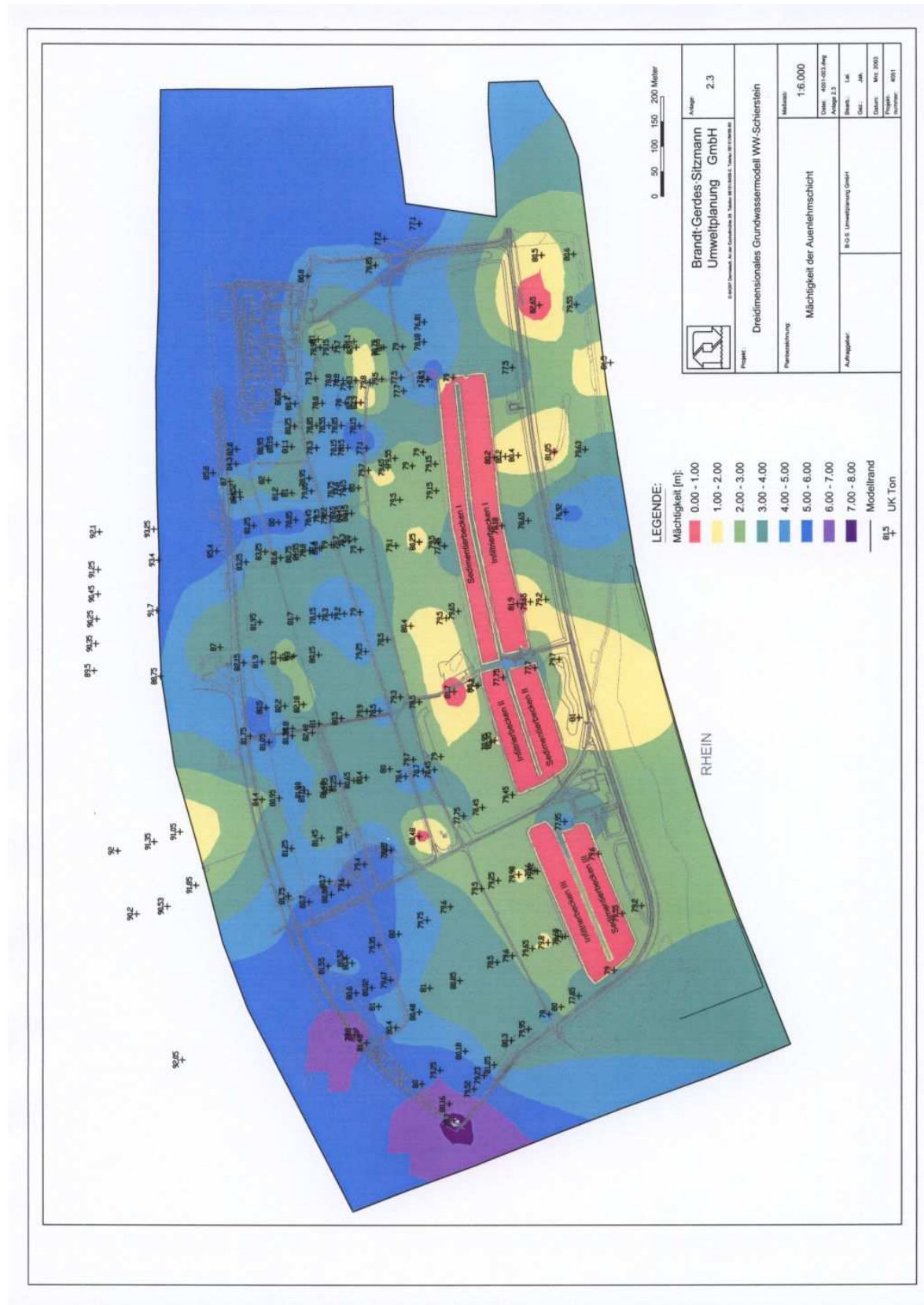
1. DIN 4022-1 (1997): Baugrund und Grundwasser. *In: Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. (2001): DIN Taschenbuch 91: Bohrarbeiten. Brunnenbauarbeiten. Wasserhaltungsarbeiten. VOB/ StLB/ STLK. Berlin (Beuth – Verlag).*
2. DIN 4023 (1984): Baugrund und Wasserbohrungen. *In: Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. (2001): DIN Taschenbuch 91: Bohrarbeiten. Brunnenbauarbeiten. Wasserhaltungsarbeiten. VOB/ StLB/ STLK. Berlin (Beuth – Verlag).*
3. DIN 4049-1 (1992): Hydrologie, Grundbegriffe. *In: Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. (2001): DIN Taschenbuch 211: Wasserwesen, Begriffe. VOB/ StLB/ STLK. Berlin (Beuth – Verlag).*
4. DIN 4924 (1998): Filtersande und Filterkiese. *In: Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg. (2001): DIN Taschenbuch 91: Bohrarbeiten. Brunnenbauarbeiten. Wasserhaltungsarbeiten. VOB/ StLB/ STLK. Berlin (Beuth – Verlag).*
5. DIN 4922 (1978): Stahlfilterrohre für Bohrbrunnen, mit Schlitzbrückenlochung und Laschenverbindung. Teil 2 bis 4. *In: DIN Taschenbuch 91: Bohrarbeiten. Brunnenbauarbeiten. Wasserhaltungsarbeiten. VOB/ StLB/ STLK. Berlin (Beuth – Verlag).*
6. DIN 4925 (1999): Filter- und Vollwandrohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U) für Brunnen. Teil 1 bis 3. *In: DIN Taschenbuch 91: Bohrarbeiten. Brunnenbauarbeiten. Wasserhaltungsarbeiten. VOB/ StLB/ STLK. Berlin (Beuth – Verlag).*
7. DIN 4935 (2002): Wickeldrahtfilterrohre aus nicht rostendem Stahl für Brunnen. Teil 1 bis 3. Berlin (Beuth – Verlag).
8. DVGW (1990): Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern und Brunnen zur Erschließung von Grundwasser: Zusammenstellung von Methoden.– Merkblatt W 110. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.

9. DVGW (1997): Planung, Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen bei der Wassererschließung -Arbeitsblatt W 111. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
10. DVGW (2001): Entnahme von Wasserproben bei der Erschließung, Gewinnung und Überwachung von Grundwasser -Merkblatt W 112. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
11. DVGW (2001): Bestimmung des Schüttkorndurchmessers und hydrogeologischer Parameter aus der Korngrößenverteilung für den Bau von Brunnen -Merkblatt W 113. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
12. DVGW (1989): Gewinnung und Entnahme von Gesteinsproben bei Bohrarbeiten zur Grundwassererschließung -Merkblatt W 114. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
13. DVGW (2001): Bohrungen zur Erkundung, Gewinnung und Beobachtung von Grundwasser -Arbeitsblatt W 115. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
14. DVGW (1998): Verwendung von Spülmittelzusätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten in Grundwasser -Arbeitsblatt W 116. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
15. DVGW (2002): Entwickeln von Brunnen durch Entsanden-Anforderungen, Verfahren, Restsandgehalte. – Arbeitsblatt W 117. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
16. DVGW (2004): Bemessung von Vertikalfilterbrunnen -Arbeitsblatt W 118. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
17. DVGW (2002): Entwickeln von Brunnen durch Entsanden – Anforderungen, Verfahren, Restsandgehalte -Merkblatt W 119. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
18. DVGW (2003): Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen -Arbeitsblatt W 121. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.

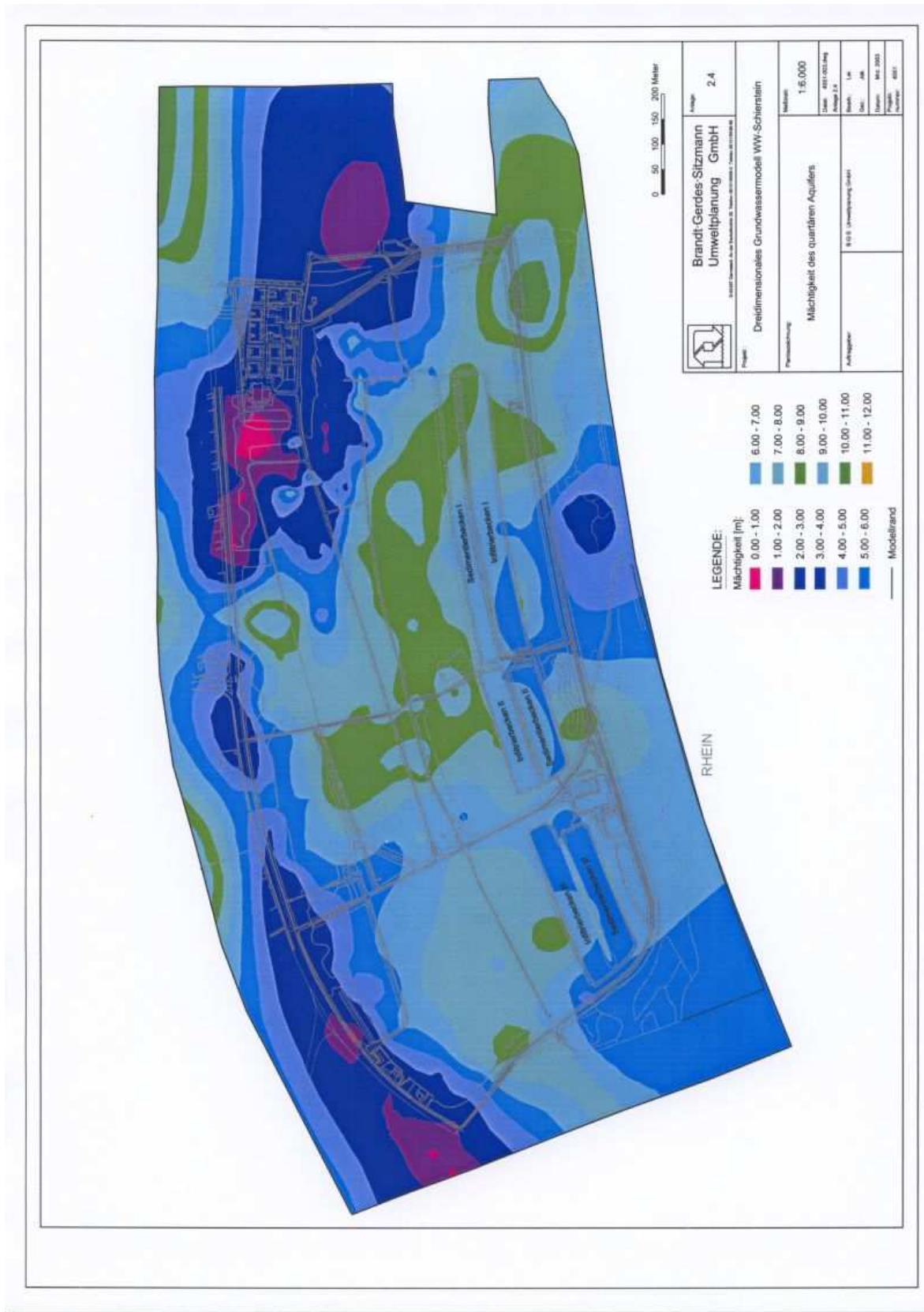
19. DVGW (2001): Bau und Ausbau von Vertikalfilterbrunnen - Arbeitsblatt W 123. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
20. DVGW (2004): Brunnenbewirtschaftung – Betriebsführung von Wasserfassungen -Arbeitsblatt W 125. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
21. DVGW (2001): Brunnenregenerierung.- Merkblatt W 130. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.
22. DVGW (1998): Sanierung und Rückbau von Bohrungen, Grundwassermessstellen und Brunnen -Merkblatt W 135. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.



