

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



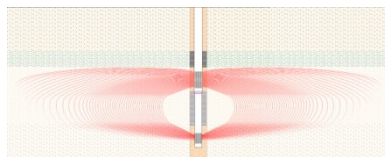
DLR Projektträger

# Schlussbericht - Sachbericht

**KMU-innovativ – Verbundprojekt:**

Förderkennzeichen 01LY1507A und B

## **KMU-innovativ – Verbundprojekt Klimaschutz: Hocheffiziente Nutzung geothermischer Energie - Integralsonde II**



Das diesem Bericht zugrunde liegende Verbundvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen «01LY1507A und B» gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel KMU-innovativ – Verbundprojekt Klimaschutz: Hocheffiziente Nutzung geothermischer Energie - Integralsonde II, Teilprojekt A	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Meeder, Alexander, Dr. Reul, Winfried Muhrbeck, Moritz	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2018
	6. Veröffentlichungsdatum 11.12.2018
	7. Form der Publikation Monographie
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Geo-En Energy Technologies GmbH Schwedter Straße 9 a 10119 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 01LY1507A
	11. Seitenzahl 111
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 10117 Berlin	13. Literaturangaben 44
	14. Tabellen 14
	15. Abbildungen 61
16. Zusätzliche Angaben Keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	

#### 18. Kurzfassung

Die bis heute den Markt oberflächennaher geothermischer Systeme dominierenden geschlossenen Erdwärmesonden sind mit voranschreitender Erwärmung des Untergrundes – in Großstädten wie Berlin besonders ausgeprägt durch die Ausbildung von Wärmeinseln - immer weniger geeignet für die passive Gebäudekühlung. Gebäudekühlung wird im innerstädtischen und speziell im Gewerbe- und Bürobereich jedoch einen zunehmend größer werdenden Anteil am Gesamtenergiebedarf einnehmen.

Die in diesem Projekt technisch weiter entwickelte und standardisierte Integralsonde ist hingegen ein offenes, oberflächennahes geothermisches System, bei dem in einem Bohrloch Grundwasser entzogen, und nach seiner thermischen Nutzung wieder eingeleitet wird. Aufgrund ihrer Funktionsweise als Zirkulationsbrunnen ermöglicht die Integralsonde eine hocheffiziente geothermische Nutzung des Grundwassers. Die platzsparende Bauweise, der Verzicht einer Netto-Grundwasserentnahme und insbesondere – wie im Projekt in der Praxis mehrfach nachgewiesen - langfristig gleichbleibende Grundwassertemperaturen sind entscheidende Gründe für die Nachhaltigkeit und die auch zukünftig gegebene hervorragende Eignung zum Heizen und passiven Kühlen von Gebäuden im innerstädtischen Bereich.

Im Rahmen dieses Projektes konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die hydrochemischen als auch die mikrobiologischen Prozesse und Veränderungen im Grundwasser durch den Betrieb der Integralsonde äußerst gering sind. Mit der gewonnenen Erkenntnis, dass die Integralsonde auch an Standorten eingesetzt werden kann, die bisher aus hydrochemischer Sicht als nicht nutzbar für offene Geothermiesysteme galten, konnte das Potenzial an möglichen Standorten gegenüber dem bisherigen Auswahlverfahren deutlich vergrößert werden.

Die Ergebnisse aus dem technischen Monitoring zum mehrjährigen Betrieb der Anlagen und die darauf aufbauenden Berechnungen zum thermischen Impact auf den Untergrund bzw. den Grundwasserleiter haben zu einer Verbesserung der 20 Jahre Betriebsprognose, wie sie genehmigungsrechtlich bei großen Anlagen gefordert wird, geführt. Sie haben zudem gezeigt, dass die Toleranzen des Systems Integralsonde bei Abweichungen des Anlagenbetriebs bzw. der jährlichen Anlagenlasten (Heizen und Kühlen) gegenüber der initialen Planung deutlich größer sind als bisher angenommen.

#### 19. Schlagwörter

Oberflächennahe Geothermie, Zirkulationsbrunnen, Grundwasser, Hydrochemie

#### 20. Verlag

#### 21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title KMU-innovativ – Verbundprojekt Klimaschutz: Hocheffiziente Nutzung geothermischer Energie - Integralsonde II, Teilprojekt A	
4. author(s) (family name, first name(s)) Meeder, Alexander, Dr. Reul, Winfried Muhrbeck, Moritz	5. end of project 31.10.2018
	6. publication date 11.12.2018
	7. form of publication Monography
8. performing organization(s) (name, address) Geo-En Energy Technologies GmbH Schwedter Straße 9 a 10119 Berlin	9. originator's report no. -
	10. reference no. 01LY1507A
	11. no. of pages 111
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 10117 Berlin	13. no. of references 44
	14. no. of tables 14
	15. no. of figures 61
16. supplementary notes none	
17. presented at (title, place, date) -	

18. Abstract

The sealed geothermal probes that have dominated the market for near-surface geothermal systems to date are increasingly ill-suited for passive cooling of buildings due to progressive warming of the subsurface; in large cities such as Berlin, this is particularly pronounced in the formation of heat islands. However, in inner-city areas and especially in commercial and office districts, cooling of buildings represents an ever-growing share of total energy requirements.

The Integralsonde that has been further developed and standardised in this project is an open, near-surface geothermal system, in which groundwater is extracted in a bore hole and then returned after serving its thermal purpose. Because it functions as a circulation well, the Integralsonde provides highly efficient geothermal use of groundwater. It boasts a space-saving design, avoids any net groundwater extraction and, in particular – as demonstrated repeatedly in practice in the project – it maintains groundwater temperatures over the long-term; these are key reasons for its sustainability and future excellent suitability for heating and passive cooling of buildings in inner-city areas.

The results of this project have demonstrated that both hydrochemical and microbiological processes and changes in groundwater as a result of the Integralsonde are exceptionally low. It is now clear that the Integralsonde can be used even at sites that were previously considered unsuitable for geothermal systems based on hydrochemical considerations; hence, the potential for possible sites is much higher than previously thought using former selection criteria.

Technical monitoring through multiple years operating a system and calculations based on these results for the thermal impact on the substrate and groundwater aquifers have improved the 20-year operating life forecast limited by law for large systems. The results have also demonstrated that the tolerances of the Integralsonde system in the event of deviations in system operation or in annual load levels (heating and cooling) are significantly higher than previously assumed in initial planning.

19. keywords

Shallow geothermal system, circulation well, groundwater, hydrochemistry

20. publisher

21. price

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel KMU-innovativ – Verbundprojekt Klimaschutz: Hocheffiziente Nutzung geothermischer Energie - Integralsonde II, Teilprojekt B	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Scheytt, Traugott, PD Dr. Dinkel, Eva Braun, Burga, Dr. Szewzyk, Ulrich, Prof. Dr. Schröder, Josephin, Dr. (bis August 2016)	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.05.2018
	6. Veröffentlichungsdatum 11.12.2018
	7. Form der Publikation Monographie
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Berlin (TU Berlin) Institut für Angewandte Geowissenschaften Geochemisches Gemeinschaftslabor und FG Umweltmikrobiologie Straße des 17. Juni 145 10623 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 01LY1507B
	11. Seitenzahl 111
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 10117 Berlin	13. Literaturangaben 44
	14. Tabellen 14
	15. Abbildungen 61
16. Zusätzliche Angaben Keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	

#### 18. Kurzfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Auswirkungen der geothermischen Nutzung eines Grundwasserzirkulationsbrunnens auf den Grundwasserleiter zu erforschen und ablaufende chemische und mikrobiologische Prozesse zu untersuchen. Diese Analysen wurden in Zusammenarbeit mit der Fa. Geo-En Energy Technologie GmbH, Berlin, durchgeführt und die Ergebnisse wurden am Geothermiesystem „Integralsonde“ gewonnen.

Die Integralsonde besteht aus einer Bohrung, in der gleichzeitig Grundwasser entzogen, über eine Wärmepumpe geothermisch genutzt und über eine höher gelegene Filterstrecke wieder eingeleitet wird. Der Einfluss dieses Systems auf den Grundwasserleiter war bisher noch nicht wissenschaftlich untersucht worden. Ein neu installiertes sowie zwei seit mehreren Jahren laufende Systeme wurden erstmals und über zwei Jahre kontinuierlich hydrochemisch und mikrobiell untersucht. Dabei wurden sowohl Grundwasserproben als auch Proben vor und hinter dem Wärmetauscher gewonnen und mittels chemischer Analyse auf Anionen, Kationen, organischen Kohlenstoff sowie mittels qPCR Analysen auf Eisenoxidierer, Eisenreduzierer sowie sulfatreduzierende Bakterien untersucht, um eine mögliche Veränderung der Redoxzonierung im Grundwasserleiter zu dokumentieren. Die Ergebnisse zeigen, dass an keinem der Standorte eine relevante Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit oder der mikrobiologischen Zusammensetzung festgestellt wurde. Ebenso wird die Redoxzonierung im Grundwasser durch den Betrieb nicht verändert. Es zeigte sich weiterhin, dass die Nutzung von Wärme und Kälte sowie der getaktete Betrieb der Anlage zu einer insgesamt ausgeglichenen thermischen, hydrochemischen und mikrobiologischen Bilanz beitragen. Zudem waren zwei der drei untersuchten Zirkulationsbrunnen an Standorten installiert, an denen eine herkömmliche offene Anlage aufgrund des hohen Gehalts an Eisen und Mangan nicht nachhaltig hätte betrieben werden können. Es zeigt sich, dass die Integralsonde an Standorten eingesetzt werden können, die bisher als nicht nutzbar für offene Geothermiesysteme galten.

#### 19. Schlagwörter

Offene Geothermiesysteme, Grundwasser, Hydrochemie

#### 20. Verlag

#### 21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title  KMU-innovativ – Verbundprojekt Klimaschutz: Hocheffiziente Nutzung geothermischer Energie - Integralsonde II, Teilprojekt B	
4. author(s) (family name, first name(s)) Scheytt, Traugott, PD Dr.  Dinkel, Eva Braun, Burga, Dr. Szewzyk, Ulrich, Prof. Dr. Schröder, Josephin, Dr.	5. end of project 31.05.2018
	6. publication date 11.12.2018
	7. form of publication Monography
8. performing organization(s) (name, address)  Technische Universität Berlin (TU Berlin) Institut für Angewandte Geowissenschaften Geochemisches Gemeinschaftslabor and FG Umweltmikrobiologie Straße des 17. Juni 145 10623 Berlin	9. originator's report no. -
	10. reference no. 01LY1507B
	11. no. of pages 111
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 10117 Berlin	13. no. of references 44
	14. no. of tables 14
	15. no. of figures 61
16. supplementary notes  none	
17. presented at (title, place, date)  -	



18. Abstract

The aim of this research project was to investigate the impact of a groundwater circulation well for geothermal use on the aquifer and to detect ongoing chemical and microbiological processes. This study was performed in cooperation with Geo-En Energy Technologies GmbH, Berlin, and the results were obtained from their geothermal system "Integralsonde".

The Integralsonde consists of one well, where groundwater is extracted, geothermally used via heat pump and re-infiltrated into the same aquifer at the same well but above the extraction layer. The impact of such a system used for geothermal energy production has not been scientifically investigated yet. One newly installed and two already running systems were sampled for more than two years to monitor hydrochemical and microbial changes in groundwater composition. Groundwater was sampled as well as water from the heat pump and analyzed for anions, cations, organic carbon. Iron reducers and oxidizers and sulfate reducing bacteria (SRB) were analyzed via qPCR to observe possible changes in redox zonation in the groundwater. The results show that the use of geothermal energy for cooling and heating as well as a clocked operation of the system lead overall to a well-balanced system regarding thermal, chemical, and microbiological characteristics of groundwater. The redox zonation in the aquifer does not change due to operation of the well. Two of the groundwater circulation wells were installed at locations with rather high concentrations of iron and manganese in groundwater. At these locations standard open geothermal systems would not have been installed without efficiency losses due to clogging. Hence, the Integralsonde circulation well system is operated at sites previously considered not feasible for open geothermal use.

19. keywords

Open geothermal systems, groundwater, hydrochemistry

20. publisher

21. price

# Inhalt

<b>I. Kurzdarstellung des Vorhabens .....</b>	<b>2</b>
1. Aufgabenstellung .....	2
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	2
3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	2
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	4
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	11
<b>II. Eingehende Darstellung .....</b>	<b>12</b>
1. Ergebnisse .....	12
1.1 Untersuchungsstandorte .....	12
1.2 Untersuchungsmethoden und Teilergebnisse .....	15
1.2.1 Probennahmen und chemische Analysen .....	15
1.2.2 Mikrobielle Analysen .....	16
1.2.3 Analysen und Ergebnisse zum Standort Berlin-Mitte .....	17
1.2.4 Analysen und Ergebnisse zum Standort Strausberg .....	19
1.2.5 Analysen und Ergebnisse zum Standort Berlin Südwest .....	22
1.2.5.1 Analyse von Ablagerungen an Brunnenbauten .....	32
1.2.5.2 Anlauf- und Inbetriebnahme-Effekte eines Brunnens .....	33
1.2.6 Alterungsuntersuchungen am Brunnen Standort Berlin Süd .....	40
1.2.7 Vergleich von Dubletten- und Integralsondenbetrieb .....	43
1.2.8 Ergebnisse der numerischen Betriebssimulation .....	45
1.2.8.1 Thermal Impact einer Integralsonde am Beispiel Strausberg .....	46
1.2.8.2 Thermal Impact eines Integralsondenfeldes, Bsp. Kreis Stormarn .....	60
1.2.9 Leistungspumpversuch am Bsp. Berlin-Charlottenburg .....	75
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	78
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	78
4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	78
5. Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen .....	80
6. Verwendete Literatur und Projektpublikationen .....	81

# I. Kurzdarstellung des Vorhabens

## 1. Aufgabenstellung

Ziel des geplanten Projektes war es, das bisherige oberflächennahe Geothermiesystem Integralsonde wissenschaftlich zu untersuchen und so optimieren, dass die Effizienz des Systems deutlich gesteigert werden kann. Dazu sollte ein innovativer Prozess für den Betrieb entwickelt werden und der Aufbau des Grundwasserzirkulationsbrunnens kostengünstiger gestaltet werden. Die Wechselwirkungen des Brunnens mit dem Grundwasserleiter sollten erforscht werden, um leistungsbeeinträchtigende Prozesse zu identifizieren und zu minimieren. Dadurch sollen zukünftige alterungsbedingte Betriebsstörungen möglichst vermieden und die Betriebsdauer der Sonde verlängert werden. Basierend auf den Ergebnissen sollte die Standortauswahl für Integralsonden systematisiert werden und es sollten verbesserte Prognoseregeln entwickelt werden.

## 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde als Verbundprojekt im Rahmen der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung eingerichteten Bekanntmachung "KMU-innovativ Ressourcen- und Energieeffizienz" im Schwerpunkt "Energieeffizienz / Klimaschutz" durchgeführt. Das Projekt hatte einschließlich kostenneutraler Verlängerungen eine Gesamtlaufzeit von 35 Monaten (12/2015–10/2018), wobei das Teilprojekt B bereits nach 30 Monaten (05/2018) endete.

## 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde gemeinsam von der Firma Geo-En Energy Technologies GmbH und der Technischen Universität Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften (TU Berlin), bearbeitet. Die Aufteilung der Arbeiten der Projektpartner ist in Tabelle 1 dargestellt. AP1–AP6 des Hauptantrags wurden so wie in Tabelle 1 angegeben durchgeführt. Die Zahlen in Klammern geben die Planung zu Projektantragstellung wieder.

Tabelle 1: Zeitlicher Ablauf des Vorhabens, Organisation der Arbeitseinheiten

Arbeitseinheit	Titel der Arbeitseinheit	Zuständig	Beginn Monat	Ende Monat
AP1	Analyse laufender Brunnensysteme mit Integralsonde	Geo-En TU Berlin	4 (1) 10	31 (9) 31
AP2	Untersuchungen zur Vermeidung von Verockerung und Korrosion (Laborversuche)	Geo-En TU Berlin	19 (4) 16	35 (12) 35
AP3	In-situ Analyse der Reaktion und Prozesse im Umfeld der Integralsonde	Geo-En TU Berlin	1 (6) 1	33 (18) 35
AP4	Konstruktion der Integralsonde Typ II	Geo-En TU Berlin	12 (12)	25 (21)
AP5	Untersuchung hydrogeochemischer Anlaufprozesse neuer Brunnensysteme mit Integralsonde	Geo-En TU Berlin	1 (12) 1	35 (24) 31
AP6	Erforschung prozessabhängiger Einflüsse auf die Brunnenleistung und -alterung	Geo-En TU Berlin	1 (1) 1	25 (24) 35
AP 7	Thermal Impact Integralsonde	Geo-En TU Berlin	30	35
AP 8	Untersuchung schwieriger Standorte	Geo-En TU Berlin	30	35
AP 9	Entwicklung Diagnoseprogramm für neu zu errichtende Integralsonden	Geo-En TU Berlin	32	35

Das Vorhaben verlief insgesamt weitestgehend entsprechend der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung. Das Gesamtziel des Projektes wurde erreicht.

### Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Ablaufplan:

Es gab eine erste gemeinsame kostenneutrale Verlängerung um 6 Monate sowie eine zweite kostenneutrale Verlängerung nur für das Teilprojekt A um weitere 5 Monate. In dieser letzten Projektphase (Projektmonate 31-35) war die TU im Unterauftrag der Geo-En weiterhin in das Projekt eingebunden.

Größere Abweichungen von der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung gab es in den AP 1 und 5 aufgrund des zwischenzeitlichen Projektbefunds, dass eine Analyse

und Bewertung von thermischen, hydrochemischen und mikrobiologischen Parametern nur unter Einbezug saisonaler Eigenarten des Betriebs geothermischer Anlagen (Heizsaison versus Kühlsaison) sinnvoll möglich ist und entsprechend möglichst lange Zeiträume untersucht werden müssen.

Für das AP3 wiederum stand nur zu Projektbeginn und Projektende je ein neuer Standort zur Durchführung der vorgesehenen in-situ-Untersuchungen zur Verfügung.

Der zunächst im Rahmen von AP1 durchgeführte Vergleich von aufgezeichneten Betriebsdaten der geothermischen Systeme und Simulationsdaten zum erwarteten Betrieb führte zu den Untersuchungen zum real zu erwartenden Thermal Impact dieser Systeme im Rahmen von AP7.

AP 8 und 9 wiederum wurden notwendig aufgrund der Problematik der Standortsuche für Integralsonden des neuen Typs, und erste Erkenntnisse dazu konnten in der abschließenden Verlängerungsphase des Projekts gewonnen werden.

## 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

### **Oberflächennahe Geothermie**

Die Klimaschutzziele der Bundesregierung und der Länder erfordern im Wärmebereich den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energie. Ein großes Potenzial für die Energiewende liegt in der Nutzung der oberflächennahen Geothermie - siehe dazu u. a. den Abschlussbericht „Neue Energie“ der Enquete-Kommission des Berliner Abgeordnetenhauses vom 3.11.2015 (Stroedter et. al., 2015). Anders als Solarthermie-, Photovoltaik- oder Windkraftanlagen sind geothermische Anlagen grundlastfähig, liefern also kontinuierlich Energie und können überdies sowohl als Wärme- als auch als Kältequelle (Gebäudekühlung) genutzt werden.

Geothermie ist die im zugänglichen Teil der Erdkruste gespeicherte Wärmeenergie. In Deutschland sind zwischen 20 bis ca. 100 Meter Tiefe konstante Temperaturen um die 10°C anzutreffen. Diese geothermische Energie kann genutzt werden, indem die Untergrundtemperatur konduktiv auf ein Medium übertragen wird, das z. B. in geschlossenen Rohrsystemen im Kreislauf geführt wird („geschlossene Systeme“). Derartige Systeme, speziell das System Erdwärmesonde (EWS), dominieren den deutschen Markt für oberflächennahe Geothermie (Quelle: BVG, BWP / BDH-Absatzstatistik Wärmepumpen).

Alternativ kann direkt Grundwasser aus dem wassergesättigten Untergrund gepumpt und thermisch genutzt werden, bevor es zurück in den Grundwasserleiter entlassen wird („offene Systeme“). Offene Systeme entziehen dem Untergrund potenziell ein Vielfaches mehr Wärme (im Sommer Kälte) pro Bohrloch als geschlossene Systeme und liefern im Winter höhere Temperaturen (und im Sommer niedrigere Temperaturen) im Wärme- (bzw. Kälte-) trägermedium als geschlossene Systeme. Entsprechende geothermische Versorgungssysteme sind daher etwa zehn Mal leistungsfähiger als geschlossene Systeme.

Ein potenzieller Nachteil offener Systeme ist, dass unter bestimmten hydrogeochemischen Voraussetzungen bei der Zirkulation des Grundwassers Alterungserscheinungen im System auftreten können, die die Leistungsfähigkeit der Systeme drosseln und den Wartungsaufwand erhöhen. So kann zum Beispiel die Vermischung oberflächennahen, sauerstoffreichen Wassers mit eisenhaltigen Wässern aus tieferen Schichten zur Ausfällung von Eisenhydroxid und biologischen Folgeprozessen (der sogenannten Verockerung) führen, so dass die Brunnenfilter verschleimen oder verstopfen können. Die Verockerung wird beherrschbar, wenn durch die Auslegung des Systems diese unerwünschten Prozesse nach Möglichkeit vermieden werden.

### **Grundwasserzirkulationsbrunnen**

Die Nutzung von Grundwasserleitern für geothermische Zwecke wird bestimmt durch die hydrogeologische Situation des Grundwasserleiters selbst, bestehend aus der Gesteinsart, des damit verbundenen Grundwasserleitertypus (z.B. Porengrundwasserleiter), der räumlichen Ausdehnung und den Strömungsbedingungen. Des Weiteren gehört hierzu die Temperaturverteilung im Untergrund, welche großmaßstäblich durch den geothermischen Tiefengradienten (typischerweise 3 Kelvin auf 100 m Teufe) bestimmt ist, jedoch oberflächennah deutliche lokale, anthropogen verursachte oder natürliche Abweichungen hiervon aufweisen kann.

Bei der bisher am häufigsten realisierten geothermischen Brunnenanlage vom Typ „Dublette“ ist der Grundwasserleiter über mindestens zwei Bohrungen erschlossen. Dabei dienen eine Bohrung zur Förderung und die andere zur Injektion des Grundwassers.

Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) wurden für ihren Einsatz in der Grundwassersanierung entwickelt. Weniger bekannt ist der Einsatz als offenes, oberflächennahes Geothermiesystem, bei dem im gleichen Bohrloch Grundwasser entzogen und nach dessen thermischer Nutzung wieder eingeleitet wird. Durch die direkte Nutzung des Grundwassers als Wärmeträgerflüssigkeit sind die Anforderungen an den Grundwasserleiter und die Grundwasserbeschaffenheit bei offenen

Geothermieanlagen hoch. Dies ist einer der Gründe, warum die Neuinstallationen weit hinter denen von geschlossenen Anlagen liegen.

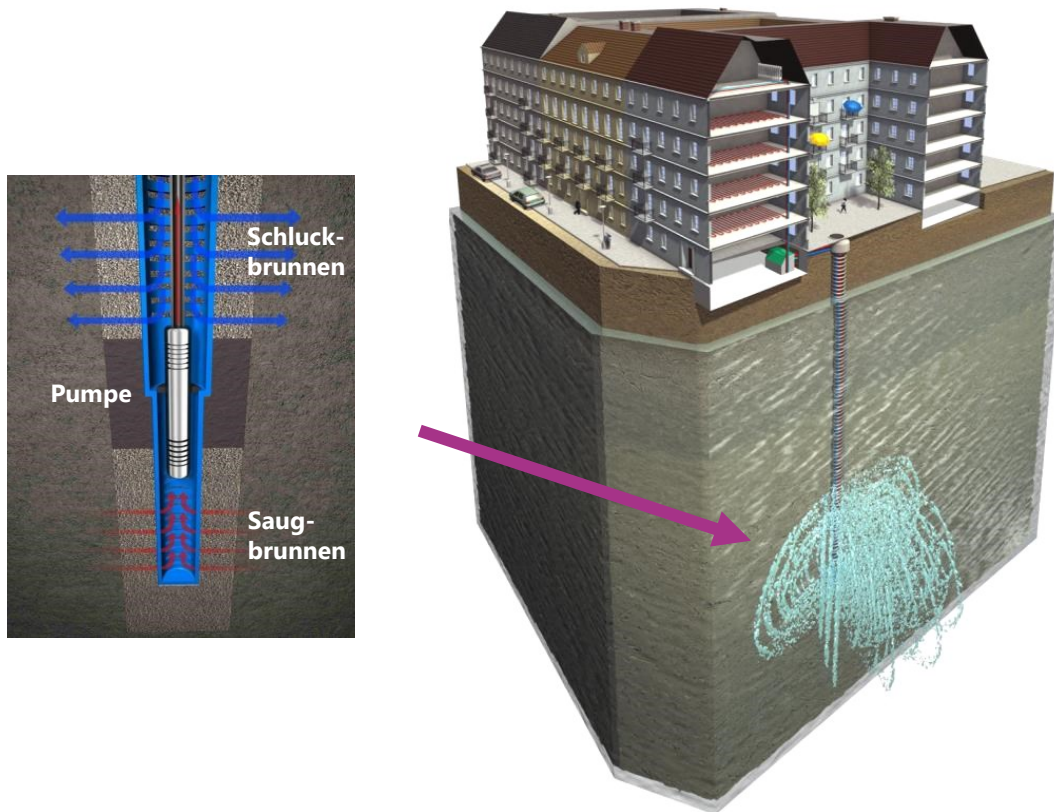


Abbildung 1: Schematischer Aufbau und Funktionsweise der Integralsonde.

Im Vergleich zur Dublette, die aus Saug- und Schluckbrunnen besteht, fällt bei GZB allgemein die Ausbildung von Absenkungstrichtern und Grundwasseraufhöhungen – je nach Teufenlage und Zuordnung der Filterstrecken - vernachlässigbar gering aus. Die Anforderungen für Dublettensysteme wurden bereits festgelegt (VDI 4640 Blatt 2, 2015, Entwurf) und deren Auswirkungen in zahlreichen Publikationen beschrieben (u.a. durch Bonte et al. in 2013, sowie von Griebler et al. in 2015). Für Grundwasserzirkulationssysteme fehlten vergleichbar gründliche wissenschaftliche Begleituntersuchungen bislang noch.

### **Aufbau und Funktionsweise der Integralsonde**

Der hier untersuchte GZB-Typ "Integralsonde" stellt eine spezielle Weiterentwicklung eines Grundwasserzirkulationsbrunnens dar, bei dem das Grundwasser in einer einzigen Bohrung gepumpt und wieder injiziert wird (Abbildung 1). Die Integralsonde eignet sie sich daher insbesondere für eng bebaute Gebiete mit kleinen Freiflächen. Sie kann sowohl zu Heiz- als auch zu Kühlzwecken verwendet werden und besteht aus einer vertikalen Anordnung zweier Filter, welche in der Rohrtour und im Ringraum der Bohrung hydraulisch entkoppelt sind. Das durch die untere Filterstrecke geförderte Grundwasser wird über ein Steigrohr direkt zum Wärmetauscher einer Wärmepumpe geleitet. Im



Wärmetauscher der Wärmepumpe wird dem geförderten Grundwasser im Heizbetrieb Wärme entzogen.

Das von der Wärmepumpe zurückfließende Wasser wird zum oberen Filter geleitet und dort in den Grundwasserleiter entlassen. Dadurch entsteht zwischen dem Einleitfilter und dem Entnahmefilter eine vertikal gerichtete Druckdifferenz. Das eingeleitete Wasser fließt auf bogenförmigen Bahnen zum Entnahmefilter (siehe Bsp. Abb.2 und Abbildung auf der Deckseite).

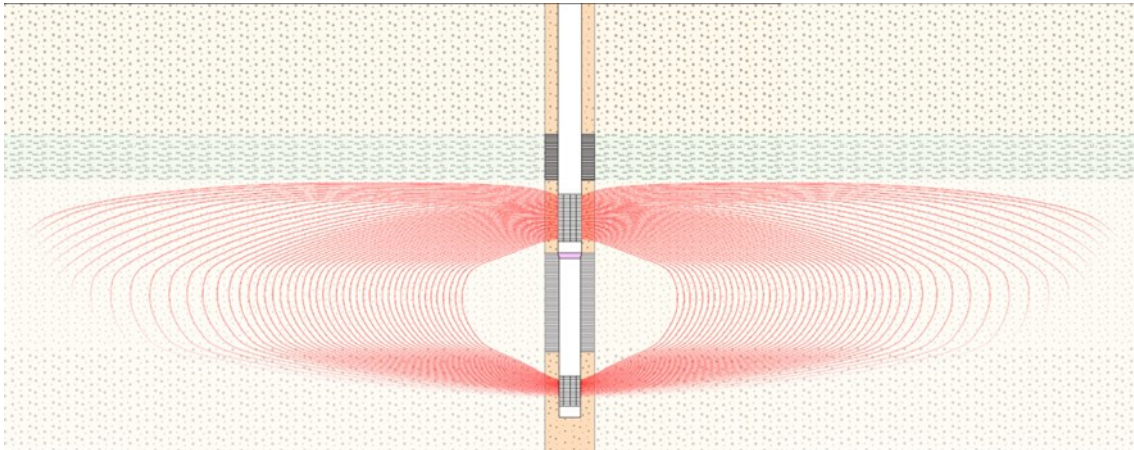


Abb. 2: Simulierte Strömungslinien eines GZB in Berlin im Dauerbetrieb mit 8,6 m<sup>3</sup>/h. Der geologische Aufbau wurde dem Bohrprofil entnommen, und die Anisotropie (horizontale Durchlässigkeit / vertikale Durchlässigkeit) des Grundwasserleiters wurde mit 3 angenommen. Die Simulation wurde mit FEFLOW 6.1 durchgeführt.

Das abgekühlte eingeleitete Wasser erwärmt sich durch thermischen Austausch mit dem Grundwasser und der Gesteinsmatrix im durchströmten Grundwasserleiter. Die so aufgenommene Wärme wird mit dem Wasser durch den Entnahmefilter und das Steigrohr zur Wärmepumpe geleitet. In Abhängigkeit von der hydraulischen Durchlässigkeit des durchströmten Grundwasserleiters, dem Vertikalabstand der Filterstrecken, der Leistung der Integralsonde (Durchflussrate in Verbindung mit der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf) und der Betriebsdauer wird das zirkulierte Wasser im Laufe einer Heizperiode abgekühlt.

Das System bietet die Möglichkeit eines problemlosen Wechsels von Winter- auf Sommerbetrieb. Dazu wird das bei Bedarf zur Gebäudekühlung genutzte und dabei passiv erwärmte Grundwasser ebenso durch den Einleitfilter in den Grundwasserleiter entlassen. Durch den saisonalen Wechselbetrieb zwischen Heizen und Kühlen kann eine ausgeglichene Energiebilanz im Grundwasserleiter mit nur wenigen Kelvin Temperaturschwankung im Jahresgang erzielt werden.

### **Grundwassertemperatur, Hydrochemie und Mikrobiologie**

Bei geothermischen Anlagen bilden sich durch die Einleitung und Entnahme von Wärme oder Kälte Bereiche aus, in denen die Temperatur über bzw. unter der ursprünglichen



Grundwassertemperatur liegt. Die Ausdehnung der kalten und warmen Bereiche im Gestein hängt von den Eigenschaften des durchströmten Feststoffs, des Grundwassers und der Intensität der geothermischen Nutzung ab. Für die Planung und Ausführung von Anlagen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie können die Empfehlungen der VDI (VDI4640, 2010) als Stand der Technik herangezogen werden. Je nach Bundesland werden diese Empfehlungen durch weitere Leitfäden ergänzt, was zu unterschiedlichen Richtlinien und Temperaturgrenzwerten führt. So ist in Berlin eine maximale Temperaturänderung von 3 K des einzuleitenden Grundwassers zur ungestörten Grundwassertemperatur Gegenstand von wasserbehördlichen Genehmigungen und Erlaubnissen für beantragte offene Geothermieanlagen. Die Empfehlung nach (VDI4640 2010) besagt, dass der Temperaturunterschied  $\pm 6\text{K}$  nicht übersteigen soll und das Grundwasser auf nicht mehr als  $20^\circ\text{C}$  erwärmt und nicht unter  $5^\circ\text{C}$  abgekühlt werden soll.

Im Rahmen eines UBA-Projekts (Griebler et al., 2015) wurde der thermische Einfluss von offenen Systemen auf Grundwasserleiter simuliert. Als Modellsystem wurde eine Dublette gewählt. Bei einer konstanten Temperaturspreizung von 4 K und durchgehender Förderung wurden je nach Grundwasserfließgeschwindigkeit Fahnenlängen von mehreren 100 m simuliert. Die Temperaturveränderung betrug jedoch ab mehreren 10 m Abstand zur Dublette weniger als 2 K.

Die meisten Studien, die sich mit dem Einfluss von Temperaturveränderungen auf Minerallöslichkeiten und Reaktionskinetiken beschäftigen, fanden heraus, dass anorganische Prozesse erst ab einer Temperatur von über  $30^\circ\text{C}$  stattfinden (Bonte 2013). Ein Großteil dieser Studien waren jedoch Säulenversuche (Bonte, 2013; Griebler et al., 2015; Griffioen and Appelo, 1993; Jesušek et al., 2013), deren Daten man nicht ohne Weiteres auf reale Grundwassersysteme übertragen kann.

Eine Absenkung der Grundwassertemperatur beeinflusst nicht nur Lösungs- und Fällungsreaktionen, sondern auch die mikrobielle Gemeinschaft. Untersuchungen von Brielmann et al. (2019) zeigen, dass insbesondere die Diversität und Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft in einem Grundwasserleiter sehr temperatursensitiv ist. Auch Pumpaktivitäten im Grundwasserleiter können die mikrobielle Gemeinschaft beeinflussen, indem sich die Häufigkeit der Bakterien, Stoffwechselaktivitäten und die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft (Kwon 2008), (Medihala 2012) verändert. Gründe für diese Beeinflussung sind Veränderungen der Temperatur, des pH oder der Eisenkonzentrationen (Navarro-Noya et al., 2013; Pinto et al., 2012). Verstärkter Heizbetrieb durch Geothermiesysteme kann die Grundwassertemperaturen verringern und dadurch mikrobielle Populationen beeinflussen (Brielmann et al., 2009; Hähnlein et al., 2013). Veränderungen in der Bakteriengemeinschaft können zusätzlich zu Änderungen der Ökosystemfunktionen führen und damit mikrobiell induzierte Probleme

wie Verockerung, Biofouling und Korrosion begünstigen. Diese Phänomene können auch in erhöhtem Auftreten von pathogenen Bakterien in Biofilmen resultieren und Gesundheitsrisiken erhöhen, wenn diese Systeme für die Trinkwassergewinnung genutzt werden.

Der Einfluss von thermischen Veränderungen auf mikrobielle Gemeinschaften wurde bereits intensiv in Labor- und Feldstudien untersucht (Bonte, 2013; García-Gil et al., 2018; Griebler et al., 2016; Lienen et al., 2017; Würdemann et al., 2016). Einige Studien fanden Einflüsse auf die Zusammensetzung der bakteriellen Gemeinschaft (Brielmann et al., 2009), während andere keinen Einfluss feststellen konnten (Schippers and Reichling, 2006). Es ist jedoch festzustellen, dass sich die Ergebnisse nicht von einem Geothermiesystem zum nächsten übertragen lassen. Zudem fehlten bisher Studien über den Einfluss von Grundwasserzirkulationsbrunnen. Zu den von Mikroorganismen in Grundwasserleitern genutzten Elektronenakzeptoren gehören Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), Mangan ( $\text{Mn}^{4+}$ ), Eisen ( $\text{Fe}^{3+}$ ), Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), elementarer Schwefel ( $\text{S}^0$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ).

Ein kritischer Aspekt für den Betrieb von Grundwasserzirkulationsbrunnen ist die vertikale Mischung von verschiedenen Redoxzonen (European Geothermal Energy Council, 2013). Die natürliche Redoxzonierung hängt von der Verfügbarkeit von Elektronendonatoren ab. Gewöhnlich ist die oberflächennächste Zone aerob, gefolgt von der nitratreduzierenden Zone, manganreduzierenden, eisenreduzierenden, sulfatreduzierenden und methanogenen (Kohlendioxid-reduzierenden) Zone. Die Mischung von Wässern verschiedener Redoxzonen kann zu Verockerung führen (Possemiers et al., 2016). Insbesondere der Eintrag von sauerstoff- oder nitratreichem Grundwasser in die eisenreduzierende Zone kann zur Ausfällung von  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -Flocken führen, die die Filterschlitze des Brunnens und den Grundwasserleiter verstopfen können (Beretta, 2017). Bonte et al., 2011, zeigten, dass ATEs Systeme oberflächennahes Grundwasser in tiefere Aquiferzonen einbringen und somit die Grundwasserqualität negativ beeinflussen können. Sulfatreduzierende Bedingungen können zu Korrosionserscheinungen an Metallteilen im System führen (Hamilton, 1985). Sand and Gehrke (2003) hingegen konnten keine Veränderung der Grundwasserqualität durch den Betrieb von offenen Geothermiesystemen in Korea feststellen.

### **Redoxprozesse**

In einem Grundwasserleiter finden Redoxprozesse statt, die zu einer Redoxzonierung im Grundwasserleiter führen. Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) spielt im Grundwasser als Elektronenakzeptor eine bedeutende Rolle, vor allem im oberflächennahen Grundwasser. Eisen liegt in Abhängigkeit vom pH-Wert und Redoxpotential als lösliches  $\text{Fe}^{2+}$  oder gering lösliches

$\text{Fe}^{3+}$  vor und kann durch abiotische und biotische Prozesse in den jeweils anderen Oxidationszustand umgewandelt werden (Stumm & Sulzberger 1992). Mikroorganismen wie *Geobacter sp.*, *Rhodoferrax sp.*, *Geothrix sp.* und *Shewanella sp.* koppeln die Reduktion von Eisen ( $\text{Fe}^{3+}$ ) an die Oxidation von Wasserstoff oder organischen Kohlenstoff (Lovley & Phillips 1986, Crosby et al. 2007) Die abiotische Eisenoxidation findet beim Kontakt anoxischen Grundwassers mit Sauerstoff oder durch das Einmischen sauerstoffhaltigen Grundwassers statt und führt zur Bildung von Hydroxiden. Ebenso ruft die in aeroben und anaeroben Habitaten stattfindende mikrobielle Oxidation von Eisenverbindungen (Straub et al. 1996) die Bildung von Hydroxiden ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), Oxyhydroxiden ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) oder Oxiden ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) hervor. Zu den dabei am weitesten verbreiteten Ausfällungen gehören Karbonate, Hydroxide, Metallsulfide (vor allem Pyrit) und Silikate.

Die mikrobielle Umsetzung von Kohlenstoff ist eng an die Fällung und Lösung von Karbonaten gekoppelt, denn Mikroorganismen beeinflussen durch ihren Stoffwechsel den Gehalt an gelöstem organischen Material und  $\text{CO}_2$  in ihrer Umgebung. Die Karbonatlöslichkeit ist dabei abhängig vom pH-Wert,  $\text{CO}_2$ -Partialdruck und im Wasser vorkommenden Erdalkali-Ionen wie Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) oder Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (Stumm & Morgan 1981). Ausgefallene Karbonate findet man als Überzüge auf Bodenpartikeln und in Porenräumen von Gestein. Dort können sie zur Zementation der Feststoffmatrix führen. Eisenoxidierer gelten als Hauptverursacher für durch Eisenhydroxide in Brunnen und Wasserleitungen hervorgerufene Verockerung (Cullimore & McCann 1978). Die Verockerung betrifft vor allem die Brunnenfilter und führt zu einer reduzierten Produktivität (de Mendonca et al. 2003). Die Bildung amorpher Silikate wird bei hydrothermalen Quellen, aber auch in Geothermieanlagen beobachtet (Fujino et al. 2008). In wasserführenden Systemen werden eisenhaltige Metalle nicht nur durch rein chemische und elektrochemische Prozesse korrodiert, sondern auch durch die Aktivität von Mikroorganismen in der sogenannten „mikrobiell induzierten Korrosion“. Dies führt zu einer drastischen Reduzierung der Lebensdauer metallischer Bauteile und ruft enorme Kosten hervor (Flemming 1996). Sulfatreduzierende Bakterien (SRB) nutzen den Wasserstoff und bilden Sulfid, das mit dem gelösten Eisen ausfällt. Durch die Bindung des Eisens schreitet die anodische Dissoziation des Metalls voran. Ein hoher Salzgehalt im Fluid, aber auch durch Mikroorganismen produzierte organische Säuren wirken sich zusätzlich negativ auf die Metalleigenschaften aus und begünstigen die Zerstörung des Metalls durch Korrosion (Gaylarde & Beech 1988, Sand 1996). Neben Chlorid zählt Sulfat zu den korrosiv wirkenden Ionen.

Bei der Integralsonde kann eine auf die Redoxzonen ausgerichtete Installation und Betriebsweise dazu führen, dass es zu keiner Vermischung von Redoxzonen kommt. Damit werden die Ausfällung von Mineralen und eine Verockerung vermieden und der

Grundwasserleiter behält seine ursprüngliche Permeabilität. Ein Ziel dieses Projektes war die Entwicklung von Verfahren zur frühzeitigen in-situ Ermittlung der Redoxzonen und der daraus abgeleiteten Betriebsführung der Integralsonde basierend auf thermo-hydraulischer und hydrochemischer Modellierung. Diese Vorgehensweise wird als das Prognoseinstrumentarium bezeichnet.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In die praktischen Arbeiten und Untersuchungen an den Standorten waren die jeweiligen Eigentümer als passive Praxispartner informell eingebunden.

In gleicher Weise wurde die Berliner Umwelt- und Wasserbehörde informell zu den Untersuchungen zu einzelnen Standorten eingebunden.

Im letzten Projektjahr wurden die wesentlichen Projektergebnisse in einem ausführlichen Workshop Interessierten aus Industrie, Wissenschaft- und Forschung vorgestellt. Hieraus ergaben sich Folgegespräche zu einzelnen Details mit einzelnen Vertretern der zuständigen Behörden und aus der Forschung, welche in Zukunft fortgeführt werden sollen.

## II. Eingehende Darstellung

### 1. Ergebnisse

In diesem Abschnitt sind die wichtigsten Ergebnisse des Projektes zusammengefasst. Eine noch detailliertere Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse kann aus den zahlreichen, während des Projektes erstellten Publikationen gewonnen werden (siehe Kap. II 6.1).

#### 1.1 Untersuchungsstandorte

In der folgenden Tabelle II sind die Standorte der für die Untersuchungen ausgewählten geothermischen Anlagen, der jeweilige Anlagentyp, die Anzahl der Brunnen am Standort sowie das Betriebsalter der Brunnen bei Projektstart angegeben.

Tabelle 2: Im Projekt untersuchte Standorte mit zu Projektstart laufenden, neu in Betrieb gehenden sowie neu vorgesehenen geothermischen Brunnenanlagen.

Nr.	Standort	Anlagentyp	Anzahl Brunnen	Alter
1	Strausberg	Integralsonde	1	1,5
2	Berlin Mitte	Integralsonde	1	3,5
3	Berlin - Niederschönhausen	Dublettensonden	2	5
4	Kreis Stormarn	Integralsonden	7	2
5	Berlin Süd-West	Integralsonde	1	0
6	Berlin Süd	GWZ	1	12
9	Berlin Charlottenburg	mehrere geplante Integralsonden Typ II		-



Im Projekt wurden drei der oben genannten Standorte mit Integralsonde über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr kontinuierlich untersucht. Der kurz nach Projektstart in Betrieb gegangene Standort Berlin-Südwest (Nr. 5 in Tabelle II) über insgesamt 25 Monate, der Standort Berlin-Mitte (Nr. 2 in der Tabelle II) über 19 Monate und der Standort Strausberg (Nr. 1 in der Tabelle II) über 22 Monate. Durch die Analyse von Wasser und Filtrat konnte festgestellt werden, dass die bisherigen Richtwerte für hydrochemische Grenzwerte für den Betrieb von Brunnenanlagen für Zirkulationsbrunnen des Typs Integralsonde angepasst werden sollten. Grund dafür ist, dass die von uns untersuchten Grundwasserzirkulationsbrunnen vom Typ Integralsonde I höhere Gehalte an Eisen und Mangan tolerieren. Anhand unseres kombinierten Grundwasser-Probennahmeverfahrens, bestehend aus der Ermittlung der physikochemischen Parameter, Bestimmung der redoxsensitiven Ionen sowie spezifischer mikrobieller Primer für die Beurteilung der Verockerung, kann der Zustand eines Zirkulationsbrunnens evaluiert werden.

