

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Daniel Kreft**

**Biofouling durch  
oberflächennahe und mitteltiefe  
geothermische  
Wärmespeicherung**

Bochum, Marsberg, Mittweida, 2017



Fakultät Angewandte Computer- und  
Biowissenschaften

---

## **BACHELORARBEIT**

---

# **Biofouling durch oberflächennahe und mitteltiefe geothermische Wärmespeicherung**

Autor:  
**Herr**

**Daniel Kreft**

Studiengang:  
**Biotechnologie**

Seminargruppe:  
**BT14wU**

Erstprüfer:  
**Frau Professor Dr. rer. nat. Petra Radehaus**

Zweitprüfer:  
**Herr M. Sc. Felix Jagert**

Einreichung:  
**Mittweida, 22.09.2017**

Verteidigung/Bewertung:  
**Mittweida, 2017**

### **Bibliographische Beschreibung:**

Kreft, Daniel: Biofouling durch oberflächennahe und mitteltiefe geothermische Wärmespeicherung. -2017 - Seitenzahl Verzeichnisse 20, Seitenzahl des Inhaltes 72, Seitenzahl der Anhänge 2 (CD) S. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften, Bachelorarbeit, 2017

### **Englischer Titel**

Biofouling by superficial- and medium-depth geothermal heat storage.

### **Kurzbeschreibung:**

Diese vorliegende Arbeit behandelt das Thema „Biofouling durch oberflächennahe und mitteltiefe geothermische Wärmespeicherung“. Dazu wurden hydrochemische Eigenschaften ausgewählter Grundwässer untersucht. Hierauf folgte die Betrachtung von In-situ-Verhältnissen für Mikroorganismen in Geothermie und Bergbau. Anschließend wurden Schadensbilder in Form einer Fotodokumentation dargestellt.

## **Danksagung**

Ich bedanke mich an dieser Stelle bei meiner Erstprüferin der Hochschule Mittweida Frau Prof. Petra Radehaus und bei meinem Zweitprüfer des Geothermiezentrums-Bochum Herrn M.Sc. Felix Jagert für die Unterstützung durch Diskussionsbereitschaft und Beratschlagung.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Geophs. Gregor Bussmann und Herrn M.Sc. Florian Hahn vom Geothermiezentrum Bochum für Tipps, Anmerkungen und Diskussionsbereitschaft.

Besonderer Dank gilt an dieser Stelle an Frau Heike Papelewski und Frau Christin Bücken der Stadtwerke Bochum für die zur Verfügung gestellten Aufnahmen aus der Anlage Robert Müser sowie Herrn Jürgen Kugel von der Bezirksregierung Arnsberg-NRW für die Einweisung in ELWAS-Web.

Ich bedanke mich außerdem bei meinen Eltern Susanne und Christian sowie allen weiteren Unterstützer/innen, insbesondere Kathrin, Patrick, Andreas, Friedhelm, Franz-Jörg und Frederic für das entgegengebrachte Interesse und die vielen sachkundigen Diskussionen.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>2</b>
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>3</b>
2.1 Entwicklung der Geothermie und Biotechnologie.....	3
2.2 Geothermie.....	6
2.2.1 Oberflächennahe geothermische Anlagen .....	6
2.2.2 Mitteltiefe Geothermie.....	9
2.3 Hydrogeologie.....	11
2.4 Hydrochemie.....	12
2.4.1 Temperatur.....	12
2.4.2 pH-Wert .....	14
2.4.3 Sauerstoffgehalt .....	14
2.4.4 Gelöste organische Kohlenstoffverbindungen (dissolved organic carbon DOC) .....	14
2.4.5. Elektrische Leitfähigkeit.....	15
2.4.6 Redoxpotential .....	15
2.4.7 Anionen und Kationen .....	15
2.6 Biofouling .....	19
2.6.1 Biofilme .....	19
2.6.2 Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC).....	22
<b>3 Material &amp; Geräte.....</b>	<b>32</b>
<b>4 Methoden .....</b>	<b>33</b>
4.1 Recherche von Gewässeranalysen .....	33
4.2 Recherche zu In-Situ Bedingungen von Mikroorganismen.....	33
4.3 Aufnahme von Schadensbildern mittels Fotodokumentation.....	34
<b>5 Ergebnisse.....</b>	<b>35</b>
5.1.1 Oberflächennahe karbonische Grundwässer.....	36

5.1.2 Quartäre oberflächennahe Grundwasserdaten .....	39
5.1.3 Tertiäre oberflächennahe Grundwasserdaten.....	42
5.1.4 Mitteltiefe karbonische Gewässer.....	45
5.2.1 Sulfat-reduzierende Mikroorganismen .....	48
5.2.2 Metalloxidierende Mikroorganismen.....	50
5.2.3 Mikroorganismen im Stickstoffkreislauf.....	52
5.3 Sichtung von Schäden.....	54
5.3.1 Zeche Hannover, Bochum .....	54
5.3.2 Wasserquelle, Obermarsberg.....	57
5.3.3 Geothermische Anlage Robert Müser, Bochum .....	59
<b>6 Diskussion .....</b>	<b>64</b>
6.1.1 Vergleich der oberflächennahen und mitteltiefen Grund- und Grubenwässer ..	64
6.1.2 Gesamtbetrachtung der Grund -und Grubenwässer.....	65
6.2 Mikroorganismen.....	66
6.2.1 Schwefel-reduzierende Mikroorganismen.....	66
6.2.2 Metalloxidierende Mikroorganismen.....	66
6.2.3 Mikroorganismen im Stickstoffkreislauf.....	67
6.3 Schadensbilder .....	67
6.3.1 Ablagerungen in den Rohrleitungen der Zeche Hannover .....	67
6.3.2 Auswaschungen des Bindemittels in der Umfassung der oberflächennahen Quelle.....	68
6.3.3 Schadensbilder der geothermischen Anlage Robert Müser mit den Harpener Teichen.....	68
6.4 Schädigung durch Biofouling von oberflächennahen und mitteltiefen geothermischen Anlagen.....	69
6.4.1. Vermeidung von Biofouling in der Geothermie .....	70
<b>7 Zusammenfassung .....</b>	<b>71</b>
<b>8 Ausblick .....</b>	<b>73</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>URL-Verzeichnis.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>XXI</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung.....</b>	<b>XXII</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Links: Leeuwenhoeksche Darstellung von Mikroorganismen; Rechts: <i>Rhodobacter</i> im modernen Mikroskop .....	4
Abbildung 2: Links: Graf Conti mit Dampfmaschine; Rechts Modernes geotherm. Kraftwerk .....	4
Abbildung 3: Korrodierte Rohre aus einem industriellen Wassernetz .....	5
Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines Erdsonden-Wärmespeichers.....	6
Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines Erdwärmespeicherbeckens.....	7
Abbildung 6: Schematischer Aufbau eines Aquifer-Wärmespeichers .....	8
Abbildung 7: Projektentwurf zur saisonalen Wärmespeicherung des GeoMTES für Prosper-Haniel .....	10
Abbildung 8: Karte der geologischen Systeme in Nordrhein-Westfalen.....	11
Abbildung 9: Tiefenabhängige Temperaturverteilung im Erdreich.....	13
Abbildung 10: Prinzip des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts.....	17
Abbildung 11: Bildung eines Biofilms in 5 Phasen.....	20
Abbildung 12: Links: Rotalge <i>Stylonema alsidii</i> ; Rechts: Cyanobakterium <i>Anabaena sp.</i> .....	20
Abbildung 13: <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> im Biofilm mit EPS.....	21
Abbildung 14: Abnahme der Wärmeleitfähigkeit durch Biofilmausprägung.....	22
Abbildung 15: Energiegewinnung in aerober und anaerober Umgebung .....	23
Abbildung 16: Reduktion von Sulfat als Nebenprozess der oxidativen Propionsäuregärung .....	24
Abbildung 17: Lochfrasskorrosion an Schlammfördereinrichtung des Klärwerks Marsberg Mitte.....	26
Abbildung 18: Korrosion durch Ausbildung von Lokalelementen.....	27
Abbildung 19: Verockerung an einer Pumpe.....	28
Abbildung 20: undefinierte Calcium-Auswaschungen und Flechten an einer Grundstücksmauer .....	31
Abbildung 21: Übersicht zur Zeche Hannover, mit Maschinenhaus (1) und Außenanlage (2).....	54
Abbildung 22: Offene Rohrleitung zur Wasserführung im Innenbereich .....	55
Abbildung 23: Offene Rohrleitung im Außenbereich .....	56

Abbildung 24: Lage der Wasserquelle (O) auf Obermarsberg .....	57
Abbildung 25: Gemauerte Umfassung der oberflächennahen Grundwasserquelle .....	58
Abbildung 26: Nahaufnahme des Mauerwerks, links im Tageslicht, rechts bei UV-Licht .....	58
Abbildung 27: Übersicht der geothermischen Anlage Robert Müser (R) und der Harpener Teiche (H) .....	59
Abbildung 28: Einspeisung in die Harpener Teiche .....	60
Abbildung 29: Biofilmbildung am verzinktem Gestell der Harpener Teiche.....	60
Abbildung 30: Abgelöster Biofilm am Zinkgestell der Harpener Teiche.....	61
Abbildung 31: Rost an den Verschraubungen der Leiter der Harpener Teiche.....	62
Abbildung 32: Filteranlage der geotherm. Anlage Robert Müser .....	62
Abbildung 33: Durchsichtiges Filtermodul mit Wasser gefüllt.....	63
Abbildung 34: Filterringe aus den Filtermodulen.....	63

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Analysewerte oberflächennaher karbonischer Gewässer .....	36
Tabelle 2: Analysewerte oberflächennaher quartärer Gewässer.....	39
Tabelle 3: Analysewerte oberflächennaher tertiärer Gewässer .....	42
Tabelle 4: Analysewerte mitteltiefer karbonischer Gewässer .....	45
Tabelle 5: Sulfat reduzierende Mikroorganismen.....	48
Tabelle 6: Metalloxidierende Mikroorganismen .....	50
Tabelle 7: Mikroorganismen im Stickstoffkreislauf.....	52

**Abkürzungsverzeichnis**

DOC dissolved organic carbon

MIC microbially induced corrosion

SRB sulfate reducing bacteria

TOC total organic carbon

TSR thermochemische Sulfat Reduktion

## **1 Introduction**

The use of terrestrial heat or saving solar-energy and processual-waste-heat beneath the earth's surface, known as geothermics, provides a low emission energy source -as opposed to conventional techniques such as oil- coal- and gas combustion- for private as well as industrial and business sectors. The energy from geothermics can be used for cooling, heating and electric power generation.

To quarry terrestrial heat or to store the heat underground there are several techniques depending on location and type of use. Close-to-surface or superficial installations can exploit thermal-energy resulting from temperature differences of 5 to 25°C whereas similar installations in average depths have been projected for around 80°C. For geothermal plant malfunctions, especially those from material-damage or reduced performance, not only chemical-physical but microbial processes have been blamed. In one case of the so called biofouling biofilm growth was seen on pumps, pipes and filters. Following procedure, the biocorrosion, known as microbial influenced corrosion, yielded corrosive chemical substances, which come along with building- or installation-damages.

Most environmental-biotechnology processes support microbial growth even though unnecessary effects such as biofilm-formation and material-damage have been seen, which had been caused by biocorrosion from wastewater treatment. But similar problems hold up in geothermal installations even when there is no active, targeted support of microbial growth.

The following thesis examines parameters from close-to-surface and average-depth geothermal storage installations by which biofouling is encouraged.

## **1 Einleitung**

Die Nutzung von Erdwärme und auch die Speicherung solarer Energie oder Prozess-Abwärme unter der Erdoberfläche, auch Geothermie genannt, bietet sowohl dem privaten als auch dem industriell-gewerblichen Umfeld eine alternative und emissionsarme Energiequelle gegenüber der konventionellen Öl-, Kohle- und Gasfeuerung an. Die aus Geothermie gewonnene Energie kann dabei zum Heizen oder Kühlen wie auch zur Erzeugung von elektrischem Strom verwendet werden (Stober & Bucher 2014).

Zur Förderung der Erdwärme oder zur Einspeisung von Wärme in den Boden kommen dabei, abhängig von Standort und Nutzungsart, verschiedene technische Prinzipien zum Einsatz. Während aus oberflächennahen geothermischen Anlagen Energien resultierend aus Temperaturunterschieden von 5-25 °C gewonnen werden, wurden für mitteltiefe Anlagen bereits bis zu 80°C projiziert (Hahn et al. 2015). Störungen von geothermischen Anlagen können, insbesondere was Materialschäden oder Leistungsminderungen betrifft, nicht nur chemisch-physikalisch, sondern auch mikrobiell verursacht werden. Im Prozess des Biofouling entstehen dabei Biofilme, welche Pumpen, Rohrleitungen und Filter bewachsen. Im weiteren Verlauf des Biofouling kann es durch Biokorrosion, also durch mikrobiologisch induzierte Korrosion, unter Bildung von aggressiven chemischen Substanzen zur allmählichen Zerstörung von Bauwerks- oder Anlagenteilen kommen (Lerm et al. 2011). Während in der umwelt-biotechnologischen Verfahrenstechnik mikrobielle Prozesse gezielt gefördert werden, beobachtet man auch hier häufig prozessbegleitende, unerwünschte Erscheinungen wie die Ausbildung von Biofilmen oder Materialzerstörung durch Biokorrosion. Derartige Probleme, wie sie beispielsweise in der Abwasseraufbereitung vorkommen, treten auch in der Geothermie auf, obwohl hier keiner zielgerichteten aktiven Förderung derartiger Prozesse Vorschub geleistet wird (Häberle 2013). In der folgenden Arbeit soll daher untersucht werden, welche Umgebungsbedingungen in Anlagen oberflächennaher und mitteltiefer Geothermie mit Speicherfunktion das Biofouling begünstigen.

## **2 Grundlagen**

In dieser Arbeit sollen mögliche Biofouling-Prozesse innerhalb von oberflächennahen und mitteltiefen geothermischen Anlagen zur Wärmespeicherung untersucht werden. In diesem Kapitel werden nach einem historischen Überblick daher zunächst die grundlegenden technischen Ausführungen der geothermischen Anlagen und die hierfür üblichen Betriebsbedingungen vorgestellt.

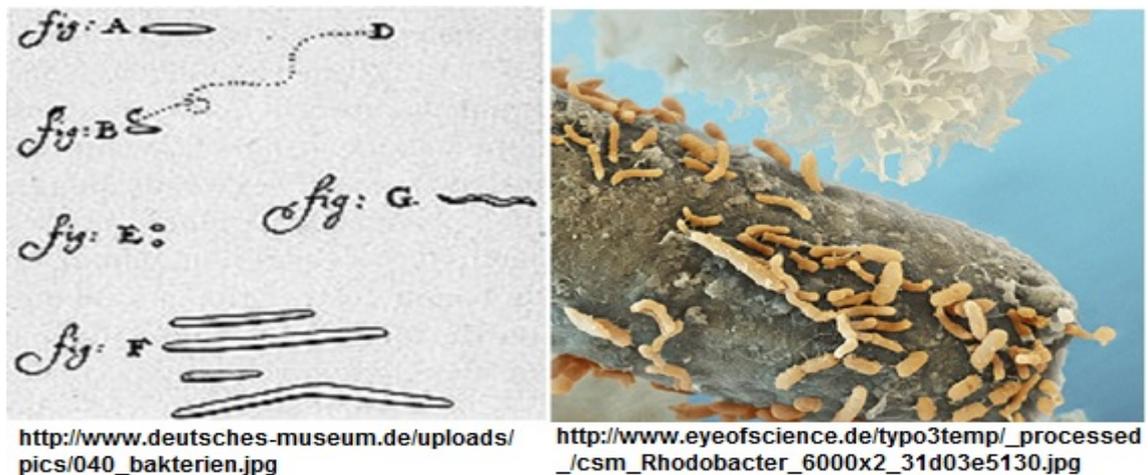
Da in der Geothermie häufig Grund- oder Tiefenwässer, spezieller auch Grubenwässer, als Energieträger verwendet werden, soll im Anschluss die Hydrogeologie mit dem Schwerpunkt der Betrachtung typischer Umgebungsparameter und Inhaltstoffe von diesen Wässern erfolgen. Anschließend richtet sich der Blick auf den Prozess des Biofouling, wozu schwerpunktmäßig die Biofilmbildung und die mikrobiologisch induzierte Korrosion verschiedener Werkstoffe erläutert werden.

### **2.1 Entwicklung der Geothermie und Biotechnologie**

Natürliche Prozesse der Geothermie als auch der Biotechnologie wurden bereits in frühester Vorzeit von Menschen genutzt. Zur kühlen Lagerung verbrachte man verderbliche Lebensmittel in natürliche Höhlensysteme. Die Nutzung von Höhlen und ihren konstanten klimatischen Bedingungen wird mitunter bis heute praktiziert, um etwa Käse reifen zu lassen (Sanchez-Ramos et al. 2007). Zeitlich belegt werden kann die Nutzung von heißen Quellen bis in das alte Rom wenigstens 2700 Jahre vor Christus (Bertani 2017). Die Tatsache, dass auch Primaten und andere größere Säuger heiße Quellen aufsuchen, dürfte aber bereits auf eine zeitlich frühere Nutzung der geothermischen Prozesse im Laufe der Menschheitsgeschichte schließen lassen.

Die Herstellung erster biotechnologische Erzeugnisse in der vorchristlichen Zeit wie Brot, Bier oder Honigwein durch den Menschen belegen zahlreiche Funde (Takors et al. 2013). Eines der ältesten bekannten Brote aus Ruchmehl und Wasser, welches über 3000 Jahre vor der modernen Zeitrechnung hergestellt wurde, konnte im schweizerischen Twann gefunden werden (Jacomet & Kreuz 1999). Verstehen konnte man biotechnologische Prozesse aber vermutlich erst, als man die Mikroorganismen

selbst sah. Dies geschah um das Jahr 1675 durch den Delfter Naturforscher Antoni van Leeuwenhoek (Munk 2008). Zum Vergleich ist in Abbildung 1 links die Aufzeichnungen von Leeuwenhoeks Sichtung gegenüber einer modernen mikroskopischen Betrachtung auf der rechten Seite gestellt worden.



**Abbildung 1: Links: Leeuwenhoeksche Darstellung von Mikroorganismen; Rechts: *Rhodobacter* im modernen Mikroskop**

Etwa 1400 km südlich vom niederländischem Delft und rund 150 Jahre später wurde im toskanischen Larderello durch den Industriellen Francesco Larderel erstmals eine Wärmekraftmaschine zum Betrieb von Pumpen aus einer heißen Quelle hergerichtet. Abbildung 2 zeigt links dazu Graf Conti mit einer geothermisch betriebenen Dampfmaschine in Larderello.



**Abbildung 2: Links: Graf Conti mit Dampfmaschine; Rechts Modernes geotherm. Kraftwerk**

Hieraus entwickelte sich ab dem 20. Jahrhundert ein Kraftwerk, welches elektrische Energie erzeugte (Stober & Bucher 2014). In etwa dieser Zeit etablierte sich in Deutschland auch die technische Aufbereitung von Abwasser. Als „Nebenprodukt“ fiel hieraus und auch aus dem schon länger bekannten Prozess der Kompostierung Biogas an, welches im weiteren geschichtlichen Verlauf ebenfalls zur Energieerzeugung benutzt wurde und wird (Raphael 1996).

Durch die Beobachtung der geothermischen und biotechnologischen Verfahrenstechnik rücken heute beide Fachgebiete näher zusammen, insbesondere da man heute versteht, dass biologische Vorgänge wesentlichen Anteil an Ausfall- oder Verschleißerscheinungen innerhalb geothermischer Anlagen haben. Diese Erscheinungen sind auf den Prozess des Biofouling zurückzuführen wie es im folgendem Bild zu erkennen ist:



<https://iww-online.de/leistungen/korrosionsschutz-in-industriellen-wassersystemen/>

**Abbildung 3: Korrodierte Rohre aus einem industriellen Wassernetz**

Dargestellt in der Abbildung 3 sind innen wie außen korrodierte Rohre aus einem industriellen Wassernetz

Biofouling wird als Oberbegriff für die Bildung von Biofilmen, aber auch für die mikrobiell induzierte Korrosion, microbially induced corrosion (MIC), verwendet (Schmidt 1999). Aus diesem kurzen historischen Rückblick zur Entwicklung, welcher bis in Gegenwart führt, sollen nun im nächsten Abschnitt die derzeit angewendeten und projektierten Nutzungsmöglichkeiten der oberflächennahen und mitteltiefen Geothermie aufgezeigt werden.

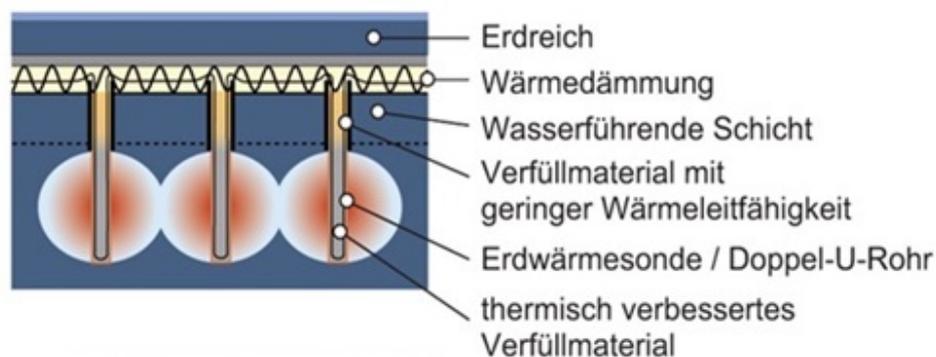
## 2.2 Geothermie

### 2.2.1 Oberflächennahe geothermische Anlagen

Es gibt verschiedene Arten und Anwendungen von oberflächennahen geothermischen Anlagen, welche sich in Tiefen von etwa 150 bis zu rund 400 m befinden können und in denen Temperaturen von unter 20°C vorherrschen. Dabei unterscheidet man geschlossene und offene Systeme.