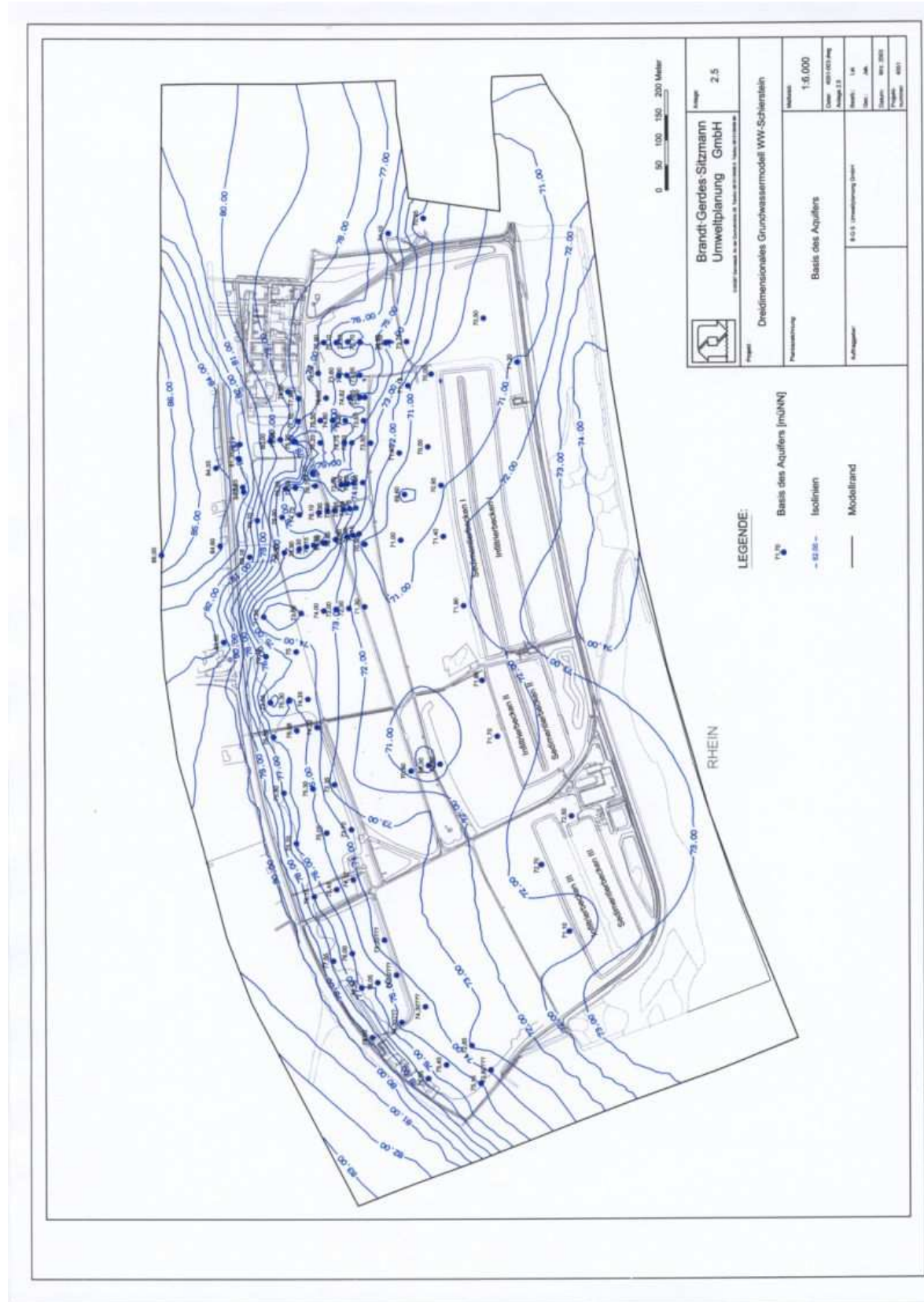
Anhang 2: Geländeoberkante aus dem dreidimensionalen Grundwassermodell des Wasserwerks Schierstein, mit freundlicher Genehmigung der Brandt • Gerdes • Sitzmann Umweltplanung GmbH [BGS Umweltplanung GmbH, 2003]



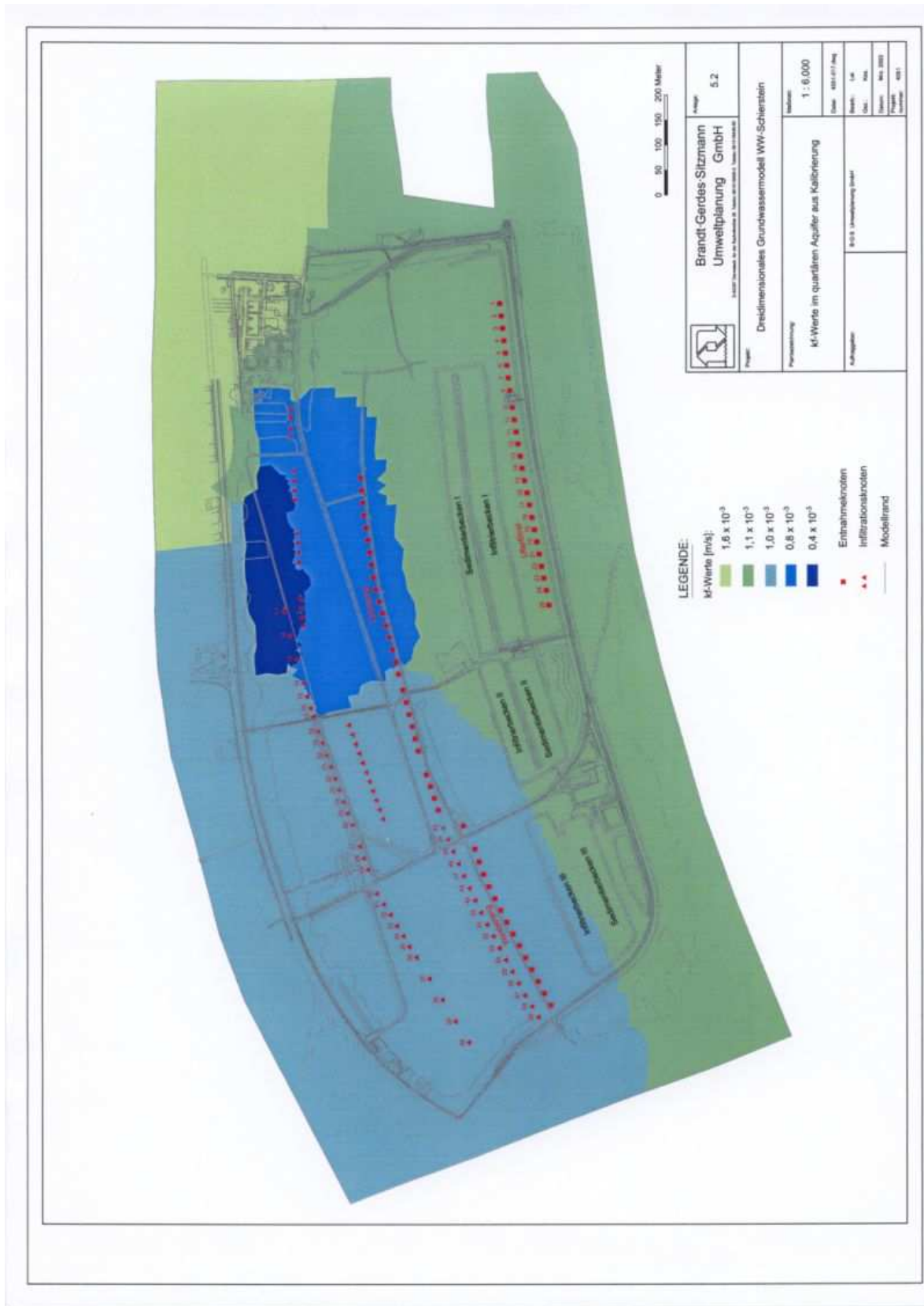
Anhang 3: Mächtigkeit der Auenlehmschicht aus dem dreidimensionalen Grundwassermodell des Wasserwerks Schierstein, mit freundlicher Genehmigung der Brandt • Gerdes • Sitzmann Umweltplanung GmbH [BGS Umweltplanung GmbH, 2003]



Anhang 4: Mächtigkeit des quartären Aquifers aus dem dreidimensionalen Grundwassermodell des Wasserwerks Schierstein, mit freundlicher Genehmigung der Brandt • Gerdes • Sitzmann Umweltplanung GmbH [BGS Umweltplanung GmbH, 2003]

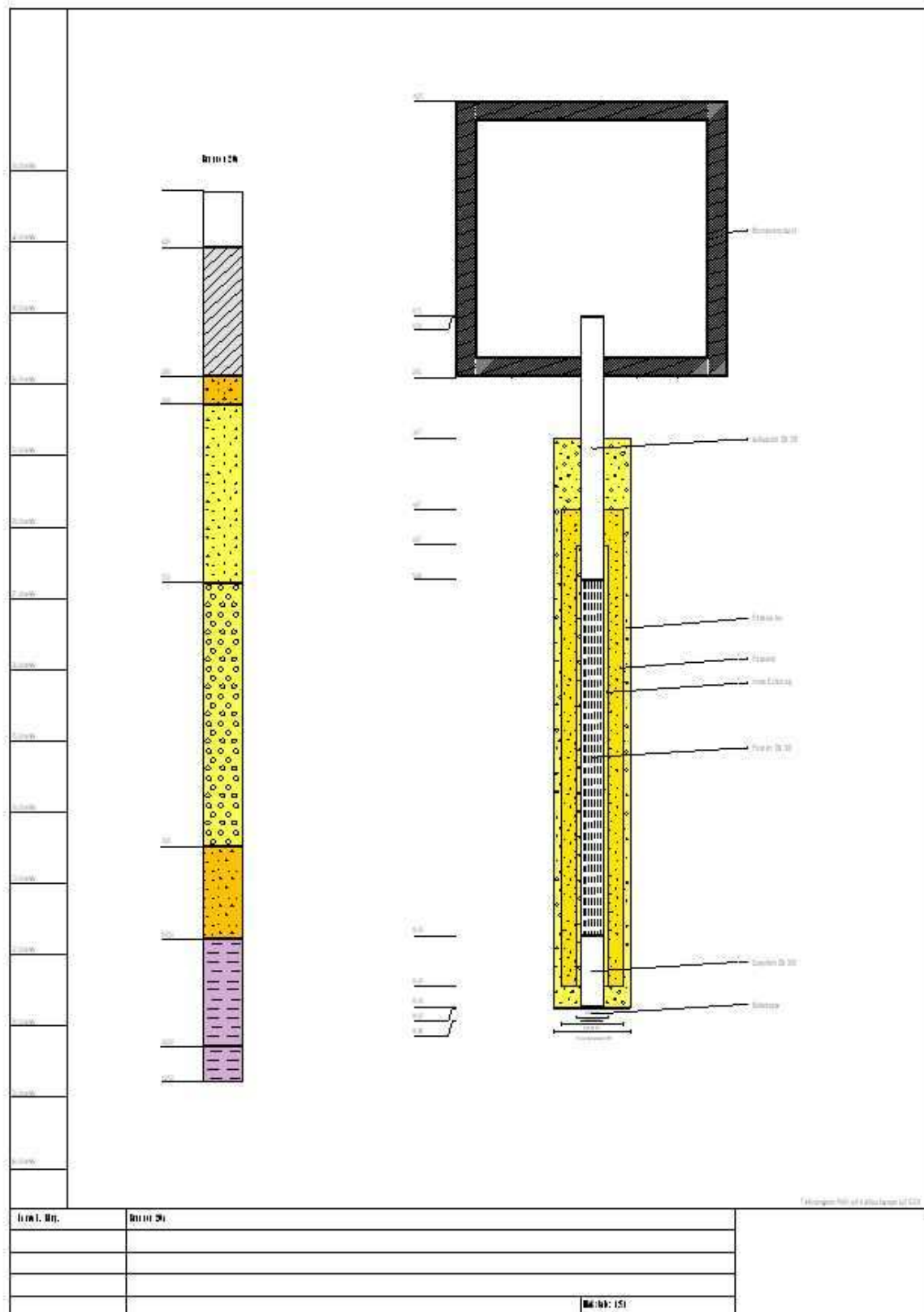


Anhang 5: Basis des Aquifers aus dem dreidimensionalen Grundwassermodell des Wasserwerks Schierstein, mit freundlicher Genehmigung der Brandt • Gerdes • Sitzmann Umweltplanung GmbH [BGS Umweltplanung GmbH, 2003]

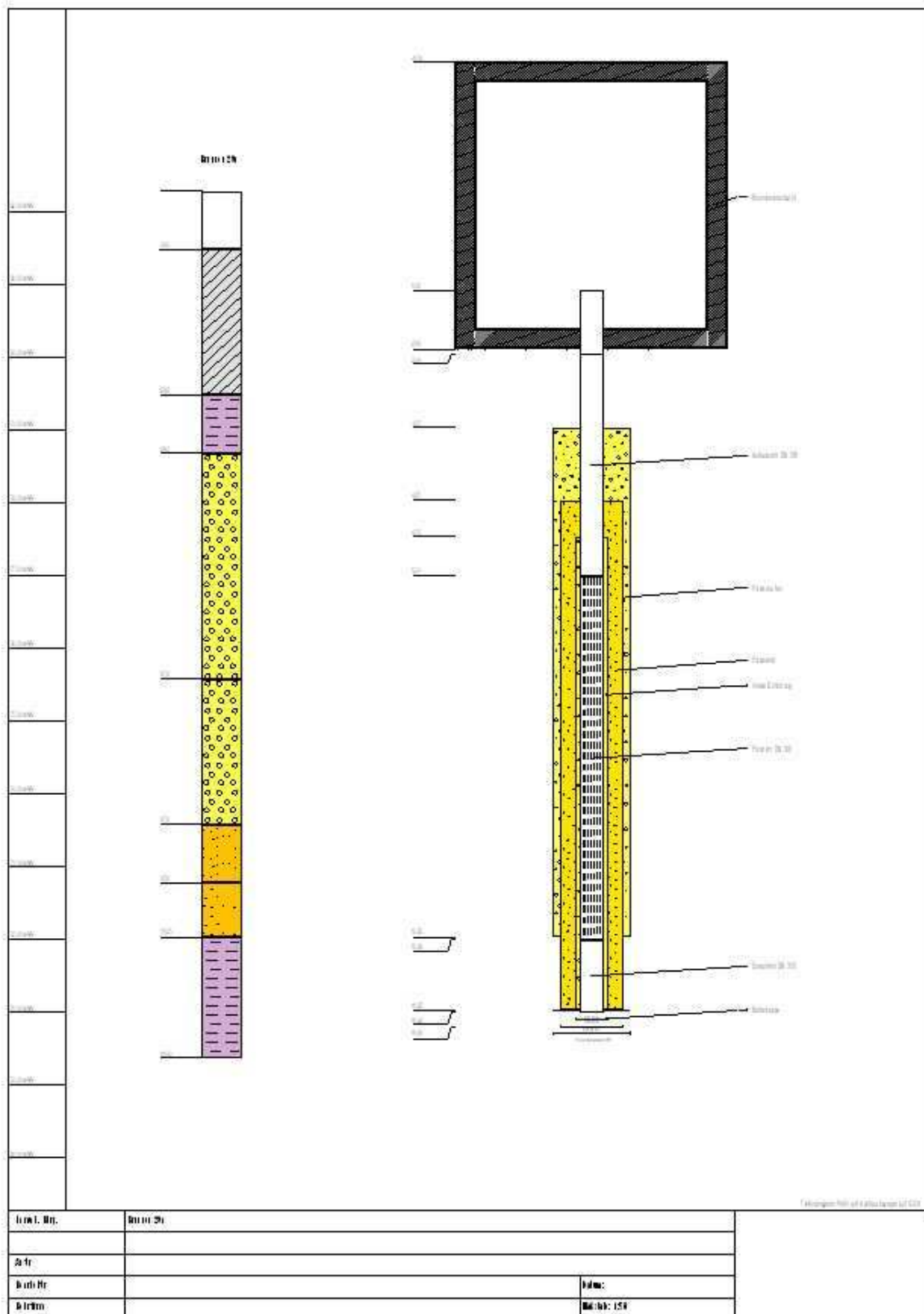


Anhang 6: kf-Werte im quartären Aquifer aus dem dreidimensionalen Grundwassermodell des Wasserwerks Schierstein, mit freundlicher Genehmigung der Brandt • Gerdes • Sitzmann Umweltplanung GmbH [BGS Umweltplanung GmbH, 2003]