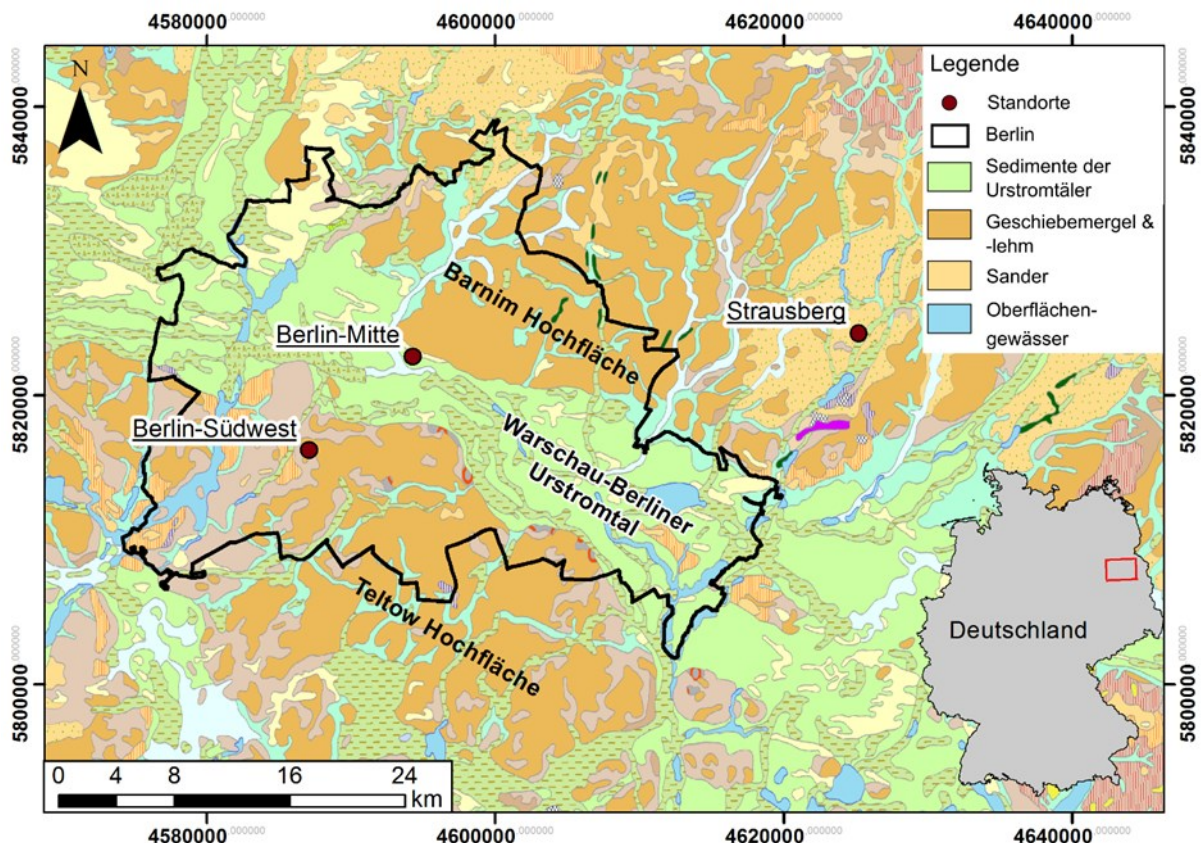


Abbildung 3: Übersichtskarte von Berlin mit den drei über die Projektlaufzeit kontinuierlich beprobten Untersuchungsstandorten

An den Standorten Berlin-Südwest und Berlin-Mitte (Abb. 3) befinden sich beide Filterstrecken im dort ungespannten saalezeitlichen Hauptgrundwasserleiter von Berlin, der aus Sanden und Kiesen aufgebaut ist. Dieser Grundwasserleiter wird auch zur Trinkwassergewinnung genutzt. Die beiden Filterstrecken am Standort Berlin-Mitte befinden sich in den Teufen 9,10 – 14,9 m und 25,4 – 28,3 m und am Standort Berlin-

Südwest in 52,0 – 56,0 m sowie 67,4 – 69,9 m. Der Standort Berlin-Mitte liegt im Warschau-Berliner-Urstromtal und weist einen geringen Grundwasserflurabstand auf. Berlin-Südwest kann dem Teltow Plateau zugeordnet werden. Die Flurabstände dort betragen über 20 m. Der dritte Standort, Strausberg, liegt 15 km nordöstlich von Berlin auf der Barnim Hochfläche bei einem Flurabstand von etwa 8,5 m. Der gespannte, pleistozäne Grundwasserleiter besteht vorwiegend aus Mittel- bis Feinsanden und kann ebenfalls dem Saale-Komplex zugeordnet werden. Die Filterstrecken in Strausberg liegen in 59,0 – 53,0 m und 70,4 – 73,7 m Tiefe. Am Standort Berlin-Südwest wurde kurz nach Projektstart eine Grundwassermessstelle in 7 m Entfernung zur Integralsonde installiert. Der Grundwasserzirkulationsbrunnen am Standort Berlin-Südwest ging im März 2016 in Betrieb. Die vorbereitenden Arbeiten im Rahmen dieses Projekts begannen im Dezember 2015 mit der Untersuchung der hydrogeochemischen Anlaufprozesse eines neuen Brunnens vom Typ Integralsonde. Vor der Inbetriebnahme dieses Brunnens wurde ein Auffüllversuch zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit des Untergrundes im Teufenbereich der Filterstrecken durchgeführt. Zusätzlich wurden erste Wasserproben für die mikrobiellen und chemischen Analysen entnommen. Von März 2016 bis August 2016 wurde der Standort wöchentlich beprobt und von Januar 2017 bis Juni 2018 monatlich.

Die Integralsonde in Berlin-Mitte ging 2012 in Betrieb und die am Standort Strausberg 2014. Der Standort Strausberg wurde im September 2016 ins Untersuchungsprogramm aufgenommen und der Standort Berlin-Mitte im Dezember 2016. Von da an wurden beide Standorte monatlich bis Juni 2018 beprobt.

Zu allen drei Standorten wurden über den jeweils untersuchten Zeitraum kontinuierlich und mit hoher Zeitauflösung (pro Minute) alle Betriebsdaten des geothermischen Systems – unter anderem die Betriebsstunden der Brunnenpumpe(n), die Temperaturen in Vor- und Rücklauf (VL: von der Sonde zur Wärmepumpe, RL: von der Wärmepumpe zur Sonde) sowie der Durchfluss pro Sonde - messtechnisch erfasst, geloggt und ausgewertet.

Auf Basis dieser Betriebsdaten kann eine Analyse des durch den Betrieb der Anlage auf den Untergrund ausgeübten thermischen Impacts [Griebler et al., 2015] z. B. über eine numerische kombinierte Strömungs- und Wärmetransportmodellierung (hier: FEFLOW 6.2) unter Berücksichtigung der Sedimenteigenschaften durchgeführt werden. Für zwei Standorte - Nr. 1 und Nr. 4 der Tabelle II – wurden diese Simulationen ausgeführt (siehe Kapitel 1.2.8). Dabei hat sich gezeigt, dass die thermischen Auswirkungen auf den Untergrund auch bei größeren Abweichungen zwischen den Jahreslastgängen aus Planung/Auslegung und Realbetrieb gering, lokal begrenzt und auch im Rahmen der genehmigungsrechtlichen Vorgaben bleiben. Dies gilt besonders auch für Standort Nr. 4 im Landkreis Stormarn (SH) als größter hier untersuchter Anlage, bestehend aus einer

Anordnung von 7 Brunnen. Für alle 7 Brunnen erfolgten Aufzeichnungen und ausführliche Analysen der betrieblich erfassten Parameter Durchfluss, Druck und Temperaturen in Vor- und Rücklauf.

Zu Standort Nr. 3 – ausgewählt als Vergleichsstandort mit dem etablierten Dublettsystem – wurden die Betriebsdaten des geothermischen Systems über einen mehrjährigen Zeitraum messtechnisch erfasst, geloggt und im Projekt vergleichend ausgewertet (Kapitel 1.2.7). Anhand der an diesen Standorten durchgeführten Analysen lässt sich kein grundsätzlicher betrieblicher Vor- oder Nachteil eines der Systeme Integralsonde und Dublette ausmachen.

Standort Nr. 6 (Berlin-Süd) als ältester (zu Projektstart seit 12 Jahren ununterbrochen im Betrieb) und im Rahmen des Projekts zugänglicher Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) wurde zur Analyse von Langzeit-Brunnenalterungsphänomenen hinzu gezogen.

Im letzten Projektjahr wurde Standort Nr. 7 (Berlin-Charlottenburg) als potentiell neuer Standort für das weiterentwickelte System der Integralsonde im Rahmen von Voruntersuchungen in das Untersuchungsprogramm mit aufgenommen, unter anderem mit dem Ziel, bessere Diagnoseprogramme zu entwickeln, um die wesentlichen Parameter (hydrochemische Beschaffenheit des Grundwassers, Durchlässigkeit des Gesteins, Reaktivität des Grundwasserleiters, mikrobielle Zusammensetzung) frühzeitig zu erfassen. Diese Arbeiten konnten in der Projektlaufzeit allerdings nicht mehr vollständig abgeschlossen werden. Zu Projektende erzielte Teilergebnisse dazu finden sich in Kapitel 1.2.9.

## 1.2 Untersuchungsmethoden und Teilergebnisse

### 1.2.1 Probennahmen und chemische Analysen

Jeweils vor jeder an den Standorten erfolgten Grundwasser-Probennahme wurden zunächst die physiko-chemischen Parameter pH, spezifische elektrische Leitfähigkeit, gelöster Sauerstoffgehalt und das Redoxpotential  $E_H$  mit Hoch Intellical Elektroden in einer Durchflussmesszelle erfasst und aufgezeichnet. Die Probennahmen wurden jeweils erst dann durchgeführt, nachdem sich für alle physiko-chemischen Parameter ein konstanter Wert eingestellt hatte. Anionen-, Kationen-, und DOC-Proben wurden mit 0,45  $\mu\text{m}$  Zellulose-Acetat-Filtern filtriert. Die Anionen-Proben wurden mit TTE (Trichlortrifluorethan), die Kationenproben mit konzentrierter  $\text{HNO}_3$  und die DOC-Proben mit HCl stabilisiert.  $\text{Fe}^{2+}$  wurde photometrisch im Gelände mit 1,10-Phenantrolin (Hach DR 2000) bestimmt. Alle Proben wurden im Geochemischen Gemeinschaftslabor der TU



Berlin analysiert. Die Kationen wurden mittels ICP-OES (Thermo iCAP 6300 Duo) und die Anionen mittels Ionenchromatographie (Dionex DX 120) gemessen. DOC-Konzentrationen wurde mittels eines TOC Analyzers (Shimadzu TOC-5000/5050) ermittelt. Gesamt- und Karbonathärte wurden mittels Titration im Feld bestimmt.

## 1.2.2 Mikrobielle Analysen

### DNA Extraktion:

Die 200 mL Wasserproben wurden vor der DNA Extraktion jeweils über einen 0,2 µm Polykarbonatfilter filtriert und anschließend mittels des GeneMATRIX Soil DNA Purification Kit (Roboklon, Berlin) nach Herstellerangaben extrahiert.

### Quantitative PCR:

Die Häufigkeit von Eubakterien, eisenoxidierenden, eisenreduzierenden und sulfat-reduzierenden Bakterien wurde in allen Proben mittels quantitativer PCR der 16S rRNA Gene und des *dsrA* Gens ermittelt. Alle qPCR Ansätze wurden mit dem SG qPCR MasterMix (Roboklon, Berlin) durchgeführt. Die verwendeten Primer und Temperaturbedingungen sind in der folgenden Tabelle III aufgeführt.

Tabelle 3 zeigt...die verwendeten Primer und Temperaturbedingungen zur qPCR Analyse

Zielorganismus	Primer	Sequence 5' -> 3'	Größe (bp)	Annealing temp. [°C]	Referenz
<i>Eubacteria</i>	Uni338F_RC	ACT CCT ACG GGA GGC AGC	571	60,4	(Lu et al., 2013)
	Uni907R	CCG TCA ATT CMT TTG AGT TT			(Lane, 1991)
<i>Rhodoferrax ferrireducens</i> Gruppe	RdoR_RC	GAC CTG CAT TTG TGA CTG YA	312	58	(Lu et al., 2013)
	Uni907R	CCG TCA ATT CMT TTG AGT TT			(Lane, 1991)
<i>Gallionella</i> -like Gruppe	628F	GBM AGG CTA GAG TGT AGC	370	51	(Wang et al., 2011)
	998R	CTC TGG AAA CTT CCT GAC			(Wang et al., 2009)

<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	DSR1F	ACS CAC TGG AAG CAC G	500	60	(Wagner et al., 1998)
	DSR500R	CGG TGM AGY TCR TCC TG			(Wilms et al., 2006)
<i>Geothrix fermentas</i>	Gx 193F	GAC CTT CGG CTG GGA TGC TG	255	58	(Coates, J. D. and Achenbach, 2002)
	Gx 448R	AGT CGT GCC ACC TTC GT			(Coates, J. D. and Achenbach, 2002)

Alle Messungen wurden mit zwei unabhängigen Duplikaten durchgeführt. Die PCRs wurden in einem Gesamtvolumen von 25 µL durchgeführt, in dem 2 µL gelöste DNA, 20mM jedes Primers und 12,5 µL des SG qPCR Master Mixes enthalten waren. Die Genkopienzahlen der jeweiligen Standards wurden in einem Messbereich von 10<sup>2</sup> bis 10<sup>8</sup> Genkopien/mL bestimmt. Eine finale Schmelzkurvenanalyse (55-99 °C) wurde am Ende jedes PCR Zyklus' durchgeführt, um die Genauigkeit der Primer-Analyse zu gewährleisten. Die Standardkurven wurden generiert, indem das individuelle Echtzeit-PCR Programm für jedes Primerset in Duplikaten durchgeführt wurde.

### 1.2.3 Analysen und Ergebnisse zum Standort Berlin-Mitte

Hydrochemie:

Aus den Planungsunterlagen zur Anlage am Standort geht hervor, dass im Dezember 2012, bevor die Integralsonde installiert wurde, Eisen komplett gelöst als Fe<sup>2+</sup> in einer Konzentrationen von 3,4 mg/L vorlag; die Mangankonzentration lag zu diesem Zeitpunkt bei 0,86 mg/L. Nach inzwischen sechs Betriebsjahren liegen die Eisengesamtkonzentrationen bei 2,8 – 4,5 mg/L, wobei die Mangankonzentration von 0,86 auf 1,14 mg/L angestiegen ist. Die Nitratkonzentration schwankt zwischen 0 und 5,9 mg/L. Das Redoxpotential E<sub>H</sub> schwankte zwischen 132 und 178 mV während der Messungen von Dezember 2016 und Mai 2018 (Abb. 4). DOC-Konzentrationen schwankten zwischen 7 mg/L im Dezember 2016 und 2,3 mg/L im März 2017. Die CaCO<sub>3</sub>-Konzentrationen im Prozesswasser liegen bei 410 ± 32 mg/L aufgrund von Mergellagen im Berliner Urstromtal. Die Sulfatkonzentration lag bei 500 ± 46 mg/L und ist damit für den Betrieb eines offenen Geothermiesystems wegen der potentiellen Korrosionsgefahr relativ hoch. Bis auf Nitrat waren alle Redox-sensitiven Parameter während der Probenahmen (Abb. 4) stabil. Mit diesen Werten ist die hydrochemische Grundwasserzusammensetzung an diesem Standort als nicht ideal für den Betrieb eines offenen Geothermiesystems einzustufen.

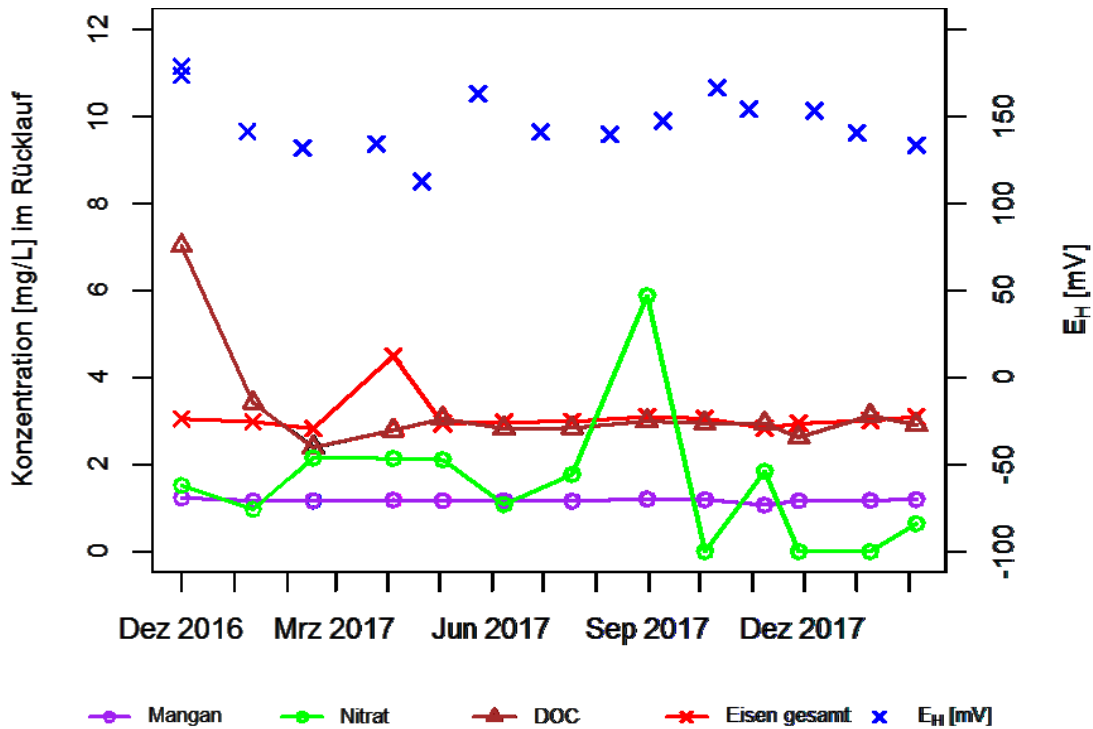


Abbildung 4: Ergebnisse des Monitorings der Redox-sensitiven Spezies am Standort Berlin-Mitte.

#### Mikrobiologie:

Die qPCR Ergebnisse (Abbildung 5) zeigen unterschiedliche Ergebnisse der rRNA Genkopienzahlen der untersuchten Bakteriengruppen. Die bakterielle Population blieb während der gesamten Probennahmezeit stabil, und es wurden keine langfristigen Änderungen während des Betriebs beobachtet. Es erhöhten sich lediglich die Genkopien von *Geothrix* und SRB seit Oktober 2017. Die spezifische Quantifizierung von *Rhodofera*-, *Geothrix*-, *Gallionella*- und SRB-verwandten Genen zeigte, dass diese Gruppen sehr häufig in allen Proben vorkamen und die durchschnittliche Genkopienzahl zwischen  $10^2$  und  $10^3$  Genkopien/mL schwankte. Es konnten keine langfristigen Veränderungen der Bakterienpopulation im Grundwasser aufgrund des Betriebs des Grundwasserzirkulationsbrunnens beobachtet werden. Die Ergebnisse der 16S rRNA Quantifizierung ergaben, dass die *Rhodofera*- und *Gallionella*-artigen Gruppen von Dezember 2016 bis Juli 2017 Monaten der Probennahmen am häufigsten vorkamen. Anschließend wurden diese Organismen von der SRB-Gruppe (bis auf zwei Ausnahmen am 08. und 23.05.2018) als häufigster Organismus abgelöst. Auch die qPCR-Analyse der *Geothrix*-artigen Organismen zeigte einen Anstieg der Zielorganismen in diesem Zeitraum.

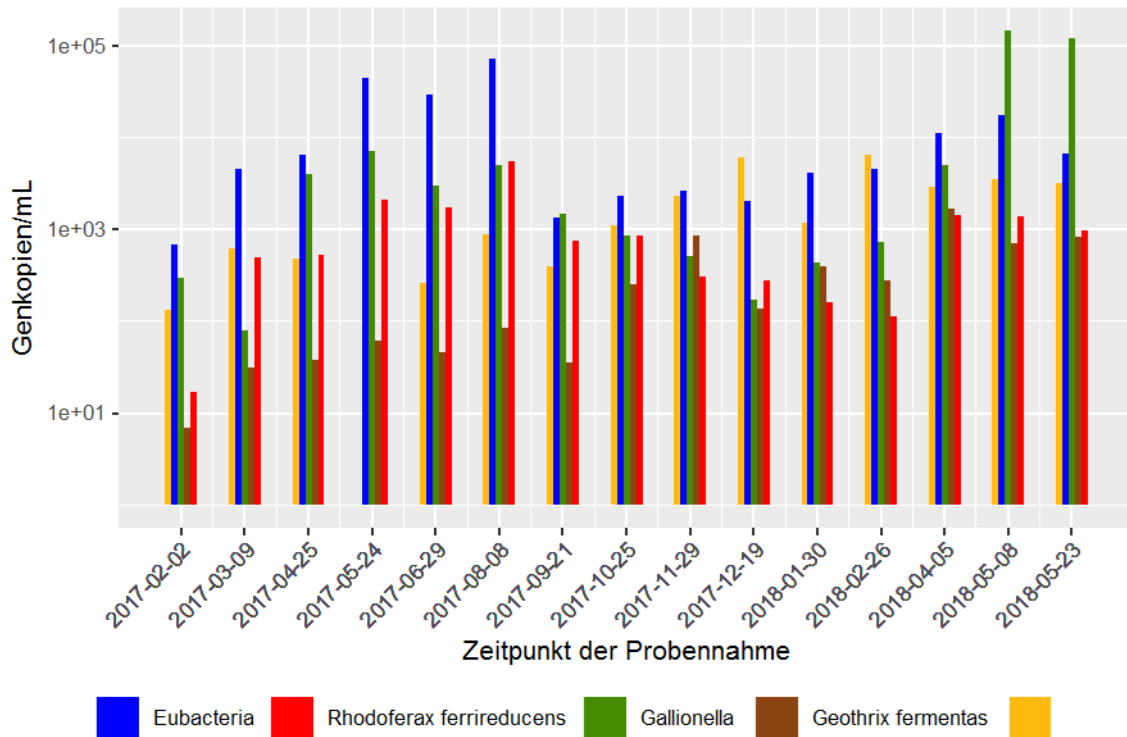


Abbildung 5: Häufigkeit der Bakterien im Grundwasserzirkulationsbrunnen am Standort Berlin-Mitte, ermittelt via qPCR.