Geschlossene Systeme werden hier durch Konstruktionen wie Energiekörbe und Erdwärmeschleifen realisiert, welche in der Regel etwa 4 bis 10 m im Erdboden vergraben werden. Ideal für die Errichtung dieser Systeme sind ständig feuchte Böden, da das Wasser als Wärmeleiter fungiert (Stober & Bucher 2014).

Für die Speicherung von Wärme mittels Erdwärmesonden, welche sich in Tiefen von bis zu 150 m befinden können, grundsätzlich auch tiefer, eignen sich ebenfalls wassergesättigte Böden mit hoher Wärmekapazität oder unterirdische Wasserreservoirs mit geringer oder keiner Strömung, da das Wasser sonst durch Ableitung zu schnell auskühlen würde (URL-1).



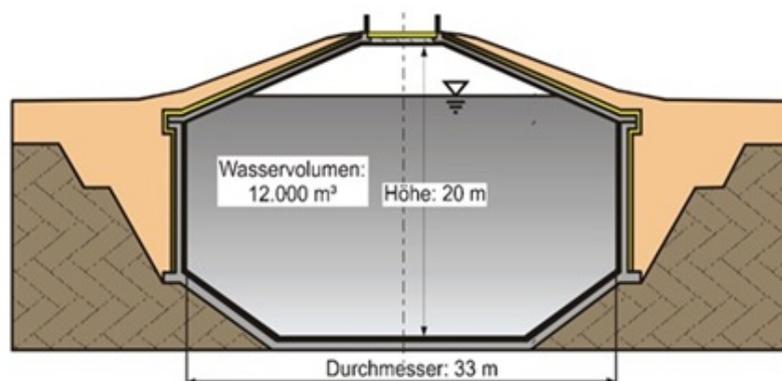
[http://www.energieagentur.nrw/content/Netze\\_und\\_Speicher/12-sensible-Waermespeicher-1476873887.jpg](http://www.energieagentur.nrw/content/Netze_und_Speicher/12-sensible-Waermespeicher-1476873887.jpg)

Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines Erdsonden-Wärmespeichers

Wie in Abbildung 4 dargestellt, werden oberflächennahe Erdwärmesonden zur Wärmespeicherung unterhalb einer wasserführenden Schicht in den Boden eingelassen, durch Wärmedämmung isoliert und mit Erdreich bedeckt. Die Erdwärmesonden selbst bestehen dabei aus U-Rohren, die mit einem zirkulierendem Fluid zur Wärmeleitung befüllt sind. Diese sind in wärmeleitendes Füllmaterial eingebettet, welches zur

Oberfläche hin, wie auch in der wasserführenden Schicht durch isolierendes Material ersetzt wird.

Zur Speicherung eignen sich zudem Erdwärmespeicherbecken oder nach ähnlicher Konstruktion isolierte, mit Wasser gefüllte Behälter, welche in den Boden eingelassen wurden. Nach der untenstehenden Abbildung 5 kann ein wasserdichter und isolierter Behälter aus Beton in den Boden eingelassen werden und mit Erdreich angefüllt werden, was zur zusätzlichen Isolation dient. Im Weiteren gibt es auch Systeme, welche zum Teil mit Kies und Wasser zur Langzeitwärmespeicherung befüllt sind (Raab et al. 2005).

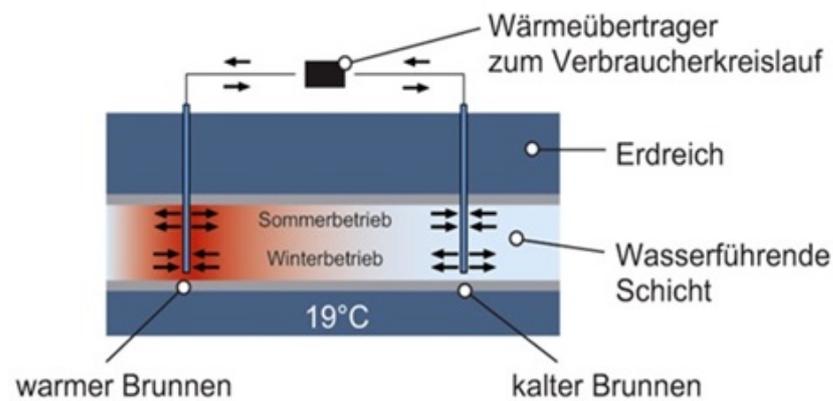


[http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Publikationen/publikationen\\_05-02.pdf](http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Publikationen/publikationen_05-02.pdf)

**Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines Erdwärmespeicherbeckens**

Durch geeignete Material- (Kuhlmann et al. 2014) und Fluidauswahl sowie aufgrund des geschlossenen Charakters solcher Systeme soll in dieser Arbeit deren Betrachtung von untergeordneter Bedeutung sein.

Offene oberflächennahe Systeme, welche zumeist mit Grundwasser arbeiten, stehen dagegen ständig in Kontakt mit der Umwelt und sind daher in vielerlei Hinsicht den unterschiedlichsten biologischen, chemischen und physikalischen Prozessen ausgesetzt. Solche Systeme können in Form von Bohr- bzw. Schachtbrunnen realisiert werden und finden sich in Tiefen von 5 bis 15m. Diese Brunnen dringen dann in oberflächennahe Grundwasserleiter, auch als Aquifer bezeichnet (Hölting & Coldewey 2013), oder Wasserreservoirs ein.



[http://www.energieagentur.nrw/content/Netze\\_und\\_Speicher//12-sensible-Waermespeicher-1476873887.jpg](http://www.energieagentur.nrw/content/Netze_und_Speicher//12-sensible-Waermespeicher-1476873887.jpg)

**Abbildung 6: Schematischer Aufbau eines Aquifer-Wärmespeichers**

Die Abbildung 6 zeigt einen Aquifer-Wärmespeicher. Hier wird durch einen Brunnen das Grundwasser aus dem Aquifer gefördert und an einen Wärmetauscher herangeführt, wobei die mitgeführte Kälte oder Wärme auf ein anderes Fluid übertragen wird. Über einen zweiten Brunnen wird das Wasser wieder in den Grundwasserleiter gespeist. Ein solches System wird auch als Zweibrunnensystem bezeichnet. Da die bei Bedarf geförderte Wärme später oft nicht zum Heizen ausreicht, muss das Fluid nachverdichtet werden, was durch eine Wärmepumpe geschieht.

Die energetische Ausbeute solcher oberflächennahen Systeme ist geringer als von mitteltiefen Systemen, welche im Anschluss betrachtet werden. Durch das Hintereinanderschalten mehrerer oberflächennaher Systeme kann mehr Energie gespeichert oder gewonnen werden, was sich allerdings auf die Investitionskosten niederschlägt.

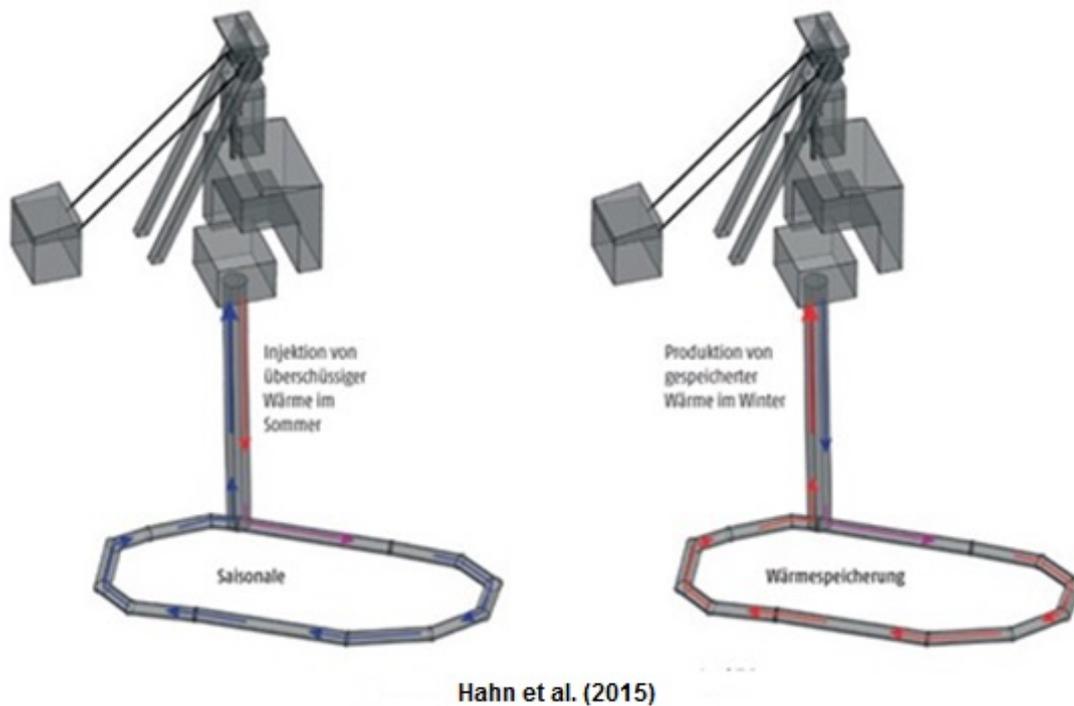
Die Nutzung der zu Beginn erwähnten Anlagen, also von Erdwärmekörben, -schleifen und -sonden, ist fast überall möglich, da hierfür kein Vorhandensein eines Aquifers nötig ist (Stober & Bucher 2014).

### 2.2.2 Mitteltiefe Geothermie

Mitteltiefe geothermische Anlagen befinden sich in Tiefen ab 400 bis zu 1500 m. Hier können Temperaturen um bis zu 85°C erreicht werden, sodass zum Heizen kaum mehr eine Nachverdichtung mittels Wärmepumpen notwendig ist. Das Funktionsprinzip ähnelt hierbei dem der oberflächennahen Anlagen und wird vornehmlich durch Koaxialsonden oder Bohrbrunnen umgesetzt (Stober & Bucher 2014). Unterschiede ergeben sich hier vor allem bei der Auswahl der geogenen Strukturen, wobei auch die Folgenutzung von stillgelegten Schachtanlagen in Augenschein genommen wird.

Im Rahmen der Wasserhaltung wird im Ruhrgebiet bereits in der ehemaligen Zeche Zollverein in Essen aus einer Teufe von 1000 m und in der ehemaligen Zeche Robert Müser in Bochum aus 570 m Teufe Wärmeenergie gewonnen. In Essen fördert man durch das Verfahren 28 °C und in Bochum 20 °C. In den Niederlanden wurde, ebenfalls auf Basis eines gefluteten Stollens, das Mijn-Water-Projekt realisiert (Hahn et al. 2015, URL-2).

Eine besondere Form der mitteltiefen geothermischen Nutzung ist hierbei die Wärmespeicherung oder auch Aquiferspeicherung. Hierzu soll z.B. mittels Energie aus solarer Strahlung, also über Solarzellen, erhitztes Wasser in den Boden gepumpt und vorgehalten werden. Die Wärme wird somit unter Tage im Wasser gespeichert. Im Winter kann man durch herauspumpen des noch immer heißen Wassers die Wärmeenergie fördern. Innerhalb einer solchen in Abbildung 7 dargestellten Anlage kommt es daher bedarfsabhängig und jahreszeitlich bedingt zu starken Temperaturänderungen.



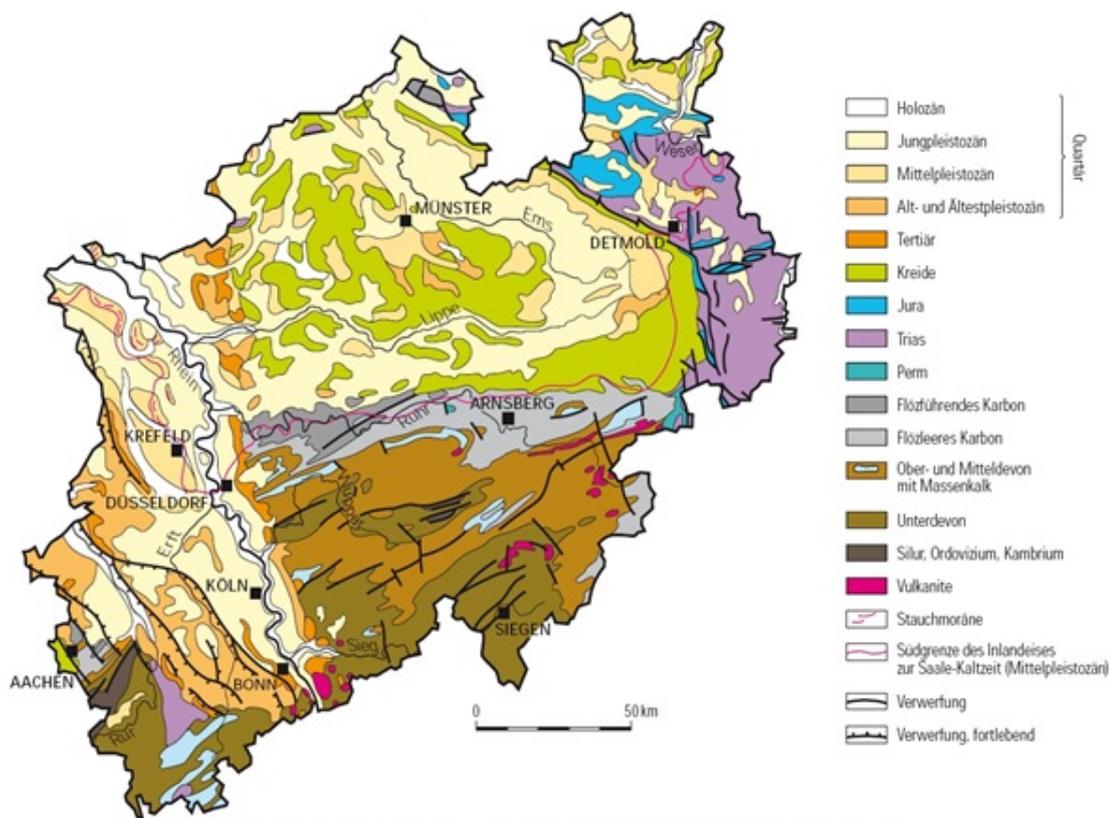
**Abbildung 7: Projektentwurf zur saisonalen Wärmespeicherung des GeoMTES für Prosper-Haniel**

Eine Anlage nach dem zuvor erwähnten Prinzip könnte beispielsweise als Folgenutzung für die Schächte Franz Haniel 1, 2 oder Schacht 10 des Bergwerks Prosper Haniel in Bottrop konzipiert werden, was derzeit durch das GeoMTES-Projekt betreut wird (Hahn et al. 2015).

Als Beispiel für eine im Betrieb befindliche Anlage sei jene unter dem Reichstagsgebäude in Berlin genannt, welche für verschiedene Gebäude des Regierungsviertels sowohl als Wärme- als auch als Kältespeicher in einem Aquifer dient (Schmidt & Müller-Steinhagen 2005; URL 2). In Neubrandenburg wird einer Aquifer-Wärmespeicher-Anlage der Wärmeüberschuss von 80°C eines benachbarten Kraftwerks während des Sommers in den unterirdischen Wasserleiter gespeist. Im Winter kann man aus einer Tiefe um 1300 m auf Temperaturen zwischen 65 bis 78 °C zurückgreifen. Zuvor betrug die Temperatur des Aquifers 53°C (URL-3).

## 2.3 Hydrogeologie

In diesem Abschnitt wird die Hydrogeologie betrachtet. Genauer werden die geogenen Strukturen betrachtet, welche potentiell wasserführende Schichten umgeben können. Hier muss beachtet werden, dass Inhaltsstoffe von Grund- und Grubenwässern standortabhängig sind und sich daher mitunter selbst an benachbarten Probeentnahmestellen auch ohne anthropogene Einflüsse sehr stark in qualitativer und quantitativer Hinsicht unterscheiden können. Eigenschaften oder Einflüsse welche auf rein geogene Prozesse zurückzuführen sind, werden auch als lithogen bezeichnet. Aufgrund der hydrogeologischen Zusammensetzung sind in Nordrhein-Westfalen (NRW) verschiedene geologische Systeme vorzufinden, wie folgende Übersicht darstellt in Abbildung 8:



<http://docplayer.org/docs-images/52/30373219/images/5-0.png>

Abbildung 8: Karte der geologischen Systeme in Nordrhein-Westfalen

Der nordwestliche Bereich Nordrhein-Westfalens besteht größtenteils aus quartären Gesteinen, durchsetzt von Kreide im mittleren Teil und vom Tertiär im westlichen Bereich. Im südöstlichen Bereich kommen hauptsächlich devonische Gesteine

durchsetzt von verschiedenen kleineren Vorkommen anderer Erdzeitalter vor. Nordöstlich sind größere Vorkommen von Trias- und Jura-Gesteinen zu erkennen.

Die oberen Grundwasserleiter des Ruhrgebiets, im Raum um Dortmund und westlich davon, befinden sich im nördlichen Bereich hauptsächlich in quartären Böden (Thome 1998), in südlichen Bereichen Karbon, dem sogenannten Ruhrkarbon, welches für seine mächtigen Steinkohlvorkommen bekannt ist (Matschullat et al. 1997). Der südliche Teil wird im Westen vom tertiären Gestein der niederrheinischen Bucht im Raum nördlich um Düsseldorf begrenzt. Grundsätzlich können sich die Gesteinsschichten überlagern, sodass mehrere Grundwasserleiter innerhalb verschiedener Schichten übereinander verlaufen. Die oberen jüngeren quartären Schichten bestehen dabei unter anderem aus Lösslehm, während die tieferliegenden älteren Gesteine des Karbons aus Schieferthon und Sandstein bestehen. In oberflächennahen Grundwasserleitern kann das Wasser in der Regel gut zirkulieren und weist vornehmlich Hydrogenkarbonate auf, allerdings weniger andere Salze.

Grundsätzlich nimmt mit der Tiefe der wasserführenden Systeme die Salinität zu welche auf die Auswaschung von Porensalzen und fossilen salzhaltigen Lösungen zurückzuführen ist. Das Grundwasser in mittleren Tiefen kann nur schwerlich zirkulieren und weist erhöhte Gehalte an Hydrogenkarbonaten, Sulfaten und Chloriden auf. (URL-13).

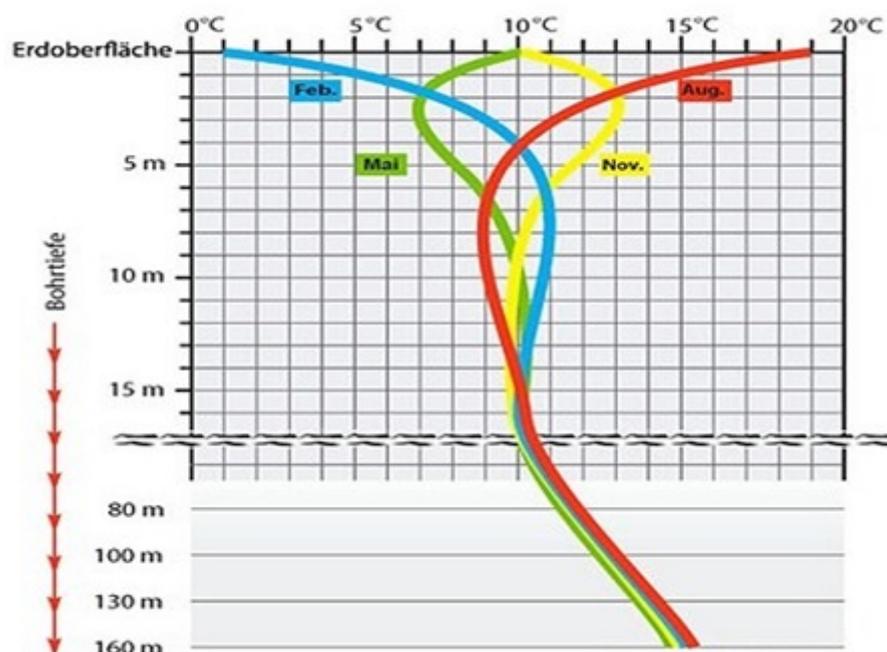
## **2.4 Hydrochemie**

### **2.4.1 Temperatur**

Die Temperatur des Wassers im Aquifer oder Reservoir hängt besonders von der Lage und Beschaffenheit des Umgebungsgesteins ab. Hierbei sind vor allem die Tiefe und die Wärmeleitfähigkeit der umgebenden Gesteine zu berücksichtigen. Dazu wird in der LAWA (87) angegeben, dass die Temperatur der oberflächennahen Aquifere stärker von der solaren Strahlung abhängig ist als die tieferliegenden. In der Tiefe erfolgt demnach der Wärmetransport über Konvektion, also Wärmeenergieübertragung durch

das fließende Tiefengewässer und Energieübertragung durch Konduktion an die Umgebungsgesteine.

Durch anthropogene Eingriffe kann die Grundwassertemperatur durch Wärmezuführung oder -abführung verändert werden, auch die Art und Weise der Landnutzung hat Einfluss auf die Temperatur. Weiter wird angegeben, dass Grundwässer in bewaldeten Flächen kühler, in Städten mit vielen dunkeln asphaltierten Flächen und dazu beheizten Kellerräumen wärmer sind (LAWA 87). Physikalisch-chemisch betrachtet hängen viele weitere Parameter von der Temperatur ab, wie die Dichte des Wassers und die Zusammensetzung seiner Inhaltsstoffe (Adam et al. 2009). Heißes Wasser mit Temperaturen von über 100 °C in sehr tiefen Regionen kann nur unter sehr hohem Druck flüssig bleiben (Nultsch 2012). Die Temperatur hat Einfluss auf die Löslichkeit von Gasen im Wasser (Adam et al. 2009), so kann die maximale Sauerstoffsättigung bei 10°C etwa 11,3 mg/l betragen, bei 20°C ca. 9,08mg/l und bei 40°C nur noch 6,41mg/l (URL-4).