- Anhang -

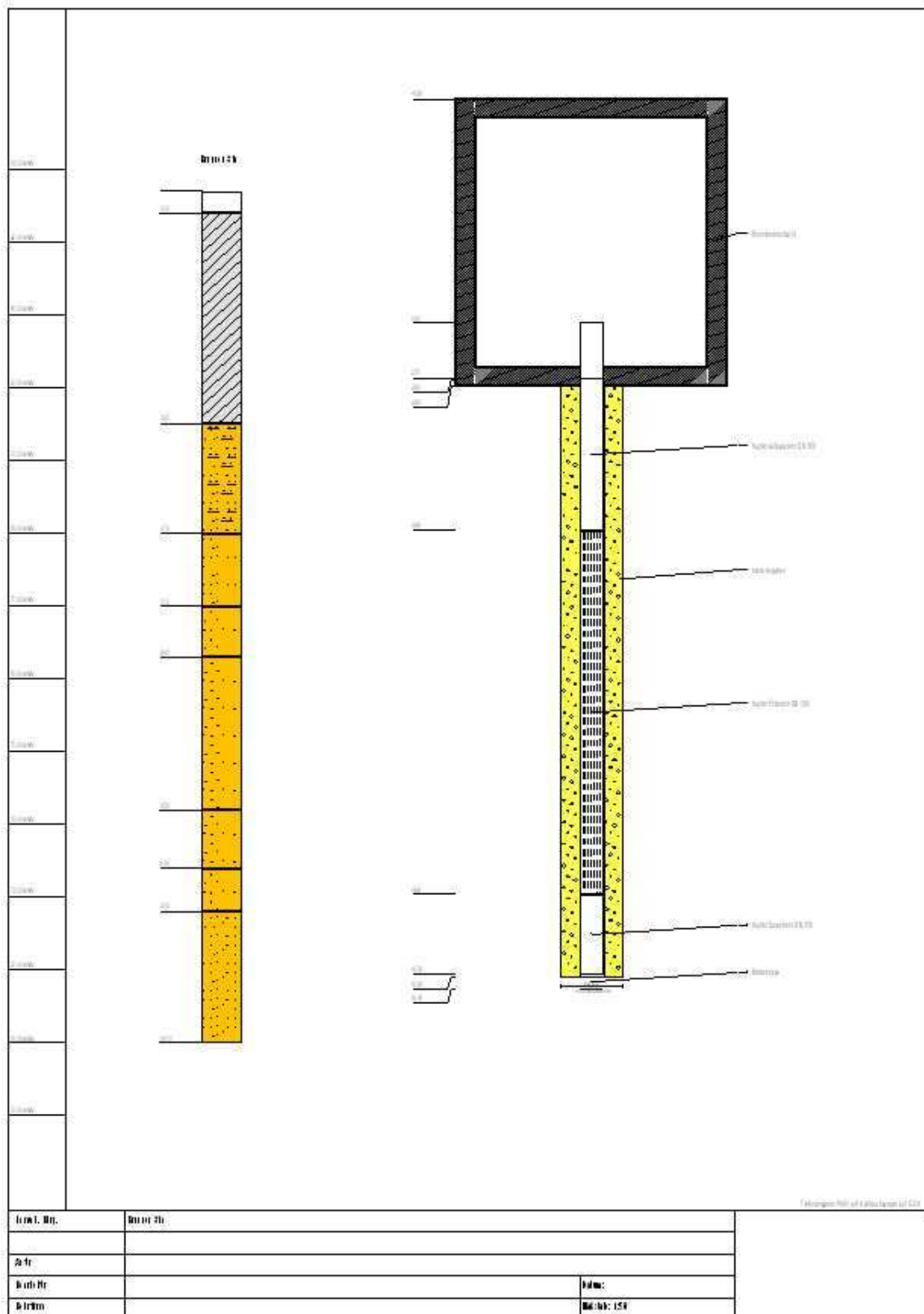


Anhang 7: aktualisierte Ausbauezeichnung von Brunnen 20a, auf Basis der Abrechnungszeichnung von 1950 und der Kamerabefahrungen 2004, erstellt mit AqualInfo (Wiacek, 2005)

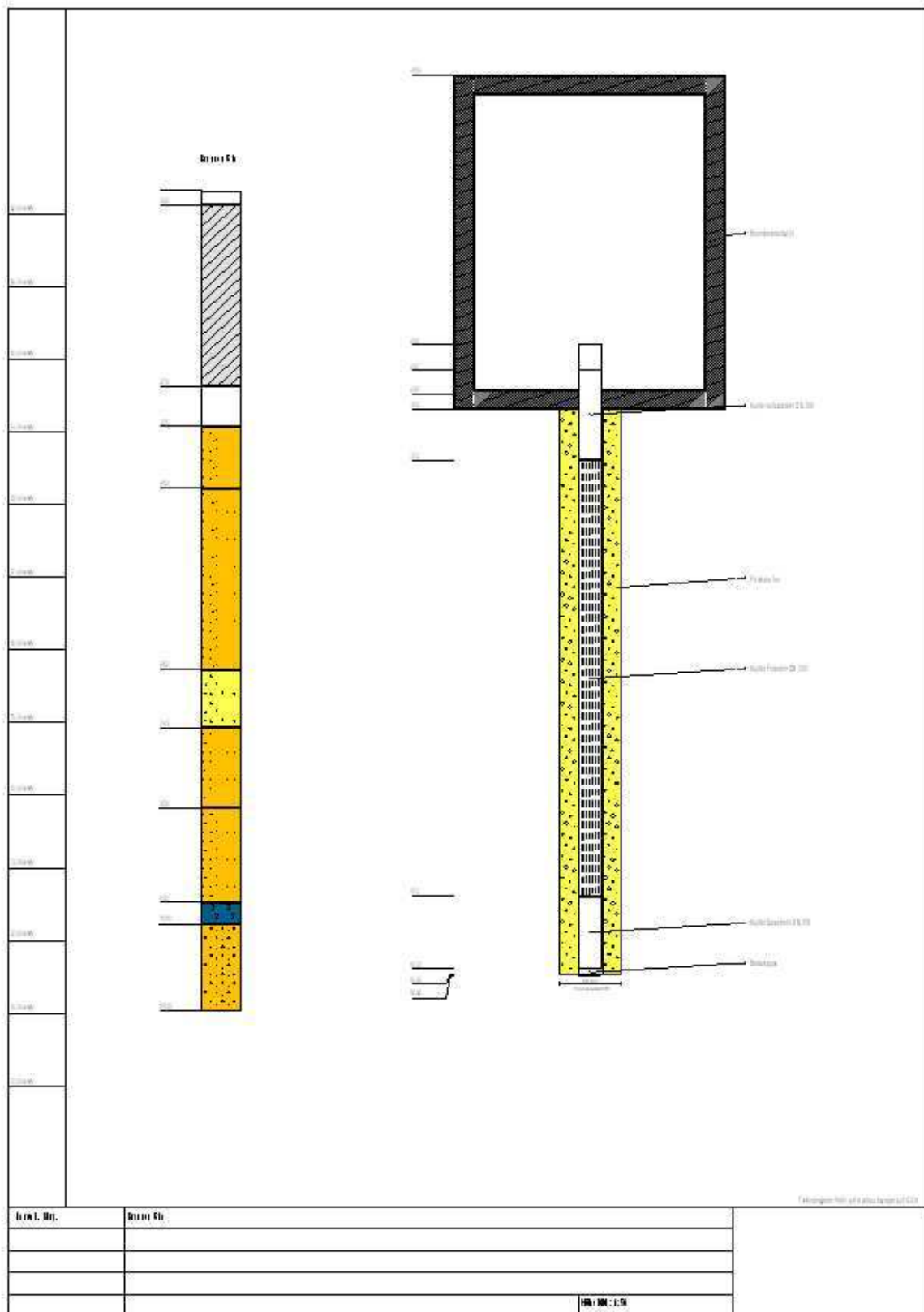


Anhang 8: aktualisierte Ausbauezeichnung von Brunnen 29a, auf Basis der Abrechnungszeichnung von 1950 und der Kamerabefahrungen 2004, erstellt mit AqualInfo (Wiacek, 2005)

- Anhang -

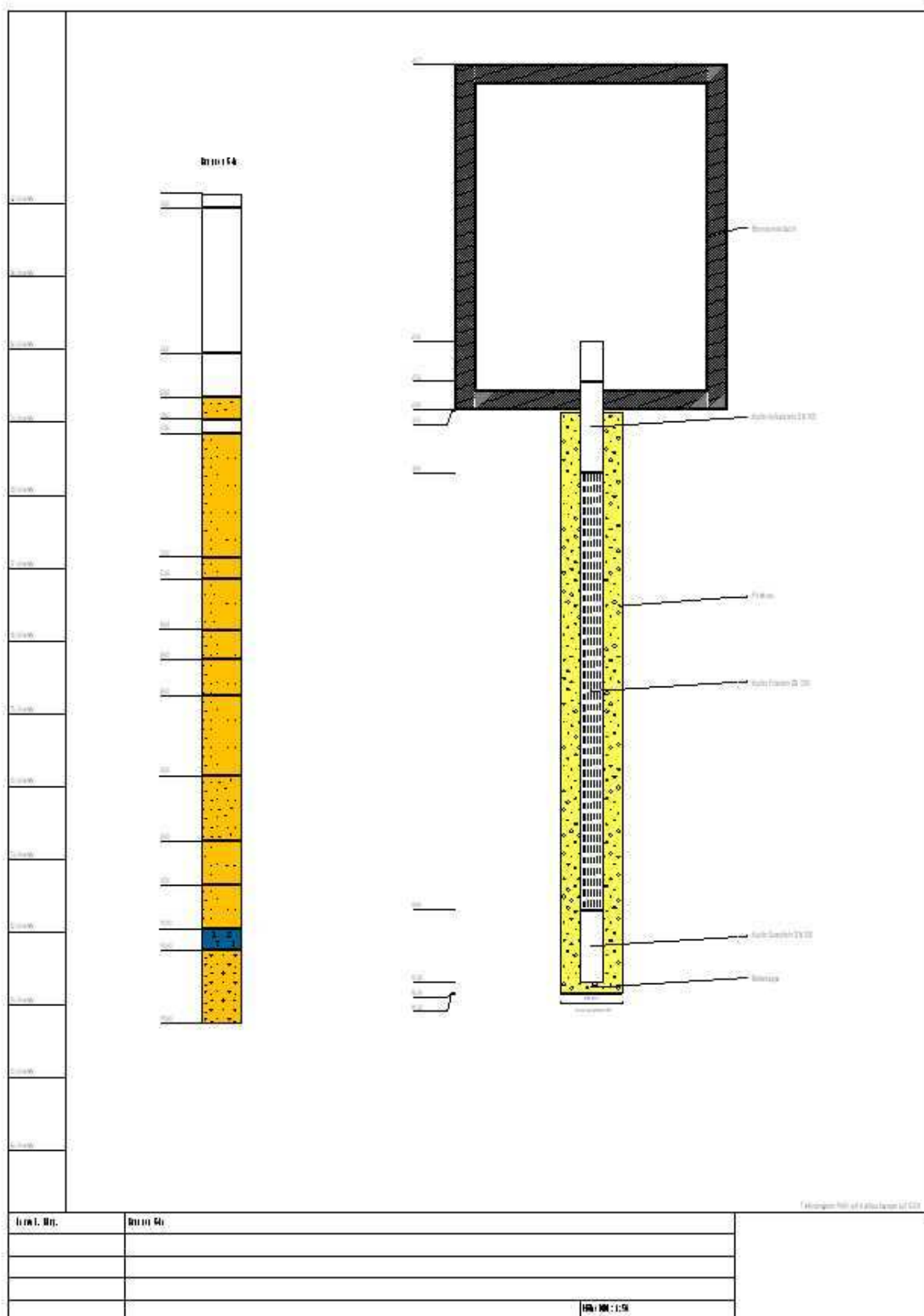


Anhang 9: aktualisierte Ausbauezeichnung von Brunnen 31a, auf Basis des Schichtenverzeichnisses von 1960 und der Kamerabefahrungen 2004, erstellt mit AqualInfo (Wiacek, 2005)