### 1.2.4 Analysen und Ergebnisse zum Standort Strausberg

Hydrochemie:

Das verwendete Grundwasser für das Geothermiesystem in Strausberg ist vom Typ Ca-HCO<sub>3</sub> und stammt aus dem zweiten, gespannten Grundwasserleiter in 58 – 73 m Tiefe, welcher auch für die Trinkwassergewinnung genutzt wird. Vor der Installation des Grundwasserzirkulationsbrunnens lagen die Konzentrationen für Eisen im Teufenbereich der oberen Filterstrecke (60 m Tiefe) bei 0,8 mg/L und im Teufenbereich der unteren Filterstrecke (65 m Tiefe) bei 1,6 mg/L. Die Sulfatkonzentrationen lagen bei 142 mg/L an der oberen Filterstrecke und bei 18 mg/L an der unteren Filterstrecke. Nitrat wurde nur an der oberen Filterstrecke mit 4,6 mg/L gemessen. Von September 2016 an konnte der Vorlauf beprobt werden und von Juni 2017 an auch der Rücklauf. Dadurch konnte überprüft werden, ob sich das Wasser beim Durchlaufen der Anlage verändert, bevor es wieder eingeleitet wird. Eisen-, Mangan-, Nitrat-, Sulfat- und DOC-Konzentrationen in Vorlauf und Rücklauf sind nahezu gleich (Abb. 6 und 7). Das Redoxpotential E<sub>H</sub> schwankt zwischen -28 und 112 mV. Die Sulfatkonzentrationen lagen bei durchschnittlich 28 ± 1,5 mg/L und Nitrat konnte nur in geringen Konzentrationen unter 8 mg/L gemessen werden. Eisen lag gelöst als Fe<sup>2+</sup> mit einer durchschnittlichen Konzentration von 1,4 ± 0,09 mg/L vor. DOC wurde in Konzentrationen zwischen 0 – 3,3 mg/L detektiert. Die

Mangankonzentrationen waren sehr stabil bei 0,14 mg/L. Die Ionenkonzentrationen veränderten sich über den gesamten Probennahmezeitraum kaum.

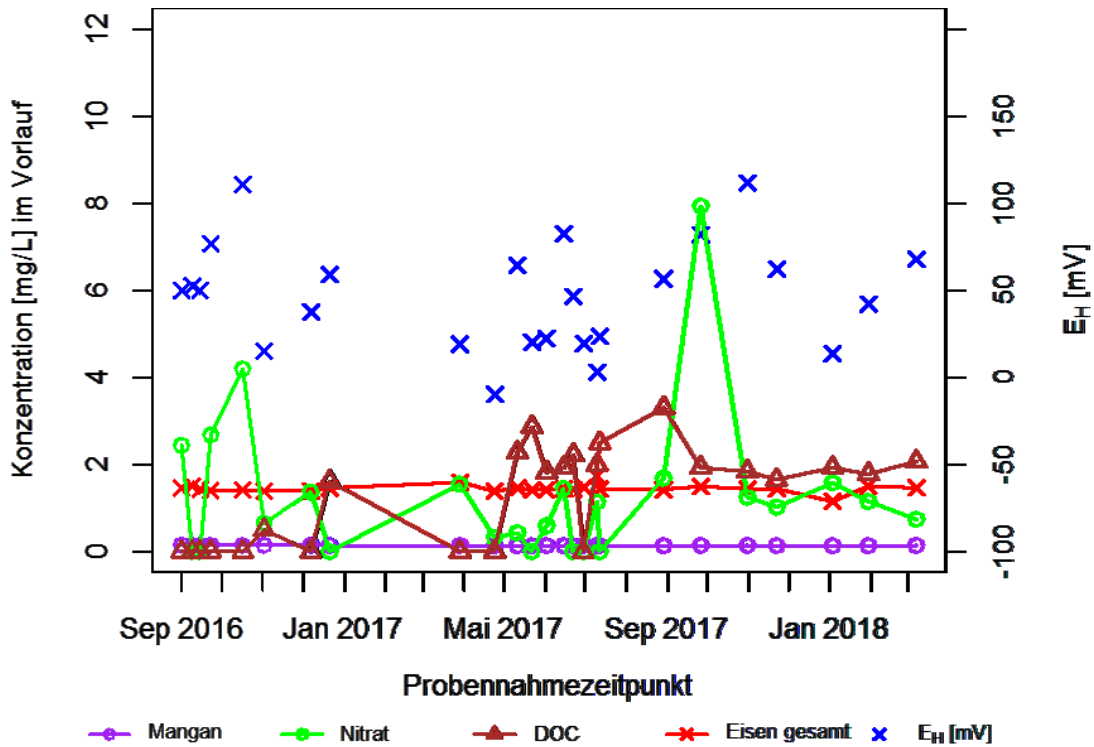


Abbildung 6: Ergebnisse des Monitorings der Redox-sensitiven Spezies am Standort Strausberg im Vorlauf des Systems

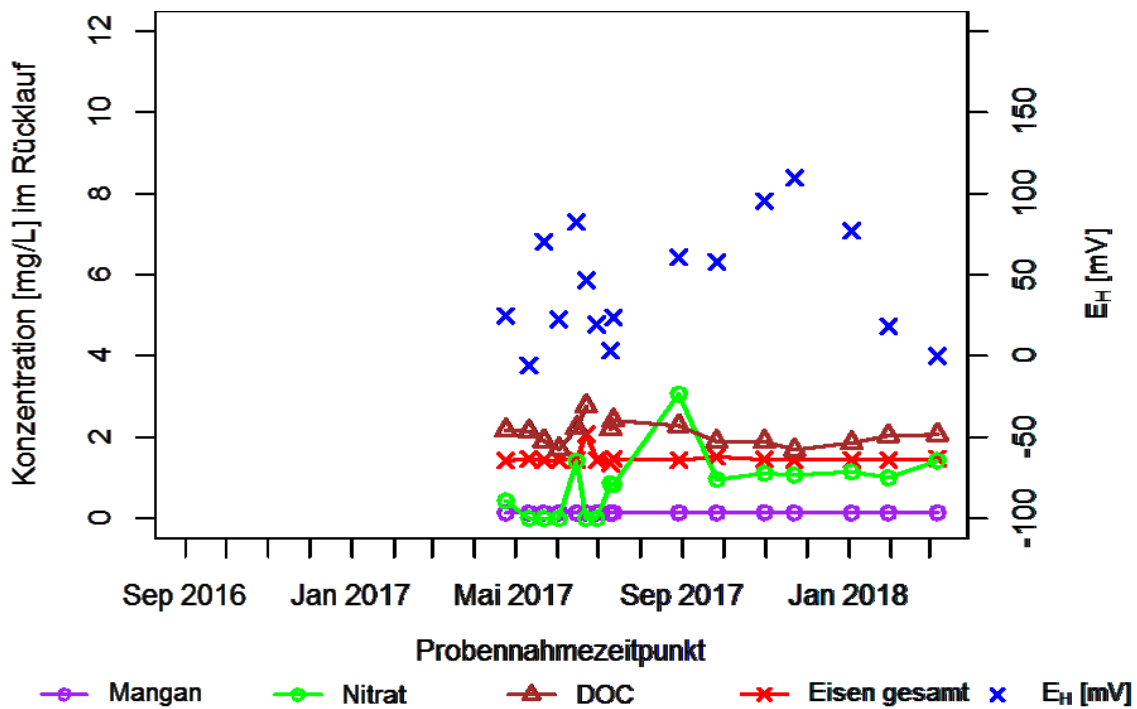


Abbildung 7: Ergebnisse des Monitorings der Redox-sensitiven Spezies am Standort Strausberg im Rücklauf des Systems.

Mikrobiologie:

Die bakteriellen 16S rRNA Genhäufigkeiten der Wasserproben wurde bestimmt, um die Zusammensetzung der bakteriellen Population in den Proben des Vor- und Rücklaufs miteinander zu vergleichen. Abb. 8 und 9 zeigen die Genkopienhäufigkeit der fünf verschiedenen Bakteriengruppen. Durchschnittlich wurden  $9 \cdot 10^4$  Genkopien/mL der Eubakterien im Vorlauf detektiert, während die Anzahl der Genkopien im Rücklauf mit  $4 \cdot 10^4$  Kopien/mL etwas geringer war. Zu Beginn der Probennahmen im September 2016 lag die Genkopienanzahl der Eubakterien im Bereich  $10^5$  Genkopien/mL und verringerte sich im Anschluss um bis zu zwei Zehnerpotenzen (mit Ausnahme von 5 Probennahmezeitpunkten). Zu dieser Zeit waren Bakterien, die *Gallionella* spp. zugeordnet werden, die häufigste detektierte Bakteriengruppe. Ab November 2016 war *Rhodofera* sp. die häufigsten Bakteriengruppe und *Gallionella* an zweiter Stelle. *Gallionella*-artige Genkopien wurden im Bereich  $0,5 \cdot 10^1$  bis  $1 \cdot 10^5$  Genkopien/mL gemessen. In einigen Wasserproben war zu wenig *Gallionella*-artige DNA enthalten, sodass die Werte unterhalb der Nachweisgrenze des Messgeräts lagen. Um anaerobe Eisenreduzierer zu quantifizieren, wurden die Gattungen *Rhodofera* und *Geothrix* ausgewählt. Einige Proben enthielten nur sehr geringe Genkopienzahlen, sodass die Anzahl zwischen „nicht detektierbar“ und  $1 \cdot 10^4$  Genkopien/mL für *Rhodofera* und für *Geothrix* zwischen „nicht detektierbar“ und  $7,5 \cdot 10^2$  Genkopien/mL schwankte. Von Januar 2017 an kamen auch Sulfat-reduzierende Bakterien (SRB) in den Wasserproben vor. Hier schwankte die Anzahl zwischen  $7,1 \cdot 10^1$  und  $5,8 \cdot 10^3$  Genkopien/mL. Der höchste Anteil von SRB wurde im Februar 2017 detektiert.

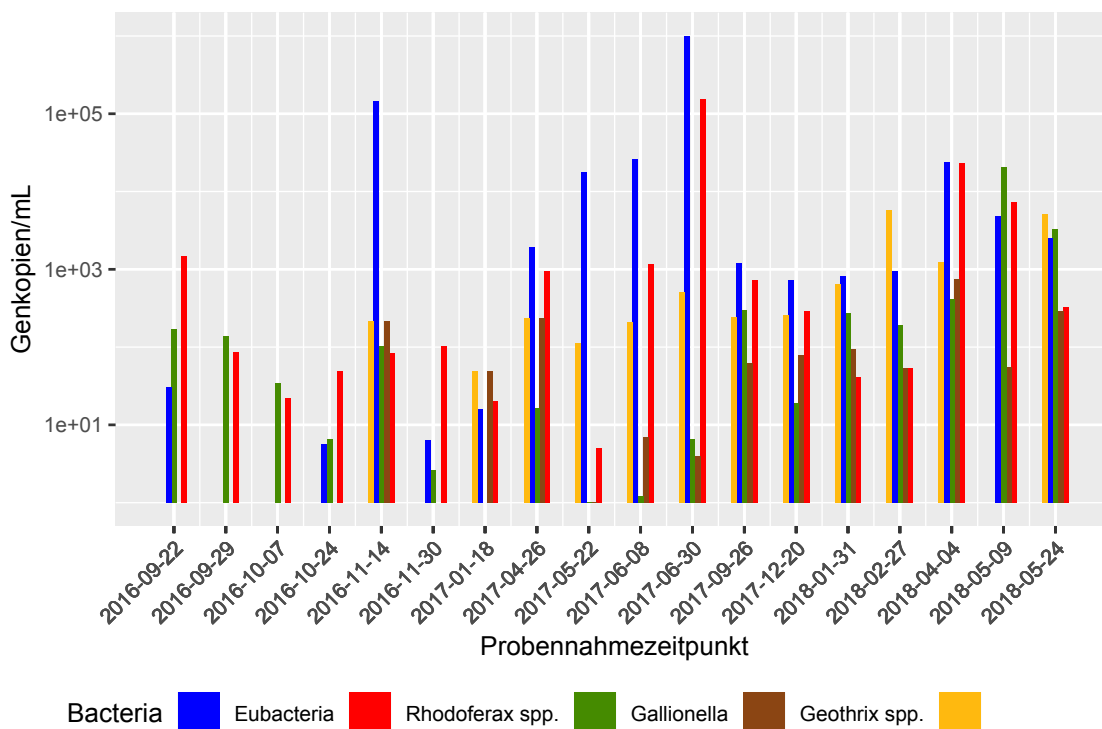


Abbildung 8: Häufigkeit der untersuchten Bakteriengruppen im Vorlauf der Integralsonde am Standort Strausberg.

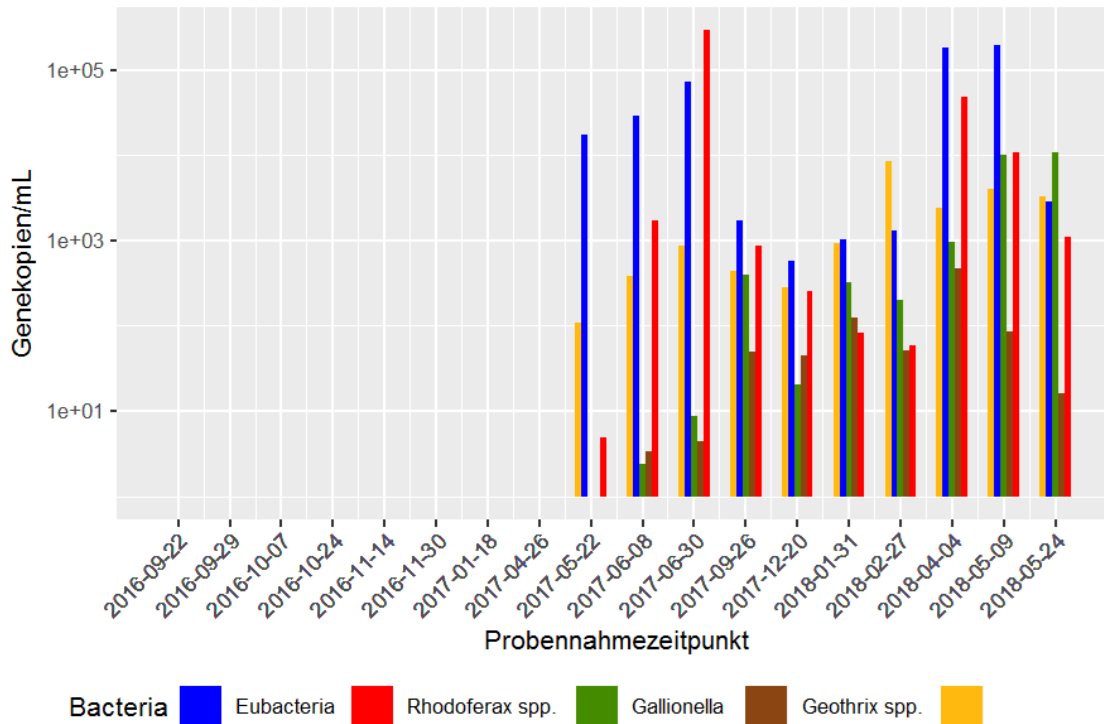


Abbildung 9: Häufigkeit der untersuchten Bakteriengruppen im Rücklauf der Integralsonde am Standort Strausberg.

Zusammenfassend konnten mit Hilfe der qPCR keine Unterschiede der detektierten rRNA Genkopien der untersuchten Bakteriengruppen zwischen Vor- und Rücklauf an diesem Standort detektiert werden.

### 1.2.5 Analysen und Ergebnisse zum Standort Berlin Südwest

Kurz nach Projektstart und noch vor der Inbetriebnahme dieser geothermischen Anlage wurden zum einen ein Auffüllversuch zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit des Untergrundes im Bereich der Filterstrecken durchgeführt, zum anderen Wasserproben für mikrobielle und chemische Analysen entnommen. Die Ergebnisse bestätigten noch einmal, dass sich der Untergrund am Standort für den Betrieb eines offenen Geothermiesystems gut eignet, da die hydraulische Durchlässigkeit groß genug ist, um 8m<sup>3</sup>/h Wasser wieder einzuleiten, und da leicht reduzierende Verhältnisse mit recht geringen Gehalten an Eisen und Mangan im Grundwasser vorliegen. Diese Ergebnisse wurden mit denen der zu Projektstart in 7 m vom Brunnen entfernt errichteten Grundwassermessstelle verglichen und bestätigt.

Im März 2016 ging die Integralsonde am Standort Berlin-Südwest in Betrieb. Zuvor wurden sowohl die Grundwassermessstelle als auch die Integralsonde beprobt, um eine eventuelle Veränderung des Grundwassers zu dokumentieren. Im Anschluss wurde ein 5-tägiger Pumpversuch mit dem Einsatz des Tracers Uranin durchgeführt. Im Rahmen

dieses Pumpversuchs konnte eine Undichtigkeit am Stopfen zwischen Vor- und Rücklauf festgestellt werden. Dieser hatte einen kurzzeitigen Sauerstoffeintrag ins System, welcher zu  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -Ausfällungen an den Filterstrecken führte, zur Folge. Durch eine unmittelbar durchgeführte Kamerabefahrung ließ sich diese Vermutung bestätigen.

Eine ausführliche Analyse der Auswirkungen eines solchen Sauerstoffeintrages auf das System findet sich im folgenden Kapitel 1.2.5.2.. In der Folge wurde die Undichtigkeit behoben und der Brunnen ging in den geregelten Betrieb. Vor jeder im Folgezeitraum bis Juli 2018 durchgeführten Probennahme an diesem Standort wurden zunächst die physikochemischen Parameter pH, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt und Redoxpotential ermittelt. Die Beprobung erfolgte jeweils bei Konstanz dieser Parameter.

An diesem Standort Berlin-Südwest (Abb. 10 und 11), der seit Inbetriebnahme im März 2016 beprobt wurde, zeigte sich nach dem 5-tägigem Pumpversuch in den folgenden drei Monaten eine Absenkung des Redoxpotentials im Vorlauf von 139 mV  $E_H$  auf -38 mV  $E_H$ . Während des 10-tägigen Pumpversuchs im August 2018 stieg das Redoxpotential leicht auf 60 mV, was durch eine Mischung aus Wässern aus verschiedenen Redoxzonen zu erklären ist. Ab Januar 2017 sank das Redoxpotential weiter bis auf -67 mV  $E_H$  im April 2017. Von da an stieg es wieder an bis auf 99 mV im Dezember 2017. Seitdem sank es wieder leicht und schwankt nun zwischen 36 und -52 mV, was sich eindeutig der eisenreduzierenden Zone zuordnen lässt.

Der Sauerstoffgehalt steigt in der gesamten Versuchszeit nie über 0,7 mg/L und blieb meist unter 0,05 mg/L, was der Nachweisgrenze des Messgeräts entspricht. Die elektrische Leitfähigkeit stieg während des gesamten Untersuchungszeitraumes an, von 954  $\mu\text{S}/\text{cm}$  zu Beginn auf 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  im Juni 2018. Dieser Anstieg lässt sich nicht durch die von uns durchgeführte Analytik klären, insbesondere, da die Ionengehalte während der Probennahme nicht gravierend angestiegen sind. Der pH-Wert blieb sehr konstant bei 7,4 während des gesamten Untersuchungszeitraumes.



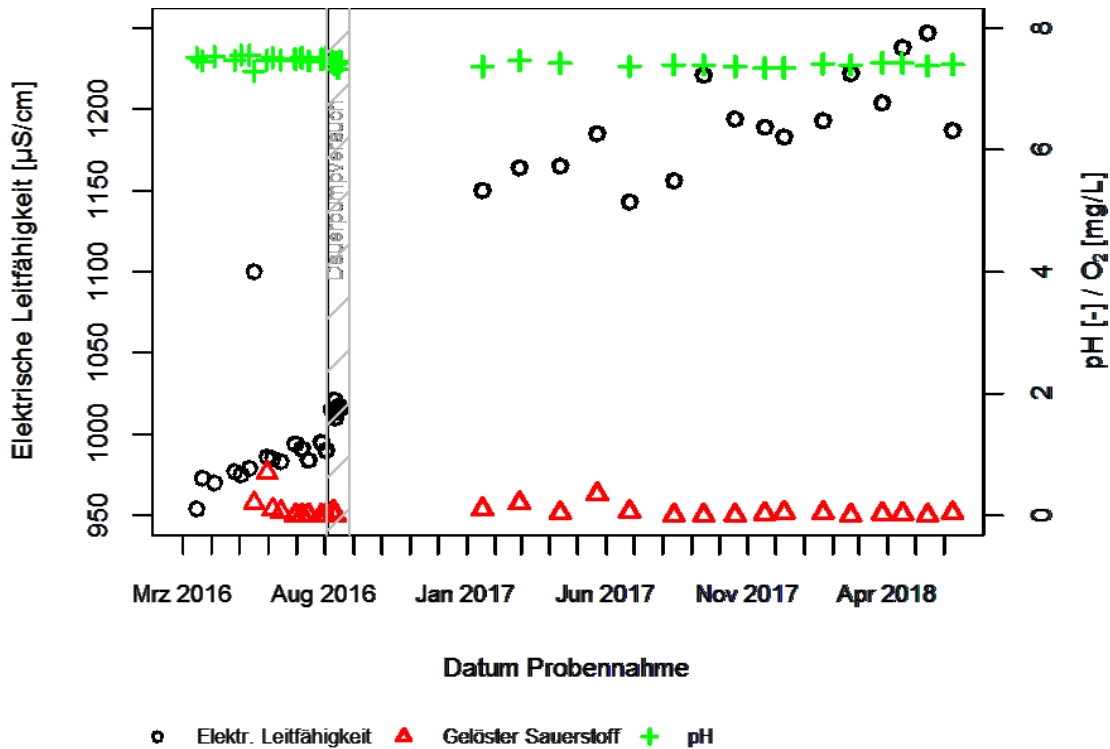


Abbildung 10: Physikochemische Parameter pH, elektr. Leitfähigkeit und gelöster Sauerstoff im Vorlauf der Integralsonde am Standort Berlin-Südwest.