<http://www.eanok.de/fileadmin/bilder/erdwaerme6.jpg>

Abbildung 9: Tiefenabhängige Temperaturverteilung im Erdreich

Die Tiefenabhängigkeit der Temperaturänderung eines Bodens bezüglich der Außentemperatur zwischen 0°C und 20°C, wie sie in Mitteleuropa zu erwarten ist, wird

nach Abbildung 9 dargestellt. In der Bildmitte ab einer Tiefe von 15 m laufen die verschiedenfarbigen Monatskurven zusammen. Die Temperatur in 15 m verläuft somit unabhängig von der Außentemperatur. Der Boden nimmt mit abnehmender Tiefe immer mehr die Außentemperatur an, sodass in der Nähe der Oberfläche näherungsweise die Außentemperatur, je nach Jahreszeit, zu messen ist. Im unteren Teil erkennt man, dass unterhalb von 17 m Tiefe die Temperatur des Bodens allmählich zunimmt.

#### **2.4.2 pH-Wert**

Der pH-Wert stellt den negativen dekadischen Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration dar (Latscha et al. 2004). Hierüber kann die Aussage getroffen werden, ob z.B. ein Grundwasser im sauren  $\text{pH} < 7$  oder im basischen Bereich  $\text{pH} > 7$  liegt. Die Erfassung des pH-Wertes ist unter anderem deshalb wichtig, da er starken Einfluss auf die Stabilität von chemischen Verbindungen hat. Verschiedene chemische Verbindungen liegen so bei alkalischem Wasser etwa als Feststoff vor, während sie sich im sauren Milieu auflösen und daher im Wasser fortgetragen werden können (Fent 2013). Bezüglich der Hydrogeologie beeinflussen sich der pH-Wert und das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht (Kunkel 2002).

#### **2.4.3 Sauerstoffgehalt**

Wie bereits gezeigt, ist der Sauerstoffgehalt abhängig von der Temperatur. Der Sauerstoffgehalt ist bestimmend für die Möglichkeit der Ausbildung aerober und anaerober Milieus (vgl. 2.6.2 Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC)). Eingetragen wird er durch Wasser und Gasblasen sowie Verwirbelungen, die beim Pumpen entstehen können.

#### **2.4.4 Gelöste organische Kohlenstoffverbindungen (dissolved organic carbon DOC)**

Mit der Erfassung dieses Parameters werden alle organisch gebundenen und im Wasser gelösten Kohlenstoffverbindungen erfasst, unabhängig von der möglichen Bioverfügbarkeit und Abbaubarkeit durch Mikroorganismen (URL-5). Je höher der

DOC-Gehalt, desto weniger Sauerstoff befindet sich im Wasser und desto reduzierter ist das Potential. Indirekt kann über den DOC auf das Redoxpotential geschlossen werden.

#### **2.4.5. Elektrische Leitfähigkeit**

Anhand der elektrischen Leitfähigkeit kann indirekt eine Aussage über den Salzgehalt, auch als Salinität bezeichnet, getroffen werden. Typische Leitfähigkeiten sind für Trinkwasser 5 mS/m -50 mS/m (auch  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) und für Meerwasser 5000 mS/m (URL-6).

#### **2.4.6 Redoxpotential**

Das Redoxpotential gibt an, ob im Wasser tendenziell mehr oxidierte oder reduzierte Verhältnisse herrschen. Werte mit positiven Vorzeichen weisen auf sauerstoffreiche, oxidierende Umgebungsbedingungen hin, während negative Vorzeichen auf reduzierte, sauerstoffarme Bedingungen (= hoher Elektronendruck) schließen lassen. In oxidierten Wässern liegen daher oft oxidierte Verbindungen vor wie Eisenoxide, Nitrate und Sulfate, während in reduzierten Umgebungen reduzierte Verbindungen (z.B.  $\text{Fe}^{2+}$ ) und mehr organische Stoffe (vgl. 2.2.4) vorliegen (URL 7, Ottow 2011).

#### **2.4.7 Anionen und Kationen**

Für die folgende Betrachtung sollen die wesentlichen Inhaltsstoffe dargestellt werden, welche den überwiegenden Anteil von bis zu 99% in den Grundwässern ausmachen (Kunkel et al. 2004). Stammen die Stoffe aus Gesteinen und Böden, ferner auch Bauwerken, so spricht man auch von Auslaugung (URL-8)

##### **Sulfat ( $\text{SO}_4^-$ )-Anionen**

Sulfat kommt im Grundwasserleiter meist gelöst aus calciumsulfathaltigen ( $\text{CaSO}_4$ ) Gesteinen, auch Anhydrit genannt, vor. Die bekannteste hydratisierte Form ist Gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (Hölting & Coldewey 2009; Markl 2015).

##### **Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ )-Anionen**

Nitratverbindungen wie Natriumnitrat ( $\text{NaNO}_3$ ), Calciumnitrat ( $\text{CaNO}_3$ ) aber auch Verbindungen mit Übergangsmetallen wie Eisennitrat ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ) sind gut lösliche

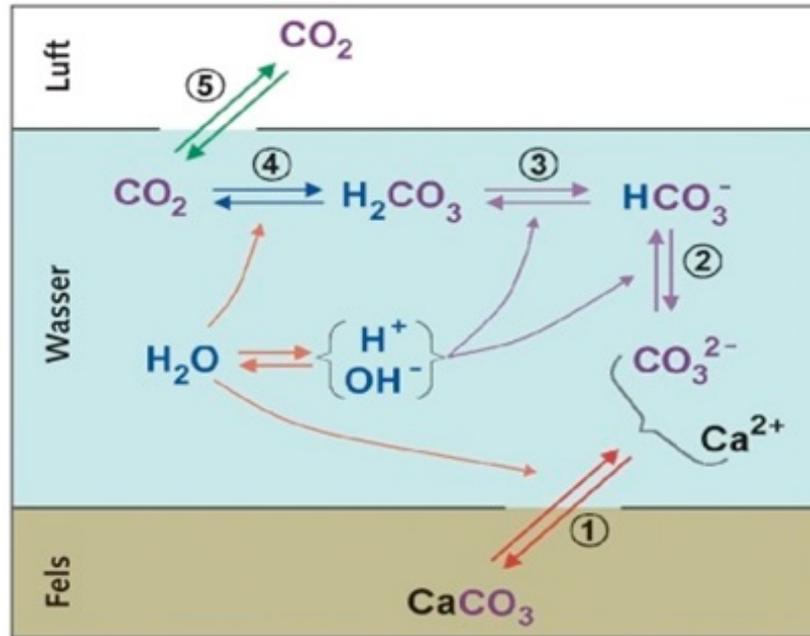
Verbindungen. Aus diesem Grunde gibt es keine bekannten nitrathaltigen Umgebungsgesteine in Aquiferen, diese können allerdings aus trockenen Salzlagerstätten herausgelöst werden (Blume et al. 2010). Durch den Menschen wird es nach Fent (2013) hauptsächlich durch Düngung in der Landwirtschaft in den Boden und damit ins Grundwasser eingetragen.

### **Chlorid (Cl<sup>-</sup>)-Anionen**

Das im Grundwasser befindliche Chlorid-Anion entstehen meist durch Auswaschung der im Boden befindlichen und gut löslichen Natriumchlorid-Salze (NaCl), Kaliumchlorid (KCl) oder Calciumchlorid (CaCl<sub>2</sub>). Durch gechlortes Wasser, Streusalz oder Dünger kann der Chlorid-Gehalt durch den menschlichen Einfluss erhöht sein. Chlorid reiht sich in die Gruppe der Halogene ein (Latscha & Mutz 2011).

### **Hydrogenkarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)-Anionen**

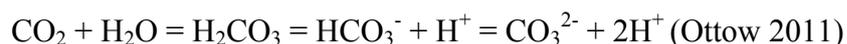
Es liegt als ionische Form der Kohlensäure (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) im Grundwasser vor, die meisten Alkali-Karbonatverbindungen sind leicht wasserlöslich (Latscha & Mutz 2011). Es tritt besonders in Anwesenheit saurer Tiefenwässer aus karbonathaltigen Gesteinen aus, welche zum Beispiel Magnesiumkarbonat (MgCO<sub>3</sub>) oder Calciumkarbonat (Kalzit, CaCO<sub>3</sub>) enthalten bzw. das Mineral Dolomit (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>). Betrachtenswert ist an dieser Stelle das bereits erwähnte Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht:



<http://www.geo-alpstein.ch/gfx/uploads/34nwg.jpg>

Abbildung 10: Prinzip des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts

Nach der Darstellung in Abbildung 10 löst sich nach Schritt 1 das Calciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) im sauren Wasser aus dem Fels. Es liegt nun als Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) Ion und Karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) Ion vor. Das Karbonat verbindet sich in Schritt 2 mit einem Wasserstoffion ( $\text{H}^+$ ) und wird zu Hydrogenkarbonat. In Schritt 3 entsteht hieraus Dihydrogenkarbonat (Kohlensäure), welche in Schritt 4 zu Wasser und Kohlenstoffdioxid zerfällt, in Schritt 5 tritt  $\text{CO}_2$  als Gas aus dem Wasser aus. Die Schritte sind grundsätzlich umkehrbar und vom pH-Wert abhängig. Bei saurem pH-Wert wird mehr  $\text{CaCO}_3$  gelöst, bei basischem pH fallen mehr Karbonate aus und es entstehen mehr Hydrogenkarbonate. Das Hydrogenkarbonat selbst fungiert als Puffer gegenüber  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{CO}_3$ . Das chemische Gleichgewicht kann man dazu verkürzt wie folgend formulieren:



**Calcium (Ca<sup>2+</sup>)-Kationen**

Calcium-Ionen entstammen der aus der Auflösung der bereits erwähnten Calciumkarbonatgesteine oder Sulfatgesteine. Nach der Chemie ordnet man Calcium den Erdalkalimetallen zu.

**Magnesium (Mg<sup>2+</sup>)-Kationen**

Magnesium gehört ebenfalls zu den Erdalkalimetallen. Die Magnesium-Ionen werden, wie Calcium, vornehmlich aus karbonatgesteinen oder aus magnesiumhaltigem Dünger in das Grundwasser gewaschen.

**Natrium (Na<sup>+</sup>)-Kationen**

Durch die anthropogenen Einträge wird Natrium unter anderem aus Streusalz und Dünger eingetragen. Lithogenen Ursprungs entstammt Natrium zumeist durch Auswaschungen von Natriumchlorid-Vorkommen. Natrium gehört zu den Alkalimetallen.

**Eisen (Fe<sup>2+/3+</sup>)-Kationen**

Im Wasser liegt Eisen fast nur als reduziertes Eisen(II)-Ion vor, da Verbindungen wie z.B. Fe(III)-Hydroxid (FeOOH) schlecht wasserlöslich sind. Diese Hydroxide sind wesentlicher Bestandteil des Eisenockers. Eisen(III)-Ionen können aber in saurer Umgebung (pH <5) in gelöster Form vorliegen. Chemisch ist Eisen den Übergangsmetallen zugeordnet.

**Mangan (Mn<sup>2+/3+</sup>)-Kationen**

Mangan ist neben Eisen mit ähnlichen chemischen Eigenschaften wesentlicher Bestandteil des Ockers, wenn auch Mangan in geringeren Konzentrationen wie Eisen vorkommt. Mangan ordnet sich den Übergangmetallen zu.

**Kalium (K<sup>+</sup>)-Kationen**

Kalium ist den Alkalimetallen zugeordnet. Es wird oft über Düngemittel in das Wasser eingetragen, was zu überhöhten Werten führen kann (Blume et al. 2010; Kunkel et al. 2004; Fent 2013; Latscha & Mutz 2011, Ottow 2011).

## 2.6 Biofouling

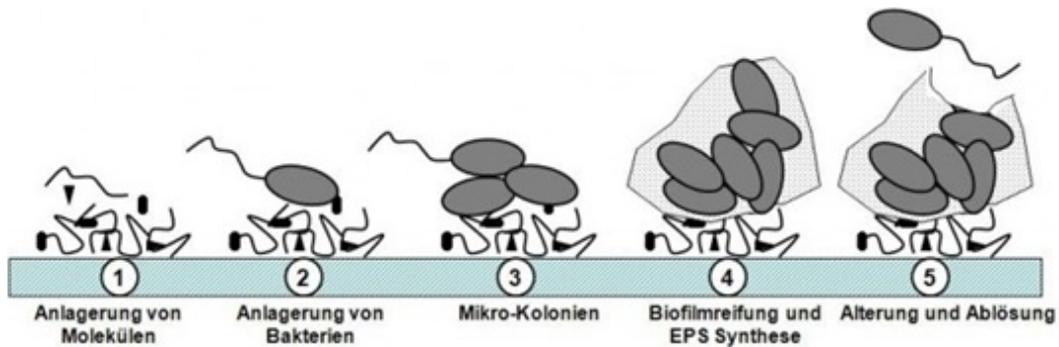
Biofouling wird zumeist als Oberbegriff für verschiedene Schadensbilder an technischen Anlagen (Schmidt 1999) oder Bauwerken (Briehl 2014) im Zusammenhang mit verschiedensten Mikroorganismen der Reiche Bacteria, Eukarya und Archaea gewählt. Am häufigsten wird der Begriff auf die Entstehung von Biofilmen und den sich daraus ergebenden negativen Veränderungen angewendet (Förstner 2008). Biofouling umfasst aber auch die mikrobiell induzierte Korrosion (Lerm et al. 2011), also den direkten schädlichen chemischen Angriff von Werkstoffen, inklusive der Verockerung (Tuovinen & Nurmiaho 1979).

Daher widmen sich die folgenden Abschnitte der separaten Betrachtung sowohl der Biofilmbildung als auch der mikrobiell induzierten Korrosion (MIC). Die Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften ist stark abhängig von den hydrochemischen Milieuparametern.

### 2.6.1 Biofilme

Biofilme bestehen sowohl aus lebendigen und abgestorbenen Mikroorganismen als auch aus organischem wie anorganischem Material. Sie bieten den darin befindlichen Mikroorganismen Schutz gegenüber extremen Bedingungen wie z.B. der Änderung von pH-Wert, Temperatur und hohen Salzbelastungen (Förstner 2008).

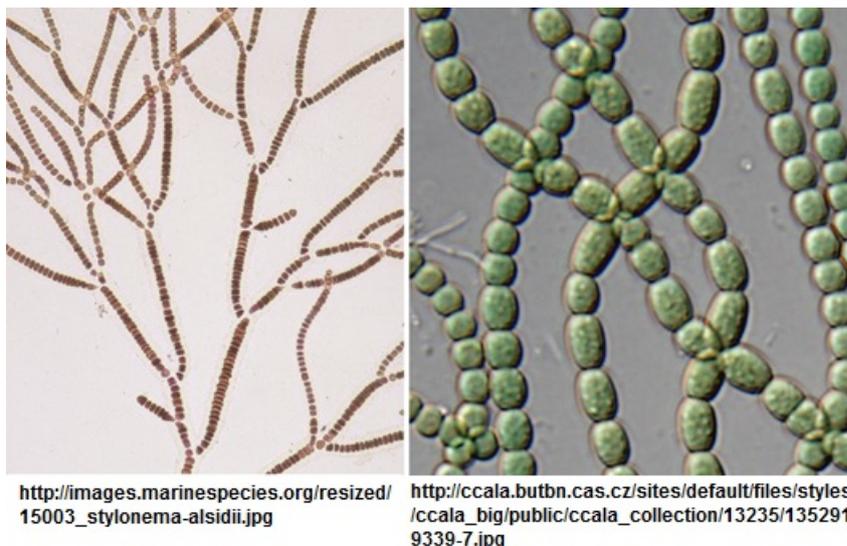
Die Entstehung von Biofilmen kann durch verschiedene Materialeigenschaften und Umgebungsbedingungen im Bereich von bewegten Gewässern begünstigt werden. Raue Oberflächen bieten meist eine gute Voraussetzung zum Anhaften von Mikroorganismen. Gering durchströmte Bereiche, an denen Stoffe sedimentieren und sich damit potentiell Nährstoffe anreichern können, sind ebenso ideal (Schmidt 1999, Paul & Rotthues 2015). Die eigentliche Ausbildung eines Biofilms verläuft dabei über mehrere Phasen und wird folgend vereinfacht dargestellt:



[https://www.biooekonomie-bw.de/files/cache/b4e41a76d9774ea8bd4ec17f597f64e6\\_f8410.JPG](https://www.biooekonomie-bw.de/files/cache/b4e41a76d9774ea8bd4ec17f597f64e6_f8410.JPG)

**Abbildung 11: Bildung eines Biofilms in 5 Phasen**

In Abbildung 11 lagern sich im ersten Schritt zunächst Moleküle an, die als Nährstoffe dienen und zugleich die Oberfläche anrauen. Dann lagern sich Bakterien oder andere Mikroorganismen an und bilden von Schritt 2 bis 3 eine Kolonie aus, welche in Schritt 4 reift. In dieser Reifung werden Proteine und andere Substanzen (extrazelluläre polymere Substanzen, EPS) aus dem Biofilm abgesondert, sodass sich eine Matrix ausbildet, in welche sich verschiedene Stoffe an- und einlagern können (Förstner 2008). Durch die Vergrößerung des Biofilms verändert sich die Nährstoff- und Sauerstoffversorgung in den tieferen Schichten des Films. Der Biofilm beginnt zu altern und kann sich auf Dauer ablösen, wie Schritt 5 zeigt (Donlan 2002).



**Abbildung 12: Links: Rotalge *Stylonema alsidii*; Rechts: Cyanobakterium *Anabaena sp.***

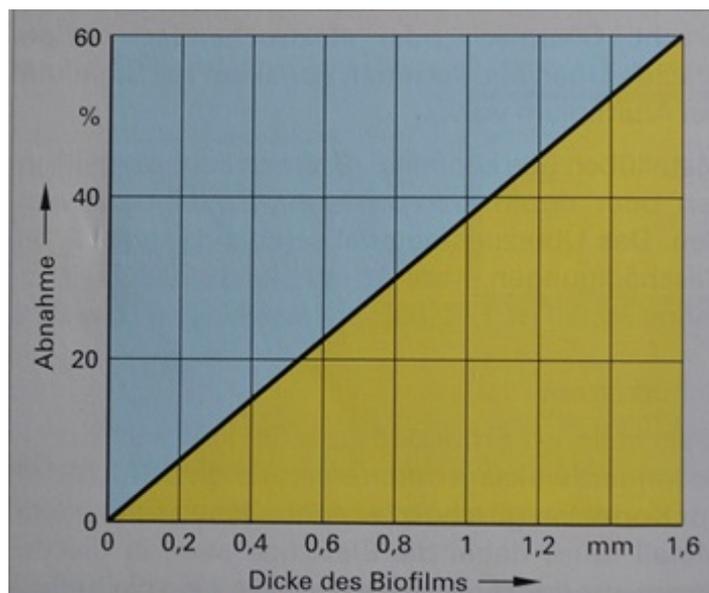
Biofilme bestehen sowohl aus „klassischen“ Bakterien, aber auch aus Algen und Pilzen (Fanning & Mitchell 2012). Abbildung 12 zeigt dazu links mikroskopische Aufnahmen der fadenförmigen Rotalge *Stylonema alsidii*, welche zu den eukaryotischen Mikroorganismen zählen und rechts ebenfalls fadenförmige Cyanobakterien *Anabaena sp.* welche den Prokaryonten zugeordnet werden.



**Abbildung 13: *Desulfovibrio desulfuricans* im Biofilm mit EPS**

In der Abbildung 13 erkennt man 10.000-fach vergrößert, das Schwefel reduzierende (vgl. 2.6.2 Mikrobiell induzierte Korrosion) stäbchenförmige Bakterium *Desulfovibrio desulfuricans* umgeben von fädigen EPS.

Die Strukturen, welche mitunter mehrere Zentimeter betragen können, können Filter, Pumpen und Rohre zusetzen, was zur Störung der Anlage führt. Werden Filter zugesetzt, spricht man von Filterclogging, verstopfen Rohrleitungen oder Bohrlöcher, spricht man von der Abnahme der Injektivität (Würdemann et al. 2015). Biofilme können auch die Wärmeleitung verringern, dies zeigt Abbildung 14:



Häberle et al. (2013)

Abbildung 14: Abnahme der Wärmeleitfähigkeit durch Biofilmausprägung

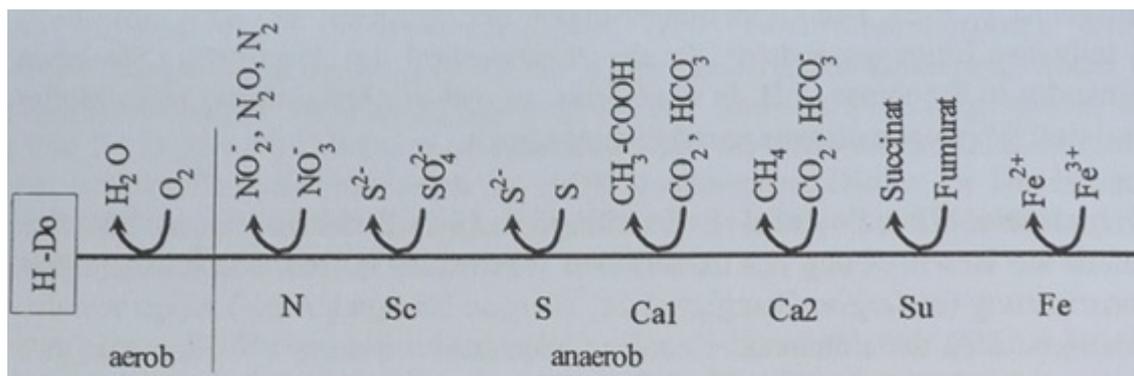
Mit zunehmender Dicke des Biofilms nimmt demnach die Wärmeleitfähigkeit linear ab. Infolge dessen kann beispielsweise der Wirkungsgrad eines Wärmetauschers herabgesetzt werden (Schmidt 1999).