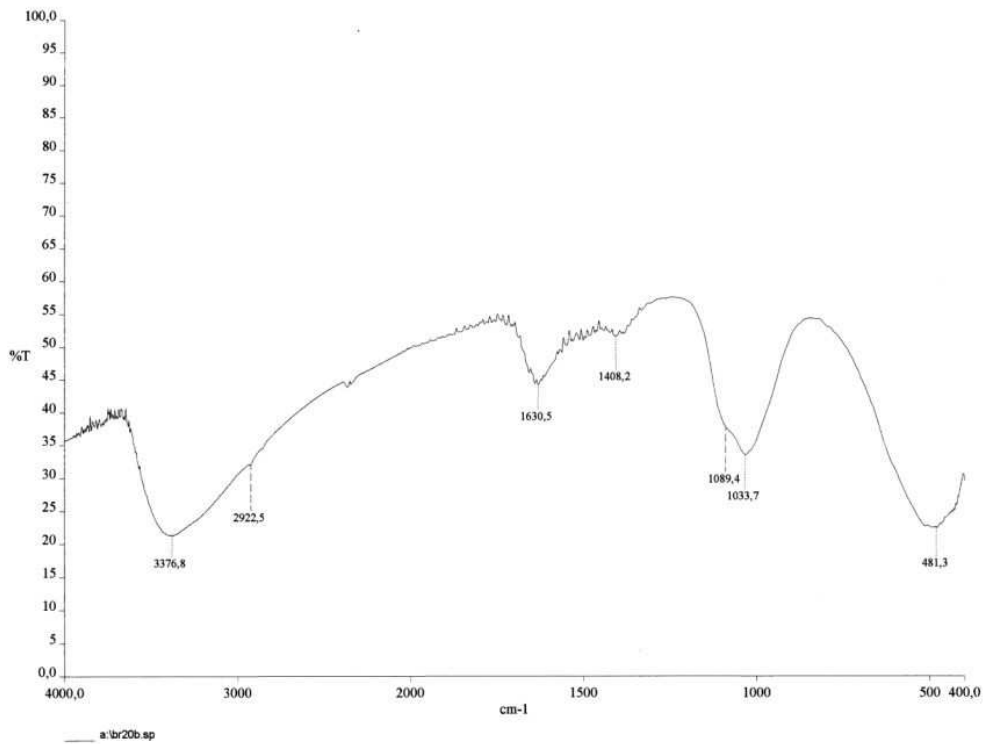


Anhang 10: aktualisierte Ausbauezeichnung von Brunnen 51a, auf Basis des Schichtenverzeichnisses von 1959 und der Kamerabefahrungen 2004, erstellt mit AqualInfo (Wiacek, 2005)

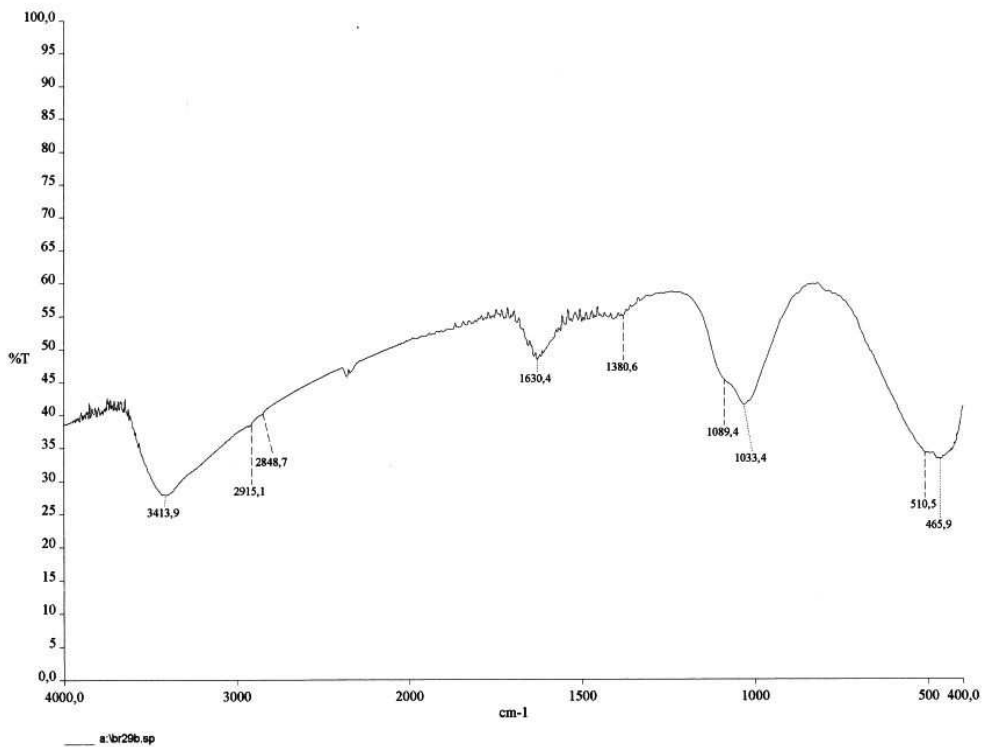
- Anhang -



Anhang 11: aktualisierte Ausbauezeichnung von Brunnen 54a, auf Basis des Schichtenverzeichnisses von 1959 und der Kamerabefahrungen 2004, erstellt mit AqualInfo (Wiacek, 2005)



Anhang 12: Infrarot-Spektrum der Sedimentprobe aus Brunnen 20a



Anhang 13: Infrarot-Spektrum der Sedimentprobe aus Brunnen 29a


Anhang 14: Tabelle zu den Ergebnissen und Umrechnungsschritten der RFA (Wiacek, 2004)

Analysenergebnisse der RFA, berechnet auf [Gramm in Probe]								
		20a IR	20a	29a	29a IR	31a	51a	54a
SiO ₂	[g]	0,0450	0,0560	0,0990	0,1100	0,0699	0,2197	0,1381
TiO ₂	[g]	0,0000	0,0000	0,0006	0,0006	0,0002	0,0003	0,0010
Al ₂ O ₃	[g]	0,0134	0,0119	0,0202	0,0201	0,0147	0,0256	0,0254
Fe ₂ O ₃	[g]	0,2691	0,2628	0,2098	0,2027	0,2680	0,2139	0,2778
MnO	[g]	0,2502	0,2445	0,2496	0,2486	0,1240	0,0627	0,1051
MgO	[g]	0,0062	0,0074	0,0107	0,0106	0,0061	0,0048	0,0067
CaO	[g]	0,0706	0,0696	0,0733	0,0721	0,0591	0,0539	0,0518
Na ₂ O	[g]	0,0000	0,0004	0,0012	0,0013	0,0000	0,0021	0,0002
K ₂ O	[g]	0,0029	0,0028	0,0050	0,0052	0,0037	0,0085	0,0074
P ₂ O ₅	[g]	0,0794	0,0781	0,0687	0,0665	0,0955	0,0912	0,0614
Cr ₂ O ₃	[g]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001
NiO	[g]	0,0019	0,0016	0,0014	0,0013	0,0010	0,0000	0,0007
Gesamt [g]		0,7387	0,7351	0,7396	0,7389	0,6423	0,6827	0,6757
Kontrolle		7,6824	8,0011	7,9986	8,0011	7,9991	7,3668	7,3257
Sum	(%)	96,1530	91,8740	92,4610	92,3480	80,2910	92,6750	92,2430

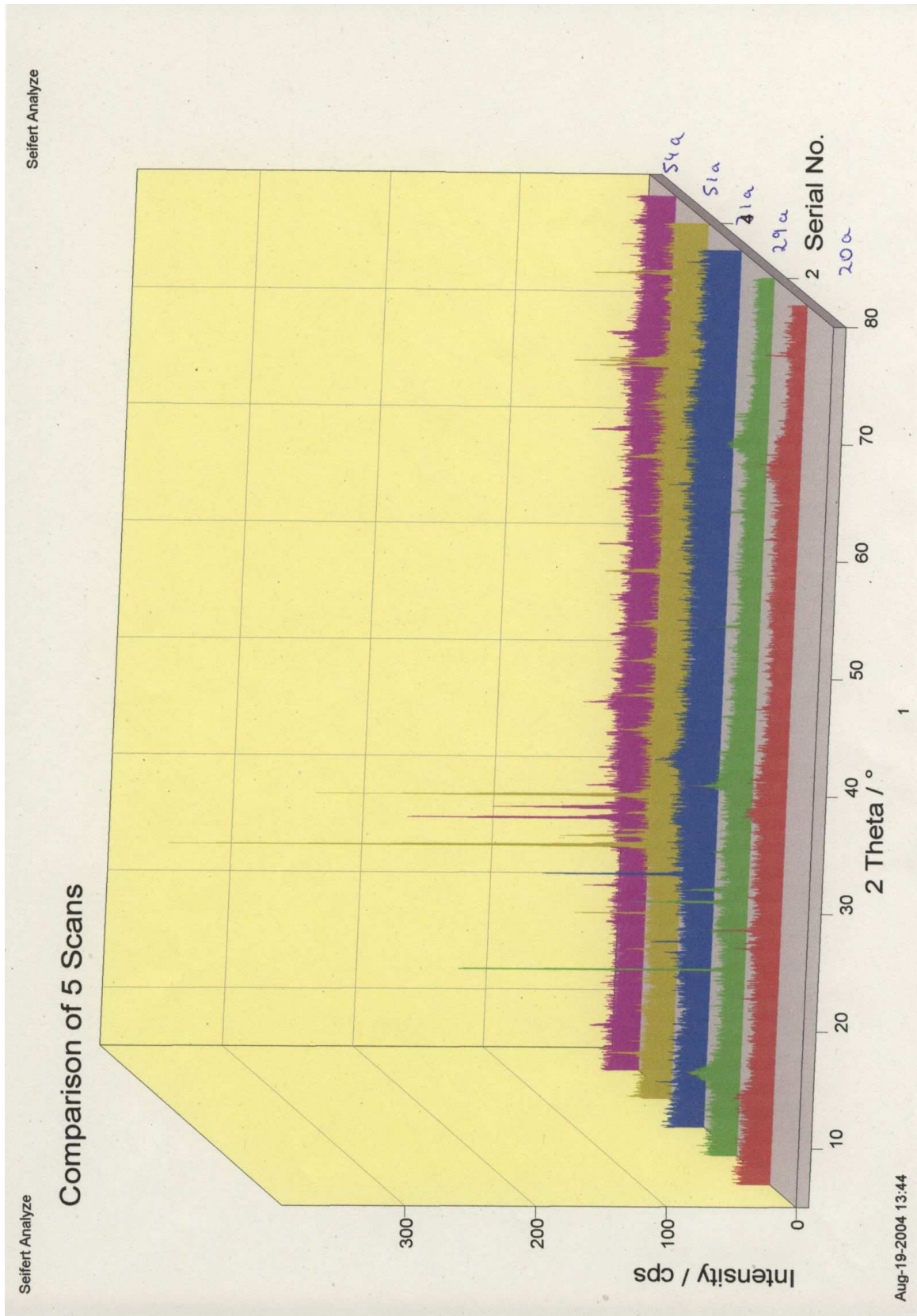
Umrechnungsfaktoren Oxid auf Element			
	M Oxid	Element	Faktor
SiO ₂	60,07	28,09	0,47
TiO ₂	79,86	47,88	0,60
Al ₂ O ₃	101,93	53,96	0,53
Fe ₂ O ₃	159,67	111,70	0,70
MnO	70,93	54,94	0,77
MgO	40,30	24,31	0,60
CaO	56,07	40,08	0,71
Na ₂ O	61,97	45,98	0,74
K ₂ O	94,19	78,20	0,83
P ₂ O ₅	141,89	61,94	0,44
Cr ₂ O ₃	151,96	103,99	0,68
NiO	74,68	58,69	0,79

Analysenergebnisse der RFA berechnet auf [Gramm Element in Probe]								
		20a IR	20a	29a	29a IR	31a	51a	54a
Si	[g]	0,0210	0,0262	0,0463	0,0514	0,0327	0,1027	0,0646
Ti	[g]	n.n	n.n	0,0003	0,0003	0,0001	0,0002	0,0006
Al	[g]	0,0071	0,0063	0,0107	0,0106	0,0078	0,0136	0,0135
Fe	[g]	0,1883	0,1838	0,1468	0,1418	0,1875	0,1497	0,1943
Mn	[g]	0,1938	0,1894	0,1933	0,1925	0,0960	0,0486	0,0814
Mg	[g]	0,0038	0,0045	0,0065	0,0064	0,0037	0,0029	0,0041
Ca	[g]	0,0504	0,0498	0,0524	0,0515	0,0423	0,0385	0,0371
Na	[g]	n.n	0,0003	0,0009	0,0009	n.n	0,0015	0,0001
K	[g]	0,0024	0,0023	0,0042	0,0043	0,0031	0,0070	0,0061
P	[g]	0,0346	0,0341	0,0300	0,0290	0,0417	0,0398	0,0268
Cr	[g]	n.n	n.n	n.n	n.n	n.n	n.n	0,0001
Ni	[g]	0,0015	0,0012	0,0011	0,0010	0,0008	n.n	0,0006
Gesamt [g]		0,5029	0,4979	0,4924	0,4900	0,4156	0,4045	0,4292