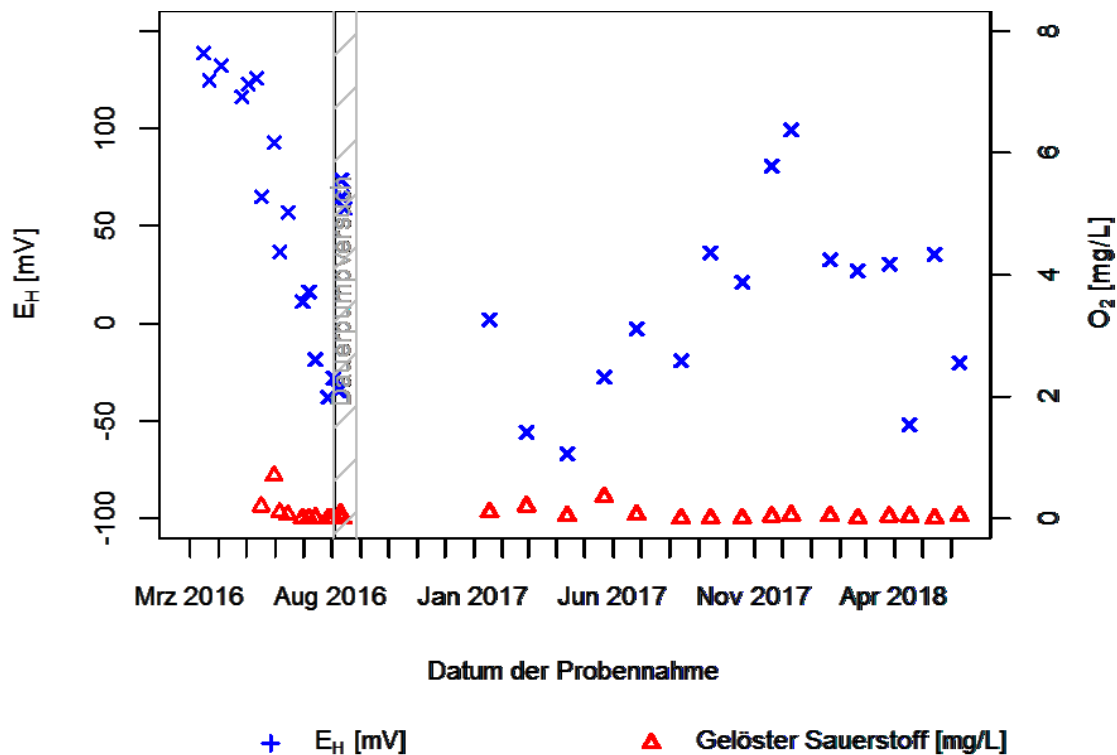


Abbildung 11: Physikochemische Parameter Redoxpotential EH und gelöster Sauerstoff am Standort Berlin-Südwest.

Zum Vergleich:

Am Standort Berlin-Mitte (Abb. 12 und 13) schwankte das Redoxpotential im Rücklauf über den kompletten Untersuchungszeitraum nur leicht zwischen 179 und 113 mV E<sub>H</sub>. Der Sauerstoffgehalt variierte zwischen 0,0 und 0,3 mg/L. Die elektrische Leitfähigkeit schwankte kaum mit Werten zwischen 1985 und 2100 µS/cm. Diese hohen Gehalte spiegeln die hohen Gehalte an Sulfat und Hydrogencarbonat im Urstromtal wider. Der pH-Wert schwankte zwischen 5,70 und 6,95. Aufgrund der gemessenen Redoxpotentiale und Sauerstoffgehalte kann auch das hier beprobte Wasser der eisenreduzierenden Zone zugeordnet werden.

Am Standort Strausberg (Abb. 14, 15, 16 und 17) war es möglich, sowohl den Vor- als auch den Rücklauf zu beproben. Dabei zeigten sich in den gemessenen Werten kaum Unterschiede. Der pH-Wert schwankte im Vorlauf zwischen 7,10 und 7,78 und im Rücklauf zwischen 7,10 und 7,52. Der Sauerstoffgehalt variierte zwischen 0,0 und 0,45 mg/L im Vorlauf 0,0 und 0,34 mg/L im Rücklauf. Das Redoxpotential schwankte im Vorlauf zwischen -28 und 112 mV E<sub>H</sub> und -6 und 110 mV E<sub>H</sub> im Rücklauf. Die elektrische Leitfähigkeit schwankte zwischen 399 und 489 µS/cm im Vorlauf 435 und 467 µS/cm im Rücklauf. Auch das hier geförderte Wasser kann daher der eisenreduzierenden Zone zugeordnet werden.

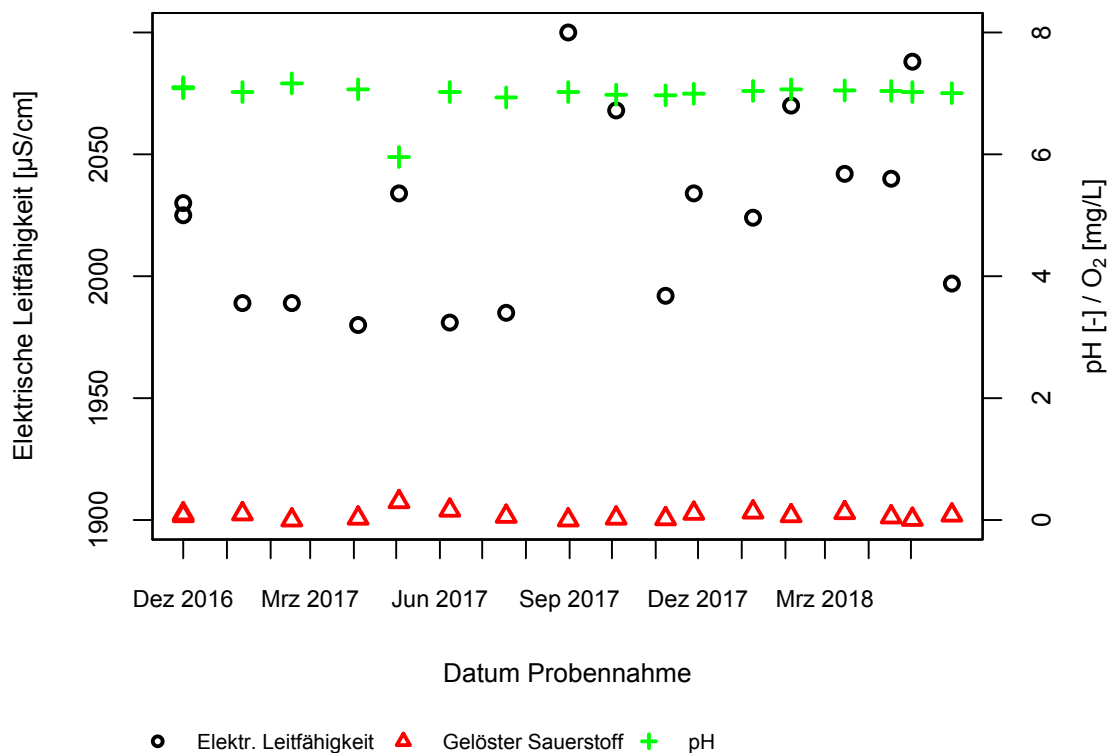


Abbildung 12: Physikochemische Parameter pH, Sauerstoffgehalt und elektrische Leitfähigkeit am Standort Berlin-Mitte.

Erstellt am: 27.02.2019

Projekt: Hocheffiziente Nutzung Geothermischer Energie - Integralsonde II

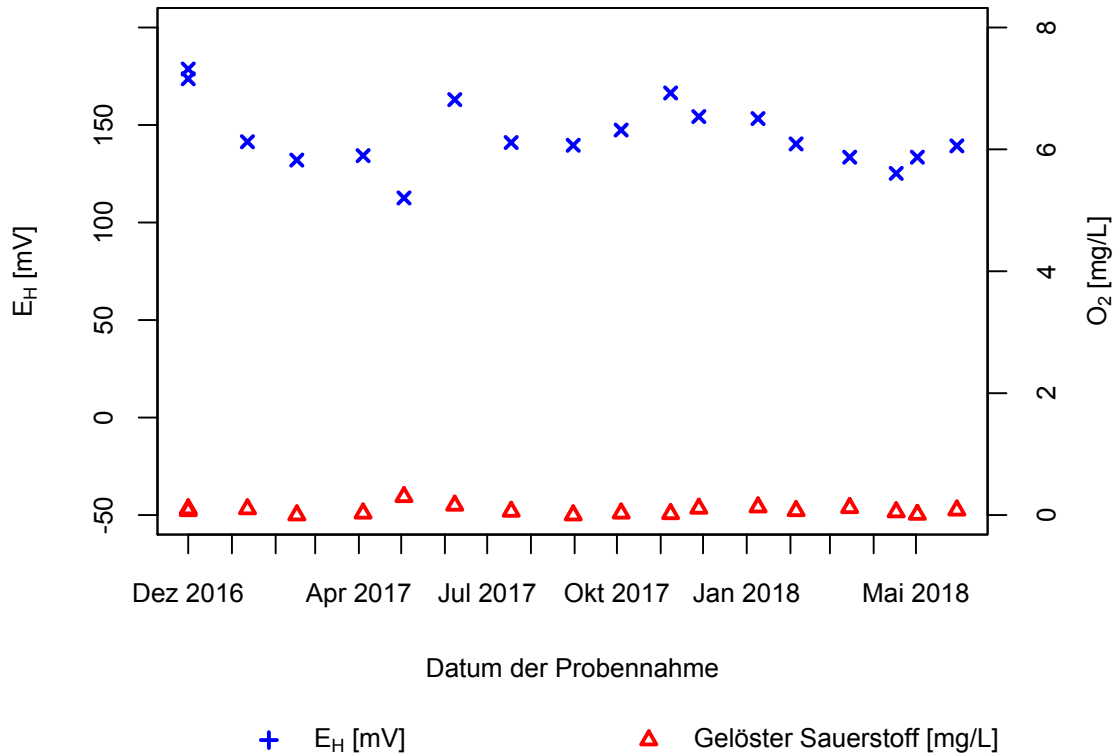


Abbildung 13: Physikochemische Parameter Redoxpotential EH und Sauerstoffgehalt am Standort Berlin-Mitte

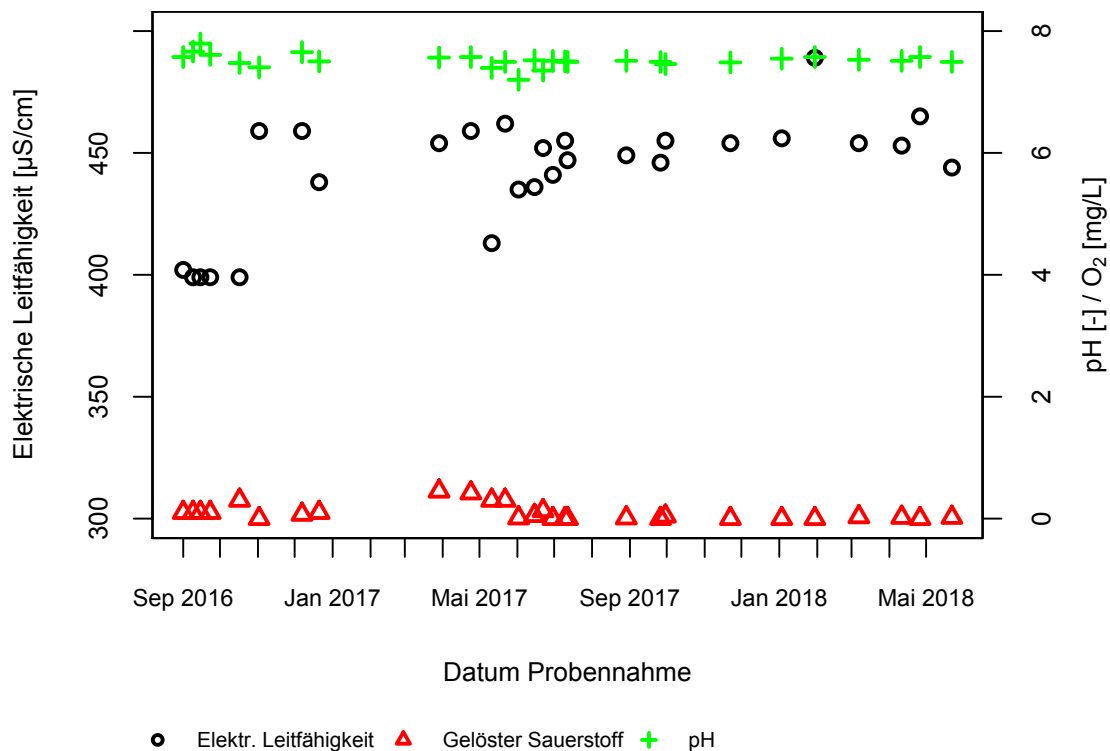


Abbildung 14: Physikochemische Parameter pH, Sauerstoffgehalt und elektrische Leitfähigkeit im Vorlauf der Integralsonde am Standort Strausberg.

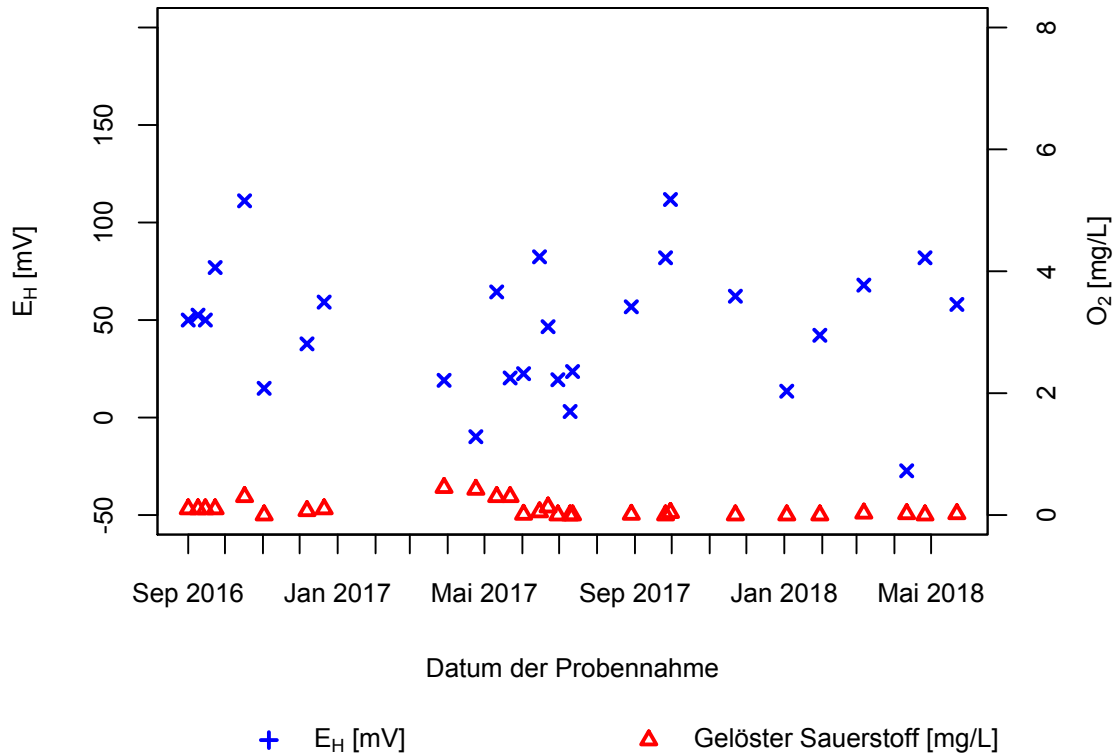


Abbildung 15: Physikochemische Parameter Redoxpotential  $E_H$  und gelöster Sauerstoff im Vorlauf der Integralsonde am Standort Strausberg.

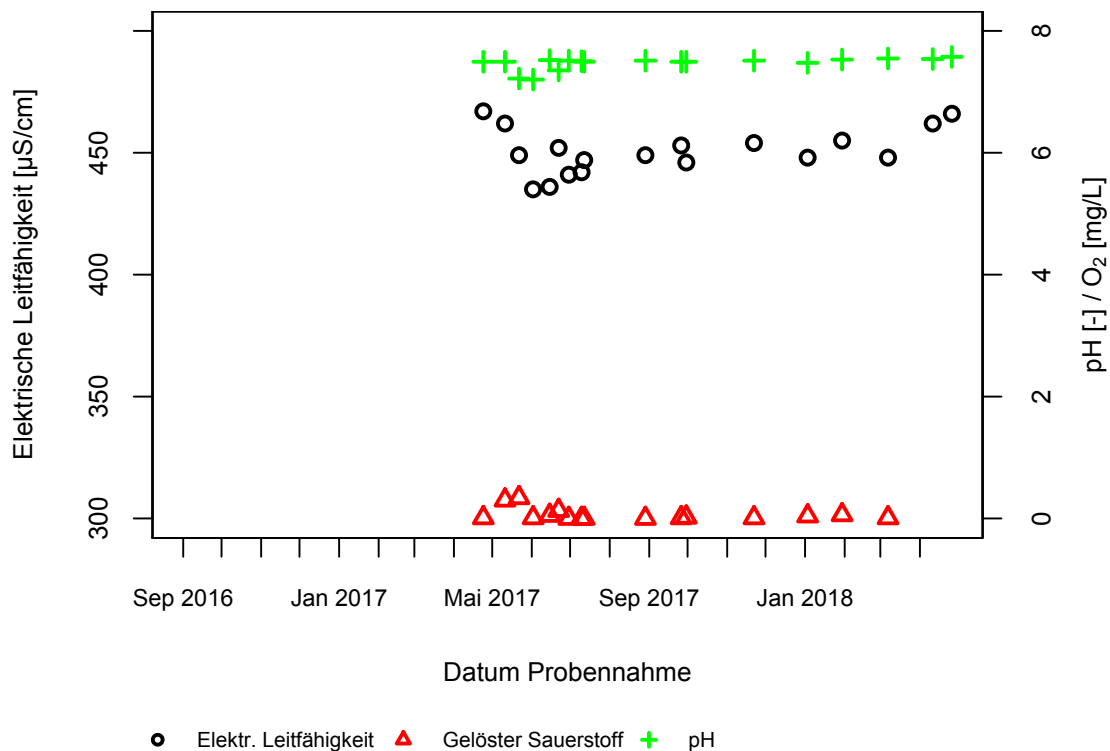


Abbildung 16: Physikochemische Parameter pH, elektrische Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt im Rücklauf der Integralsonde am Standort Strausberg.

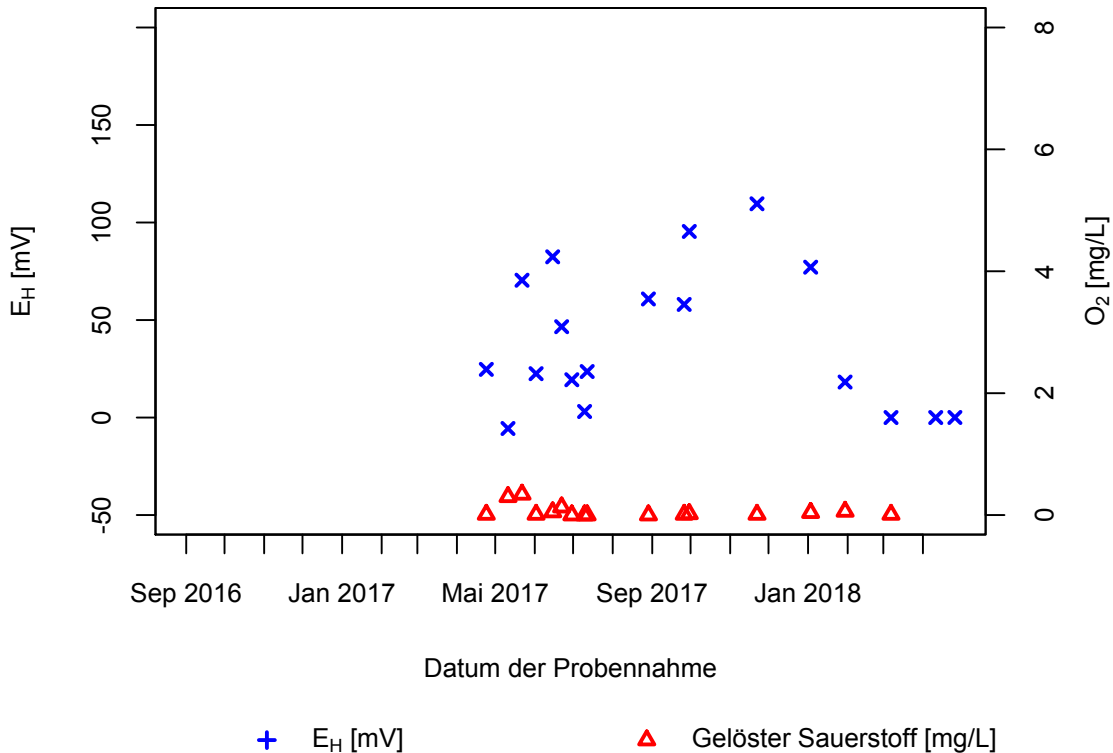


Abbildung 17: Physikochemische Parameter Redoxpotential E<sub>H</sub> und Sauerstoffgehalt im Rücklauf der Integralsonde am Standort Strausberg.

### Hydrochemie am Standort Berlin-Südwest:

Bevor der Grundwasserzirkulationsbrunnen installiert wurde, wies das Grundwasser in 44 m bzw. 70 m Tiefe eine Eisengesamtkonzentration von 1,90 bzw. 0,23 mg/L auf. Nach der Installation, aber noch vor der Inbetriebnahme des Brunnens, betrug die Eisengesamtkonzentration 3,90 mg/L. Im März 2016 ging die Integralsonde am Standort Bernadottestraße in Betrieb. Zuvor wurde sowohl die Grundwassermessstelle als auch die Integralsonde beprobt, um eine eventuelle Veränderung des Grundwassers zu dokumentieren. Im Anschluss wurde ein 5-tägiger Pumpversuch durchgeführt. Durch eine Undichtigkeit am Stopfen wurde Sauerstoff in die Anlage gesaugt, welcher rotbraune Ausfällungen an den Filtertrecken verursachte. Dabei handelte es sich höchstwahrscheinlich um Fe(OH)<sub>3</sub>-Ausfällungen. Der Zirkulationsbrunnen wurde am 18.03.2016 repariert, und von da gelangte kein weiterer Sauerstoff in die Anlage. Durch das niedrige Redoxpotential von 50 mV E<sub>H</sub> lösten sich die Fe(OH)<sub>3</sub>-Ausfällungen wieder auf. Diese wurden wahrscheinlich zu Fe<sup>2+</sup> gelöst und das Wasser wurde wieder klar. In den folgenden Abbildungen 18 und 19 sind Ergebnisse aus den Beprobungen der Integralsonde resp. der Grundwassermessstelle dargestellt.