Da Biofilme aus einer sehr großen Anzahl verschiedener Mikroorganismen bestehen (Lerm 2012), kann sich die Betrachtung einzelner Prozesse als schwierig erweisen. Untersuchungen hierzu findet man unter dem Begriff „Quorum Sensing“ (URL-8), ein von der Zelldichte des Biofilms abhängiges chemisches Kommunikationssystem der verschiedenen Lebensgemeinschaften.

Chemische Verbindungen wie sie auch innerhalb eines Biofilms gebildet werden, können, wie auch der Biofilm selbst, gegenüber unterschiedlichen Materialien korrosiv wirken, was im nachstehenden Abschnitt betrachtet wird.

### 2.6.2 Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC)

Die folgende Abbildung 12 betrachtet vereinfacht einige metabolische Vorgänge, aus denen sich am Ende korrosive Produkte ergeben:



Schmidt (1999)

Abbildung 15: Energiegewinnung in aerober und anaerober Umgebung

Die Wasserstoff-Donatoren (H-Do.) können organischen Ursprungs sein, Mikroorganismen, welche diese nutzen, werden als organotroph bezeichnet oder sie stammen aus anorganischen Quellen, den Stoffwechseltyp nennt man lithotroph.

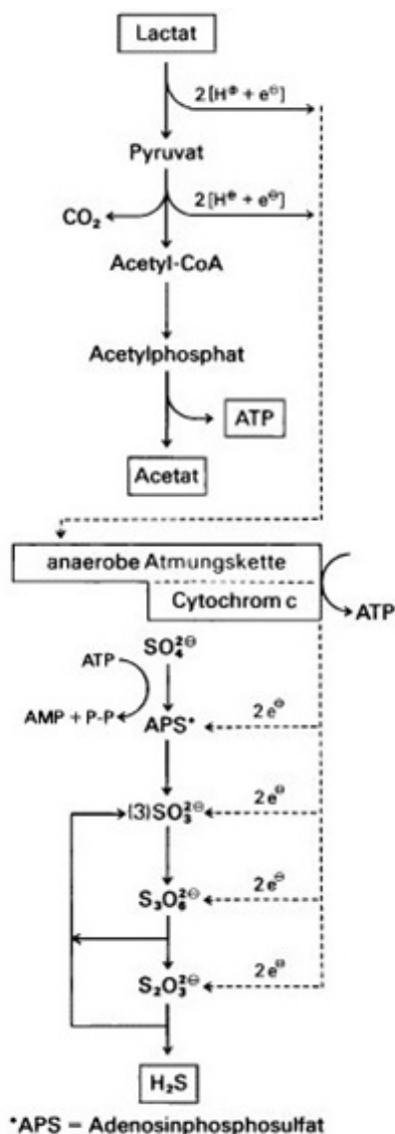
Links der vertikalen Linie in der Abbildung 15 wird Energie über die Atmung bzw. Reduktion von Luftsauerstoff ( $O_2$ ) gewonnen, was auch als Aerobe-Atmung bezeichnet wird, rechts werden die Stoffe wie Nitrat ( $NO_3^-$ ), Sulfat ( $SO_4^{2-}$ ), Schwefel ( $S^0$ ), Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) oder Eisen ( $Fe^{3+}$ ) reduziert, was innerhalb einer Anaeroben-Atmung geschieht.

Der vor allem aus den gebildeten Stoffen der Anaeroben-Atmung induzierte Korrosionsprozess selbst ist rein chemisch oder elektrochemisch zu betrachten und als Grenzflächenprozess zu verstehen (Förstner 2008), nicht aber die Bildung der korrosiven Stoffe. Die mikrobiellen Bildungsprozesse der Stoffe können dabei den unterschiedlichsten Zwecken wie der Atmung dienen.

Zur Betrachtung der folgenden Abläufe sei gesagt, dass einige Stoffwechselprozesse nur begrenzt selektiv sind, so können z.B. eisenoxidierende Mikroorganismen bei Eisenmangel alternativ Mangan oxidieren. Ebenso ist zu erwähnen, dass die Voraussetzung für die folgenden aufgezeigten chemischen Reaktionen im Wesentlichen auch von der Vakanz chemischen Stoffe, der Temperatur, dem pH-Wert und anderen physikalischen, chemischen Bedingungen abhängig ist. Man darf im Weiteren nicht außer Acht lassen, dass sich in unmittelbarer Umgebung der folgend dargestellten Prozesse auch andere physikalisch-chemische oder biologische Vorgänge vollziehen

können, welche potentielle Reaktionen inhibieren oder beschleunigen können (Plewinsky et al. 2014; Adam et al. 2009; Fent 2013; Ottow 2011).

Verbreitetes Problem ist hierbei die unter anaeroben Bedingungen mikrobielle Erzeugung von Schwefelwasserstoffgas ( $H_2S$ ), z.B. durch Sulfat-reduzierende (sulphate-reducing bacteria (SRB)) Bakterien (Wallhäuser & Puchelt 1966), wie z.B. *Desulfovibrio*-Stämme:

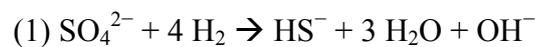


<http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/sulfatatmung/64676>

Abbildung 16: Reduktion von Sulfat als Nebenprozess der oxidativen Propionsäuregärung

Im oberen Teil der Abbildung 16 wird dargestellt, wie aus dem zur Energiegewinnung nötigem Stoffwechselprozess der Propionsäuregärung Wasserstoff und Elektronen freigesetzt werden. Der untere Teil zeigt, wie Sulfat-Anionen ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) entlang der anaeroben Atmungskette schrittweise zu Schwefelwasserstoffgas ( $\text{H}_2\text{S}$ ) umgewandelt werden. Dies geschieht unter Mitwirkung von Cytochrom C als Elektronentransporter (Fent 2013; Ottow 2011) und Aufnahme der zuvor freigesetzten Elektronen.

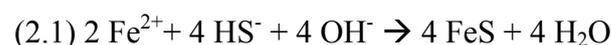
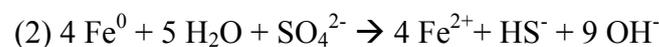
Verkürzt wird der vorherige Prozess der Sulfat-Reduktion, auch Desulfurikation, nach der folgenden chemischen Gleichung (1) angegeben (Schmidt 1999):



Die Reduktion von Sulfat durch Mikroorganismen wird auch als Sulfat-Atmung bezeichnet, da hier nicht der Luftsauerstoff als Elektronenakzeptor verwendet wird, sondern ein Sulfat-Anion. Durch die Aktivität der Mikroorganismen sinkt also der pH-Wert in unmittelbarer Umgebung, welche zugleich reduziert wird.

Der umgekehrte Prozess, also die Oxidation von Schwefelwasserstoff zu Sulfat, findet dagegen im aeroben Milieu unter anderem durch Stämme von *Thiobacillus* und *Sulfolobus* statt.

Mit diesen Stoffwechselforgängen schaffen Mikroorganismen die Grundlage für den eigentlichen Korrosionsprozess, denn sowohl das im Wasser gelöste Sulfation als auch das Schwefelwasserstoffgas wirken chemisch aggressiv auf Metalle. Dies wird am Beispiel von Eisen gezeigt:



Nach (1) wird das elementare Eisen (Fe) in wässriger Umgebung unter Einwirkung von Sulfationen ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) zum Eisen(II)-Ion oxidiert. Unter weiterer Einwirkung von Schwefelwasserstoff wird schließlich die wasserunlösliche Verbindung Eisen(II)-sulfit (FeS) gebildet. Diese Verbindung fällt als schwarzer Niederschlag aus und kann sich

auf Werkstoffoberflächen ablagern (Ottow 2011). Durch die allmähliche Abtragung von Eisen oder anderen durch Schwefelwasserstoff angegriffenen Metallen kann es zum Schadensbild der „Lochfrasskorrosion“ kommen:

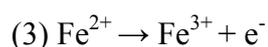


Daniel Kreft, Marsberg 2016

**Abbildung 17: Lochfrasskorrosion an Schlammfördereinrichtung des Klärwerks Marsberg Mitte**

Auf Abbildung 17 ist eine Abdeckvorrichtung einer verzinkten Schlammfördereinrichtung aus dem Abwasser-Klärwerk „Marsberg-Mitte“ abgebildet, welche durch Schwefelwasserstoffgas stark beschädigt wurde.

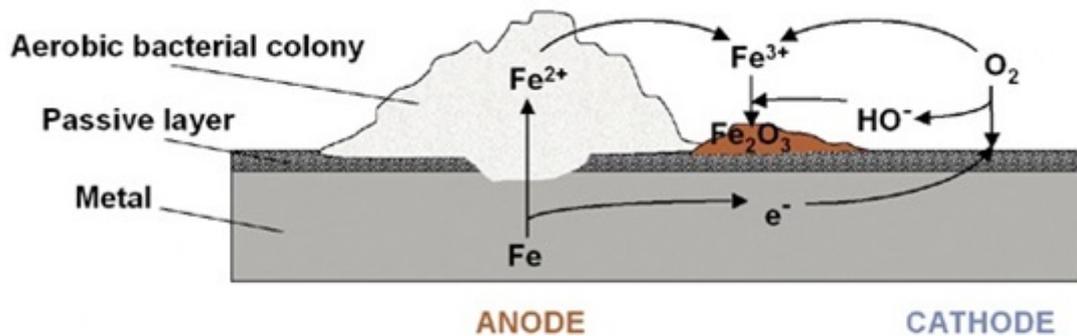
Eisen(II) wird nach (3) durch Abgabe eines weiteren Elektrons ( $e^-$ ) zu Eisen(III) oxidiert. Von solchen oder ähnlichen Prozessen profitieren eisenoxidierende Bakterien wie *Leptospirillum ferrooxidans* und *Thiobacillus ferrooxidans* oder manganoxidierende Organismen wie die Pilze *Plectosphaerella cucumerina* und *Microdochium bolleyi* (Santelli et al. 2010), wobei der Oxidationsprozess unter aeroben Bedingungen stattfindet:



Das in (3) gebildete Eisen(III) kann im Umkehrprozess von Mikroorganismen wiederum als Elektronenakzeptor verwendet werden, so auch von *Thiobacillus*

*ferrooxidans* selbst, allerdings unter Sauerstoffausschluss in anaerober Umgebung (Valdes et al.2008).

Ergänzend kann man die Korrosion von Metallen bzw. Eisen ebenso elektrochemisch betrachten:



[http://www.ikz.de/fileadmin/news\\_import/008-002\\_07.jpg](http://www.ikz.de/fileadmin/news_import/008-002_07.jpg)

Abbildung 18: Korrosion durch Ausbildung von Lokalelementen

Die Abbildung 18 stellt dar, wie durch Ausbildung eines Biofilms, hier als Aerobic bacterial colony bezeichnet, welcher in Kontakt mit einer passiven Schicht (passive layer) (z.B. Zink) und Eisen (Metal) steht, dieses unter Ausbildung eines „lokalen Elementes“ allmählich von  $Fe^0$  über  $Fe^{2+}$  nach  $Fe^{3+}$  oxidiert.  $Fe^{3+}$  geht dann mit Hydroxidionen die Verbindung Eisen(III)-Oxid ein. Hydroxidionen wiederum entstehen durch die Kathodenreaktion von Sauerstoff ( $O_2$ ). Biofilme können demnach auch als Elektrolyt fungieren und an der Entstehung lokaler Elemente und ebenfalls am Korrosionsprozess beteiligt sein. (URL-9; Sand & Gerke 2003).

### Schadensprozess der Verockerung

Hauptsächlich Eisen(II)-, Eisen(III)- und Mangan-Verbindungen sind für die Verockerung von technischen Anlagen wie Pumpen, und Bauwerkselementen verantwortlich (Thronicker & Szewzyk 2013).

Die Verbindungen können aus den Werkstoffen selbst und Gesteinen gelöst werden oder als sogenannte geogene Lösungsinhalte bereits im Aquifer vorkommen (Hölting & Coldewey 2009). In Kontakt mit Sauerstoff können damit schwer wasserlösliche Eisen- z.B. Ferrihydrit ( $Fe^{3+}_{10}O_{14}(OH)_2$ ) oder Manganoxide (z.B.  $MnO_2$ ) entstehen (Seibt et al.

2000). Diese fallen als rotbrauner/ockerfarbener Niederschlag aus, wobei sich auf Werkstoffoberflächen Krusten bilden.



<http://deferro.de/wp-content/uploads/2014/10/050420111124-225x300.jpg>

**Abbildung 19: Verockerung an einer Pumpe**

Abbildung 19 zeigt hierzu einen typischen Schadensfall der Verockerung an einer Pumpe wie sie zum Beispiel in kleineren Anlagen zur Wasserförderung eingesetzt werden. Ockerfarbene Ablagerungen haben sich auf der Oberfläche gebildet. Optisch lassen sich Biofilme und Verockerungen oft nicht trennen.

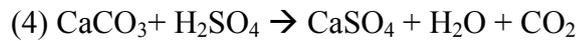
Nach Langguth & Voigt (2004) sind dafür auch Mikroorganismen der Gattungen *Gallionella* und *Leptotrix* verantwortlich.

### **Korrosion an Wasserbindebaustoffen**

Zementierte oder betonierte Bauteile und Fundamente können ebenfalls von Biofouling und der MIC betroffen sein. Zement zählt zu den Wasserbindebaustoffen und besteht aus Calciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), Calciumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ), Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Eisen(III)-Oxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Durch Zugabe von Kies und Steinen in den Zement erhält man Beton. Wie auch bei Stahlerzeugnissen kann man durch Beigabe unterschiedlicher Additive, auch als Zuschlagstoffe bezeichnet, die chemischen und physikalischen Eigenschaften verändern.

In der oberflächennahen Geothermie können dabei beispielsweise Brunnenbauten der Betonkorrosion unterliegen. Durch säurebildende Mikroorganismen wird das

Calciumkarbonat mit der Zeit nach der folgenden chemischen Reaktionsgleichung gelöst:



Nach (4) wird aus Calciumkarbonat unter Einwirkung von Schwefelsäure Calciumsulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) gebildet. Calciumsulfat wird auch zu Gips (Löslichkeitsprodukt ( $\text{CaSO}_4$ ) =  $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ mol}^2/\text{l}^2$ ) und ist gegenüber dem Zement (Löslichkeitsprodukt ( $\text{CaCO}_3$ ) =  $4,7 \cdot 10^{-9} \text{ mol}^2/\text{l}^2$ ) grundsätzlich besser wasserlöslich, dennoch sind Calciumkarbonat als auch Calciumsulfat insgesamt schlecht wasserlöslich und bilden oft das Schadenbild der Verkalkung (Briehl 2014; Gerthsen 2006).

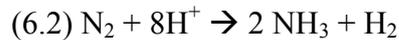
Die Auflösung von Calciumkarbonat kann nach vergleichbarer Chemie auch über Kohlensäure oder andere Säuren hervorgerufen werden, wobei man hier von Protolyse spricht. Die Verwitterung von Karbonatgesteinen der Erdkruste wird Karbonatverwitterung genannt, vgl. hierzu auch Kalk-Kohlensäuregleichgewicht, und verläuft analog zur Silicatverwitterung in der Erdkruste:



Das Calciumsilikat ( $\text{CaSiO}_3$ ) wird durch Kohlensäure in Calcium-Di-hydrogenkarbonat und Kieselsäure ( $\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ ) umgewandelt (Bahlburg & Breitzkreutz 2004). Somit ist der  $\text{CO}_2$ -Ausstoß (vgl. Abb. 7) von Mikroorganismen aller Art und die damit einhergehende Bildung von Kohlensäure mitverantwortlich sowohl für die Verwitterung von natürlichen Bestandteilen der Erdkruste als auch für Materialien aus anthropogener Erzeugung, welche sich chemisch ähnlich sind.

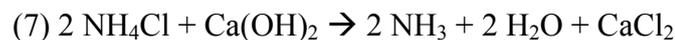
Durch die mikrobielle Stickstofffixierung und die darauffolgende Umwandlung zu Ammoniak (Ammonifikation) gemäß dem Stickstoffkreislauf (Häberle et al. 2013) ist es möglich, dass Wasserbindebaustoffe hierdurch einem weiteren Korrosionsprozess unterliegen. Atmosphärischer Stickstoff wird beispielsweise von den stickstofffixierenden Mikroorganismen wie Rhizobien oder vielen Cyanobakterien zu

Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) nach den folgenden Formeln (6.1; 6.2) ammonifiziert:



Ammonium kann sich in mit im Wasser oder wässriger Umgebung gelösten Ionen wie Cl- zu Ammoniumchlorid ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) verbinden.

In der Folge wird das Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), auch als gelöschter Kalk bekannt, durch Ammoniumchlorid angegriffen werden.



Nach der chemischen Gleichung (7) entstehen am Ende Ammoniak, Wasser und das Salz Calciumchlorid, welches sich gut in Wasser löst.

Im weiteren Verlauf des Stickstoffkreislaufs können Ammoniak und Ammonium durch Mikroorganismen im Prozess der Nitrifikation zu Nitrit oder Nitrat überführt werden.

Die für diese Schritte notwendigen Stoffwechseleigenschaften bringen Mikroorganismen der Gattungen *Nitrosomonas* (für Nitrit) und *Nitrobacter* (für Nitrat) mit sich, welche Nitrifikanten genannt werden und deren Metabolismus als chemolithoautotroph bezeichnet wird (Broda 1977).

Aus Nitrat und nicht-nitrifiziertem Ammonium kann die Verbindung Ammoniumnitrat ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) entstehen. Dieses hat ebenfalls eine korrosive Wirkung auf die Calciumverbindungen des Zements und lässt wasserlösliches Calciumnitrat  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , entstehen. Bei Wasserentzug kristallisiert die Verbindung häufig in weißer Farbe an Mauerwerks- oder Betonoberflächen aus und wird im Schadensfall auch als Mauersalpeter bezeichnet, häufig zu finden in Kellern älterer Bauwerke.



Kreft, Obermarsberg 2016

**Abbildung 20: Undefinierte Calcium-Auswaschungen und Flechten an einer Grundstücksmauer**

Abbildung 20 zeigt einen typischen Bauwerksschaden an einer Betonmauer durch Auswaschung im mittleren Teil entstanden. Ausgelaugte und später kristallisierte undefinierte Calciumverbindungen treten aus Rissen in der Mauer aus. Flechten, symbiotische Lebensgemeinschaften aus Pilzen und Blaualgen (z.B. *Chlorococcales*) oder Cyanobakterien (z.B. *Chroococcales*), nutzen diese Mauer als Lebensraum vor allem oberhalb der Auswaschungen (Ottow 2011).

In diesem Abschnitt wurden einige grundlegende biologisch induzierte Korrosionsprozesse dargestellt. Festzuhalten ist, dass die Korrosionsprozesse vornehmlich im sauerstoffarmen, anaeroben Milieu unter chemolithoautotrophen Bedingungen ablaufen und in eher saurer Umgebung stattfinden.

### **3 Material & Geräte**

Digitale Spiegelreflexkamera Nikon D3100

UV Handlampe SAFE Pocket-UV No. 1045 4Watt 366nm

iPhone SE

ELWAS-WEB (letzter Stand 04.09.2017 Version: 2.6.1)

## **4 Methoden**

In dieser Arbeit soll nunmehr eine Abschätzung erfolgen, ob die zuvor untersuchten Grund- und Tiefenwässer potentiell unterschiedliche Lebensräume darstellen und welche mikrobiellen Lebensgemeinschaften vornehmlich hierin zu finden sind.

### **4.1 Recherche von Gewässeranalysen**

Durch Recherche im Fachinformationssystem ELWAS des Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen mit dem Onlineverzeichnis ELWAS-Web (elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem für die Wasserwirtschaftsverwaltung in NRW (URL-4 2017)) und in der Literatur werden Daten zur Gewässergüte oberflächennaher karbonischer, quartärer und tertiärer Grundwasserleiter aufgenommen. Berücksichtigt werden sollen dabei die wesentlichen Parameter und Inhaltsstoffe, wie sie im Kapitel 2 bereits behandelt wurden. Hiermit soll untersucht werden, ob sich die verschiedenen Umgebungsgesteine quantitativ auf das Grundwasser auswirken und in welcher Hinsicht sich diese dadurch unterscheiden.

Im Anschluss werden mitteltiefe, karbonische Grundwässer, vor allem aus Bergbauanlagen in Nordrhein-Westfalen anhand von Literatur untersucht. Die daraus ermittelten Parameter sollen denen der oberflächennahen Anlagen soweit möglich gegenübergestellt werden, um mögliche quantitative Unterschiede zu untersuchen.

### **4.2 Recherche zu In-Situ Bedingungen von Mikroorganismen**

Durch Recherche wissenschaftlicher Veröffentlichungen sollen soweit möglich die in-Situ Bedingungen von Grund- und Grubenwässern betrachtet werden, in welchen bereits Mikroorganismen nachgewiesen wurden. Dazu sollen die In-Situ Werte neben den relevantesten Mikroorganismen bezüglich des Biofouling dargestellt und aufgelistet

werden. Separat hervorgehoben werden hierzu Sulfat-reduzierende, Metall-atmende und Mikroorganismen, wie sie entlang des Stickstoffkreislaufs zu finden sind.

Am Ende der Arbeit erfolgt eine Abschätzung, ob die zuvor untersuchten Grund- und Grubenwässer potentiell unterschiedliche Lebensräume darstellen, welche mikrobiellen Lebensgemeinschaften vornehmlich hierin zu finden sind.