Fortsetzung

in 0,8 g		
im kg		* 1250

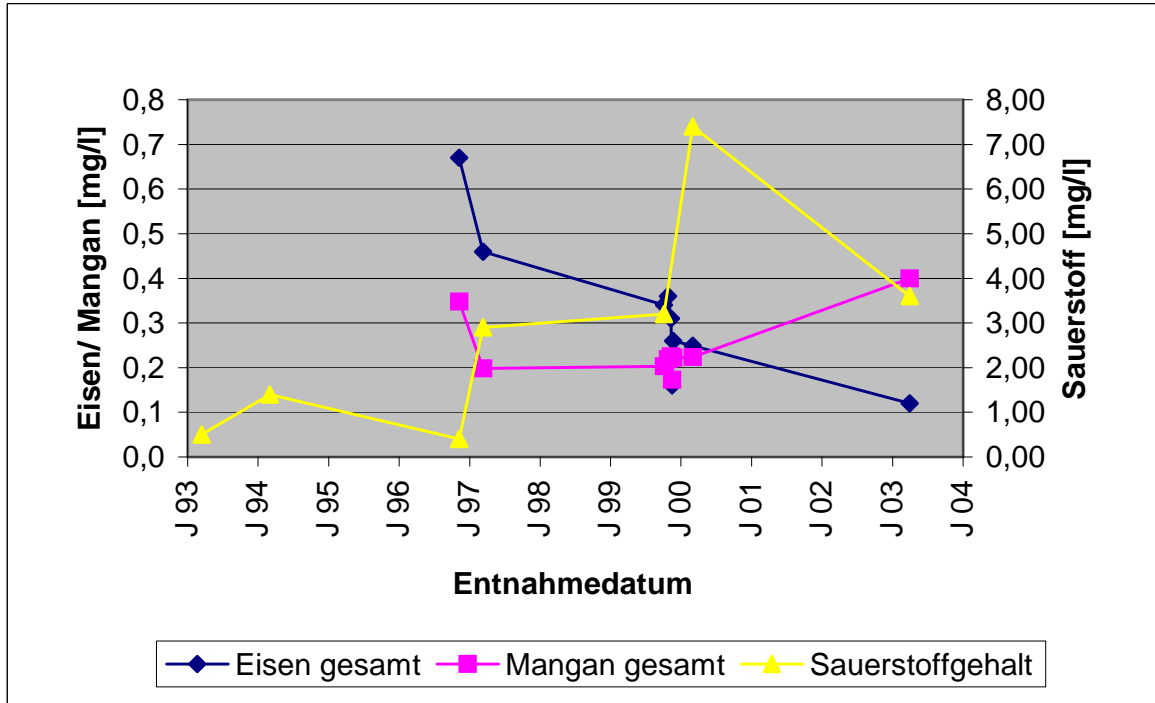
Ergebnis RFA in [g/kg TS] (nach GV)		20a IR	20a	29a	29a IR	31a	51a	54a
Si	[g/kg]	26,2803	32,7335	57,8447	64,2979	40,8701	128,4088	80,7114
Al	[g/kg]	8,8936	7,8878	13,3934	13,2875	9,7406	16,9403	16,8344
Fe	[g/kg]	235,3346	229,8080	183,4966	177,2705	234,3552	187,0644	242,8900
Mn	[g/kg]	242,2844	236,7075	241,6647	240,6578	120,0578	60,7260	101,7780
Mg	[g/kg]	4,7052	5,6100	8,0832	7,9626	4,5845	3,6194	5,0671
Ca	[g/kg]	63,0472	62,1894	65,4776	64,4054	52,8253	48,1789	46,3204
Na	[g/kg]		0,3710	1,1130	1,1872		1,9291	0,1484
K	[g/kg]	2,9889	2,9058	5,2305	5,3965	3,8191	8,8005	7,6382
P	[g/kg]	43,3043	42,6058	37,4984	36,2761	52,1223	49,7650	33,5259
Ti	[g/kg]			0,4197	0,4197	0,1199	0,2398	0,7195
Cr	[g/kg]							0,1109
Ni	[g/kg]	1,8453	1,5285	1,3384	1,2912	0,9776		0,7230
	gesamt	628,6837	622,3475	615,5602	612,4523	519,4725	505,6722	536,4671
Cu	[g/kg]	2,306	0,972	0,739	0,671	118,598	27,671	62,656



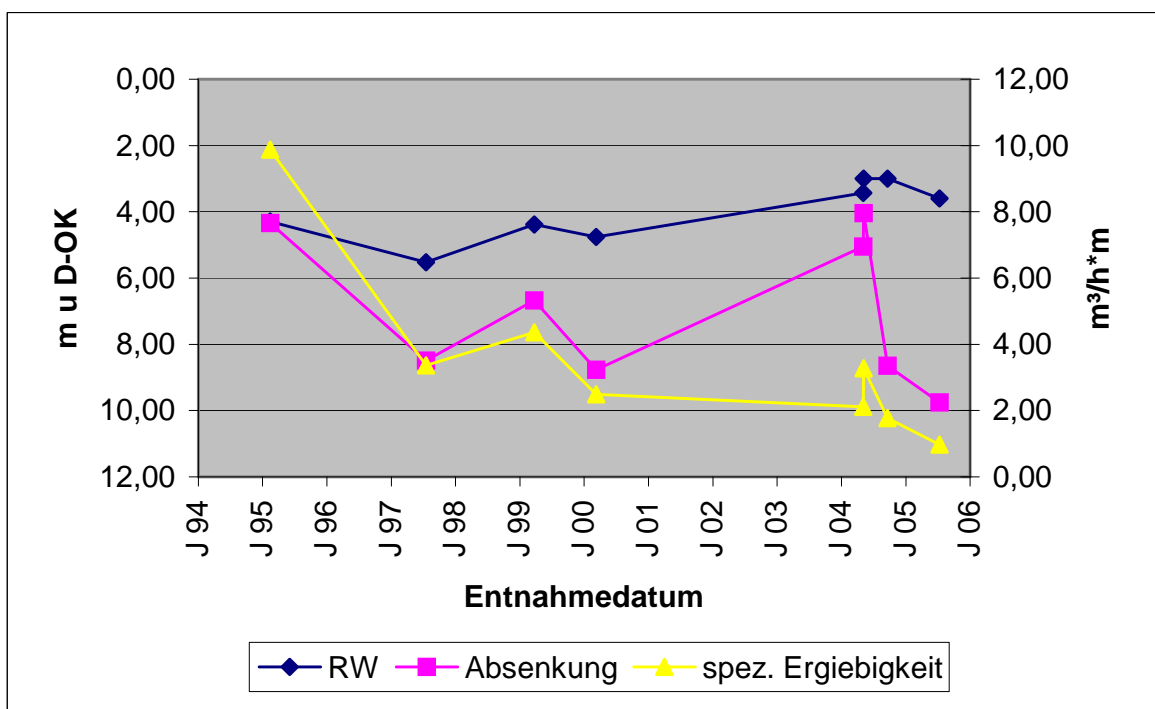
Anhang 15: Spektren der RDA-Messung der Sedimentproben der fünf Brunnen (Wiacek, 2004)

Anhang 16: Brunnen 20a

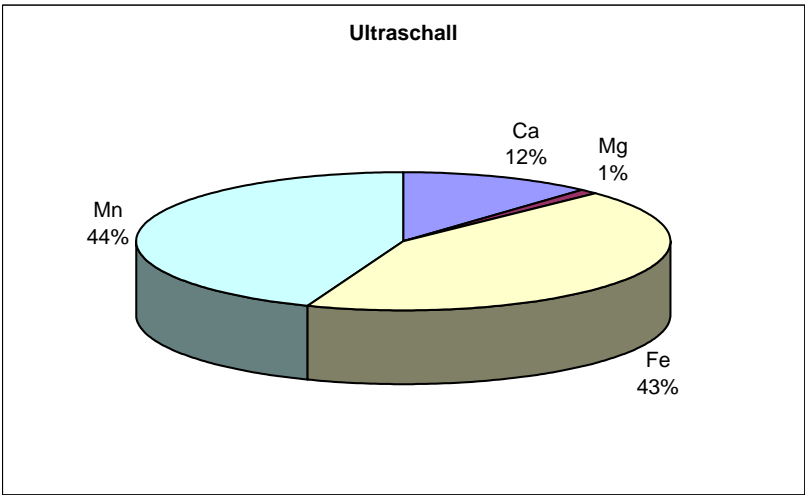
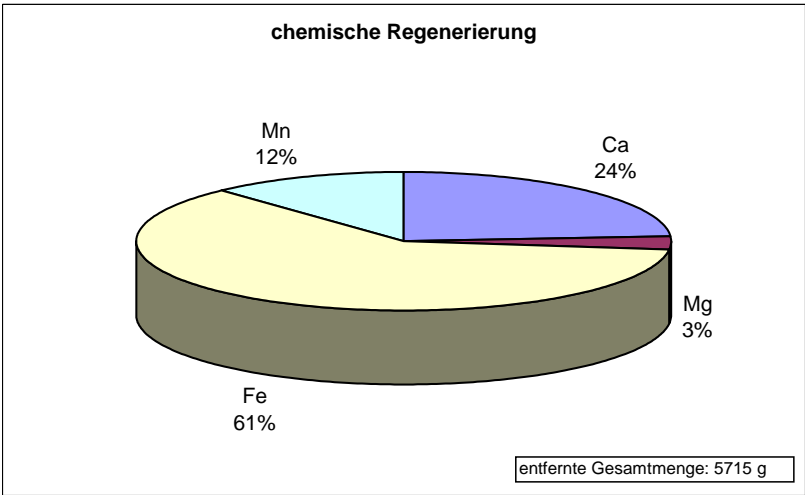
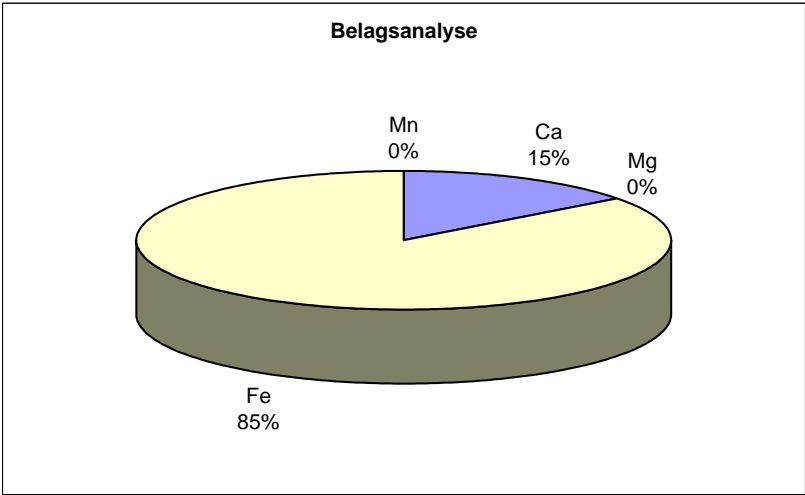
Sauerstoffgehalt versus Eisen- und Mangangehalt (Wiacek, 2005):



Pumpversuchsergebnisse 1995 bis 2005 (Wiacek, 2005):