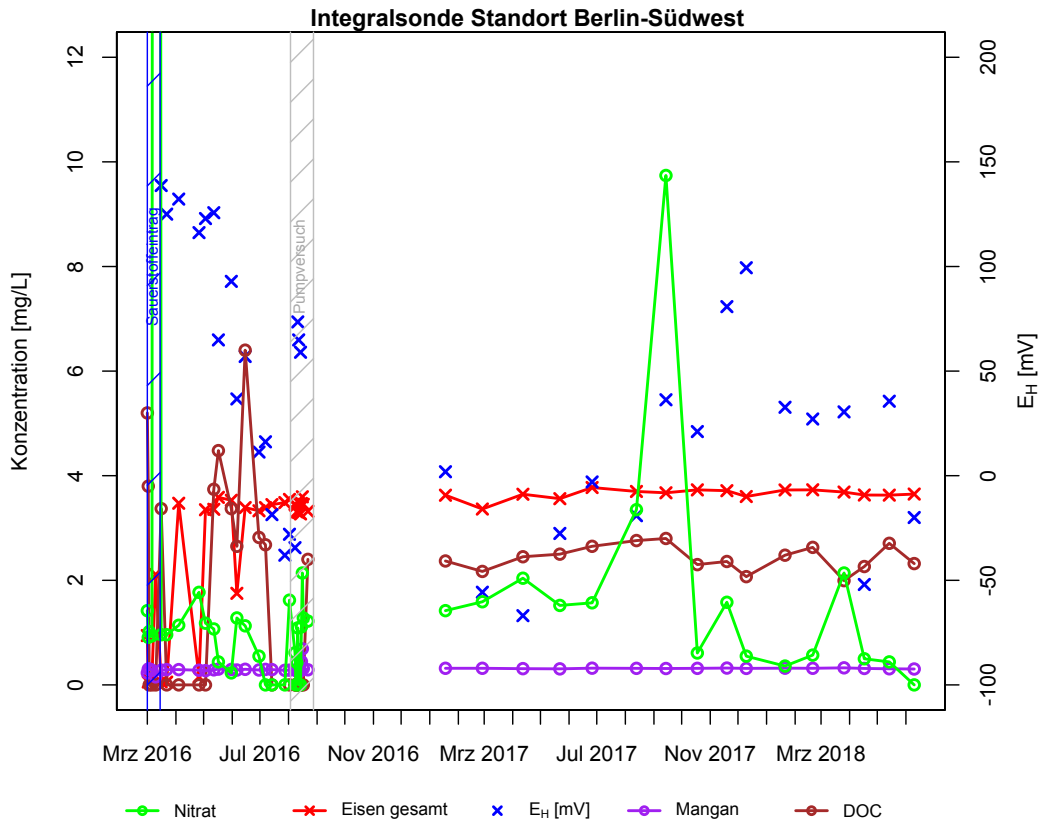


Abbildung 18: Ergebnisse der Beprobungen der Integralsonde am Standort Bernadottestraße (Berlin-Südwest).

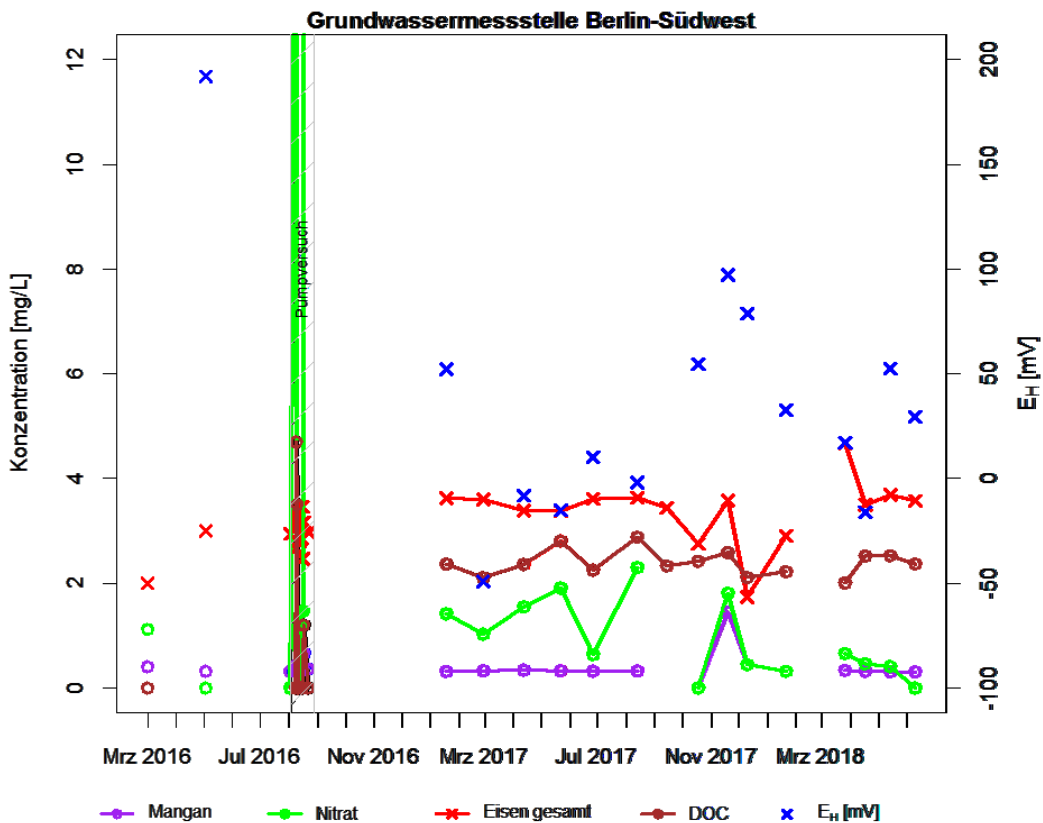
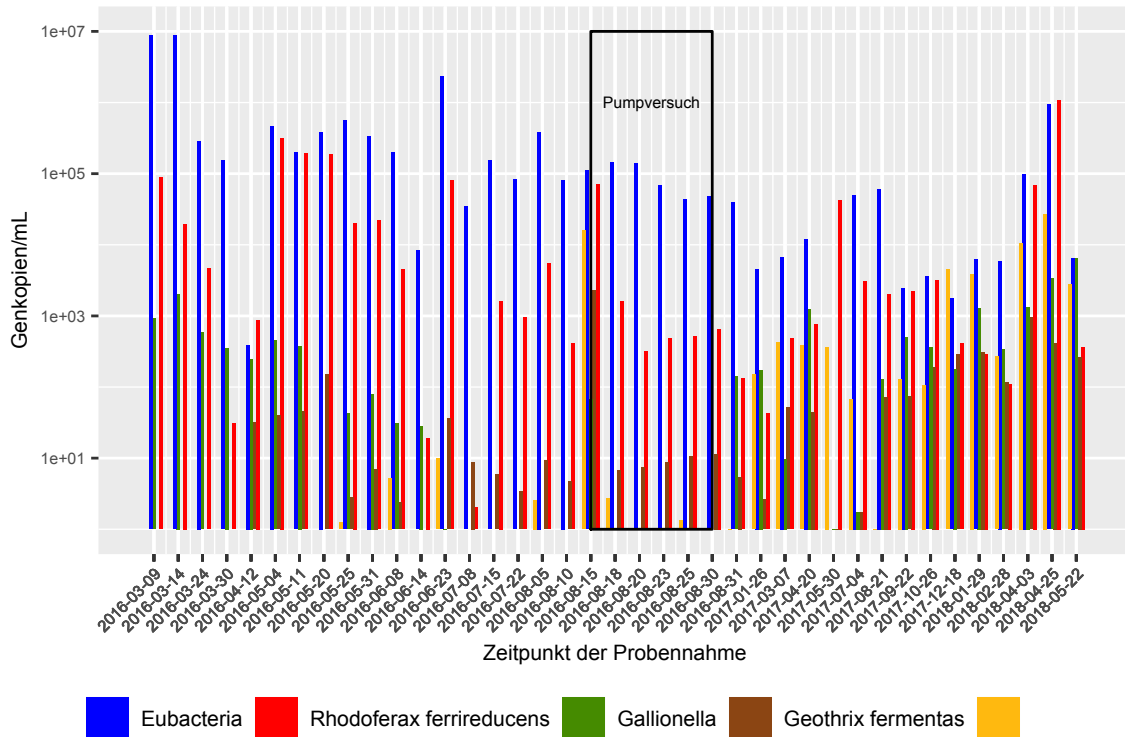


Abbildung 19: Ergebnisse der Beprobungen der Grundwassermessstelle am Standort Bernadottestraße (Berlin-Südwest).

Nach zwei Jahren Betriebsdauer liegt die  $\text{Fe}^{2+}$ -Konzentration bei 3,7 mg/L (Abb. 18). Im Zuge der Reparatur musste der Stopfen angehoben werden, was zur Mischung von Wässern aus verschiedenen Redoxzonen führte. Zu dieser Zeit wurde ein Nitratpeak von 142 mg/L gemessen. Die Mangankonzentration sank nach dem Sauerstoffeintrag leicht, da vermutlich Mangandioxid ausgefallen ist. Nach der Reparatur lösten sich auch diese Ausfällungen wieder und Mangankonzentration stabilisierte sich bei 0,28 mg/L. Während des zehntägigen Pumpversuchs im August 2016 erhöhte sich die Mangankonzentration leicht auf 0,6 mg/L, während alle untersuchten Ionenkonzentrationen stabil blieben. Die physikochemischen Parameter pH und gelöster Sauerstoff blieben stabil bei pH 7,4 und 0,09 mg/L Sauerstoff, wobei sich die spezifische elektrische Leitfähigkeit kontinuierlich von 954  $\mu\text{S}/\text{cm}$  zu Beginn des Betriebs auf 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  während des unregelmäßigen Betriebs im Mai 2018 erhöhte. Der Betrieb des Brunnens richtet sich nach Heiz- und Kühlanforderungen im Gebäude und wird automatisch über die Wärmepumpe gesteuert. Dies führt zu unregelmäßigen Pumpzyklen. Die Grundwassertemperaturen schwanken infolge des Anlagenbetriebs saisonal zwischen 9 und 12 °C. Die Konzentrationen von Gesamteisen, Mangan und Nitrat in der nahegelegenen Grundwassermessstelle ähneln sehr stark denen im Vorlauf der Integralsonde (Abb. 19). Generell stellt der Bohrvorgang eine Störung der natürlichen Redoxzonierung des Grundwassers dar. Nach einer Anpassungsphase von drei Monaten stabilisierten sich die redoxsensitiven Ionenkonzentrationen wieder.

#### Mikrobiologie:

Die Quantifizierungsberichte der qPCR Durchläufe zeigten immer eine bestimmte Reaktionseffizienz zwischen 75% und 99%, sowie ein  $R^2$  von mindestens 0,99. Die Schmelzkurvenanalyse am Ende jedes Durchlaufs zeigte überlappende Peaks bei gleichbleibender Temperatur in Abhängigkeit der DNA Fragmentlänge sowie einen kleineren Peak der Negativkontrolle aufgrund der verbliebenen Primer in der Reaktion. Die Häufigkeit der bakteriellen 16S rRNA Gene der Eisen oxidierenden, Eisen reduzierenden und Sulfat reduzierenden Mikroorganismen wurde in Wasserproben aus den Grundwasserzirkulationsbrunnen mithilfe von spezifischer qPCR untersucht. Real-time qPCR zeigte Unterschiede in der Anzahl der rRNA Genkopien der untersuchten Bakteriengruppen im ersten Betriebsjahr (Abb. 20).



**Abbildung 20: Häufigkeit der Bakterien im Grundwasserzirkulationsbrunnen Berlin-Südwest, ermittelt via qPCR.**

Nach zwei Betriebsjahren stellte sich jedoch heraus, dass die untersuchten Bakteriengruppen im Vergleich mit den Genzahlen der Eubakterien sehr häufig vorkamen. Vor der Inbetriebnahme des Brunnens wurden im Schnitt  $5 \cdot 10^5$  16S rRNA Genkopien/mL Eubakterien gemessen. Bis zum ununterbrochenen Betrieb im August 2016 verringerte sich die Anzahl auf  $7 \cdot 10^4$  16S rRNA Genkopien/mL. Im Vergleich mit den Messungen zu Beginn der Studien verringerten sich die Eubakterien-Genkopienzahlen um zwei Größenordnungen zum Ende der Studie. Die Genkopien des Eisenreduzierers *Rhodoferrax* sp. wurden von Anfang an in allen Proben der Studien detektiert. Die Genkopienzahlen für diese Gattung schwankten in den ersten drei Monaten der Studien zwischen  $10^3$  und  $10^4$  16S rRNA Genkopien/mL und verringerten sich um eine Größenordnung auf  $10^2$  bis  $10^3$  16S rRNA Genkopien/mL am Ende der Probenahme. Aerobe Eisenoxidierer (*Gallionella* sp.) traten nach der Installation des Brunnens auf. Die Anzahl der detektierten Genkopien verringerte sich in den ersten drei Betriebsmonaten bis diese nicht mehr detektierbar waren. Nach dem kontinuierlichen Betrieb im August 2016 traten *Gallionella* sp. in hohen Genkopienzahlen im Vergleich zu Eubakterienzahlen auf. *Geothrix* sp. konnte vor dem Pumpversuch im März 2016 nicht detektiert werden, trat danach aber in nahezu allen Wasserproben in unterschiedlichen Konzentrationen auf. Im ersten Betriebsjahr konnten Sulfat reduzierende Bakterien nur sporadisch gemessen werden, ab 2018 traten sie jedoch in allen gemessenen Wasserproben auf.



Die Anzahl der Eubakterien Genkopien erhöhte sich während des zehntägigen Pumpversuchs vom 16. bis zum 25.08.2016 in der Grundwassermessstelle, wobei die Genkopienzahlen des Eisenreduzierers *Rhodospirillum rubrum* leicht zurückgingen. Zusätzlich wurden Sulfat-reduzierende Bakterien detektiert. Nach dem Pumpversuch sanken die Genkopienzahlen von *Gallionella* und *Geothrix* bis Juli 2017 und stiegen in der Folge wieder leicht an. Die Anzahl aller untersuchten Gene sank während der Wintermonate leicht ab (November 2017 bis Januar 2018) und stieg daraufhin wieder an.

### 1.2.5.1 Analyse von Ablagerungen an Brunnenbauten

Aufgrund der Schwierigkeit, ein laufendes System zur Probennahme für Ablagerungen zu öffnen, wurden mehrmals in der Grundwassermessstelle Berlin-Südwest Glasobjektträger eingebracht, um mögliches Biofilmwachstum zu beobachten. Im März/April 2016 wurden die Objektträger sechs Wochen in der Grundwassermessstelle exponiert, wobei sich ein Biofilm von 1 bis 2 mm Dicke bildete (Abb. 21). Mikroskopisch konnten einige Eisenpartikel und *Gallionella*-Scheiden detektiert werden, per qPCR und MiSeq-Analyse machten diese aber nur 1% der Mikroorganismen aus. Dieser Versuch wurde in 2017 wiederholt. Dabei zeigte sich ein geringeres Biofilmwachstum auf den Glasobjektträgern. Von Januar bis März 2018 wurden deshalb verschiedene Brunnenbauteile in der Grundwassermessstelle exponiert, um zu testen, an welchen Punkten im System die Biofilmbildung am wahrscheinlichsten ist. Als Materialien standen EPDM-Profildichtungsgummis, EPDM-Schlitzgummibänder zur Kabelbefestigung, Edelstahlwickelfilter, Abdichtungen der Drahtkörbe mit Glaskugelfüllung, PVC aus den PVC-Vollrohren, die Gummiummantelung des Pumpenkabels und PE-Rohr zur Verfügung, die gleichen Materialien, die auch für die Integralsonde am Standort Berlin Süd-West verbaut wurden. Nach 8 Wochen Expositionszeit zeigten sich lediglich auf der Gummiummantelung des Pumpenkabels leichte Ablagerungen, die jedoch zu gering waren, um via qPCR DNA isolieren zu können.

Zusammenfassend gehen wir deshalb davon aus, dass die Wahrscheinlichkeit der Biofilmbildung im System Integralsonde aufgrund der verbauten Materialien und generell als gering einzuschätzen ist. Im Betrieb herrschen, im Gegensatz zu den Versuchsbedingungen in einer Grundwassermessstelle, an den exponierten Materialoberflächen voraussichtlich so hohe Strömungsgeschwindigkeiten, dass die Ansiedlung von Biofilmen deutlich erschwert ist.

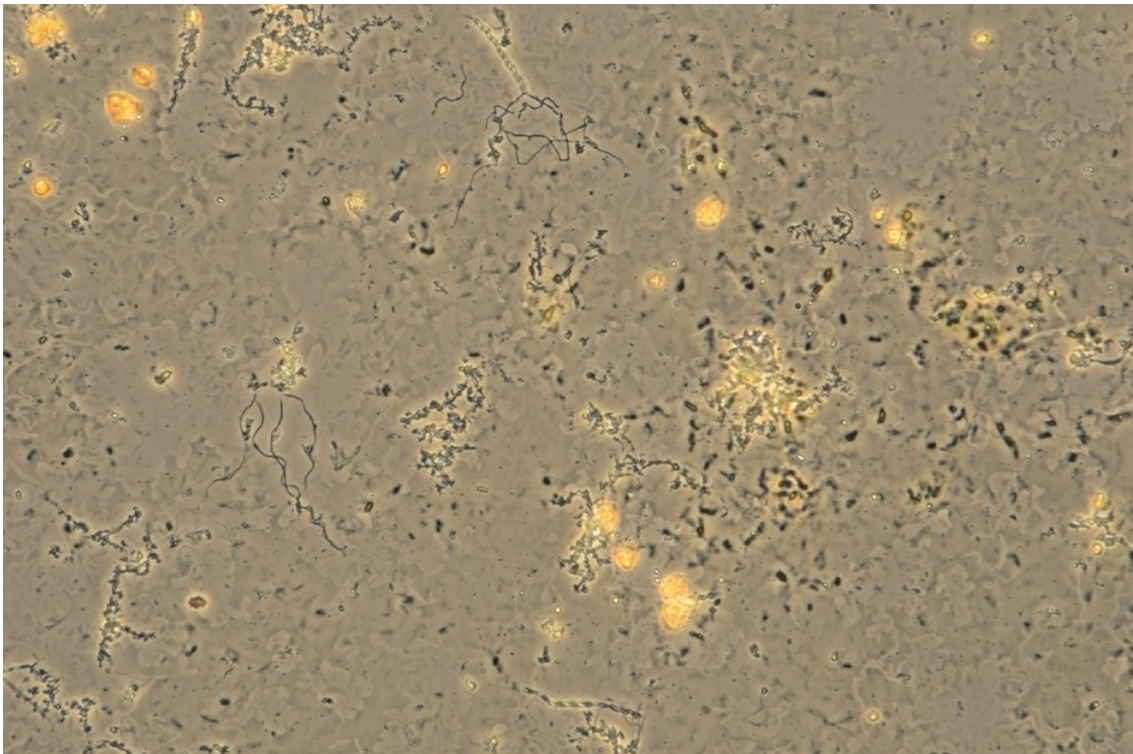


Abbildung 21: Mikroskopische Aufnahme (630-fache Vergrößerung) eines in der GWM exponierten Objektträgers.

### 1.2.5.2 Anlauf- und Inbetriebnahme-Effekte eines Brunnens

Einen gravierenden geochemischen Effekt auf das Grundwasser kann der Eintrag von Sauerstoff durch Unterdruck oder Undichtigkeiten im System auslösen. Als am Standort Berlin-Südwest während des 5-tägigen Pumpversuchs Sauerstoff ins System gelangte, zeigten sich bereits innerhalb kurzer Zeit massive  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -Ausfällungen. Diese waren auch in einer Kamerabefahrung gut sichtbar (Abb. 22).

Nach der Reparatur gelangte kein Sauerstoff mehr in das System, und die Ablagerungen lösten sich wieder auf. Ein weiterer Einfluss des Systems auf die Hydrochemie kann die Ausgasung von  $\text{CO}_2$  sein, wodurch sich das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht verschiebt und damit Karbonate ausfallen können. Die Analyse der laufenden Systeme hat gezeigt, dass sich nach mehreren Betriebsjahren kaum noch hydrochemische Veränderungen infolge von Anlagenbetrieb feststellen lassen. Der Vergleich von Proben, die aus dem Vor- und Rücklauf entnommen wurden, zeigt, dass das System selbst einen kaum messbaren Einfluss auf die Wasserqualität hat. Die größten Veränderungen zeigten sich lediglich nach dem Anlauf eines neu installierten Systems und durch Wechsel der Betriebsweise. Für die Anlaufphase des Brunnens am Standort Berlin-Südwest wurde eine hydrochemische Modellierung der Sättigungsindices (S.I.) verschiedener Mineralphasen durchgeführt.



Abbildung 22: Fe(OH)<sub>3</sub>-Ausfällungen nach Sauerstoffeintrag in der Integralsonde Berlin-Südwest vor der Reparatur.

In der folgenden Tabelle IV sind die betrachteten hydrochemisch relevanten Phasen, ihre Summenformeln und die in der Datenbank PHREEQC.DAT verwendeten logarithmierten Löslichkeitsprodukte  $\log_{(K_{LP})}$  dargestellt. Bei der Auswertung werden Eisen-, Mangan-, Schwefel- oder Calcium-haltige Minerale betrachtet. Das Lösungsverhalten dieser Minerale ist vom Redoxpotential abhängig, sodass eine Veränderung des Redoxmilieus oder ein Vermischen von oxidierendem und reduzierendem Grundwasser eine Ausfällung oder Lösung dieser Minerale zur Folge haben kann. Die Sättigungsindizes dieser Phasen im Zeitraum vom 24.03.2016 bis zum 05.08.2016 wurden mithilfe der Software PHREEQCI berechnet und anschließend in Abbildung 24 dargestellt.

Tabelle 4: Summenformeln und Löslichkeitsprodukte betrachteter Phasen

Phase	Summenformel	$\log(K_{LP})$
Calcit	CaCO <sub>3</sub>	-8,48
Aragonit	CaCO <sub>3</sub>	-8,37
Dolomit	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-17,9
Eisenhydroxid	Fe(OH) <sub>3</sub>	4,89
Siderit	FeCO <sub>3</sub>	-10,89
Hämatit	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-4,01

Goethit	FeOOH	-1
Manganit	MnOOH	25,34
Hausmannit	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	61,3
Gips	CaSO <sub>4</sub> :2H <sub>2</sub> O	-4,58
Anhydrit	CaSO <sub>4</sub>	-4,36

Der S.I. von Calcit schwankt zwischen 0,3 und 0,6, der von Aragonit zwischen 0,1 und 0,4. Damit sind beide Minerale leicht übersättigt. Dolomit weist mit einem S.I. zwischen -0,4 und 0,2 die größten Schwankungen der Calcit-haltigen Phasen auf. Dolomit ist abwechselnd über- und untersättigt und befindet sich damit im dynamischen Gleichgewicht. Insgesamt sind die Schwankungen der calciumhaltigen Minerale jedoch unregelmäßig, und daher ist kein Trend erkennbar. Die Fe(III)-haltigen Minerale Eisenhydroxid, Hämatit und Goethit sind deutlich übersättigt. Der S.I. von Eisenhydroxid liegt zwischen 2 und 3, der von Goethit zwischen 7 und 10. Der S.I. von Hämatit schwankt zwischen 17 und 20. Siderit befindet sich, ähnlich wie Dolomit, im dynamischen Gleichgewicht; der S.I. schwankt zwischen 1 und -1. Die Schwankungen der S.I.s der eisenhaltigen Minerale sind eher gering. Es ist keine Zu- oder Abnahme im Verlauf der Zeit erkennbar. Die Mangan-haltigen Phasen Manganit und Hausmannit sind deutlich untersättigt. Der S.I. von Manganit schwankt zwischen -6 und -10, der von Hausmannit zwischen -17 und -24. Im Verlauf der Zeit ist ein abwärts verlaufender Trend der S.I.s beider Phasen zu erkennen. In der Probe vom 25.05.2016 weisen die S.I.s der calcium- und Mangan-haltigen Minerale eine deutliche Abweichung nach unten auf. Auch die Schwefel-haltigen Phasen Gips und Anhydrit sind untersättigt. Der S.I. von Gips beträgt -0,9 bis -1. Anhydrit ist mit einem S.I. von -1,35 bis -1,45 stärker untersättigt als Gips. Am 25.05.2016 und 08.06.2016 sind beide Mineralphasen stärker übersättigt als in den restlichen Proben. Insgesamt ist auffällig, dass die S.I.s der Calcium-, Fe(III)-, Mangan-, und Schwefel-haltigen Minerale jeweils sehr ähnlich verlaufen. Die einzelnen Phasen sind dabei um einen gewissen Abstand zueinander versetzt, sodass die Linien der dargestellten S.I.s näherungsweise parallel verlaufen.