### **4.3 Aufnahme von Schadensbildern mittels Fotodokumentation**

Mittels Begehung und Besichtigung sollen verschiedene Schadensbilder des Biofouling, wie es typischerweise aus oberflächennahen und mitteltiefen Grund- und Grubenwässern resultiert, betrachtet werden.

Ergänzende Schadensbilder wurden durch Anfragen bei Betreibern oder aus Institutsbeständen hinzugefügt.

## **5 Ergebnisse**

Die Werte der hier angeführten Ergebnisse aus ELWAS-Web sind Durchschnittswerte. Bei der Darstellung wurden lediglich die wesentlichen Werte und Parameter betrachtet, welche bereits im Grundlagenteil bearbeitet wurden. Detailliertere Auszüge dazu befinden sich im Anhang. Die Durchschnittswerte ergeben sich aus einer unterschiedlichen Anzahl von Messwerten, abhängig von der Messstelle und dem Turnus der Probennahme. Die Einzelmessungen innerhalb einer Messstelle können sich sehr stark voneinander unterscheiden, was aus den folgend dargestellten Ergebnissen nicht hervorgeht. So kann beispielsweise das Redoxpotential innerhalb der Messstelle Nr.059110156 im Minimum -118,00 mV betragen, maximal wurde allerdings + 197,00 mV gemessen. Einzelmessungen nach ELWAS-Web sind nur online abrufbar und befinden sich nicht im Anhang (Stand September 2017).

Die aus der Literatur entnommenen Werte der sind in der Regel Einzelmessungen und können in den Werken selbst nachgeschlagen werden.

Bei der Auswahl der aufgeführten Werte wurde nicht beachtet, ob die Messstelle noch aktiv ist und ob das Gelände bereits einer anderweitigen Nutzung unterliegt. Es wird davon ausgegangen, dass jedes untersuchte Gewässer das Potential zur Errichtung einer geothermischen Anlage hat.

### 5.1.1 Oberflächennahe karbonische Grundwässer

Tabelle 1: Analysewerte oberflächennaher karbonischer Gewässer

Datenquelle	ELWAS- WEB	ELWAS- WEB	ELWAS- WEB	Siebert (1962)	ELWAS- WEB	ELWAS- WEB	ELWAS- WEB
Messstelle	059110156	059110363	059540515	Crefelder Sprudel	059540308	042035016	030302742

#### Umgebungsparameter:

Messung	Einheit	Mittelwert						
Wassertemperatur	°C	15,03	13,08	12,08	14	13,27	11,65	12,91
pH-Wert		6,66	6,83	6,58	-	6,22	6,20	6,05
Sauerstoffgehalt	mg/l	2,09	6,18	2,21	-	2,14	4,60	1,98
TOC	mg/l	8,90	1,83	1,57	-	1,48	1,45	2,20
Leitfähigkeit	mS/m	232,73	102,50	42,76	-	115,74	79,50	47,24
Redoxspannung	mV	-27,75	109,67	205,19	-	239,64	-	290,90

#### Anionen:

Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/l	672,80	398	50,34	0,86	214,74	43,50	89,68
Nitrat(NO <sub>3</sub> )	mg/l	5,31	4,63	3,97	2,2	14,17	8,41	2,76
Hydrogenkarbonat (HCO <sub>3</sub> )	mg/l	827,33	182,33	121,61	452	203,50	-	64,68
Chlorid (Cl)	mg/l	452,73	14,03	38,17	4397	190,68	126,50	62,50

#### Kationen:

Magnesium (Mg)	mg/l	106,80	43,67	9,53	85,9	27,23	9,50	9,75
Eisen (Fe)	mg/l	9,34	3,83	0,47	3,97	0,51	0,58	0,12
Kalium (K)	mg/l	11,99	2,3	4,68	50	2,61	1,90	4,65
Mangan (Mn)	mg/l	5,16	0,16	0,29	-	0,37	0,00	1,02
Calcium (Ca)	mg/l	455,80	133,33	62,39	108,8	168,58	60,40	50,12
Natrium (Na)	mg/l	262,27	35,67	23,86	2700	94,01	41,60	30,71

Fortsetzung Tabelle 1: Analysewerte oberflächennaher karbonischer Gewässer

Datenquelle	ELWAS- WEB						
Messstelle	059130726	059540576	099780112	031040100	094150450	091175008	094140273

**Umgebungsparameter:**

Messung	Einheit	Mittelwert						
Wassertemperatur	°C	12,08	15,48	12,02	10,77	11,27	9,07	11,94
pH-Wert		6,89	7,14	6,71	7,25	7,40	6,77	7,55
Sauerstoffgehalt	mg/l	1,96	5,27	5,11	4,83	9,78	7,49	8,61
TOC	mg/l	3,08	1,37	0,40	0,41	4,70	0,00	8,40
Ele. Leitfähigkeit	mS/m	83,11	33,69	55,41	37,80	18,42	25,03	48,00
Redoxspannung	mV	54,11	219,05	-40,33	431,67	-42,20	263,00	-

**Anionen:**

Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/l	1,96	38,90	118,93	18,61	22,91	22,66	41,06
Nitrat(NO <sub>3</sub> )	mg/l	0,54	3,12	1,67	8,73	6,81	25,32	2,95
Hydrogenkarbonat (HCO <sub>3</sub> )	mg/l	362,83	157,30	131,38	219,00	32,31	81,49	123,54
Chlorid (Cl)	mg/l	46,20	18,68	21,21	6,36	21,91	10,91	13,33

**Kationen:**

Magnesium (Mg)	mg/l	22,86	17,38	16,88	6,76	6,13	3,90	7,28
Eisen (Fe)	mg/l	0,35	0,62	10,22	0,12	0,96	0,40	0,50
Kalium (K)	mg/l	7,19	2,91	1,57	0,66	1,39	0,46	2,64
Mangan (Mn)	mg/l	2,76	0,090	0,91	0,0042	0,050	0,021	0,28
Calcium (Ca)	mg/l	154,67	35,49	69,24	72,71	8,07	35,71	34,77
Natrium (Na)	mg/l	43,21	9,77	14,65	4,30	13,85	5,62	9,79

**Umgebungsparameter**

In Tabelle 1 liegt die Wassertemperatur zwischen 9,7 und 15,03 °C. Die durchschnittlichen pH-Werte bewegen sich von 6,05-7,55.

Der Sauerstoffgehalt zeigt eine Schwankungsbreite von 1,96 bis 9,78 mg/l. Die Werte des gelösten organischen Kohlenstoffs (TOC) variieren im Bereich um 0,00 bis 8,90 mg/l, die Leitfähigkeit zwischen 18,42- 232,73 mS/m. Das durchschnittliche Potential der Redoxspannung wurde mit -42,2 mV bis +290,90mV gemessen.

**Anionen**

Unter den gelösten Anionen in Tabelle 1 wurden die Werte mit 32,31 - 827,33mg/l Hydrogenkarbonat, 0,86 -672,8 mg/l Sulfat, 0,54 - 25,32mg/l Nitrat und 6,36- 4397 mg/l Chlorid ermittelt.

**Kationen**

Bei den Kationen aus Tabelle 1 wurden Werte zwischen 3,90 - 106,80mg/l für Magnesium, 0,12 - 10,22 mg/l Eisen, 0,46 - 11,99mg/l Kalium, 0,00 - 5,16 Mangan mg/l, 8,07 - 455,80mg/l Calcium und 4,30 - 2700 mg/l Natrium gemessen.

### 5.1.2 Quartäre oberflächennahe Grundwasserdaten

Tabelle 2: Analysewerte oberflächennaher quartärer Gewässer

<b>Datenquelle</b>	ELWAS- WEB						
<b>Messstelle</b>	059160068	059160123	060090339	040100091	060080164	059130600	059130570

#### Umgebungsparameter:

Messung	Einheit	Mittelwert						
Wassertemperatur	°C	13,55	15,14	10,85	13,09	13,06	10,75	12,84
pH-Wert		7,43	6,88	6,94	5,99	7,19	8,10	6,87
Sauerstoffgehalt	mg/l	0,31	2,93	1,52	3,60	0,86	1,32	0,72
TOC	mg/l	2,16	2,88	2,97	1,62	1,90	4,11	4,65
Ele. Leitfähigkeit	mS/m	59,33	157,74	84,24	74,89	68,68	142,58	95,09
Redoxspannung	mV	-129,25	172,81	-29,50	175,99	-73,00	-182,16	-24,38

#### Anionen:

Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/l	58,76	514,00	150,13	162,88	112,56	17,81	35,96
Nitrat(NO <sub>3</sub> )	mg/l	0,12	0,54	0,063	33,62	1,06	0,00	0,00
Hydrogenkarbonat (HCO <sub>3</sub> )	mg/l	244,67	384,00	291,20	125,45	323,50	663,15	642,50
Chlorid (Cl)	mg/l	67,24	224,63	74,45	69,99	30,64	161,08	40,36

#### Kationen:

Magnesium (Mg)	mg/l	5,84	31,63	7,81	14,96	5,87	2,92	24,39
Eisen (Fe)	mg/l	3,20	0,15	1,88	0,029	1,96	0,40	1,62
Kalium (K)	mg/l	4,89	11,34	5,15	7,70	1,94	6,50	5,24
Mangan (Mn)	mg/l	0,31	0,014	0,27	0,0049	0,096	0,027	0,0079
Calcium (Ca)	mg/l	85,87	344,83	146,35	80,30	130,92	13,52	0,055
Natrium (Na)	mg/l	49,38	72,02	20,59	42,83	9,32	352,49	103,30

Fortsetzung Tabelle 2: Analysewerte oberflächennaher quartärer Gewässer

Datenquelle	ELWAS- WEB						
Messstelle	040061504	040061498	040061425	040061267	030000075	080303330	010203862

## Umgebungsparameter:

Messung	Einheit	Mittelwert						
Wassertemperatur	°C	12,45	12,78	11,60	11,23	10,30	10,87	11,81
pH-Wert		7,13	7,30	6,73	6,73	5,95	6,46	6,83
Sauerstoffgehalt	mg/l	0,13	0,83	8,56	1,02	1,53	4,11	6,79
TOC	mg/l	1,65	1,42	0,37	2,03	1,79	1,18	7,42
Ele. Leitfähigkeit	MS/M	82,67	69,98	71,42	143,98	39,35	68,88	90,57
Redoxspannung	MV	188,00	148,00	230,40	-34,80	142,88	249,63	79,00

## Anionen:

Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/l	107,18	63,04	111,85	272,90	107,80	117,08	82,80
Nitrat(NO <sub>3</sub> )	mg/l	0,81	12,34	29,17	0,22	8,80	34,87	96,61
Hydrogenkarbonat (HCO <sub>3</sub> )	mg/l	324,50	180,78	214,11	439,67	74,50	210,88	271,50
Chlorid (Cl)	mg/l	64,18	87,01	58,94	137,69	23,84	48,34	52,13

## Kationen:

Magnesium (Mg)	mg/l	10,03	10,56	12,30	22,02	10,55	18,39	15,38
Eisen (Fe)	mg/l	0,013	0,0089	0,017	18,86	5,54	3,42	0,99
Kalium (K)	mg/l	5,62	5,10	6,55	17,32	1,86	5,26	1,99
Mangan (Mn)	mg/l	0,22	0,24	0,0015	1,59	1,80	1,52	0,026
Calcium (Ca)	mg/l	123,67	72,02	84,29	202,00	39,90	99,96	155,00
Natrium (Na)	mg/l	44,33	46,40	43,10	78,09	12,04	16,43	13,00

**Umgebungsparameter**

Die Wasserstemperatur lag in Tabelle 2 innerhalb der Messungen zwischen 10,3 und 15,41 °C, der pH-Wert zwischen pH 5,95 und pH 8,10. Für den Sauerstoffgehalt ergaben sich Werte von 0,13 bis 8,56 mg/l und für den TOC 0,37 bis 7,42 mg/l.

Für die elektrische Leitfähigkeit wurden Werte zwischen 39,35 und 157,74 mS/m und zum Redoxpotential Werte zwischen -182,16 und + 249,63 mV ermittelt.

**Anionen**

Für Sulfat lagen die Werte aus Tabelle 2 zwischen 35,96 - 514,00, für Nitrat 0,00 - 96,61, für Hydrogenkarbonat 125,45 - 663,15 und für Chlorid 30,64 - 224,63 jeweils in mg/l.

**Kationen**

Die aus Tabelle 2 ermittelten Wertebereiche stellen sich wie folgt dar: Magnesium 2,92 - 31,63mg/l, Eisen 0,0089 - 18,8 mg/l, Kalium 1,86 – 17,32 mg/l, Mangan 0,0015 -1,80 mg/l, Calcium 0,055 - 344,83 mg/l, Natrium 9,32 - 352,49 mg/l.

### 5.1.3 Tertiäre oberflächennahe Grundwasserdaten

Tabelle 3: Analysewerte oberflächennaher tertiärer Gewässer

Datenquelle	ELWAS- WEB	ELWAS- WEB	ELWAS- WEB	Siebert (1962)	ELWAS- WEB	ELWAS- WEB	ELWAS- WEB
Messstelle	030302626	040607010	040406015	Krefeld- Uerdingen	030302810	030302821	032032055

#### Umgebungsparameter:

Messung	Einheit	Mittelwert						
Wassertemperatur	°C	11,21	11,76	11,74	10,5	12,51	10,58	12,36
pH-Wert		6,79	6,28	5,81	-	6,95	6,62	6,88
Sauerstoffgehalt	mg/l	2,00	0,53	5,61	-	5,47	2,42	5,58
TOC	mg/l	6,63	16,25	1,97	-	0,77	6,38	-
Leitfähigkeit	mS/m	49,76	68,79	62,51	-	80,57	77,94	60,63
Redoxspannung	mV	163,56	-39,14	291,00	-	322,78	185,54	430,50

#### Anionen:

Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/l	46,23	69,33	189,00	25,4	35,23	67,75	78,75
Nitrat(NO <sub>3</sub> )	mg/l	0,84	0,00	38,91	0	120,11	5,11	26,04
Hydrogenkarbonat (HCO <sub>3</sub> )	mg/l	261,00	136,58	45,45	282,0	378,67	284,78	270,40
Chlorid (Cl)	mg/l	23,89	101,46	34,79	638	27,23	102,76	21,13

#### Kationen:

Magnesium (Mg)	mg/l	6,84	8,72	15,00	6,6	16,07	12,96	9,61
Eisen (Fe)	mg/l	3,68	3,44	0,0027	0,05	2,70	13,78	0,52
Kalium (K)	mg/l	4,26	3,50	4,57	20	1,47	2,62	3,41
Mangan (Mn)	mg/l	0,26	0,22	0,00070	-	0,028	1,16	0,0029
Calcium (Ca)	mg/l	81,51	57,81	73,28	16,4	158,27	97,65	105,88
Natrium (Na)	mg/l	13,36	69,71	29,02	480	7,99	42,95	22,50

Fortsetzung Tabelle 3: Analysewerte oberflächennaher tertiärer Gewässer

<b>Datenquelle</b>	ELWAS- WEB						
<b>Messstelle</b>	040606016	073529217	076839217	076840116	076981113	076988491	278534910

**Umgebungsparameter:**

<b>Messung</b>	<b>Einheit</b>	<b>Mittelwert</b>						
Wassertemperatur	°C	11,56	10,95	14,19	13,84	13,80	12,11	11,82
pH-Wert		5,24	6,45	5,36	6,81	5,32	6,96	6,08
Sauerstoffgehalt	mg/l	6,79	3,96	2,47	1,58	0,60	7,35	1,71
TOC	mg/l	1,77	2,01	3,80	1,74	3,88	1,10	5,34
Leitfähigkeit	mS/m	46,08	62,05	76,05	70,20	6,21	64,55	101,93
Redoxspannung	mV	132,67	-	245,00	-	-	-	-

**Anionen:**

Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/l	55,84	52,67	255,20	59,71	15,52	60,65	177,70
Nitrat(NO <sub>3</sub> )	mg/l	40,23	52,59	9,09	19,46	0,00	10,94	0,13
Hydrogenkarbonat (HCO <sub>3</sub> )	mg/l	11,03	-	15,00	-	-	302,00	-
Chlorid (Cl)	mg/l	13,97	30,92	52,97	37,03	0,00	27,92	94,02

**Kationen:**

Magnesium (Mg)	mg/l	8,09	12,77	15,37	13,63	1,00	15,65	20,61
Eisen (Fe)	mg/l	0,58	0,011	0,55	1,19	1,39	0,0037	17,54
Kalium (K)	mg/l	1,28	3,32	5,61	3,13	1,14	2,33	1,85
Mangan (Mn)	mg/l	0,065	0,00017	1,26	0,12	0,071	0,00	0,70
Calcium (Ca)	mg/l	25,84	82,12	93,95	112,98	7,23	92,63	160,06
Natrium (Na)	mg/l	6,90	15,96	30,48	9,69	2,97	14,78	28,18

**Umgebungsparameter**

Aus der Betrachtung der Umgebungsparameter von Tabelle 3 wurden folgende Wertbereiche ermittelt: Wassertemperatur 10,5-14,19 °C, pH-Wert 5,24 - 6,96, Sauerstoffgehalt 0,53 – 7,35mg/l, TOC 0,77 – 16,25 mg/l, ele. Leitfähigkeit 6,21 – 101,93 mS/m, Redoxspannung -39,14 - 430,50 mV.

**Anionen**

Nach Tabelle 3 wurden für die Anionen folgende Konzentrationen ermittelt: Sulfat 15,52 -255,20 mg/l, Nitrat 0,00 – 120,11 mg/l, Hydrogenkarbonat 11,03- 378,67 mg/l, Chlorid 0,00 – 638 mg/l.

**Kationen**

Für die Kationen aus Tabelle 3 können die nachstehenden Konzentrationsangaben zwischen den höchsten und niedrigsten Werten angegeben werden: Magnesium 1,00 - 20,61 mg/l, Eisen 0,0027- 17,54 mg/l, Kalium 1,14 – 20mg/l, Mangan 0,00 – 1,26mg/l, Calcium 7,23 -16,06mg/l, Natrium 2,97 – 480mg/l

### 5.1.4 Mitteltiefe karbonische Gewässer

Tabelle 4: Analysewerte mitteltiefer karbonischer Gewässer

Datenquelle	Wedewardt (1995)	Wedewardt (1995)	Wedewardt (1995)	Wisotzky (2011)	Wisotzky (2011)	Wisotzky (2011)	Wisotzky (2011)
Messtelle	PR1	PR 2	ZW5	Friedlicher Nachbar	Rober Müser	Heinrich	Haus Aden

#### Umgebungsparameter:

Messung	Einheit	Mittelwert						
Wassertemperatur	°C	39,0	20,0	22,0	22,0	19,6	21,6	29,3
pH-Wert		6,20	7,10	7,62	7,6	7,1	7,1	7,15
Sauerstoffgehalt	mg/l	-	-	-	-	-	-	-
TOC	mg/l	-	-	-	-	-	-	-
Leitfähigkeit	mS/m	16800,0	9450,0	615,0	238,8	455,0	271,0	1945,0
Redoxspannung	mV	-	-	-11	-	-		

#### Anionen:

Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/l	<10	1850,0	111,0	395	188	440	188
Nitrat(NO <sub>3</sub> )	mg/l	<5	<5	3,6	22	2	-	<0,2
Hydrogenkarbonat (HCO <sub>3</sub> )	mg/l	109,0	128,0	929,0	864	872	-	592
Chlorid (Cl)	mg/l	84000,0	27000,0	1600,0	219	1130	432	6420

#### Kationen:

Magnesium (Mg)	mg/l	1200	600,0	49,0	50	46,5	-	136
Eisen (Fe)	mg/l	14,0	0,7	0,2	110	1,9	13	0,4
Kalium (K)	mg/l	370,0	170,0	25,0	20	38,3	22,0	38,3
Mangan (Mn)	mg/l	0,8	1,0	0,26	-	<0,1	0,77	-
Calcium (Ca)	mg/l	3800,0	2200,0	111,0	103	138	-	453
Natrium (Na)	mg/l	48000,0	15000,0	1200,0	455	856	446	3800

Fortsetzung Tabelle 4: Analysewerte mitteltiefer karbonischer Gewässer

Datenquelle	Wedewardt (1995)						
Messstelle	C2	C3	HD1	ZW33	ZW28	Z16	M3

**Umgebungsparameter:**

Messung	Einheit	Mittelwert						
Wassertemperatur	°C	58,0	38,0	34,0	36,0	23,5	27,0	26,0
pH-Wert		6,26	6,88	6,60	7,41	7,38	4,99	7,25
Sauerstoffgehalt	mg/l	-	-	-	-	-	-	-
TOC	mg/l	-	-	-	-	-	-	-
Leitfähigkeit	mS/m	16210,0	14150,0	1170,0	6180,0	1410,0	14710,0	8730,0
Redoxspannung	mV	-	-	-	-	-	-	-

**Anionen:**

Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/l	<5	<5	610,0	<5	52,0	1220,0	20,0
Nitrat(NO <sub>3</sub> )	mg/l	45,0	43,0	<5	<10	5,8	110,0	88,0
Hydrogenkarbonat (HCO <sub>3</sub> )	mg/l	115,0	127,0	153,0	298,0	458,0	2,0	208,0
Chlorid (Cl)	mg/l	82800,0	68000,0	54000,0	24300,0	4600,0	72500,0	37700,0

**Kationen:**

Magnesium (Mg)	mg/l	1120,0	1050,0	2200,0	420,0	94,0	1800,0	1300,0
Eisen (Fe)	mg/l	23,0	9,2	0,3	<0,5	5,7	36,0	61,0
Kalium (K)	mg/l	616,0	469,0	280,0	233,0	29,0	18,0	175,0
Mangan (Mn)	mg/l	2,6	2,7	11,0	0,8	0,28	8,0	2,72
Calcium (Ca)	mg/l	5430,0	4380,0	3450,0	1480,0	260,0	7040,0	2430,0
Natrium (Na)	mg/l	44500,0	36100,0	27000,0	13900,0	2720,0	35100,0	20200,0

### **Umgebungsparameter**

Die hier in Tabelle 4 dargestellten mitteltiefen karbonischen Grund- und Grubenwasser wiesen Temperaturen zwischen 19,6 und 58,0 °C auf. Die pH-Werte lagen zwischen 4,99 und 7,62 und die Leitfähigkeit lag bei Werten von 238,8 – 16800,0 mS/m.