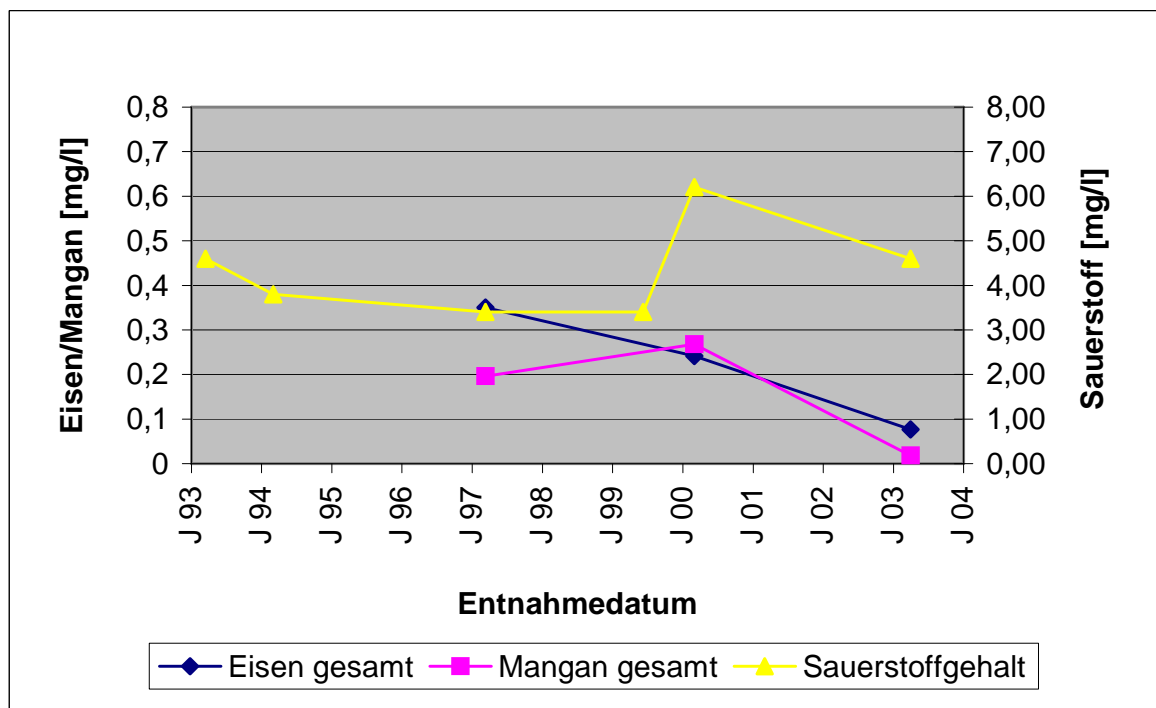


- Anhang -

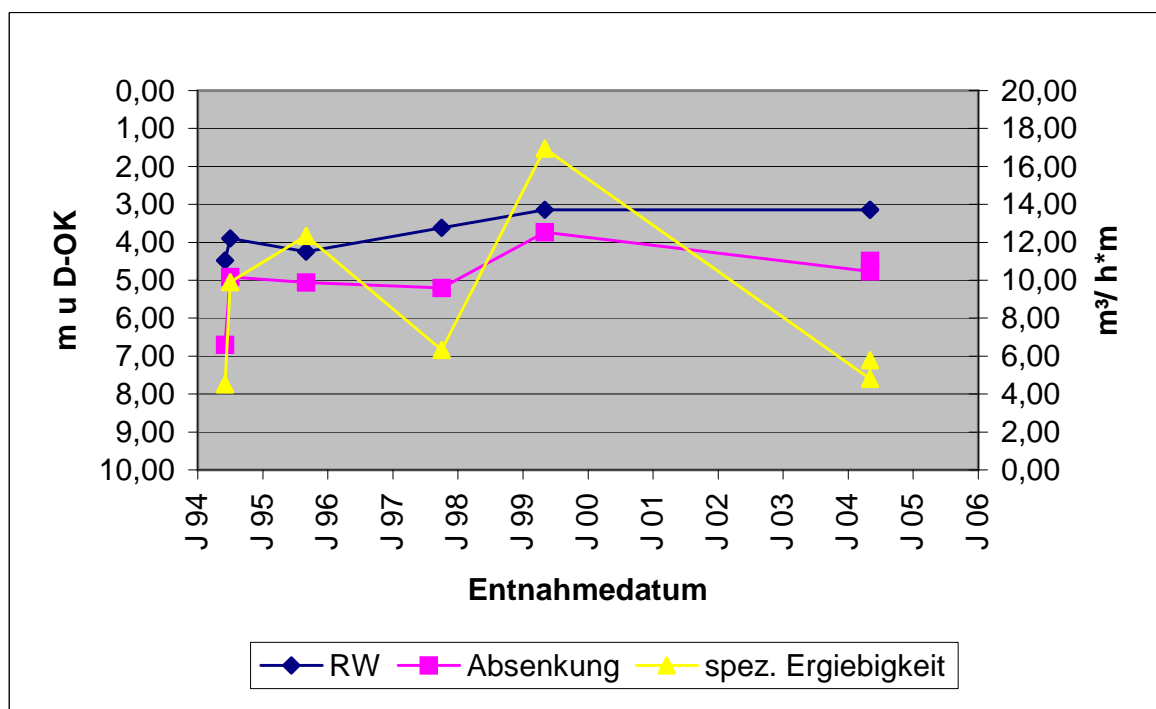


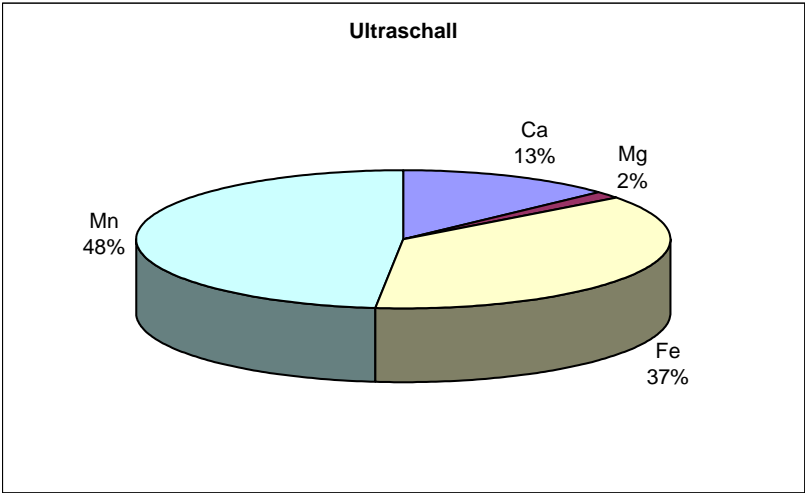
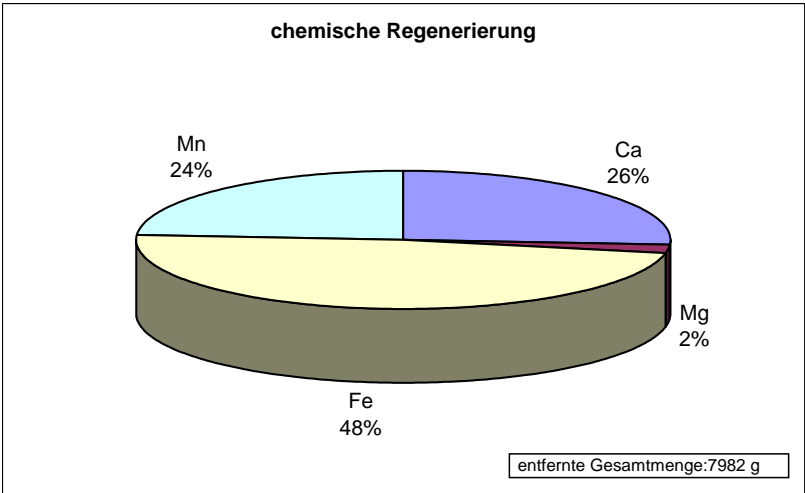
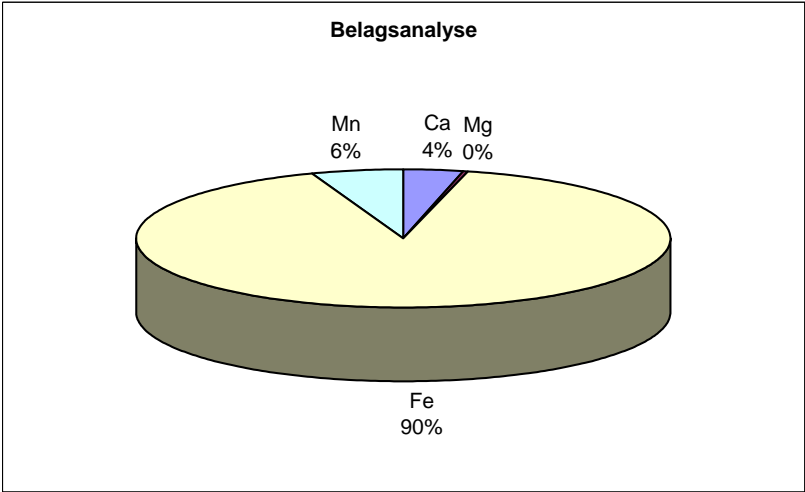
Anhang 17: Brunnen 29a

Sauerstoffgehalt versus Eisen- und Mangangehalt (Wiacek, 2005):



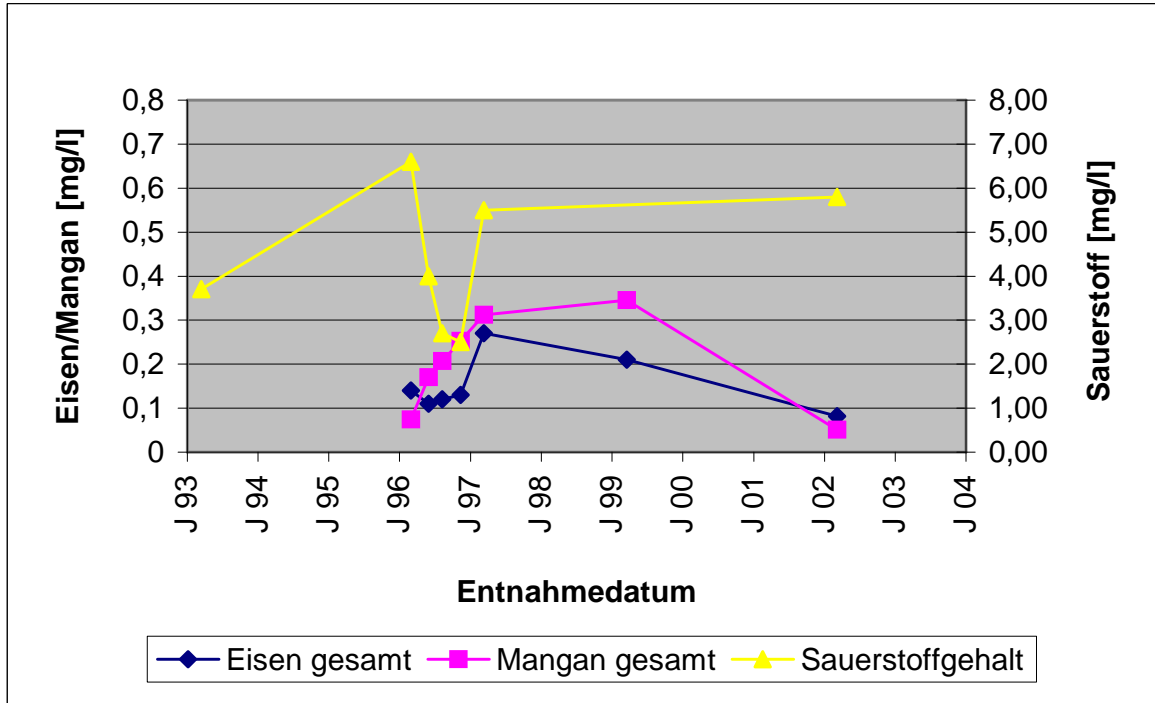
Pumpversuchsergebnisse 1995 bis 2004 (Wiacek, 2005):