Da die Löslichkeit der meisten Elemente vom pH-Wert abhängig ist, verlaufen die Sättigungsindizes der eisen-, calcium- und manganhaltigen Minerale proportional zum pH-Wert (Abbildung 24). Die calciumhaltigen Mineralphasen Calcit, Aragonit und Dolomit sind leicht übersättigt. Dies liegt zum einen an den hohen Konzentrationen an Calcium und Hydrogencarbonat, die über das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht mit der Calcit-Konzentration im Gleichgewicht stehen. Ein anderer Grund dafür könnten turbulente Strömungsverhältnisse und die damit verbundene Entgasung von CO<sub>2</sub> im Brunnen sein (Houben, 2006). Durch das häufige Ein- und Ausschalten der Grundwasserpumpe könnte dieser Effekt zusätzlich verstärkt werden. Calcit und Aragonit haben aufgrund ihrer



unterschiedlichen Kristallstruktur unterschiedliche Löslichkeitsprodukte. Aragonit hat mit  $\log(K_{LP}) = -8,37$  eine höhere Löslichkeit als Calcit mit  $\log(K_{LP}) = -8,48$  und ist daher auch weniger stark übersättigt (Tabelle 4). Dolomit enthält neben Calcium auch Magnesium, dessen Konzentration im Gegensatz zu Calcium nur leicht überhöht ist. Daher ist Dolomit nicht übersättigt, was durch Sättigungsindizes zwischen  $-0,4$  und  $0,2$  widergespiegelt wird.

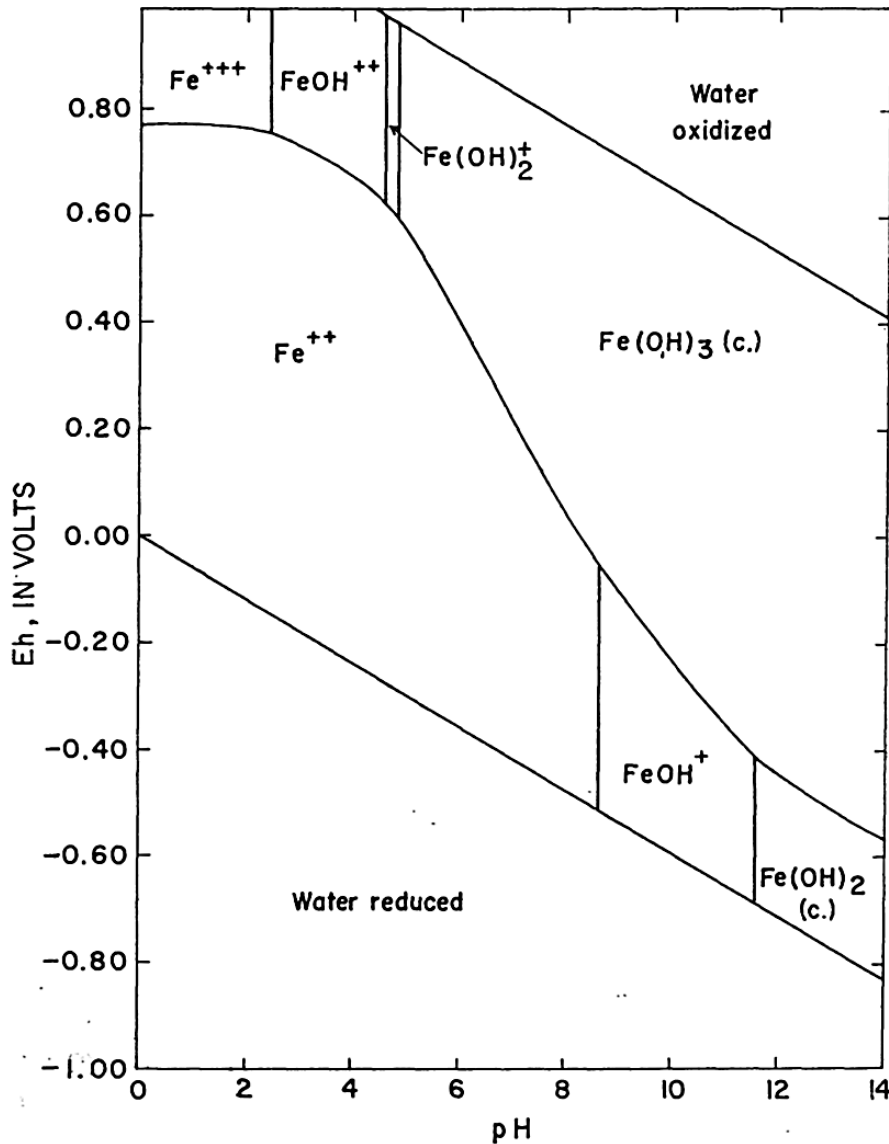


Abbildung 23: Stabilitätsfelddiagramm für Fe(II)- und Fe(III)-haltige Phasen in wässriger Lösung (Hem and Cropper, 1959)

Das in Abbildung 23 dargestellte Phasendiagramm nach Hem and Cropper (1959) zeigt, dass Fe(III)-haltige Minerale unter den gegebenen pH-EH-Bedingungen ( $pH = 7,4$  bis  $7,5$ ;  $E_H = -0,05$  bis  $0,15$  V) nicht stabil und daher stark übersättigt sind. Die gemessene Fe(III)-Konzentration im Vorlauf spiegelt wahrscheinlich, ähnlich der Nitratkonzentration, nicht die natürliche Beschaffenheit des Grundwassers wider, sondern entsteht durch Oxidation von Fe(II) im Brunnen und während der Probenahme. Hämatit ist das Eisenoxid mit der geringsten Löslichkeit und daher auch am stärksten übersättigt. Das amorphe

Eisenhydroxid ist im Vergleich dazu leichter löslich und daher weniger stark übersättigt (Houben, 2003).

Nach Houben (2003) sind in Brunnen, in denen sich Eisenoxid-Ablagerungen bilden, in der Regel keine Ausfällungen von Manganoxiden zu erwarten. Grund dafür sind die verschiedenen Redoxpotentiale, die zur Bildung der Ausfällungen benötigt werden. Für Eisenoxid-Ausfällungen betragen diese etwa 0 bis 500 mV, für die Bildung von Manganoxiden 600 bis 1200 mV. Die hier gemessenen Redoxpotentiale betragen -40 bis 140 mV. Die starke Untersättigung des Grundwassers bezüglich manganhaltiger Phasen bestätigt damit die These von Houben (2003). Zudem weist das Grundwasser nur sehr geringe Mangan-Gehalte auf, sodass keine Übersättigung der Mangan-haltigen Phasen zustande kommt.

Die Konzentrationen an gelöstem Sulfat sind sehr hoch. Mit durchschnittlich 208 mg/l liegt diese jedoch deutlich unterhalb der Sättigungskonzentration von Gips, welche nach Wagner et al. (1988) 1440 mg/l beträgt. Am 25.05.2016 und 08.06.2016 verursachen erhöhte Sulfat-Konzentrationen einen Anstieg der S.I.s der Sulfat-haltigen Phasen. In der Grundwasserprobe vom 25.05.2016 sind eine deutliche Absenkung der S.I.s der calcium- und manganhaltigen Minerale und eine geringe Absenkung der eisenhaltigen Minerale zu beobachten. Diese korreliert mit dem vergleichsweise geringen pH-Wert von 7,2 an diesem Tag. Der pH-Wert beträgt in den anderen Proben 7,4 bis 7,5. Da der pH-Wert neben dem CO<sub>2</sub>-Partialdruck die wichtigste Einflussgröße auf das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht ist, wirkt sich eine Schwankung des pH-Werts direkt auf die Carbonat-Konzentration aus (Appelo and Postma, 2013). Metall-haltige Minerale, wie Eisen- und Manganoxide, sind bei geringen pH-Werten am besten löslich. Daher weisen die Sättigungsindizes der Eisen- und Mangan-haltigen Phasen bei einem Abfall des pH-Werts ebenfalls eine Absenkung auf.

Die Untersuchung der hydrochemischen Prozesse während der Anlaufphase der Integralsonde zeigt, dass trotz teils starker Übersättigung des Grundwassers nur in geringem Maße Mineralausfällungen zu erwarten sind. Vor allem bezüglich der Fe(III)-haltigen Mineralphasen weist das Wasser hohe S.I.s auf. Allerdings sind Fe(III)-Ionen in natürlichen Grundwässern dieser Redoxbedingungen nicht stabil. Ihr Vorkommen ist vermutlich durch die Zufuhr von Sauerstoff im Brunnen oder während der Probenahme bedingt. Im ungestörten Betriebsablauf besteht die einzige Möglichkeit der Sauerstoffzufuhr ins Grundwasser während der Inaktivität der Integralsonde. Nach Houben (2003) ist die Wassersäule im Brunnen in dieser Zeit atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt, wodurch eine Zufuhr von Sauerstoff und CO<sub>2</sub> ermöglicht wird. Es sind daher lediglich Ausfällungen im Brunnen zu erwarten, nicht aber im umgebenden Grundwasserleiter.

Unser Ergebnis ist mit den Erkenntnissen von Possemiers et al. (2016) vergleichbar. Diese fanden heraus, dass bei geothermischen Anlagen, deren Filterstrecken innerhalb derselben Redoxzone liegen, mit nur geringen Eisenhydroxid-Ausfällungen zu rechnen ist. Eine Vermischung von oxidierendem und reduzierendem Grundwasser findet nicht statt. Dennoch sind nach Houben (2006) Carbonat-Ausfällungen aufgrund turbulenter Strömungsverhältnisse im Brunnen zu erwarten. Da das Berliner Grundwasser besonders hohe Calcium- und Hydrogencarbonat-Konzentrationen aufweist, ist dieser Prozess von besonderer Bedeutung für den Betrieb der Integralsonde an diesem Standort. Die Entwicklung der physiko-chemischen Parameter deutet auf zunehmend reduzierende Verhältnisse im Grundwasser hin. Eine mögliche Ursache dafür ist das Heranpumpen von Grundwasser aus größeren Tiefen. Bisher wird diese Vermutung jedoch nicht von den gemessenen Ionenkonzentrationen widerspiegelt.

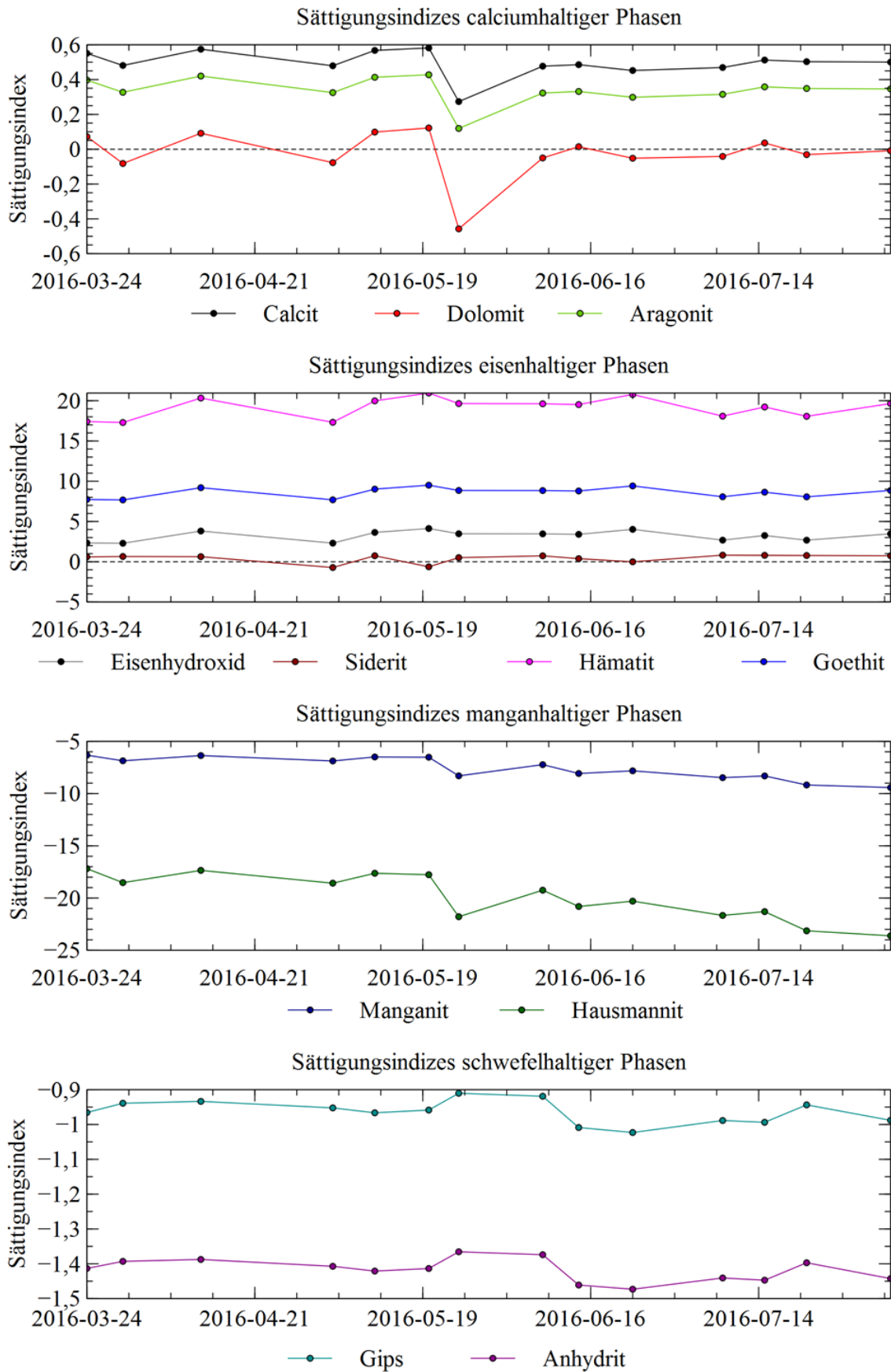


Abbildung 24: Sättigungsindizes hydrochemisch relevanter Phasen vom 24.03.2016 bis zum 05.08.2016 am Standort Berlin Südwest



## 1.2.6 Alterungsuntersuchungen am Brunnen Standort Berlin Süd

An dieser "Doppelbrunnen"-Grundwasserzirkulationsanlage, einem Vorgängermodell der Integralsonde, wurde mit unterschiedlichen Messverfahren der Alterungszustand des zum Untersuchungszeitpunkt seit 13 Jahren laufenden Brunnens, speziell im Bereich der Filterstrecken und der Tonsperre, untersucht. Daneben stand die grundsätzliche Fragestellung, ob sich eine Tonsperre, wie sie standardmäßig zur Trennung der zwei Filterstrecken verbaut wird, im sandigen Untergrund über so viele Betriebsjahre stabil halten kann.

Zunächst wurden die Steigleitung des Brunnens mit Grundwasserpumpe sowie die Falleitung ausgebaut und Feststoffproben von Ablagerungen an definierten Abschnitten der 26,7 m langen Steigleitung und des 18 m langen Fallrohres entnommen. Zusätzlich wurde eine Grundwasserprobe am Zapfhahn des Vorlaufs entnommen. Diese Proben wurden im Geochemischen Gemeinschaftslabor der Technischen Universität analysiert. Bei dem an diesem Standort realisierten offenen Brunnensystem wird - im Gegensatz zur Integralsonde - an der oberen Filterstrecke Grundwasser entnommen und an der unteren Filterstrecke wieder eingeleitet. Dies kann dazu führen, dass sauerstoff- bzw. nitratreiches Grundwasser mit eisenreichem, reduziertem Wasser gemischt wird, was zur Verockerung führen kann. Diese Verockerungen zeigten sich bei diesem Brunnen nach 13 Betriebsjahren. Die mikrobiellen Analysen zeigten um bis zu zwei Größenordnungen höhere Gehalte des Eisenoxidierers *Gallionella*, der in Kombination mit dem Eisenreduzierer *Geothrix* auftrat.

Die Standrohrspiegelhöhe wurde am ersten Untersuchungstag im DN 125 Rohrstrang und im DN 90 Rohrstrang bei 12,3 m u. GOK gelotet. Das Steigrohr war ab 10,7 m u. GOK von braunem Ocker belegt. Mit zunehmender Tiefe nahm die Mächtigkeit der Ablagerungen zu. Die Grundwasserpumpe war nahezu frei von Ablagerungen. Das Fallrohr war auf ganzer Länge mit braunem Ocker belegt. Mit zunehmender Tiefe nahm die Mächtigkeit der Ablagerungen zu.

Über eine Kamerabefahrung der beiden Rohrtouren konnte der Zustand der Filterstreckeninnenseiten begutachtet werden. Die Abbildung 25 zeigt den Zustand des Filters des Schluckbrunnen mit deutlich erkennbarer innerer Verockerung. Erkennbar ist überdies ein bereits weit fortgeschrittener Verschluss der Filterschlitzte.

Der Zustand des Porenraumes der Filterkiesschüttung und des unmittelbar am Brunnen angrenzenden Grundwasserleiters wurde anschließend anhand geophysikalischer Vermessungen und Flowmetermessungen untersucht.

Die vermutlich durch die fortschreitende Verockerung bedingten erhöhten Strömungswiderstände verursachten über die Zeit möglicherweise eine Aufhöhung des Betriebswasserspiegels bei gleicher Einletrate. Dies lassen zumindest die beobachtete vollständige Belegung des Fallrohres im Schluckbrunnen mit Ablagerungen bis hinauf zum Brunnenkopf und der gemessene Systemdruck im Rücklauf von 1,1 bar vermuten. Die Untersuchungsergebnisse lassen weiterhin vermuten, dass sekundäre Ausfällungen durch den Brunnenbetrieb die Durchlässigkeit im angrenzenden Gebirge deutlich reduzierten.



Abbildung 25: Innere Verockerung des Schluckbrunnen in 44 Metern Tiefe

Während der Grundwasserförderung wurden im jeweiligen Rohrstrang Flowmetermessungen durchgeführt, um die Anströmung im Bereich der Filterstrecken zu ermitteln. Diese lässt sich nach FLOW.Q-1-1/2-DN 125 für den DN 125 Rohrstrang wie folgt (Tabelle 5) quantifizieren:

Tabelle 5: Grundwasserzulauf DN 125 Rohrstrang

Teufe in m			Grundwasserzulauf bei einer Förderrate von ~ 6 m³/h (DN 125 Rohrstrang)		
			%	m³/h	m³/h/ 1m Filter
29,7	-	30,7	36	2,2	2,2
30,7	-	34,5	38	2,3	0,6
34,5	-	35,7	26	1,5	1,3

Bei der GW-Förderung im DN 125 Rohrstrang zeigte sich, dass alle Bereiche des DN 125 Filterrohres angeströmt werden. Der stärkste Zufluss erfolgt dabei an der Filteroberkante. Für den DN 90 Rohrstrang lässt sich das Anströmverhalten nach FLOW.Q-1-1/2-DN 90 wie folgt (Tabelle 6) quantifizieren:

Tabelle 6: Grundwasserzulauf DN 90 Rohrstrang

Teufe in m			Grundwasserzulauf bei einer Förderrate von ~ 5,5 m³/h (DN 90 Rohrstrang)		
			%	m³/h	m³/h/ 1m Filter
41,6	-	42,0	30	1,7	4,1
42,0	-	47,2	61	3,3	0,6
47,2	-	47,6	9	0,5	1,2

Auch die Filterstrecke des DN 90 Rohrstrangs wurde bei der GW-Förderung vollständig angeströmt. Ähnlich dem DN 125 Rohrstrang zeigt sich der stärkste Zufluss an der Filteroberkante. Ein analoger, jedoch nicht so stark ausgeprägter Effekt zeigt sich auch für die Filterunterkante.

### **Untersuchungen zu Stabilität und Wirksamkeit der Tonsperre zwischen den Filterstrecken:**

Eine wirksame hydraulische Entkopplung im Ringraum zwischen der Einleitfilterstrecke und der Entnahmefilterstrecke setzt eine Abdichtung zwischen den Filterstrecken voraus. Die Abdichtung erfolgte für diesen Brunnen bei Ausbau mit einer Tonsperre aus Quellton im Ringraum mit einer 2,0 m Mächtigkeit. Die Lage und Mächtigkeit der Tonsperre ließ sich mit den folgenden geophysikalischen Messverfahren (Tabelle 7) abbilden.