### **Anionen**

Für die Anionen nach Tabelle 4 konnten die Wertebereiche wie folgt ermittelt werden: Sulfat <5 – 1850,0 mg/l, Nitrat <0,2 – 110 mg/l, Hydrogenkarbonat 2,0 – 929,0 mg/l, Chlorid 219,0 – 84000,0 mg/l.

### **Kationen**

Die Konzentrationsangaben in Tabelle 4 für die Kationen erstreckten sich über folgende Bereiche: Magnesium 46,5 – 1800,0 mg/l, Eisen 0,2 – 110mg/l, Kalium 18,0 - 616,0 mg/l, Mangan <0,1 – 11,0 mg/l, Calcium 103,0 – 7040,0 mg/l, Natrium 446, 0 – 48000,0 mg/l.

## 5.2.1 Sulfat-reduzierende Mikroorganismen

Tabelle 5: Sulfat reduzierende Mikroorganismen

Nummer	1	2	3	4
<b>Autor/Quelle:</b>	Alawi et al. (2011)	Alawi et al. (2011)	Detmers et al. (2004)	Wallhäuser & Puch (1966)
<b>Organismen</b>	<i>Desulfotomaculum sp.</i> ; Candidatus <i>Desulforudis</i> 94 <i>audaxviator</i>	<i>Desulfotomaculum sp.</i> ; <i>Desulfococ. oleovorans</i> Hxd3	u.a. <i>Desulfotomaculum sp.</i>	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>
<b>Fundort (Tiefe)</b>	geotherm. Anlage (3-3,5km)	geotherm. Anlage (3-3,5km)	Grundwasser (Tiefe: 120-125m)	u.a. Zechen im Ruhrkarbon (Tiefe: 339 -950m)
<b>Art der Probe</b>	Wasserprobe	Wasserprobe		Wasserprobe
<b>Umgebungsparameter</b>	Temperatur: 61°C Kohlenstoff: 6,4-19,3mg/l Redoxspannung: -350mV pH-Wert: 6,6-7,3	Temperatur: 103°C Kohlenstoff: 7,3-12,3mg/l Redoxspannung: -350mV pH-Wert: 6,6-7,3	Temperatur: 11,3-13,2°C Kohlenstoff: 1,31-26,3 mg/l Sauerstoff: 0,0-1,1mg/l pH: 6,94-7,74	Temperatur: 17-33,1 °C Kohlenstoff: 0-3470mg/l
<b>Anionen</b>	Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ): 30–39mg/l	Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ): 30–39mg/l	Sulfat(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ): 2,8-17,1mg/l Nitrat(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ):0,04-0,10mg/l	-
<b>Kationen</b>	Eisen: 0,055mg/l	Eisen: 0,055mg/l		
<b>Art des Nachweises</b>	Genomanalyse	Genomanalyse	Genomanalyse	Kultiviert/Mikroskopisch

In Spalte 1, nach Alawi et al. (2011), konnten in einer geothermischen Anlage bei einer Temperatur von 61°C und einem pH-Wert zwischen 6,6 und 7,3 die SRBs *Desulfotomaculum sp.* und *Candidatus Desulforudis 94 audaxviator* nachgewiesen werden. Die Redoxspannung betrug -350mV, der Kohlenstoffanteil 6,4-19,3mg/l. Weiter konnten Sulfat-Gehalte zwischen 30 und 39mg/l festgestellt werden, während die Konzentration von Eisen 0,055mg/l betrug.

In der gleichen Anlage konnten in Spalte 2, ebenfalls nach Alawi et al. (2011), bei einer Temperatur von 103 °C, einem Kohlenstoffgehalt von 7,3-12,3mg/l und sonst gleichen Verhältnissen wie zuvor die Organismen *Desulfotomaculum sp.* und *Desulfococ. oleovorans* Hxd3 sequenziert werden.

In Spalte 3 wiesen Detmers et al. (2004) unter anderem *Desulfotomaculum sp.* per Genomanalyse nach. Die Wasserproben hatten zum Zeitpunkt der Entnahme Temperaturen zwischen 11,3-13,2°C und einen pH-Wert um 6,94-7,74. Die Proben enthielten außerdem zwischen 1,31-26,3 mg/l Kohlenstoff, 9,0 bis 1,1mg/l Sauerstoff, 2,8-17,1mg/l Sulfat und 0,04-0,10mg/l Nitrat.

Nach Wallhäuser & Puchelt (1966), in Spalte 4, wurde unter anderem in verschiedenen Zechen des Ruhrkarbons unter Temperaturen von 17 bis 33,1 °C und Kohlenstoffanteilen von 0 bis 3470 mg/l das SRB *Desulfovibrio desulfuricans* nachgewiesen.

## 5.2.2 Metalloxidierende Mikroorganismen

Tabelle 6: Metalloxidierende Mikroorganismen

Nummer	1	2	3	4
<b>Autor/Quelle:</b>	Rosa et al. (1974)	Robbins & Corley (2005)	Xie et al. (2010)	Bruneel et al. (2006)
<b>Organismen</b>	<i>Sulfolobus acidocaldarius</i>	<i>Leptothrix discophora</i>	u.a. <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> <i>Gallionella ferruginea</i>
<b>Fundort (Tiefe)</b>	geotherm. Quelle/Hotspring	Fluss nahe Kupfergrube	Kupfergrube (bis -160m)	Grube
<b>Art der Probe</b>	Wasserprobe	Wasserprobe	Wasserproben	Wasserprobe
<b>Umgebungsparameter</b>	Temperatur: 74 - 89°C Kohlenstoff: 7,3 - 12,3mg/l pH: 1,4 - 2,6	Temperatur: -5 bis 43 °C pH: 6,9-7,2	Temperatur: <30°C pH: 2-3	Temperatur: gelagert 20°C pH: 2,7 -3,4
<b>Anionen</b>	-	-	(Schwefel: 1,25-14,03 mg/l)	Sulfat: 2000-7500mg/l
<b>Kationen</b>	-	Mangan: 40-65mg/l	Eisen: 0.62 -9.90 mg/l Magnesium: 0.10 -0.56 mg/l Calcium: 0,11-0,60 mg/l Mangan: 0,19-66 mg/l Natrium 0,03 -0,11 mg/l	Eisen: 750 -2700 mg/l
<b>Art des Nachweises</b>	Genomanalyse	-	Genomanalyse	Genomanalyse

Nach Rosa et al. (1974), Spalte 1, konnte *Sulfolobus acidocaldarius* (Archaea) aus einer Wasserprobe in einer geothermalen Quelle bei Temperaturen zwischen 74-89 °C und pH-Werten zwischen 1,4 und 2,6 nachgewiesen werden. Auffällig erhöhte Werte bezüglich der Wasserinhaltsstoffe wurden dabei nicht festgestellt.

Robbins & Corley (2005), Spalte 2, wies bei Temperaturen von -5 bis 43°C und pH-Werten um 6,9-7,2 das Bakterium *Leptothrix discophora* aus Grubenabwasser einer Kupfergrube nach, welches in einen Fluss eingeleitet wurde. Darin befanden sich erhöhte Mangangehalte um 40-65mg/l.

Aus den Wasserproben einer Kupfergrube konnten Xie et al. (2010), Spalte 3, bei einem pH-Wert von 2-3 und Temperaturen von unter 30°C unter anderem *Acidithiobacillus ferrooxidans* nachweisen.

Durch Bruneel et al. (2006) in Spalte 4, wurden durch die Untersuchung von Sumpfungswässern *Acidithiobacillus ferrooxidans* und *Gallionella ferruginea* bestimmt. Der pH-Wert schwankte innerhalb der Proben zwischen 2,7-3,4, welche bei 20°C gelagert wurden. Gekennzeichnet waren die Proben durch hohe Sulfat- (2000-7500mg/l) und Eisengehalte (750 -2700 mg/l).

### 5.2.3 Mikroorganismen im Stickstoffkreislauf

Tabelle 7: Mikroorganismen im Stickstoffkreislauf

Nummer	1	2	3	4
<b>Autor/Quelle:</b>	(Xie et al. 2010)	Coman et al. (2013)	Lerm et al. (2011)	Hamilton et al. (2011)
<b>Organismen</b>	u.a. <i>Calothrix sp.</i> , <i>Chlorogloeopsis sp.</i>	<i>Chroococidiopsis sp.</i> , <i>Fischerella sp.</i>	u.a. <i>Nitrosospira sp.</i>	Gensequenz nifH von versch. Alphaproteobakterien
<b>Fundort (Tiefe)</b>	Kupfergrube (bis -160m)	Geotherm. Quelle	geotherm. Anlage (-30-60m)	Geotherm. Quelle
<b>Art der Probe</b>	Wasserproben	Biofilm	Wasserprobe	
<b>Umgebungsparameter</b>	Temperatur: <30°C; pH: 2-3 Schwefel: 1,25-14,03mg/l	Temperatur: 45-55°C pH: 8	Temperatur: 6-30°C; pH: 7,4 Redoxspannung: 40-80mV DOC: 3,6 – 6,2mg/l	Temperatur: 48,0–89,0°C pH 1,90–5,02
<b>Anionen</b>	-	-	Sulfat: 164–221mg/l Nitrat: 1,3 mg/l	-
<b>Kationen</b>	Fe: 0,62 -9,9 0mg/l Mg: 0,10 - 0.56 mg/l Ca: 0,11-0,60 mg/l Mn: 0,19-66 mg/l Na: 0,03 -0,11 mg/l	-	Eisen: 2,1-2,4mg/l	-
<b>Art des Nachweises</b>	Genomanalyse	Genomanalyse	Genomanalyse	Genomanalyse

Xie et al. 2010, in Spalte 1, konnten innerhalb der gleichen Messungen, welche bereits in den Ergebnissen unter Tabelle 6 aufgezeigt worden sind, weiter die Organismen *Nitrosomonas sp.*, *Calothrix sp.*, und *Chlorogloeopsis sp.* nachweisen.

In Spalte 2 konnten Coman et al. (2013) bei Temperaturen zwischen 45-55°C und pH 8 in einer geothermalen Quelle *Chroococidiopsis sp.* und *Fischerella sp.* feststellen.

*Nitrosospira sp.* wurde durch Lerm et al. (2011), Spalte 3, in einer geothermischen Anlage mit einer Temperatur von 6-30°C bei pH: 7,4 und einer Redoxspannung zwischen 40-80mV und einem DOC bei 3,6 – 6,2mg/l per Genomanalyse ermittelt. Der Sulfatgehalt wurde mit zwischen 164–221mg/l gemessen.

Anhand einer Genanalyse ermittelten Hamilton et al. (2011) in Spalte 4 die nifH-Sequenz, welche aus verschiedenen Alphaproteobakterien stammten. Die Temperatur lag zwischen 48,0–89,0°C, der pH-Wert bei 1,90–5,02.

### 5.3 Sichtung von Schäden

Zur Feststellung von Material- und Bauwerksschäden wurden diese im Rahmen von Begehungen verschiedener Anlagen fotodokumentarisch festgehalten.

Für die Sichtung von Schäden durch verschiedene Kalkausfällungen aus mitteltiefen Grubenwässern wurden ehemalige Anlagenteile zur Wasserhaltung eines stillgelegten Bergwerks, heute Besucherbergwerk, untersucht und für Schäden durch Kalkabtragung oberflächennaher Grundwässer, welche man durch oberflächennahe Schachtbrunnen erreichen könnte, die Umfassung einer nicht mehr genutzten Wasserquelle betrachtet.

Um die Biofilmbildung und Korrosion von Metallwerkstoffen sowie die Verockerung zu untersuchen, wurde die Außenanlage der Wasserausspeisung einer aktuell in Betrieb befindlichen mitteltiefen geothermischen Anlage ohne Speicherbetrieb in Sicht genommen.

Ergänzende Aufnahmen befinden sich im Anhang.

#### 5.3.1 Zeche Hannover, Bochum

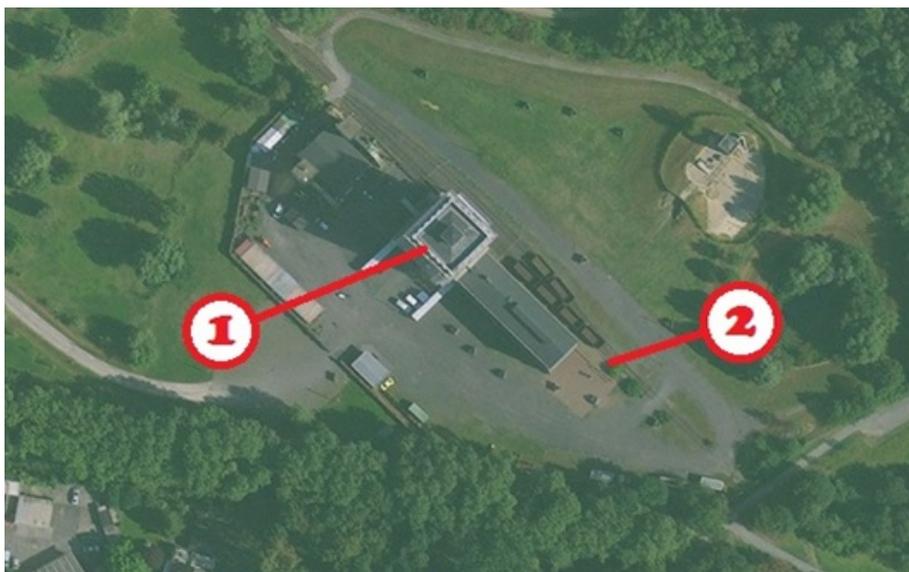


Abbildung 21: Übersicht zur Zeche Hannover, mit Maschinenhaus (1) und Außenanlage (2)

Die Reste ehemalige Zeche sind in der Abbildung 21 zu erkennen, welche heute als Museum zum Teil zugänglich sind. Gekennzeichnet ist, an welchen Orten die nachfolgenden Bilder aufgenommen wurden.

Ob die nachfolgend gezeigten Leitungen über die gesamte Zeit des Bestehens der Zeche zwischen 1857 und 1973 benutzt wurden, ist fraglich.



**Abbildung 22: Offene Rohrleitung zur Wasserführung im Innenbereich**

Die Abbildung 22 zeigt trockene gelbliche Ablagerungen, zum Teil zerbrochen in einem Rohr zur Wasserführung im Innenbereich der stillgelegten Zeche Hannover.



Kreft, Bochum 2017

**Abbildung 23: Offene Rohrleitung im Außenbereich**

Abbildung 23 zeigt ein Rohr, welches zur Grubenwasserhaltung verwendet wurde, bei dessen Betrachtung man verschiedenfarbige gräuliche, gelbliche und auch weißliche Ablagerungen erkennt. Die einzelnen Ablagerungen liegen zum Teil geschichtet übereinander und sind teilweise von Poren durchsetzt. Am äußerem Rand zwischen Ablagerung und Rohr erkennt man dunkle rostige Stellen, welche besonders gut erkennbar links unten schuppig abstehen. Auf den gelblichen Ablagerungen sind kleinere grünliche flechtenartige Stellen zu erkennen.

### 5.3.2 Wasserquelle, Obermarsberg



google Maps 2017

Abbildung 24: Lage der Wasserquelle (O) auf Obermarsberg

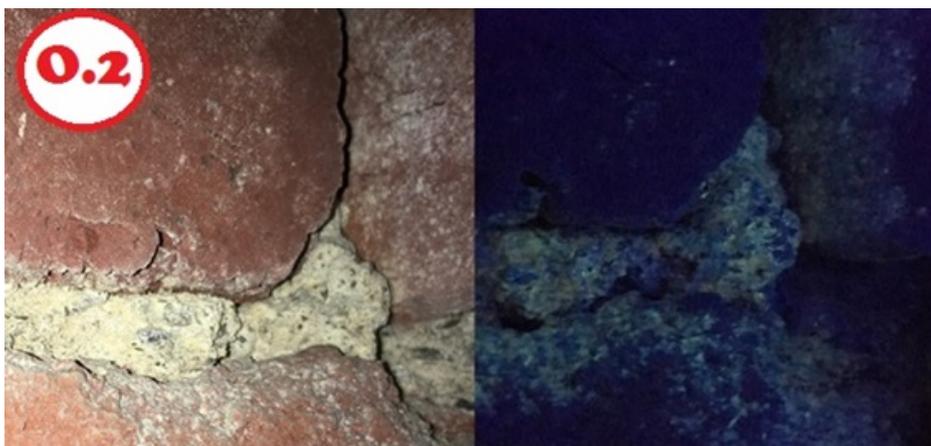
In der Mitte der Abbildung 24 liegt das auf einem Tafelberg aus Kalksandstein errichtete Obermarsberg. Die markierte Stelle deutet auf die Lage der Untersuchungsstelle einer oberflächennahen Quelle (Drakenhöhlenquelle) hin, deren Wasser spätestens ab dem Jahre 1628 als Trinkwasser genutzt wurde, seit 1965 aber keine Verwendung mehr findet. Die angrenzenden Höhlen wurden von 1928 bis 1935 als Kühlraum für Fleischwaren genutzt (Informationstafel am Ort; vgl. Anhang).



Kreft, Obermarsberg 2017

**Abbildung 25: Gemauerte Umfassung der oberflächennahen Grundwasserquelle**

Die gemauerte Umfassung der „Drakenhöhlenquelle“, in Abbildung 25 (O.1), welche direkt an das Höhlengestein grenzt, weist zum Teil mehrere Zentimeter tiefe Auswaschungen des Bindemittels zwischen den Ziegelsteinen auf. Etwa 5 bis 10 m oberhalb der Quelle befinden sich mineralische Böden mit Pflanzenbewuchs.



Kreft, Obermarsberg 2017

**Abbildung 26: Nahaufnahme des Mauerwerks, links im Tageslicht, rechts bei UV-Licht**

Abbildung 26 (O.2) zeigt die größere Darstellung einer Fuge. Links erkennt man gelblich/weißliche Ablagerungen im Tageslicht auf den roten Backsteinen, das gelbliche Bindemittel wirkt brüchig. Rechts wurde die Stelle abgedeckt und mit einer UV-Leuchte bei 366 nm angestrahlt, womit der Kontrast zwischen Bindemittel und Backsteinen deutlicher wird. Nicht alle Stellen des gelblichen Bindemittels fluoreszieren im UV-Licht.

### 5.3.3 Geothermische Anlage Robert Müser, Bochum



google Maps 2017

**Abbildung 27: Übersicht der geothermischen Anlage Robert Müser (R) und der Harpener Teiche (H)**

Auf der Abbildung 27 ist eine Übersicht der Harpener Teiche (links) zu erkennen, welche deutliche weiß/bläuliche bis grünlich/türkisene Verfärbungen aufzeigen. Rechts liegt das Gelände der ehemaligen Zeche Robert Müser. Oberhalb befindet sich die Feuerwache. In der Zeche wird seit dem Jahr 2012 geothermale Energie zum Beheizen zweier nahegelegener Schulen und der Hauptfeuerwache gewonnen (vgl. Anhang; URL-6). In unmittelbarer Umgebung kann ein schwefeliger Geruch wahrgenommen werden.



Kreft, Bochum 2017

Abbildung 28: Einspeisung in die Harpener Teiche

Abbildung 28 (H1) zeigt die Einleitung des Grubenwassers in die Harpener Teiche. Im Vordergrund fließt helles Wasser aus dem Auslauf unterhalb des Metallgestells, im Hintergrund zunächst eine milchig-bläuliche Färbung des Wassers mit Übergang ins Bräunliche. Die gesamte Teichanlage weist eine bräunliche Trübung auf.



Kreft, Bochum 2017

Abbildung 29: Biofilmbildung am verzinktem Gestell der Harpener Teiche

Am Gestell in Abbildung 29 (H2) sind verschiedene Biofilme und Ablagerungen zu erkennen. Im Bild unten links erkennt man eine dunkle, grünliche feuchte Ablagerung, welche weiter nach rechts weiß/kalkig und trocken erscheint, während sie in der Mitte rötlich/bräunlich gefärbt ist.



Kreft, Bochum 2017

**Abbildung 30: Abgelöster Biofilm am Zinkgestell der Harpener Teiche**

In Abbildung 30 (H3) erkennt man einen rötlichen/bräunlichen Film im Vordergrund. Entfernt man den Film auf der Oberfläche des Zinkgestells, zeigt sich darunter das blanke Zinkmaterial. Im Hintergrund erkennt man grünlichen und gelblichen flechtenartigen oder moosartigen Bewuchs.



Kreft, Bochum 2017

Abbildung 31: Rost an den Verschraubungen der Leiter der Harpener Teiche

Im linken Teil der Abbildung 31 (H4) sind verrostete Schraubenköpfe mit bräunlichem Kranz an der Leiter des Zinkgestells zu den Harpener Teichen zu erkennen.



Quelle: **Christin Bücker, Stadtwerke Bochum**

Abbildung 32: Filteranlage der geotherm. Anlage Robert Müser

Abbildung 32 (R1) zeigt die Filteranlage der geothermischen Anlage Robert Müser, während Abbildung 33 (R2) ein einzelnes durchsichtiges Filtermodul gefüllt mit Wasser zeigt. Innerhalb dieses Moduls befinden sich die einzelnen Filterringe



Abbildung 33: Durchsichtiges Filtermodul mit Wasser gefüllt



Abbildung 34: Filterringe aus den Filtermodulen

In Abbildung 34 (R3) ist ein Filterring aus einem Filtermodul mit weißlichem Rückstand zu erkennen.