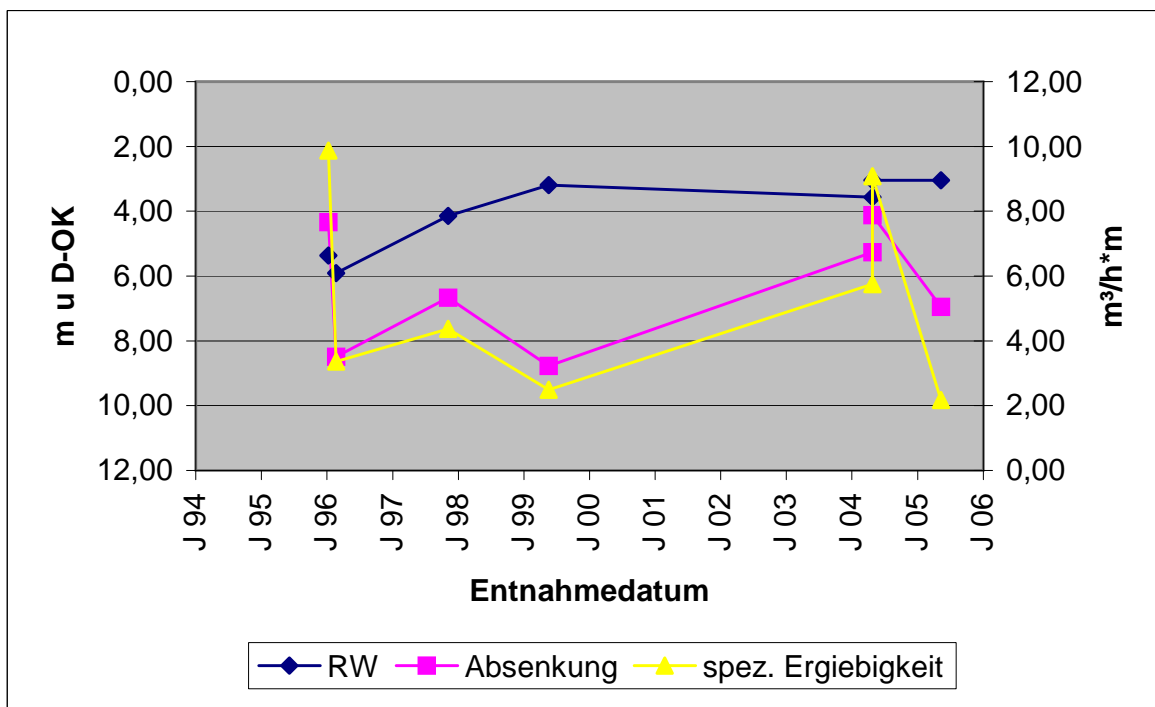


Anhang 18: Brunnen 31a

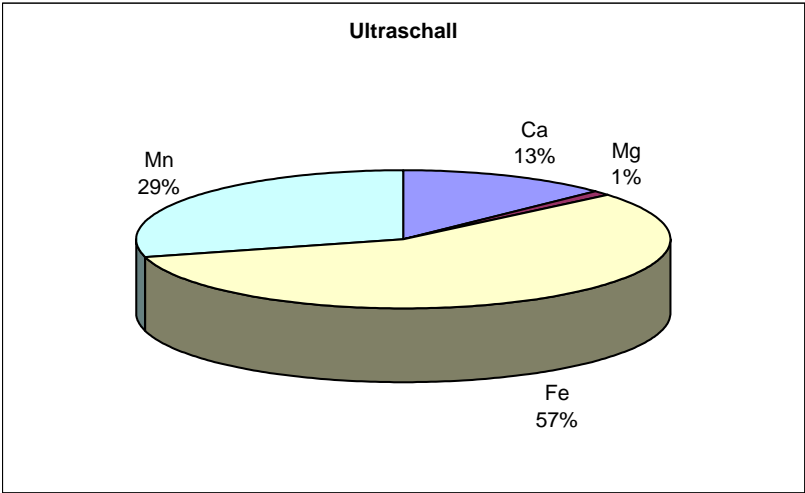
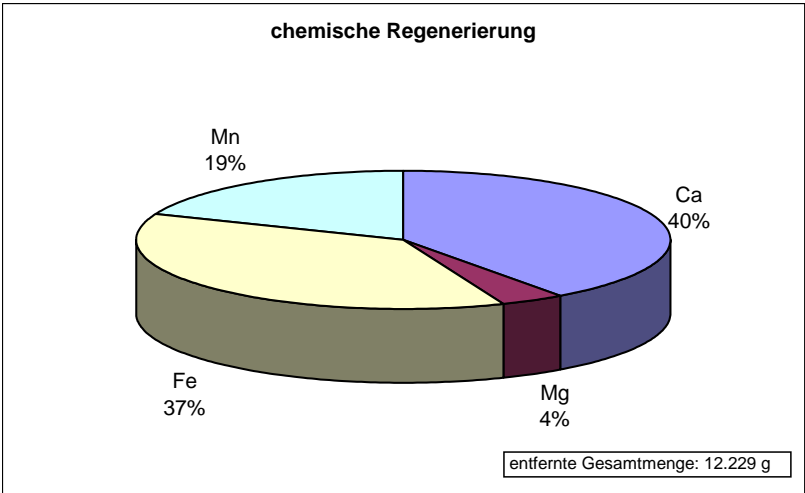
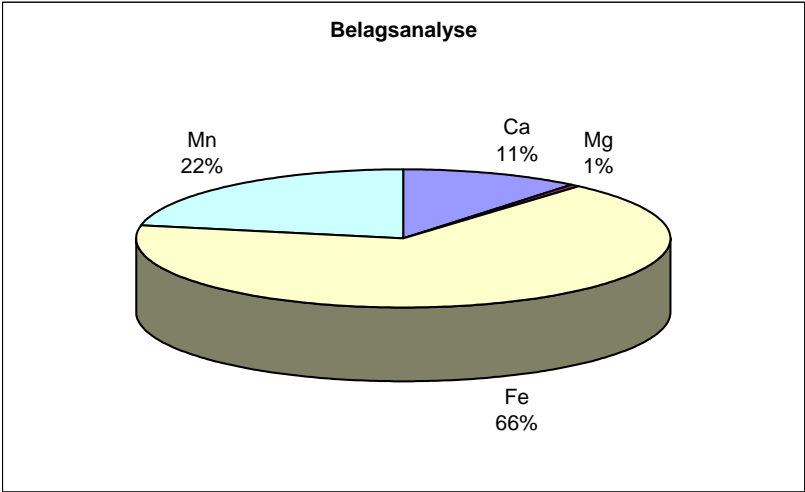
Sauerstoffgehalt versus Eisen- und Mangangehalt (Wiacek, 2005):



Pumpversuchsergebnisse 1995 bis 2005 (Wiacek, 2005):

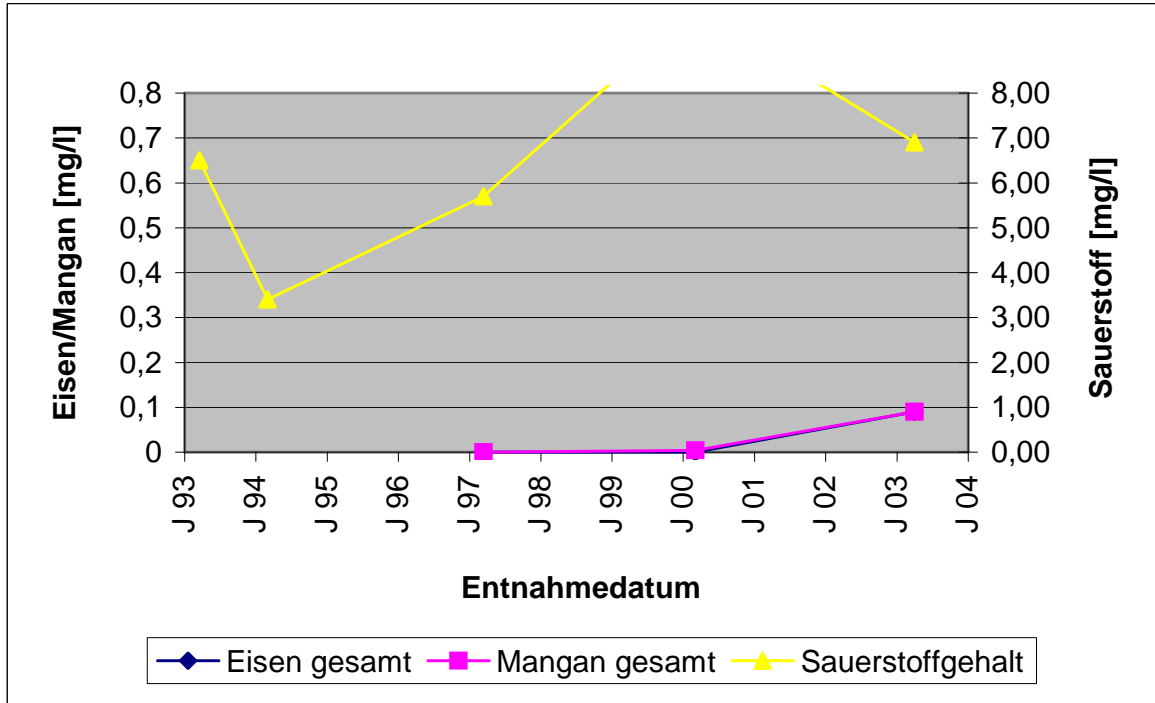


- Anhang -

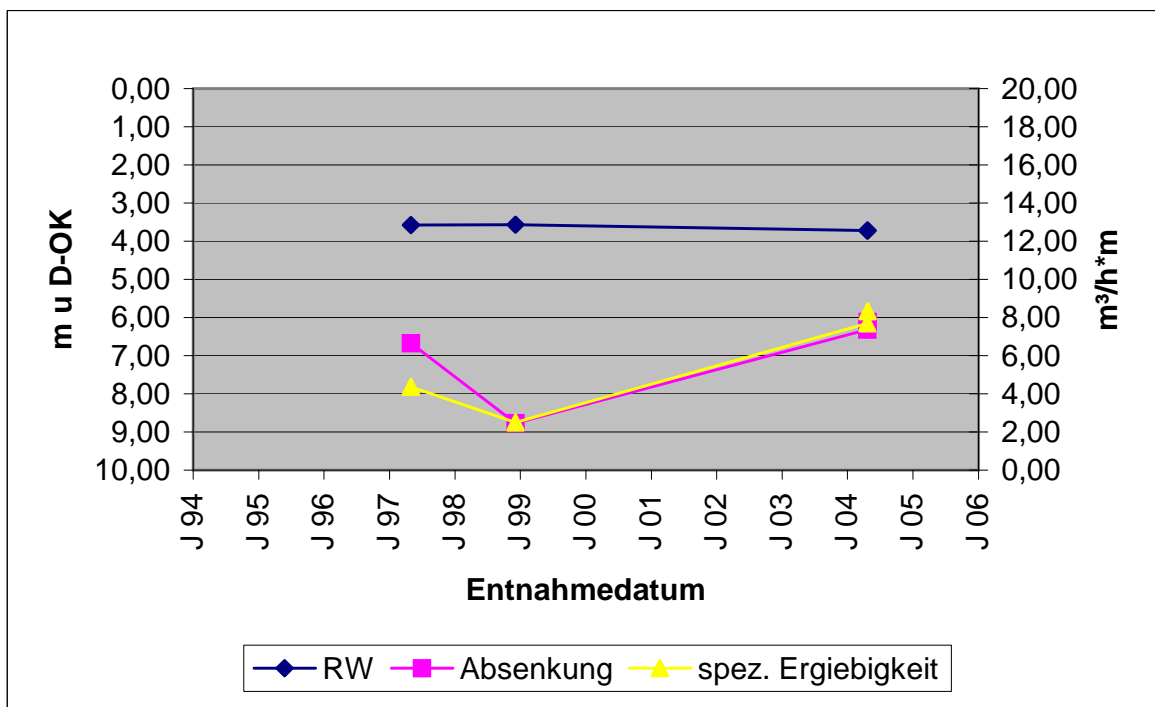


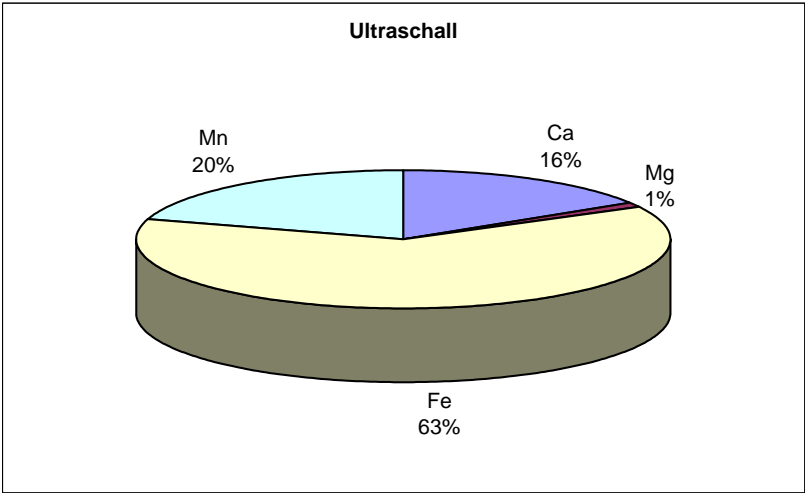
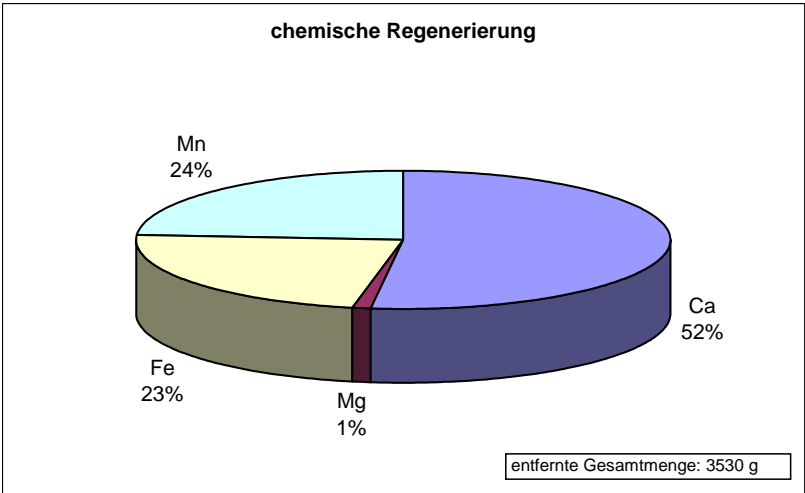
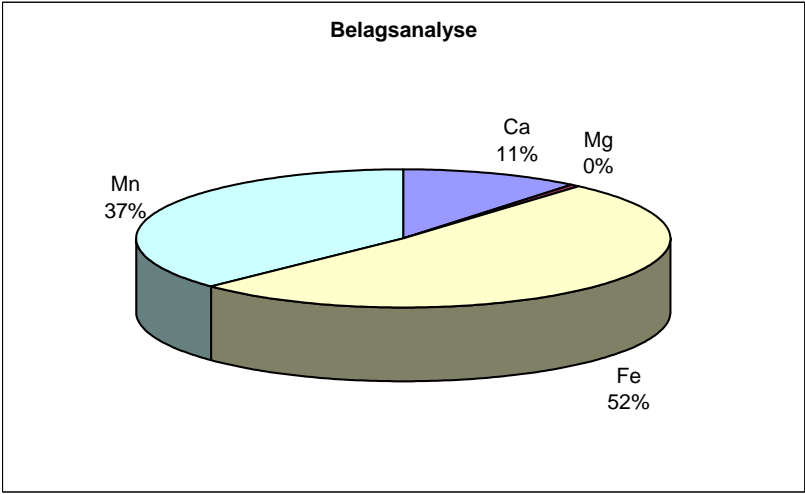
Anhang 19: Brunnen 51a

Sauerstoffgehalt versus Eisen- und Mangangehalt (Wiacek, 2005):



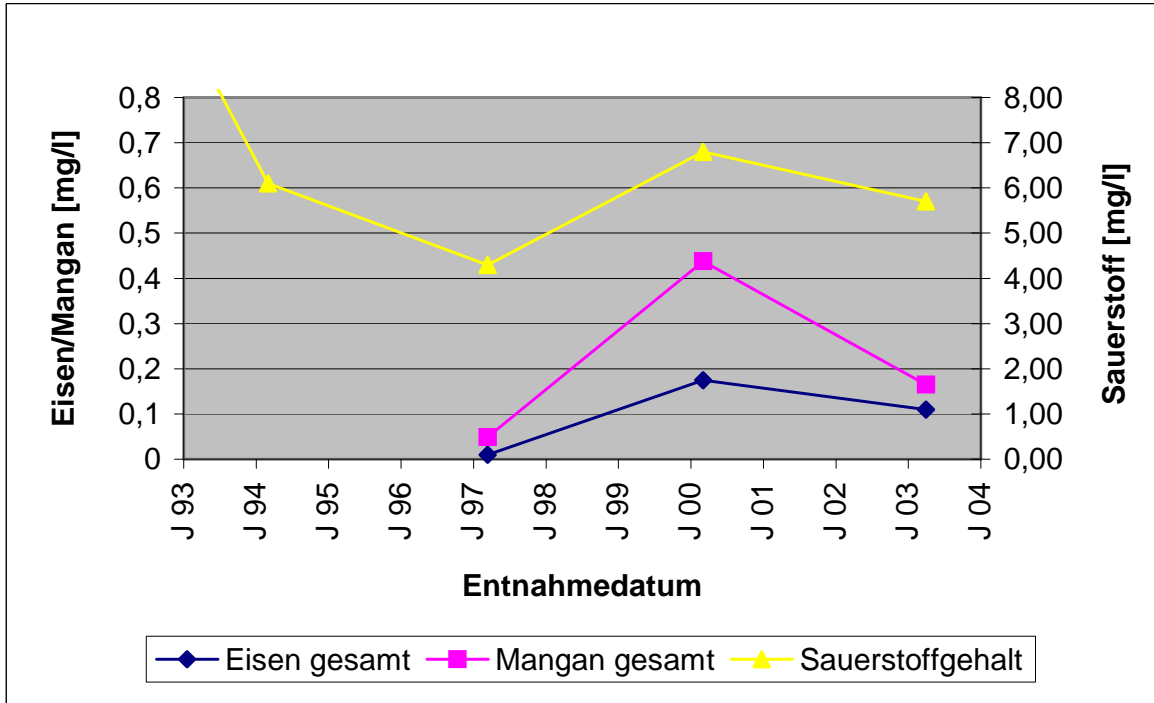
Pumpversuchsergebnisse 1995 bis 2004 (Wiacek, 2005):



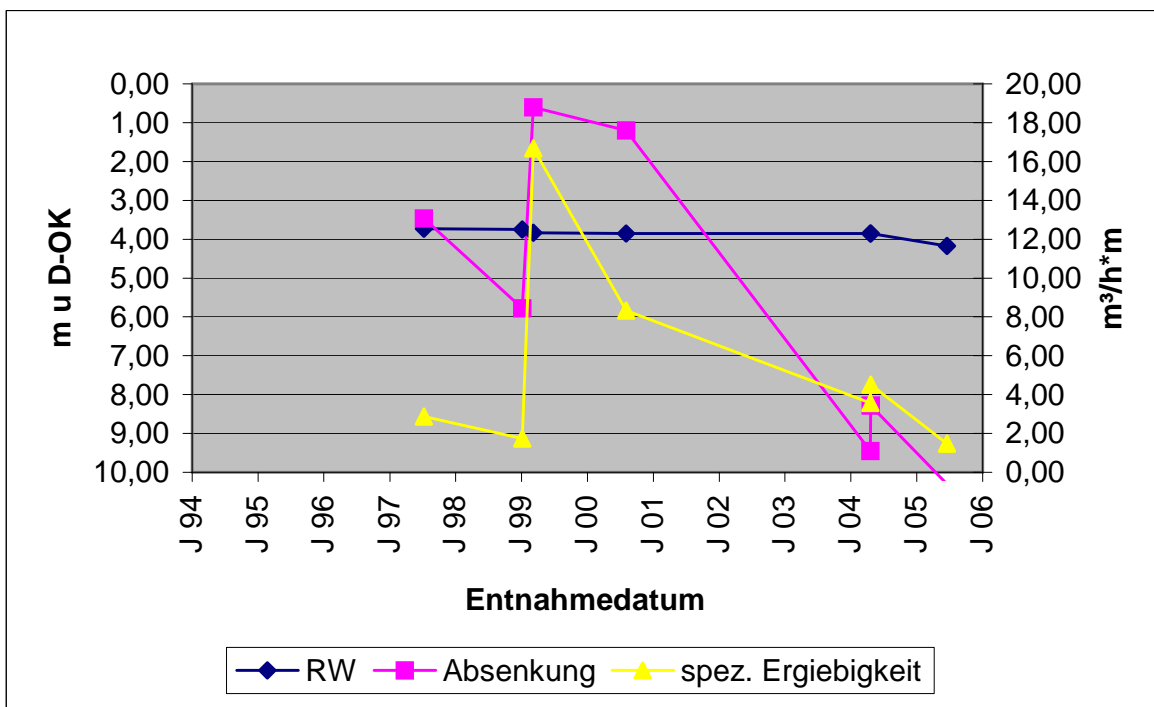


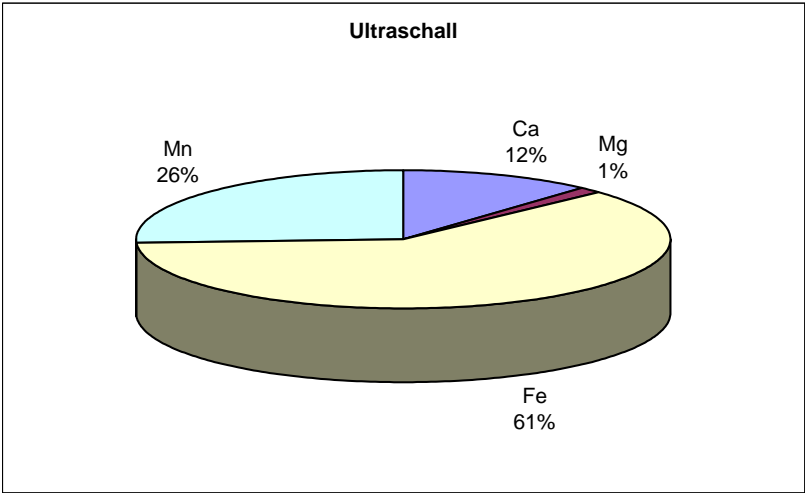
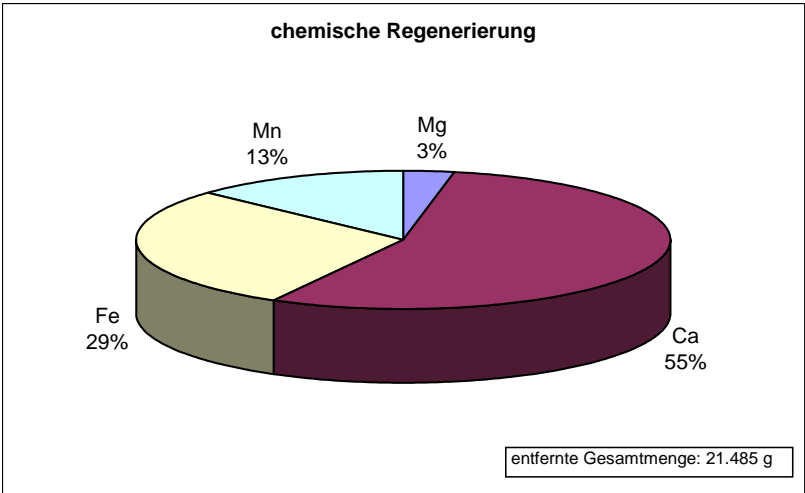
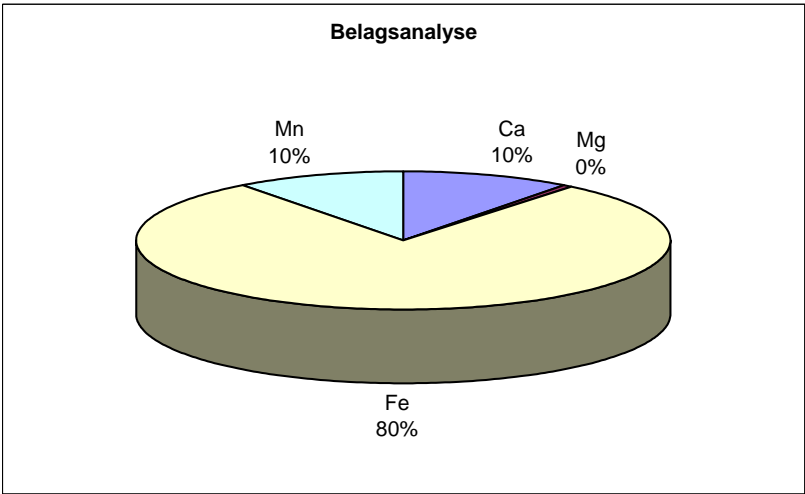
Anhang 20: Brunnen 54a

Sauerstoffgehalt versus Eisen- und Mangangehalt (Wiacek, 2005):



Pumpversuchsergebnisse 1995 bis 2005 (Wiacek, 2005):





Anhang 21: Tabellarische Zusammenstellung der verglichenen Ergebnisse (Wiacek, 2005)

STATISTIK		Brunnen 20a	Brunnen 29a	Brunnen 31a	Brunnen 51a	Brunnen 54a
letzte Chem. Reg.	[Jahr]	1993	1994	1996	2002	1999
Intervall US 2004 - letzte CHEM	[Jahre]	11	10	8	2	5
CHEM davor		1991	1988	1986	1988	1986
Intervall letzte CHEM - CHEM	[Jahre]	2	6	10	14	13
Fe gelöst CHEM	g/m ³	622,527	684,171	807,988	144,982	1112,616
Mn gelöst CHEM	g/m ³	122,464	342,086	414,913	151,286	498,759
Verhältnis Fe : Mn		5,1	2,0	1,9	1,0	2,2
Fe gelöst US	g/m ³	53,500	93,900	63,400	32,000	48,700
Mn gelöst US	g/m ³	28,200	42,800	8,600	3,800	6,300
Verhältnis Fe : Mn		1,9	2,2	7,4	8,4	7,7
Fe gelöst CHEM	g gesamt	3486,150	3831,360	4524,730	811,900	6230,650
Mn gelöst CHEM	g gesamt	685,800	1915,680	2323,510	847,200	2793,050
Verhältnis Fe : Mn		5,1	2,0	1,9	1,0	2,2
Summe Bilanzierung	g gesamt	5715,0	7982,0	12229,0	3530,0	21485,0
Fe gelöst US	g gesamt	53,500	93,900	63,400	32,000	48,700
Mn gelöst US	g gesamt	28,200	42,800	8,600	3,800	6,300
Verhältnis Fe : Mn		1,9	2,2	7,4	8,4	7,7
Summe Bilanzierung	g gesamt	475,5	676,6	642,6	725,9	945,4
Fe Feststoff US	g/kg TS	229,808	183,497	234,355	187,064	242,890
Mn Feststoff US	g/kg TS	236,708	241,665	120,058	60,726	101,778
Verhältnis Fe : Mn		1,0	0,8	2,0	3,1	2,4
Summe Hauptelemente	g/kg TS	623,319	616,299	638,070	533,343	599,123
Zeitpunkt Belagsanalyse	Monat/Jahr	?	07/1994	01/1996	04/1995	04/1996
Belagsanalyse Fe	g/kg TS	309,0	453,0	263,0	212,0	342,0
Belagsanalyse Mn	g/kg TS		78,0	86,0	154,0	45,0
Verhältnis Fe : Mn		n.b.	5,8	3,1	1,4	7,6
Fe Wasser RUV 2003	mg/l	0,120	0,077	0,082	< 0,01	0,110
Mn Wasser RUV 2003	mg/l	0,400	0,018	0,051	0,090	0,165
pH Wasser RUV 2003		7,24	7,24	7,45	7,39	7,28
O2 Gehalt RUV 2003	mg/l	3,6	4,6	5,8	6,9	5,7
Verhältnis Fe : Mn		0,3	4,3	1,6	1,0	0,7
Glühverlust Belagsanalyse	%	26,3	11,8	24,1	27,3	23,1
Glühverlust RFA	%	76,1	77,0	74,0	78,3	75,1
Leistungssteigerung letzte CHEM	vor/nach %	?	120	-80	?	864
Leistungssteigerung US	gesamt %	55	21	58	8	26
	nur US %	39	44	72	5	2