## **6 Diskussion**

### **6.1.1 Vergleich der oberflächennahen und mitteltiefen Grund- und Grubenwässer**

Die Wassertemperaturen der karbonischen, quartären und tertiären oberflächennahen Gewässern aus Tiefen von bis zu 400m zeigten anhand der hier dargestellten Messwerte keine wesentlichen Unterschiede. Mit Temperaturen zwischen etwa 10-15 °C liegen sie damit im kühlen Bereich und eignen sich für psychrophile, aber auch für psychrotolerante und mesophile Mikroorganismen.

Die mitteltiefen karbonischen Grubenwässer zeigen demgegenüber deutlich höhere Temperaturen von 17 bis 58°C und bieten somit Potential für die Ausbildung mesophiler wie thermophiler mikrobieller Lebensgemeinschaften.

Anhand der pH-Werte konnten ebenfalls keine wesentlichen Unterschiede zwischen oberflächennahen Gewässern festgestellt werden. Sie variieren vom leicht sauren in den leicht basischen Bereich. Für mitteltiefe Gewässer trifft dies ebenso zu.

Bezüglich des Sauerstoffgehalts konnte festgestellt werden, dass dieser innerhalb der oberflächennahen Grundwassertypen fast gleich ist und nach dieser Betrachtung fast der gleichen Schwankungsbreite unterliegen. Da der Sauerstoffgehalt, dort wo er bestimmt wurde, stets größer als 1mg/l war, können sich potentiell auch nicht-anaerobe Gemeinschaften ausbilden.

Der Sauerstoffgehalt wurde für mitteltiefe Gewässer nicht bestimmt, aber aufgrund der erhöhten Temperatur kann angenommen werden, dass dieser geringer ist.

Aus den Werten der elektrischen Leitfähigkeit für oberflächennahe Grundwässer, welche einen indirekten Hinweis auf die Salinität geben, konnte ermittelt werden, dass diese unter dem typischen Salzgehalt von Meerwasser bei 5000 mS/m liegen. Zwischen quartären, karbonischen und tertiären oberflächennahen Proben ergeben sich keine

auffälligen Unterschiede. Mitteltiefe Grund- und Grubenwasser weisen eine erhöhte Leitfähigkeit auf, welche auf den hohen Salzgehalt zurückzuführen ist.

Der TOC-Gehalt von oberflächennahen Gewässern variiert sehr stark, wurde zum Teil nicht gemessen und weist keine generellen erhöhten oder niedrigen Werte innerhalb der drei Grundwassertypen auf. Bei mitteltiefen Gewässern wurde der TOC-Gehalt nicht bestimmt.

Das Redoxpotential wies sowohl negative als auch positive Werte auf, was darauf schließen lässt, dass die Grundwässer hierüber Voraussetzungen für aeroben und anaeroben Stoffwechselbetrieb bieten. Bei mitteltiefen Gewässern wurde das Redoxpotential nicht bestimmt.

Die Anionen und Kationen wiesen innerhalb der jeweils karbonischen, quartären und tertiären oberflächennahen Gewässer hohe Schwankungsbreiten auf, auffällige Abweichungen waren dennoch nicht zu erkennen. Bei der Betrachtung der mitteltiefen Grund- und Grubenwässern fallen die zum Teil besonders stark erhöhten Natrium- und Chlorid-Gehalte auf.

Ebenfalls finden sich hier erhöhte Konzentrationen für Kalium, Calcium und Magnesium, Eisen und Mangan. Die Sulfat-Werte können auch höher sein, zum Teil entspricht der Gehalt aber auch den Werten der oberflächennahen Wässer oder ist sogar geringer. Nitrate und Hydrogenkarbonate weisen keine größeren Unterschiede auf. Insgesamt sind in mitteltiefen Wassern im erhöhten Maße gelöste Ionen zu erkennen.

### **6.1.2 Gesamtbetrachtung der Grund -und Grubenwässer**

Anhand der Umgebungsparameter und des Chemismus ähneln sich die oberflächennahen Gewässer sehr. Eine deutliche Abgrenzung ist aus diesen Daten daher nicht möglich, zumal auch die Schwankungen der Werte innerhalb einzelner Messstellen sehr groß sein können (vgl. Anhang Grundwassermesswerte).

Demgegenüber steht die Unterscheidung zu mitteltiefen Wassern. Diese lassen sich besonders hinsichtlich der höheren Temperatur und in der Regel auch durch höhere Konzentrationen an gelösten Ionen unterscheiden, wobei in besonders erhöhtem Maß die Natrium- und Chlorid-Konzentrationen auffallen. Aus den dargestellten Ergebnissen

ist daher zu erwarten, dass in mitteltiefen Anlagen eine wesentlich höhere Präzipitation auftritt.

## 6.2 Mikroorganismen

### 6.2.1 Schwefel-reduzierende Mikroorganismen

Wie die Ergebnisse zeigten, sind die verschiedenen Sulfat-reduzierenden Bakterien sowohl bei Temperaturen zwischen 11,3 und 103 °C und von der Tiefe sowohl in oberflächennahen um 120 m als auch in sehr tiefen Regionen um 3500 m gefunden worden. Die pH-Werte der Proben lagen dabei zumeist im leicht sauren (pH<6) oder leicht alkalischen (pH>8) Bereich. Oft wurden *Desulfotomaculum* spp. direkt oder indirekt nachgewiesen. Dass diese Lebensbedingungen möglich sind, belegen zum einen Aüllo et al. (2013), indem sie Proben aus verschiedenen Untersuchungen diskutierten, in welchen unterschiedliche *Desulfotomaculum*-Stämme zu finden waren. Bezüglich des Sulfat-Gehalts gaben sie an, dass dieser ein limitierender Faktor sei. Sie belegten weiter, dass *Desulfotomaculum* sp. in verschiedenen Lebensräumen mit unterschiedlichen Gehalten an Kohlenstoffverbindungen und Luft-Sauerstoff zu finden gewesen seien, sodass sie in reduzierten Gewässern zu finden waren, was sich mit den Ergebnissen dieser Arbeit deckt. Zum anderen gibt Machel (2001) an, dass SRB bei Temperaturen über 80°C Stoffwechselaktivitäten einstellen. Stattdessen könne demnach die thermochemische Sulfat-Reduktion (TSR) stärkeren Einfluss auf die Bildung von Schwefelwasserstoff haben, welche allerdings Temperaturen mindestens 100°C oder mehr benötigt. Bei Temperaturen unterhalb von 80°C haben aus diesem Grund wahrscheinlich Mikroorganismen den größten Anteil an der Bildung von H<sub>2</sub>S.

### 6.2.2 Metalloxidierende Mikroorganismen

Die Ergebnisse zeigen, dass Metall-oxidierende Bakterien bei Temperaturen von -5 bis +89 °C und pH-Werten zwischen 1,4 und 7,2 nachgewiesen wurden.

Nach dem pH-Wert kann der acidophile *Acidithiobacillus ferrooxidans* zwar durchaus Eisen bei pH >5 oxidieren, jedoch überwiegt hier eher der Anteil der rein chemischen

Oxidation (Meruane & Vargas 2003). Bezüglich der Temperatur tritt *Acidithiobacillus ferrooxidans* als mesophiles Bakterium vor allem bei gemäßigten Temperaturen auf, während man z.B. hyperthermophile Archaea wie *Sulfolobus acidocaldarius* auch bei höheren Temperaturen findet (Rodriguez et al. 2003), wie es in dieser Arbeit auch aus den Ergebnissen zu erkennen ist.

### **6.2.3 Mikroorganismen im Stickstoffkreislauf**

Bei Temperaturen zwischen 6 und 89 °C sowie pH 1,9-8 konnten Mikroorganismen an mehreren Orten gefunden werden, welche auf verschiedenste Art Stickstoffverbindungen metabolisieren. Grundsätzlich gehen aus den Ergebnissen zwei verschiedene Arten hervor. Zum einen sind dies Cyanobakterien, wie *Fischerella sp.* und *Chroococciopsis sp.*, welche freien Stickstoff direkt in Ammoniak bzw. Ammonium umwandeln können, zum anderen solche, wie verschiedene Alphaproteobakterien, die das Ammonium zu Nitrat oxidieren. Nach Yim et al. (2005) war dieses Ergebnis zu erwarten, jedoch gaben sie an, dass auch hier bei höheren Temperaturen um 83 °C die Diversität absinkt. Hierzu wurde außerdem bemerkt, dass über 70 °C keine phototrophe Ernährung, also Energiegewinnung aus Photosynthese möglich ist, sodass aus Quellen mit höherer Temperatur nur nicht-phototrop lebende Organismen isoliert wurden bzw. solche wie Chloroflexi-Stämme, die ihren Metabolismus anpassen können.

## **6.3 Schadensbilder**

### **6.3.1 Ablagerungen in den Rohrleitungen der Zeche Hannover**

Bei den Krusten in den Rohren, welche sich über Jahrzehnte gebildet haben, handelt es sich wahrscheinlich hauptsächlich um Kalk- und Ferrihydritablagerungen ( $\text{Fe}^{3+}_{10}\text{O}_{14}(\text{OH})_2$ ) (Ottow 2011). Der Kalk kann durch mikrobielle Aktivität ins Wasser gelangt sein, aber auch durch ein anderweitig induziertes Ungleichgewicht des Kalk-Kohlensäure-Verhältnisses. Die verschiedenen Farben deuten darauf hin, dass sich möglicherweise im Laufe der Zeit die Zusammensetzung des Grubenwassers geändert

hat. Es kann aber auch sein, dass sich Biofilme auf den Ablagerungen gebildet haben, welche ihrerseits wieder allmählich durch neue Ablagerungen überdeckt wurden.

Dieses Schadensbild kann sich auch an Filtern oder Wärmetauschern in geothermischen Anlagen ergeben (Häberle et al. 2013).

Die äußeren gelblichen/grünlichen Punkte deuten auf eine neuerliche Besiedlung von Flechten hin, welche nicht mehr im direkten Zusammenhang mit der Wasserführung stehen. Die Poren können durch Bruch beim Trennen der Rohre entstanden sein.

### **6.3.2 Auswaschungen des Bindemittels in der Umfassung der oberflächennahen Quelle**

Die Auswaschungen des Bindemittels, welches vermutlich eine Art Kalkmörtel ist, bestehend aus Calciumkarbonat und Sand, ist wahrscheinlich auf leicht säuerliche Eigenschaften des Sickerwassers der Umgebungsgesteine hinter dem Mauerwerk zurückzuführen. Auch könnte es sich stellenweise um Mauersalpeter handeln  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ . Es ist hierbei sehr wahrscheinlich, dass die Qualität des Sickerwassers auch durch mikrobielle Prozesse beeinflusst wird, da sich oberhalb der Quelle mineralische Böden mit gemischtem Aufwuchs befinden.

Die Untersuchung bei UV-Licht diente lediglich der Kontrastdarstellung, nährt allerdings den Verdacht, dass es sich um Calciumablagerungen handelt, da diese generell lumineszieren können.

### **6.3.3 Schadensbilder der geothermischen Anlage Robert Müser mit den Harpener Teichen**

Schadensbilder an Anlagenteilen aus der Wasserhaltung mitteltiefer Grubenwasser zeigten Biofilme, Verockerungen und Rost. Biofilme sind damit das einzige direkte Indiz für Biofouling dieser Arbeit, welches durch Sichtprüfung feststellbar war. Die Verockerungen bzw. das gefärbte Wasser lassen hingegen nur einen Verdacht auf mikrobielle Aktivität zu, da sie nicht direkt nachgewiesen konnten.

Die rostigen Schrauben am Zinkgestell können auch ohne mikrobielle Vorgänge durch Ausbildung galvanischer Elemente in feuchter Umgebung erklärt und als reine Sauerstoffkorrosion betrachtet werden (Briehl 2014).

Der weißliche Filterrückstand an den Filterringen lässt Rückschlüsse auf Präzipitation von Calcium-Ablagerungen zu, möglicherweise sind diese ähnlich den Verkrustungen in den Rohrleitungen aus der Zeche Hannover und den Auswaschungen an der Mauerumfassung der oberflächennahen Wasserquelle. Auch an dieser Stelle konnte keine direkte Einwirkung von Mikroorganismen beobachtet werden. Allerdings kann das Austragen von Calcium aus Gesteinen mikrobiell begründet werden.

#### **6.4 Schädigung durch Biofouling von oberflächennahen und mitteltiefen geothermischen Anlagen**

Grundsätzlich bieten die geothermischen Anlagen, selbst mit erhöhten Temperaturbedingungen, hohen Salzgehalten und niedrigen pH-Werten verschiedensten Mikroorganismen eine Umgebung an, in welcher sie gedeihen können (Das et al. 2009; Santelli et al. 2010). Ungünstige Bedingungen wie sie mit Temperaturänderungen durch saisonale Wärmespeicherung hervorgerufen werden, können Mikroorganismen zum Übergang in Dauerformen zwingen, wobei zum Beispiel an Sporenbildung gedacht sei (Tardy-Jacquenod et al. 1998; Aüllo et al. 2013). Verbessern sich die Bedingungen, können sich die Mikroorganismen wieder vegetativ vermehren. Es ist nicht auszuschließen, dass durch Zu- oder Abführen von Wärme thermische Wachstumsoptima für verschiedene Mikroorganismen erreicht werden, sodass es saisonbedingt zur erhöhten Biofilmbildung oder zum erhöhten Ausstoß von Schwefelwasserstoffgas kommen kann (Würdemann et al. 2015). Ottow (2011) gibt an, dass mikrobielle Aktivität grundsätzlich bei Temperaturen von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+130^{\circ}\text{C}$  möglich ist. Biofilmbildung und mikrobiell induzierte Korrosion sind somit sowohl in oberflächennahen als auch in mitteltiefen geothermischen Anlagen zu erwarten.

#### **6.4.1. Vermeidung von Biofouling in der Geothermie**

Durch Einsatz von Filtern kann die Korrosion von Anlagenteilen vermindert werden. Um kostenintensivere Filter wie Aktivkohlefilter zu schonen, kann es sinnvoll sein diesen zum Beispiel günstigere Filtersysteme mit Sand oder ähnlichen Füllungen vorzuschalten. Eine regelmäßige Reinigung der Anlagenteile sollte ebenfalls z.B. im Zuge von Wartungsarbeiten angedacht werden. Durch modulare Bauweise von Anlagen können korrodierte Bauteile oder Filter einfacher getauscht werden und mit Auswahl geeigneter passivierter und oberflächenbeschichteter Anlagenteile können Ablagerungen und Korrosionsschäden vermieden werden.

Die Anwendung von bioziden Chemikalien sollte nicht nur mit Hinsicht auf die mögliche wassergefährdende Wirkung vermieden werden. Als Alternative könnte man Fällungs- oder Flockungsmittel verwenden, wie beispielsweise Eisen-(III)-Chloridsulfatlösung von Ferrifloc (Barjenbruch & Dohse 2004) zur Minimierung der Schwefelwasserstoffemission. Um Eisen und Mangan zu fällen, könnte man Ozon oder Wasserstoffperoxid als Oxidationsmittel verwenden. Mithilfe von Oxidationsmitteln kann außerdem einem negativen Redoxpotential entgegengewirkt und somit die Ausbildung anaerober Milieus minimiert werden. Zu pH-Wert-Regulierung könnte man verschiedene Säuren oder Basen einleiten (Würdemann et al. 2015). Da die Zuführung bzw. Einleitung von Chemikalien mit zusätzlicher Technik wie auch Kosten verbunden ist, sollte in jedem Fall die Notwendigkeit für den Einsatz überprüft werden, auch eine etwaige Desinfektion durch UV-Strahlung dürfte sich insbesondere bei größeren Anlagen als schwierig erweisen.

## **7 Zusammenfassung**

Die Grundlagen stellen zu Beginn innerhalb eines zeitlichen Rückblicks die Entwicklung der Geothermie und der Biotechnologie dar. Hiermit wurde verdeutlicht, dass beide Bereiche den Menschen bereits Jahrtausende begleiteten. Anschließend wurden einige verschiedene gängige Techniken der Geothermie vorgestellt. Es wurden geschlossene und offene Systeme vorgestellt, wobei die Feststellung erfolgte, dass offene Anlagen, wie sie in oberflächennahen und mitteltiefen Systemen als Schachtbrunnen vorkommen, aufgrund ihrer Bauart besonders den natürlichen Umgebungsbedingungen und damit dem potentiellen Schadprozess des Biofouling ausgesetzt sind. Darauf folgte die Betrachtung der Hydrogeologie und der geogenen Verhältnisse. Genauer wurden dann einige relevante Umgebungsparameter und wichtige Inhaltsstoffe von Grundwassern dargestellt. Das nächste Kapitel gab eine Einleitung in das Biofouling. Dieses wurde durch Unterteilung in zwei Abschnitten, der Biofilmbildung und der mikrobiell induzierten Korrosion, behandelt. Die MIC stellte die Betrachtung der mikrobiellen Erzeugung korrosiv wirkender Stoffe mit einigen Schadenprozessen dar. Behandelt wurden die Entstehung von Schwefelwasserstoffgas, der Auslaugung, der Verockerung und die Korrosion von Wasserbindebaustoffen.

In den Ergebnissen wurden zunächst anhand von Recherche-Daten aus ELWAS-Web und Literatur typische Inhaltsstoffe und Parameter von oberflächennahen karbonischen, quartären und tertiären Grundwassern untersucht. Ergänzt wurde der Teil mit der Untersuchung von mitteltiefen karbonischen Grund- und Grubenwassern, wie sie typischerweise in Schachtanlagen des Bergbaus unter anderem im Ruhrgebiet zu finden sind.

Im zweiten Teil der Ergebnisse sind durch Recherche wissenschaftlicher Veröffentlichungen Daten zu in-Situ Bedingungen von Bergbaugewässern oder Gewässern aus geothermalen Quellen und Anlagen aufgestellt worden, in denen nachweislich Mikroorganismen entdeckt wurden, welche zum Biofouling beitragen. Das Schadensbild von Prozessen infolge des Biofouling an Grubenwasser-führenden-

und geothermischen Anlagen wurde im dritten Teil der Ergebnisse durch Begehung und Fotografie aufgenommen.

Durch Auswertung der erfassten Daten konnte gezeigt werden, dass man oberflächennahe Grundwasser aus karbonischen, quartären und tertiären Aquiferen nicht unterscheiden kann. Im Vergleich mit mitteltiefen karbonischen Grund- und Grubenwasser konnte man die Aussage treffen, dass diese höheren Temperaturen und höhere Salzgehalte besitzen.

Innerhalb der Diskussion zu den Mikroorganismen wurde festgestellt, dass oberflächennahe und mitteltiefe geothermale Anlagen zur Wärmespeicherung die Ausprägung mikrobieller Lebensgemeinschaften zulassen, sodass in jedem Fall mit Biofouling zu rechnen ist. Allerdings können bei höheren Temperaturen  $>85^{\circ}\text{C}$  gewisse Stoffwechselprozesse nicht mehr ausgeführt werden. Aus diesem Grunde nimmt die Diversität mit zunehmender Temperatur ab.

## **8 Ausblick**

Um Mikroorganismen an entsprechenden bzw. potentiellen Anlagen nachzuweisen, müssten jeweils Vorort Proben gesammelt und analysiert werden. Da eine Kultivierung oft nicht über sämtliche im Milieu befindlichen Mikroorganismen Auskunft gibt, kann es künftig sinnvoll sein, Gensequenzierungen vorzunehmen, so wie es auch bereits des Öfteren praktiziert wird (Ottow 2011; Würdemann et al. 2015).

Ebenso sollten möglichst viele Parameter der Tiefenwässer untersucht werden, um eine größere Vergleichbarkeit von Proben unterschiedlicher Standorte zu ermöglichen, so könnte man künftig auch einzelne Materialien auf Beständigkeit gegenüber den Vorort-Verhältnissen bereits vorab betrachten.

Mithilfe von miniaturisierten Tauchkameras, Kamerawagen oder Endoskopen könnte man Schacht-, Brunnen-, und Rohrleitungssysteme abfahren, damit der Zustand des Biofouling beurteilt werden kann, wie es zuweilen z.B. in häuslichen Wasser-/Abwassersystemen durchgeführt wird (URL-11).

Für die Auswirkungen von Temperaturänderungen in Anlagen mit Speicherfunktion könnte man ein Langzeit-Monitoring einrichten und sowohl die Auswirkungen auf Wasserzusammensetzung als auch die Biodiversität zu überprüfen.

## Literaturverzeichnis

Adam et al. (2009)

Adam, G.; Läuger, P.; Stark, G.; 2009: Physikalische Chemie und Biophysik; 5. überarbeitete Auflage; Verlag Springer Dordrecht; ISBN 978-3-642-00423-0; e-ISBN 978-3-642-00424-7; DOI 10.1007/978-3-642-00424-7

Alawi et al. (2011)

Alawi, M.; Lerm, S.; Vetter, A.; Wolfgramm, M.; Seibt, A.; Würdemann, H.; (2011): Diversity of sulfate-reducing bacteria in a plant using deep geothermal energy; Verlag Springer; Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie; 16:105–112; DOI 10.1007/s00767-011-0164-y

Aüllo et al. (2013)

Aüllo, T.; Rancho-Peyruse, A.; Ollivier, B.; Magot, M.; 2013: Desulfotomaculum spp. and related gram-positive sulfate-reducing bacteria in deep subsurface environments; frontiers in microbiology; Vol. 4: 362; DOI: 10.3389/fmicb.2013.00362

Bahlburg & Breitzkreutz (2004):

Bahlburg, H.; Breitzkreutz, C.; 2004: Grundlagen der Geologie; 2. Auflage; Spektrum Akademischer Verlag, Elsevier GmbH München; ISBN: 3-8274-1394-X

Barjenbruch & Dohse (2004)

Barjenbruch, M.; Dohse, C.; 2004: Abschlussbericht: Bewertung von Maßnahmen zur Verringerung von Geruchs- und Korrosionserscheinungen im Kanalnetz des ländlichen Raums, LAWA Forschungsvorhaben im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser und Boden“ 2001; LAWA-Projekt-Nr. AA 1.01; Institut für Umweltingenieurwesen, Universität Rostock

Bertani (2017)

Bertani, R.; 2017: Perspectives for Geothermal Energy in Europe; Verlag World Scientific Publishing Europe Ltd. London; ISBN: 978-1-78634-231-7; ISBN: 978-1-78634-233-1 (ebook)

Blume et al. (2010)

Blume, H.; Brümmer, G.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knaber, I.; Kretschmar, R.; Stahr, K.; Wilke, B.; 2010: Scheffer/Schachtschnabel Lehrbuch der Bodenkunde; 16. Auflage; Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg; ISBN 978-3-8274-1444-1

Briehl (2014)

Briehl, H.; 2014: Chemie der Werkstoffe; 3., überarbeitete und erweiterte Auflage; Verlag Springer Vieweg; ISBN 978-3-658-06224-8; ISBN 978-3-658-06225-5 (eBook); DOI 10.1007/978-3-658-06225-5

Broda (1977)

Broda, E.; 1977: Two kinds of lithotrophs missing in nature; Zeitschrift für allgemeine Mikrobiologie; Vol. 17(6): 491-493

(Bruneel et al. 2006)

Bruneel, O.; Duran, R.; Casiot, C.; Elbaz-Pouchlichet, Personne, J.; 2006: Diversity of Microorganisms in Fe-As-Rich Acid Mine Drainage Waters of Carnoules, France; Verlag American Society for Microbiology; APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY; Vol. 72 (1): 551–556; DOI:10.1128/AEM.72.1.551–556.2006

Coman et al. (2013)

Coman, C.; Drugă, B.; Hegedus, A.; Sicora, C.; Dragoș, N.; 2013: Archaeal and bacterial diversity in two hot spring microbial mats from a geothermal region in Romania; Verlag Springer; Extremophiles, Volume 17 (3): 523-534

Das et al. (2009)

Das, B.; Roy, A.; Koschorreck, M.; Mandal, S.; Wendt-Potthoff, K.; Bhattacharya, J.; 2009: Occurrence and role of algae and fungi in acid mine drainage environment with special reference to metals and sulfate immobilization; Verlag Elsevier; Water Research; Vol 43: 883–894

Detmers et al. (2004)

Detmers, J.; Strauss, H.; Schulte, U.; Bergmann, A.; Knittel, K.; Kuever, J.: FISH Shows That Desulfotomaculum spp. Are the Dominating Sulfate-Reducing Bacteria in a Pristine Aquifer; Microbial Ecology; Vol.47(3): 236–242

Donlan (2002)

Donlan, R.; (2002): Biofilms: Microbial Life on Surfaces; Emerg Infect Dis. 2002; Vol.8(9):881-90; DOI: 10.3201/eid0809.020063

Fanning & Mitchell (2012)

Fanning, S.; Mitchell, A.; 2012: Fungal Biofilms; PLoS Pathogens. 8(4): e1002585. DOI: 10.1371/journal.ppat.1002585

Fent (2013)

Fent, K; 2013: Ökotoxikologie, Umwelt-Toxikologie-Ökologie; 4. Vollständig überarbeitete Auflage; Verlag Georg Thieme Stuttgart; ISBN 978-3-13-109994-5; eISBN 978-3-13-1693044

Förstner (2008)

Förstner, U.; 2008: Umweltschutztechnik; 7. vollständig bearbeitete und aktualisierte Auflage; Verlag Springer Berlin; ISBN 978-3-540-77882-0; e-ISBN 978-3-540-77883-7; DOI 10.1007/978-3-540-77883-7

Gerthsen (2006)

Gerthsen, T.; 2006: Chemie für den Maschinenbau 1, Anorganische Chemie für Werkstoffe und Verfahren; Universitätsverlag Karlsruhe; ISBN: 978-3-86644-079-1

Hahn et al. (2015)

Hahn, F.; Busmann, G.; Ignacy, R.; 2015: Geo-MTES: Saisonale Wärmespeicherung in Steinkohlebergwerken am Beispiel des Bergwerks Prosper-Haniel; Ingenieurbau, Brunnenbau; wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft, Gas und Wasser mbH Bonn; Geothermie-bbr-Jahresmagazin; Vol. 2015: 72-78

Hamilton et al. (2011)

Hamilton, T.; Lange, R.; Boyd, E.; Peters, J.; 2011: Biological nitrogen fixation in acidic high-temperature geothermal springs in Yellowstone National Park, Wyoming; Society for Applied Microbiology and Blackwell Publishing Ltd; Environmental Microbiology; DOI:10.1111/j.1462-2920.2011.02475.x

Häberle et al. (2013)

Häberle, G.; Fritsche, H.; Häberle, H.; Heinz, E.; Kürbiß, B.; Paul, C.; 2013: Fachwissen Umwelttechnik; 6. überarbeitete und erweiterte Auflage Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel; ISBN: 978-3-8085-3496-0

Hölting & Coldewey (2013)

Hölting, B.; Coldewey, G.; 2013: Hydrogeologie, Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie; 8. Auflage; Verlag Springer Spektrum Berlin; ISBN 978-3-8274-2353-5; ISBN 978-3-8274-2354-2 (eBook); DOI 10.1007/978-3-8274-2354-2

Jacomet & Kreuz (1999)

Jacomet, S.; Kreuz, A.; 1999: Archäobotanik, Aufgaben, Methoden und Ergebnisse vegetations- und agrargeschichtlicher Forschung; Verlag Eugen Ulmer Stuttgart; ISBN 3-8252-8158-2

Kuhlmann et al. (2014)

Kuhlmann, J.; Kühl, J.; Uebigau, M.; Oldorf, B.; Janßen, K.; 2014: Report ABSCHLUSSBERICHT FÜR DAS ANWENDUNGSPROJEKT 16 -

„KÜSTENSCHUTZ UND GEOTHERMIE“ Datenauswertung, Planung,  
Wirtschaftlichkeit; RADOST-Berichtsreihe; Nr. 29; ISSN: 2192-3140

Kunkel et al. (2004)

Kunkel, R.; Hannappel, S.; Voigt, H.; Wendland, F.; 2004: Die natürliche, ubiquitär  
überprägte Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland; Forschungszentrum  
Jülich GmbH; Zentralbibliothek; Reihe Umwelt/Environment Vol. 47; ISSN  
1433-5530 ISBN 3-89336-353-X

Langguth & Voigt (2004)

Langguth, H.; Voigt, R.; 2004: Hydrogeologische Methoden; 2 Auflage; Springer-  
Verlag Berlin; ISBN: 3-540-21126-8

Latscha et al. (2004).

Latscha, H.; Linti, G.; Klein, H.; 2004: Analytische Chemie, Chemie-Basiswissen III, 4.,  
vollständig überarbeitete Auflage; Springer Verlag Berlin; ISBN 3-540-40291-8

Latscha & Mutz (2011)

Latscha, H.; Mutz, M.; 2011: Chemie der Elemente, Chemie Basiswissen IV; Verlag  
Springer Heidelberg; ISBN 978-3-642-16914-4; e-ISBN 978-3-642-16915-1;  
DOI 10.1007/978-3-642-16915-1

LAWA (87)

LAWA; 1987: Grundwasser, Richtlinien für die Beobachtung und Auswertung, Teil 2-  
Grundwassertemperatur 1987; Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Arbeitskreis  
„Grundwassermessung, Grundwasserrichtlinie 2/87; Woeste Druck + Verlag  
Essen; ISBN 3-88754-010-7

Lerm (2012)

Lerm, S.; 2012: Mikroorganismen in geothermischen Aquiferen – Einfluss mikrobieller  
Prozesse auf den Anlagenbetrieb, Kumulative Dissertation zur Erlangung des

naturwissenschaftlichen Doktorgrades - Dr. rer. nat. -; Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Potsdam

Lerm et al. (2011)

Lerm, S.; Alawi, M.; Miethling-Graff, R.; Wolfgramm, M.; Rauppach, K.; Seibt, A.; Würdemann, H.; 2010: Influence of microbial processes on the operation of a cold store in a shallow aquifer: impact on well injectivity and filter lifetime; Springer Verlag: Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie; Vol. 16: 93–104; DOI 10.1007/s00767-011-0165-x

Machel (2001)

Machel, H.; 2001: Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings: Old and new insights; Verlag Elsevier; Sedimentary Geology; Vol. 140: 143-175

Markl (2015)

Markl, G.; 2015: Minerale und Gesteine, Mineralogie – Petrologie – Geochemie; 3. Auflage; Verlag Springer Spektrum Berlin; ISBN 978-3-662-44627-0 ISBN 978-3-662-44628-7 (eBook); DOI 10.1007/978-3-662-44628-7

Matschullat et al. (1997)

Matschullat, J.; Tobschall, H.; Voigt, H.; 1997: Geochemie und Umwelt, Relevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre; Verlag Springer Berlin; ISBN: 978-3-642-63826-8

Meruane & Vargas (2003)

Meruane, G.; Vargas, T.; 2003: Bacterial oxidation of ferrous iron by Acidithiobacillus ferrooxidans in the pH range 2.5–7.0; Verlag Elsevier; Hydrometallurgy; Vol. 71(1): 149-158

Munk (2008)

Munk, K.; 2008: Taschenlehrbuch der Mikrobiologie; Verlag Georg Thieme  
Stuttgart; ISBN 978-3-13-144861-3

Nultsch (2012)

Nultsch, W.; 2012: Allgemeine Botanik; 12. Unveränderte Auflage; Verlag Georg  
Thieme Stuttgart; ISBN 978-3-13-383312-7

Ottow (2011)

Ottow, J.; 2011: Mikrobiologie von Böden, Biodiversität, Ökophysiologie und  
Metagenomik; Verlag Springer Berlin; ISBN 978-3-642-00823-8; DOI:  
10.1007/978-3-642-00824-5

Paul & Rotthues (2015)

Paul, C.; Rotthues, A.; (2015): Fachwissen Biologie und Biotechnik; 2. Auflage; Verlag  
Europa-Lehrmittel Haan-Gruiten; ISBN 978-3-8085-7025-8

Plewinsky et al. (2014)

Plewinsky, B.; Hennecke, M.; Oppermann, W.; 2014: Das Ingenieurwissen: Chemie;  
Verlag Springer Berlin; ISBN 978-3-642-41123-6; ISBN 978-3-642-41124-3  
(eBook); DOI 10.1007/978-3-642-41124-3

Raab et al. (2005)

Raab, S.; Schmidt, T.; Benner, M.; Heidemann, W.; Müller-Steinhagen, H.; 2005:  
Saisonale Wärmespeicher – aktuelle Speichertechnologien und Entwicklung bei  
Heißwasser-Wärmespeichern; [http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/ Publi  
kationen/publikationen\\_05-02.pdf](http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Publikationen/publikationen_05-02.pdf)

Raphael (1996)

Raphael, T.; 1996: Umweltbiotechnologie, Grundlagen, Anwendungen und  
Perspektiven; Verlag Springer Berlin; ISBN 3-540-61423-0

Robbins & Corley (2005)

Robbins, E.; Corley, T.; 2005: Microdynamics and seasonal changes in manganese oxide epiprecipitation in Pinal Creek, Arizona; Verlag Springer; Hydrobiologia Vol. 534(1–3): 165–180

Rodriguez et al. (2003)

Rodriguez, Y.; Ballester, A.; Blazquez, M.; Gonzales, F.; Munoz, J.; 2003: New information on the pyrite bioleaching mechanism at low and high temperature; Verlag Elsevier; Hydrometallurgy; Vol. 71: 37-46

-

Rosa et al. (1974)

Rosa, M.; Gambocarta, A.; Bu'Lock, J.; Extremely Thermophilic Acidophilic Bacteria Convergent with *Sulfolobus acidocaldarius*; Journal of General Microbiology Vol. 86 156-164

-

Sanchez-Ramos et al. (2007)

Sanchez-Ramos, I.; Alvarez-Alfageme, F.; Castanera, P.; 2007: Development and survival of the cheese mites, *Acarus farris* and *Tyrophagus neiswanderi* (Acari: Acaridae), at constant temperatures and 90% relative humidity; Journal of Stored Products Research; Vol. 43(1): 64-72; <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2005.10.002>

Sand & Gerke (2003)

Sand, W.; Gerke, T.; 2003: Microbially influenced corrosion of steel in aqueous environments; Verlag Kluwer; Reviews in Environmental Science and Bio/Technology; Vol. 2: 169–176

Santelli et al. (2010)

Santelli, C.; Pfister, D.; Lazarus, D.; Sun, L.; Burgos, W.; Hansel, C.; 2010: Promotion of Mn(II) Oxidation and Remediation of Coal Mine Drainage in Passive Treatment Systems by Diverse Fungal and Bacterial Communities; Verlag American Society for Microbiology; Applied and environmental microbiology; Vol. 76 (1): 4871-4875

Schmidt (1999)

Schmidt, R.; 1999: Werkstoffverhalten in biologischen Systemen; Grundlagen, Anwendungen, Schädigungsmechanismen, Werkstoffprüfung; 2. Auflage; Verlag Springer Berlin; ISBN 978-3-540-65406-3

Schmidt & Müller-Steinhagen (2005)

Schmidt, T.; Müller-Steinhagen, H.; 2005: Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher in Deutschland; OTTI Profiforum Oberflächennahe Geothermie, Regenstau (Online verfügbar am 28.08.2017: <http://www.solites.de/download/literatur/05-01.pdf>)

-

Siebert (1962)

Siebert, G.; 1962: Das Grundwasser im Raume Krefeld; Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen, Krefeld; Band 20

-

Stober & Bucher (2014)

Stober, I.; Bucher, K.; 2014: Geothermie; 2. Auflage; Verlag Springer Spektrum Berlin; ISBN 978-3-642-41762-7; ISBN 978-3-642-41763-4 (eBook); DOI 10.1007/978-3-642-41763-4

Takors et al. (2013)

Takors, R.; Sahm, H.; Antranikian, G.; Stahmann, K.; 2013: Industrielle Mikrobiologie; Verlag Springer Spektrum Berlin; ISBN 978-3-8274-3039-7; ISBN 978-3-8274-3040-3 (eBook); DOI 10.1007/978-3-8274-3040-3

Tardy-Jacquenod et al. (1998)

Tardy-Jacquenod, C.; Magot, M.; Patel, B.; Matheron, R.; Caumette, P.; 1998: *Desulfotomaculum halophilum* sp. nov., a halophilic sulfate-reducing bacterium isolated from oil production facilities; International Journal of Systematic Bacteriology; Vol. 48(2): 333-338

Thome (1998)

Thome, K.; 1998: Einführung in das Quartär, Das Zeitalter der Gletscher; Verlag Springer Berlin; ISBN: 3-540-62932-7

Thronicker & Szewzyk (2013)

Thronicker, O.; Szewzyk, U.; 2013: Verockerungsanalytik für eine längere Brunnenlebensdauer; bbr Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie; wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH Bonn; Vol. 64(10): 70-73; ISSN: 1611-1478

Tuovinen & Nurmiäho (1979)

Tuovinen, O.; Nurmiäho, E.; 1979: Microscopic Examination of Bacteria in Fe(III)-Oxide Deposited from Ground Water; Microbial Ecology; Vol. 5(1): 57-66; DOI: 10.1007/BF02010579

Valdes et al.2008

Valdes, J.; Pedroso, I.; Quatrini, R.; Dodson, R.; Tettelin, H.; Il, R.; Eisen, J.; Holmes, D.; 2008: Acidithiobacillus ferrooxidans metabolism: from genome sequence to industrial applications; BioMed Central Genomics, Vol 9: 597; DOI:10.1186/1471-2164-9-597

Wallhäuser & Puchelt (1966)

Wallhäuser, K.; Puchelt, H.; 1966: Sulfatreduzierende Bakterien in Schwefel- und Grubenwässern Deutschlands und Österreichs; Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol.13(1): 12–30; DOI: 10.1007/BF00518124

-

Wedewardt (1995)

Wedewardt, M.; 1995: Hydrochemie und Genese der Tiefenwässer im Ruhr-Revier; Bochum DMT-Institut für Wasser- und Bodenschutz, Dissertation Bonn DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung; 39

Wisotzky (2011)

Wisotzky, F.; 2011: Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydro-geochemische Modellierung, Grundlagen, Anwendungen und Problemlösungen; Verlag Springer Berlin; ISBN 978-3-642-17812-2

-

Würdemann et al. (2015)

Würdemann, H.; Westphal, A.; Kleyböcker, A.; Miethling-Graff, R.; Teitz, S.; Kasina, M.; Seibt, A.; Wolfgramm, M.; Eichinger, F.; Lerm, S.; 2015: Störungen des Betriebs geothermischer Anlagen durch mikrobielle Stoffwechselprozesse und Erfolg von Gegenmaßnahmen; Verlag Springer Berlin; Grundwasser- Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie; Vol. 21: 93-106; DOI 10.1007/s00767-016-0324-1

Xie et al. (2010)

Jianping Xie, Zhili He, Xinxing Liu, Xueduan Liu, Van Nostrand, J.; Ye Deng, Liyou Wu, Jizhong Zhou, Guanzhou Qiu; 2010: GeoChip-Based Analysis of the Functional Gene Diversity and Metabolic Potential of Microbial Communities in Acid Mine Drainage; APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY, Vol. 77(3): 991–999; Verlag American Society for Microbiology; DOI:10.1128/AEM.01798-10

Yim et al. (2005)

Yim, L.; Hongmei, J.; Aitchison, J.; Pointing, S.; 2005: Highly diverse community structure in a remote central Tibetan geothermal spring does not display monotonic variation to thermal stress; Federation of European Microbiological Societies; Vol. 57(1): 80-91; DOI: 10.1111/j.1574-6941.2006.00104.x

## URL-Verzeichnis

### URL-1

URL-1 (14/09/2017) Mangold, Dirk; Das Wissensportal für saisonale Wärmespeicherung: *Speichermaterial* URL: <http://www.saisonalspeicher.de/Speichertypen/Erdsonden/Speichermaterial/tabid/128/Default.aspx>

### URL-2

URL-2 (14/09/2017) Mijnwater B.V.: Mijnwater als kwalitatieve duurzame energie; Allgemeine Informationen zum Mijnwater-Projekt URL: <http://www.mijnwater.com>

### URL-3

URL-3 (14/09/2017) Wolfgramm, M. & Seibt, A.; Geochemisches Monitoring des geothermalen Tiefenspeichers in Neubrandenburg URL: [http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/Zusatzinfos/2007-04\\_Monitoring-Bericht.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/Zusatzinfos/2007-04_Monitoring-Bericht.pdf)

### URL-4

URL-4 (14/09/2017) Internetchemie.info, Die naturwissenschaftliche Wissensdatenbank; Sauerstoffgehalt Salzwasser URL: <http://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/s/sauerstoffgehalt-salzwasser.php>

### URL-5

URL-5 (14/09/2017) Hydrogroup/Hydroelektrik; Trinkwasser und Wasseraufbereitung URL: <https://www.hydrogroup.de/fileadmin/redakteur/pdf/ProduktHandbuch/wasseraufbereitung-grundlagen-s1i1-de.pdf>

### URL-6

URL-6 (14/09/2017) Lenntech B.V.; Elektrische Leitfähigkeit des Wassers URL: <http://www.lenntech.de/anwendungen/reinstwasser/leitfaehigkeitsmessung/leitfaehigkeit.htm>

URL-7

URL-7 (14/09/2017) Baier, A.; Geozentrum Nordbayern; Parameter zur Beurteilung einer Wasserprobe URL: <http://www.angewandte-geologie.geol.uni-erlangen.de/paramete.htm>

URL-8

URL-8 (15/09/2017) Spektrum Akademischer Verlag; Lexikon der Geowissenschaften Auslaugung; URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/auslaugung/1213>

URL-9

URL-8 (14/09/2017) Schön, G.; Spektrum der Wissenschaft; Lexikon der Biologie Quorum Sensing; URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/quorum-sensing/55384>

URL-10

URL-9 (14/09/2017) Kuklinski, A. Sand, W.; Mikrobielle Korrosion -Vorkommen – Mechanismen - Identifizierung URL: <http://www.ikz.de/detail/news/detail/mikrobielle-korrosion-vorkommen-mechanismen-identifizierung/>

URL-11

URL-11 (14/09/2017) Stadtwerke Bochum: Ein Jahr Wärme aus Grubenwasser an der Zeche Robert Müser URL: [http://www.stadtwerke-bochum.de/privatkunden/unternehmen/pressecenter/pressemeldungen/presseinfo\\_20131025.html](http://www.stadtwerke-bochum.de/privatkunden/unternehmen/pressecenter/pressemeldungen/presseinfo_20131025.html)

URL-12

URL-12 (14/09/2017) Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen; Sanierung privater Abwasserleitungen Entscheidungshilfe zur Auswahl von Sanierungsverfahren URL:[http://www.ruhrverband.de/fileadmin/pdf/abwasser/faltblatt\\_sanierung\\_2015\\_1\\_ebook.pdf](http://www.ruhrverband.de/fileadmin/pdf/abwasser/faltblatt_sanierung_2015_1_ebook.pdf)

URL-13

URL-13 (14/09/2017) Brewitz, W.; Brasser, Th.; Anwendbarkeit der Indikatoren “teufenabhängige Mineralisation / Salzgehalt” für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung “keine oder langsame Grundwasserbewegung”; Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte URL: [https://www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/388962/5ccd726366adc7224c2f53353c988547/kmat\\_12-08-data.pdf](https://www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/388962/5ccd726366adc7224c2f53353c988547/kmat_12-08-data.pdf)

**Anhang**

Siehe beigefügte CD

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Marsberg-Obermarsberg, den 22.09.2017

Daniel Kreft