Tabelle 7: Grundwasserzulauf DN 90 Rohrstrang

Mess- und Gerätedaten:					
Einsatz-Nr.	Messverfahren		Messstrecke [m]		Bemerkungen
			von	bis	
1	CAL-DN 125	Kaliber-Log	0.21	37.62	im DN 125 Rohrstrang
1	CAL-DN 90	Kaliber-Log	0.18	49.55	im DN 90 Rohrstrang
1	MAL-DN 125	Magnetik-Log	0.04	37.09	im DN 125 Rohrstrang
1	MAL-DN 90	Magnetik-Log	0.03	49.18	im DN 90 Rohrstrang
1	NN-DN 125	Neutron-Neutron-Log	0.31	37.31	im DN 125 Rohrstrang
1	NN-DN 90	Neutron-Neutron-Log	0.02	49.12	im DN 90 Rohrstrang
1	SGL M-DN 125	Segmentiertes Gamma-Ray-Log, Mittelwert	0.00	37.10	im DN 125 Rohrstrang
1	GR-DN 90	Gamma-Ray-Log	2.47	49.32	im DN 90 Rohrstrang
1	SGL-DN 125	Segmentiertes Gamma-Ray-Log	0.00	37.25	im DN 125 Rohrstrang
1	GG-K-D-DN 125	Gamma-Gamma-Dichte-Log, kurzes Spacing	0.40	37.35	im DN 125 Rohrstrang
1	GG-L-D-DN 125	Gamma-Gamma-Dichte-Log, langes Spacing	0.30	37.25	im DN 125 Rohrstrang
1	GG-K-D-DN 90	Gamma-Gamma-Dichte-Log, kurzes Spacing	0.14	49.24	im DN 90 Rohrstrang
1	GG-L-D-DN 90	Gamma-Gamma-Dichte-Log, langes Spacing	0.09	49.14	im DN 90 Rohrstrang

Die Tonsperre im Bereich von 35,7 bis 37,7 m kann aufgrund dieser Untersuchungen auch nach 13 Betriebsjahren weiterhin als intakt und als hydraulisch dicht eingeschätzt werden. Die Lage und Ausbildung der Tonsperre ist im Vergleich zur Initialvermessung unmittelbar nach der Erstellung des Brunnens im Rahmen der Messgenauigkeit unverändert. Nach diesem Befund wird die Tonsperre weiterhin als sinnvoll und als notwendig angesehen und sollte integraler Bestandteil von Vertikalbrunnen wie der Integralsonde bleiben. Hingegen kann die Mächtigkeit der Tonsperre, die hier aus Sicherheitsgründen überwiegend mit 6 m Mächtigkeit bemessen wurde, aufgrund der hier gemachten Ergebnisse durchaus geringer ausfallen und trotzdem ihre hydraulisch entkoppelnde Wirkung beibehalten.

Die Filterkiesschüttung weist jedoch von 37,7 bis 39,8 m tonige Beimengungen auf. Ursächlich ist eine wahrscheinlich zu schnell durchgeführte Schüttung der Tonsperre nach Einbringung des Filterkieses. Auf ausreichend lange Sinkzeiten des Filterkieses sollte daher beim Brunnenbau geachtet werden, bevor eine Tonsperre geschüttet wird.

### 1.2.7 Vergleich von Dubletten- und Integralsondenbetrieb

Die Abbildungen 27B (Integralsonde) und 27A (Dublette) zeigen die zeitliche Entwicklung der Grundwassertemperaturen über die bisherige Betriebszeit der Systeme am Standort Nr. 2 und am Standort Nr. 3.



Beide Anlagen sind ähnlich dimensioniert. Nur aufgrund der geringeren Mächtigkeit des Grundwasserleiters von nur 12 Metern ist am Standort Niederschönhausen auf ein Dublettensystem mit getrenntem Saug- und Schluckbrunnen ausgewichen worden (Modelldarstellung siehe Abb. 26 A).

Beide Anlagen sind mit Sensorik zur Erfassung von Temperaturen, Betriebsstunden und Durchflüssen mit einer Zeitauflösung in Minuten ausgestattet worden, was eine direkte Vergleichsanalyse von Betriebsdaten ermöglicht. Die gemessenen Grundwassertemperaturen (gemittelte Monatswerte) beider Systeme (siehe folgende zwei Graphen, Abbildungen 27A und 27B) zeigen nur sehr geringe jahreszeitliche Schwankungen. Am Standort Berlin-Mitte wird dem Gebäude zusätzlich in den Sommermonaten geothermische Kühlleistung bereitgestellt, wodurch neben der natürlichen Regeneration der Temperatur über Grundwasserströmung und solare Einstrahlung dem Untergrund zusätzliche Wärme zugeführt wird. Dies zeigt sich in den im Sommer gegenüber dem Vorlauf leicht erhöhten Rücklauftemperaturen in die Sonde.

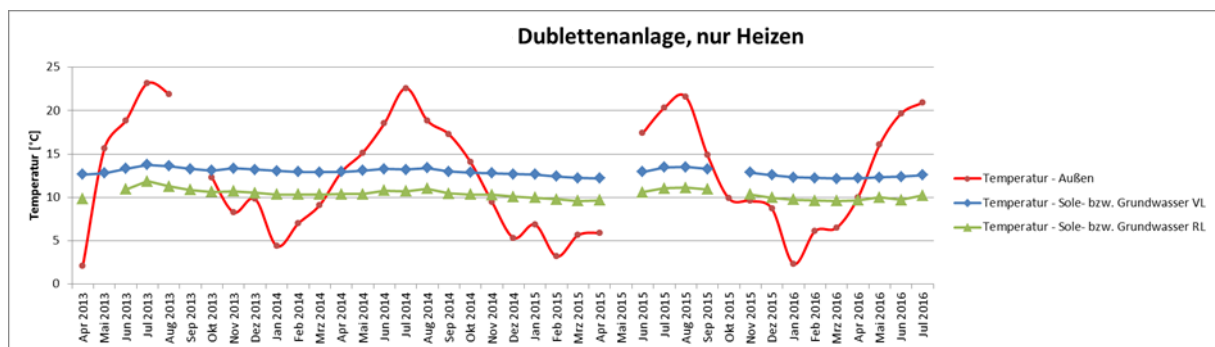


Abb. 27.A: Mittlere monatliche Grundwassertemperaturen im Saugbrunnen (VL) und Schluckbrunnen (RL) zum Standort Berlin-Hohenschönhausen.



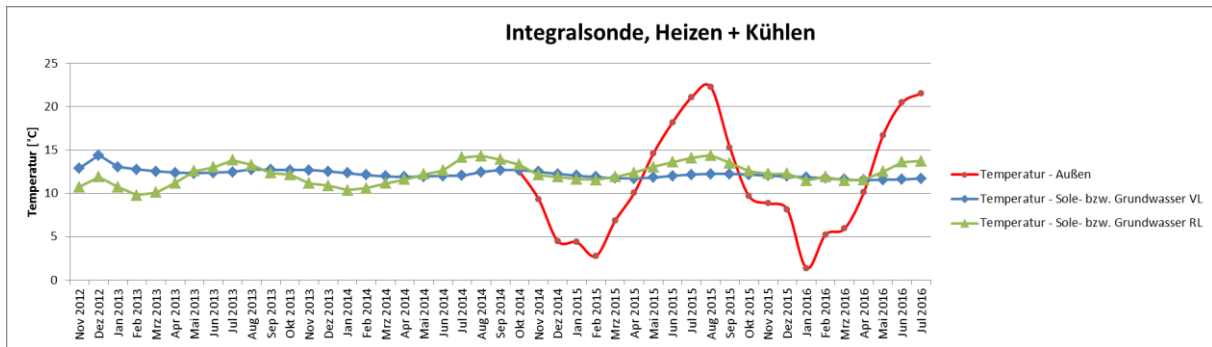


Abb. 27.B: Mittlere monatliche Grundwassertemperaturen im Vorlauf (VL) und Rücklauf (RL) der Integralsonde am Standort BOR016

Ein langfristiges Absinken der Grundwassertemperaturen aufgrund von zu hohem Wärmeentzug pro Jahr konnte bisher an beiden Standorten nicht beobachtet werden. Ebenso ist das erwartete initiale Absinken der Vorlauftemperaturen um wenige Kelvin in den ersten Betriebsjahren nicht zu beobachten.

Die in einer Nachsimulation des Realbetriebes berechneten Vorlauf- und Rücklauftemperaturen eines Betriebsjahres (durchgeführt mit FEFLOW 6.2, siehe dazu beispielhaft auch die folgenden zwei Kapitel) decken sich bei diesen zwei Standorten mit den gemessenen Temperaturen im Realbetrieb. Die in der Planungsphase zum Bau der Anlagen entwickelten hydrogeologischen Modelle zur Auslegung bestätigen sich damit für diese Standorte. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich kein grundsätzlicher betrieblicher Vor- oder Nachteil eines der Systeme Integralsonde und Dublette - für diese Standorte - ausmachen.

### 1.2.8 Ergebnisse der numerischen Betriebssimulation

Unter Verwendung numerischer 3D Grundwassermodelle mit gekoppeltem Wärmetransport konnten die zum Teil komplexen hydraulischen Vorgänge und Wärmetransportprozesse im Grundwasserleiter stationär und instationär simuliert werden. Daraus ließ sich der durch den Anlagenbetrieb ausgeübte thermische Impact auf den Grundwasserleiter auf Basis der realen und mehrjährig aufgezeichneten Betriebsdaten für zwei Standorte exemplarisch bestimmen.

Verwendet wurden in diesem Projekt die Programme FEFLOW 6.1 und FEFLOW 6.2. Die komplexen Randbedingungen wie geothermisches Brunnensystem, kombinierter Betrieb von Wärmeeintrag und Wärmeentzug, Berücksichtigung der Gesteinseigenschaften und der Grundwasserströmung, dreidimensionales System machen die Anwendungen numerischer Grundwassermodelle als mathematische Modelle erforderlich, die nur näherungsweise lösbar sind.

### 1.2.8.1 Thermal Impact einer Integralsonde am Beispiel Strausberg

Zur Beheizung und Klimatisierung eines Mehrfamilien-, Kleingewerbe- und Bürogebäudes in Strausberg (Standort 1 nach Tabelle II) wird unter anderem eine geothermische Grundwasserzirkulationsanlage vom Typ Integralsonde genutzt. Die Inbetriebnahme des Brunnens erfolgte im April 2014.

Um den thermischen Impact auf den Grundwasserleiter bei realem Anlagenbetrieb zu explorieren, wurde der Betrieb der Anlage mit aufgezeichneten Betriebsdaten der ersten vier Betriebsjahre simuliert und der thermische Einfluss auf den Grundwasserleiter dargestellt. Basierend auf diesem Modell, das anhand der Nutzungsdaten kalibriert wurde, konnte eine Prognose für die folgenden 25 Jahre in Hinsicht auf die Systemtemperaturen und die thermischen Auswirkungen auf den Grundwasserleiter erarbeitet werden unter der Annahme, dass sich die Energielasten und damit der Betrieb der ersten 4 Jahre in den kommenden 25 Jahren nicht wesentlich verändern. Auf den folgenden Seiten werden das Simulationsmodell und die Modellannahmen beschrieben und die Simulationsergebnisse vorgestellt und erläutert.

#### **Geologisch-Hydrogeologische Verhältnisse:**

Der Anlagenstandort liegt in der Norddeutschen Tiefebene. Das gesamte norddeutsche Tiefland ist durch Ablagerungen aus den letzten Kaltzeiten gekennzeichnet. Der Standort befindet sich im Bereich der durch eiszeitliche Ablagerungen gekennzeichneten Barnim-Hochfläche. Der oberflächennahe Untergrund in dieser Gegend besteht aus Moränenmaterial, Schmelzwassersanden und Seenablagerungen.

Die lokale Schichtenfolge am Standort ist durch eine Erkundungsbohrung bekannt. Des Weiteren wurde die Schichtenfolge zu der ca. 250 m nordöstlich gelegenen Bohrung HY-SU 2/981 für diese Untersuchung berücksichtigt. Der Untergrund besteht demnach unterhalb einer dünnen Sandauflage aus einer gering durchlässigen Grundmoräne und ab etwa 50 m Tiefe aus durchlässigen Schmelzwassersanden. Diese stellen den pleistozänen Hauptgrundwasserleiter dar, welcher thermisch genutzt wird.

Auf Basis der bohrlochgeophysikalischen Messungen und unter Einbeziehung der geologischen Feldaufnahme lässt sich der am Aufschlusspunkt vorhandene Untergrund wie folgt (Tabelle 8) gliedern:

Tabelle 8: Untergrundaufbau nach geophysikalischer Messung am Aufschlusspunkt

0 m	-	2,8 m	Sand
2,8 m	-	3,5 m	Sand / Kies

3,5 m	-	7,1 m	Sand
7,1 m	-	29,5 m	Schluff, sandig, kiesig (Geschiebemergel)
29,5 m	-	30,0 m	Sand, schluffig
30,0 m	-	32,0 m	Schluff, sandig, kiesig (Geschiebemergel)
32,0 m	-	32,4 m	Sand, schluffig
32,4 m	-	35,3 m	Schluff, sandig, kiesig (Geschiebemergel)
35,3 m	-	53,7 m	Schluff, stark sandig, kiesig (Geschiebemergel)
53,7 m	-	57,8 m	Schluff, sandig, kiesig (Geschiebemergel)
57,8 m	-	59,7 m	Mittelsand-Feinsand, schluffig
59,7 m	-	62,4 m	Mittelsand, schwach feinsandig, schwach grobsandig
62,4 m	-	65,5 m	Mittelsand, grobsandig
65,5 m	-	66,0 m	Feinsand, schluffig
66,0 m	-	66,4 m	Schluff, sandig, kiesig (Geschiebemergel)
66,4 m	-	74,4 m	Mittelsand bis Feinsand
74,4 m	-	77,3 m	Schluff, sandig, kiesig (Geschiebemergel)
77,3 m	-	78,5 m	Sand, stark schluffig, kiesig (Geschiebemergel)
78,5 m	-	79,7 m	(Geschiebemergel)?

Der untere, bedeckte, wasserführende Grundwasserleiter wird durch eine ca. 0,4 m mächtige lokal vorkommende Geschiebemergellage (66,0 bis 66,4 m) aufgegliedert. Oberhalb dieser Geschiebemergellage weist der Grundwasserleiter eine relativ starke Wechsellagerung auf, bei der das Kornspektrum zwischen grobsandigen Mittelsanden und schluffigen Feinsanden variiert.

Der untere Abschnitt des bedeckten Grundwasserleiters ist im Vergleich dazu mit Fein- bis Mittelsanden gleichförmiger aufgebaut. Schluffige und grobsandige Kornanteile sind hier nicht mehr nachweisbar. Der unterste Messpunkt befindet sich bei 79,74 m unter Bohransatzpunkt. Das Wasser im unteren Grundwasserleiter weist keine Anzeichen für eine anormal erhöhte Mineralisation auf. Nach der Hydrogeologischen Karte HYK50 des 2. Grundwasserleiterkomplexes, herausgegeben vom Landesamt Brandenburg für Geologie und Rohstoffe (siehe Abb. 28), liegt das Grundstück im Randbereich einer eiszeitlichen Rinne, deren Mächtigkeit zum Osten zunimmt und die im Grundstücksbereich zwischen 20 und 30 m beträgt. Das Grundwasser fließt hier bei einem hydraulischen Gradienten von  $i = 0,0034$  in Richtung Süden.



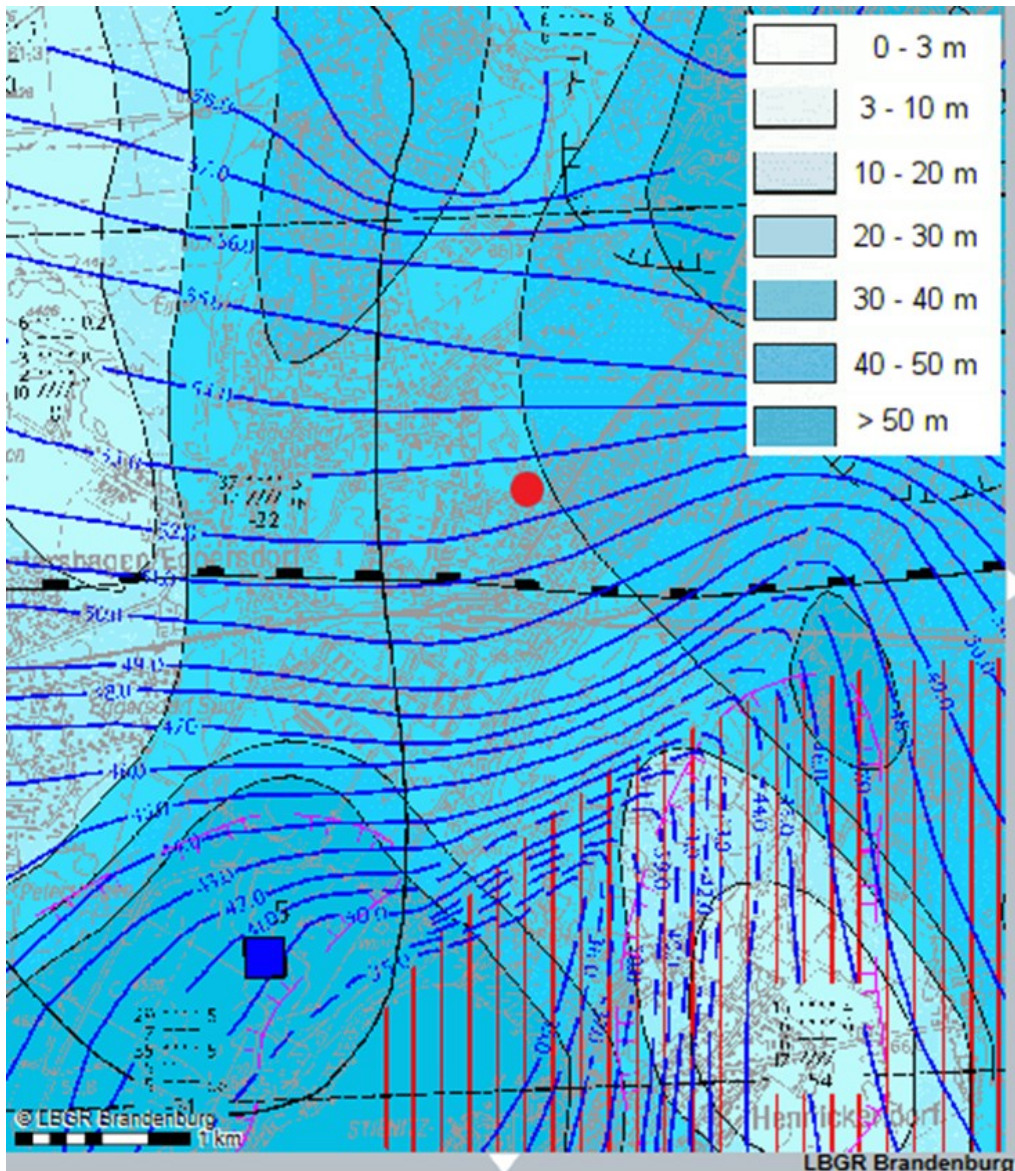


Abbildung 28: Hydrogeologische Karte des 2. Grundwasserleiter-komplexes (HYK50-GWKL2) mit Mächtigkeitsangaben (Quelle: Landesamt Brandenburg für Geologie und Rohstoffe)

Im Zusammenhang mit der Erkundungsbohrung wurde die Standrohrspiegelhöhe 8,75 m unter Rohroberkante gemessen. Sie liegt damit 9,7 m u. GOK innerhalb des Geschiebemergels. Das Grundwasser des Nutzgrundwasserleiters ist somit gespannt.

### Ungestörte Untergrundtemperatur:

Zu Beginn des Temperatur-Monitorings wurde initial eine Temperatur von 11,3 °C aufgezeichnet. Es wird angenommen, dass diese Temperatur repräsentativ für den gesamten Grundwasserleiter im Einflussbereich der Geothermieanlage ist und der Jahresgang der Lufttemperatur weitgehend keinen Einfluss auf den wassergesättigten Nutzgrundwasserleiter hat.

### Ausbau Integralsonde:

An den Bohrproben, die aus den relevanten Teufen des quartären Nutzgrundwasserleiters entnommen wurden, konnten Siebkornanalysen erstellt werden, auf Basis derer Durchlässigkeitsbeiwerte berechnet und die Brunnenfilter bemessen wurden. Die Teufenlagen der Filterrohre und die Filterrohrängen der Integralsonden wurden demnach in Abhängigkeit der vorliegenden geologischen und hydrogeologischen Untergrundverhältnisse festgelegt, sind aber auch Ergebnis der thermo-hydrodynamischen Simulation zur Auslegung der Anlage die zeigt, welcher Abstand zwischen den Filterstrecken erforderlich ist, um sowohl technisch bedingte Temperaturgrenzen des Förderwassers als auch wasserrechtlich vorgegebene Grenztemperaturen im Grundwasserleiter langfristig einzuhalten.

Die Einleitfilterstrecke der Integralsonde befindet sich in 59,0 m bis 63,0 m u. GOK und die Entnahmefilterstrecke in 70,4 m bis 73,4 m u. GOK. Der Filterstreckenabstand zwischen Oberkante Überschüttung des unteren Filters und Unterkante Unterschüttung des oberen Filters beträgt 7,4 m. Zur Anwendung kamen Edelstahlwickeldrahtfilter und Drahtkörbe mit einer inneren Schüttung aus Glaskugeln und einer äußeren Schüttung aus Filtersand. Die Schüttkornklassen und die dazu passenden Filterschlitzweiten wurden anhand von Kennwerten aus den Siebkornanalysen ausgelegt. Die Filterstrecken sind im Ringraum der Bohrung durch eine Tonsperre hydraulisch voneinander entkoppelt.

### **Modellaufbau in FEFLOW 6.2:**

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde das Simulationsmodell aus der Planung anhand der umfangreichen geologischen/hydrogeologischen Kenntnisse, unter anderem Bohrprofile, Bohrproben, Siebkornanalysen, Ergebnisse aus geophysikalischen Bohrlochvermessungen, Untergrundtemperaturen, Messwerte zu Grundwasserständen etc., die im Zuge der Erstellung und der Inbetriebnahme der Anlage gewonnen wurden, angepasst. Die Ausdehnung des Modells beträgt ca. 480m x 870m. Die Fläche des Simulationsmodells wurde so groß gewählt, dass Randeinflüsse weitestgehend vermieden werden. Zur Festlegung der Modellgebietsgrenzen wurde die Grundwassergleichenkarte des geologischen Landesamts für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg herangezogen. Die Modellgrenze im Norden liegt ca. 200 m zur Geothermieanlage im Grundwasseranstrom entlang der 53 m ü. NN Grundwassergleiche, die gleichzeitig einen Festpotentialrand, d. h. eine Randbedingung 1. Art des Simulationsmodells bildet. Die Modellgrenze im Süden liegt ca. 680 m zur Geothermieanlage im Grundwasserabstrom entlang der 50 m ü. NN Grundwassergleiche, die ebenfalls einen Festpotentialrand bzw. Randbedingung 1. Art des Simulationsmodells bildet. An den Modellgrenzen im Osten und Westen ergibt sich eine „No-Flow-Randbedingung“.

Der tiefere pleistozäne Grundwasserleiter ist im Grundstücksbereich bedeckt und gespannt. Vereinfachend wurde für das Simulationsmodell deshalb ein vollständig

gesättigter, gespannter Grundwasserleiter angesetzt, dessen Druckhöhe mit der Geländeoberfläche übereinstimmt. Unter Verwendung der Randbedingungen 1. Art wurde dem Modell ein hydraulischer Gradient  $i = 0,0034$  entsprechend der Grundwassergleichenkarte übertragen (siehe Abb. 29).

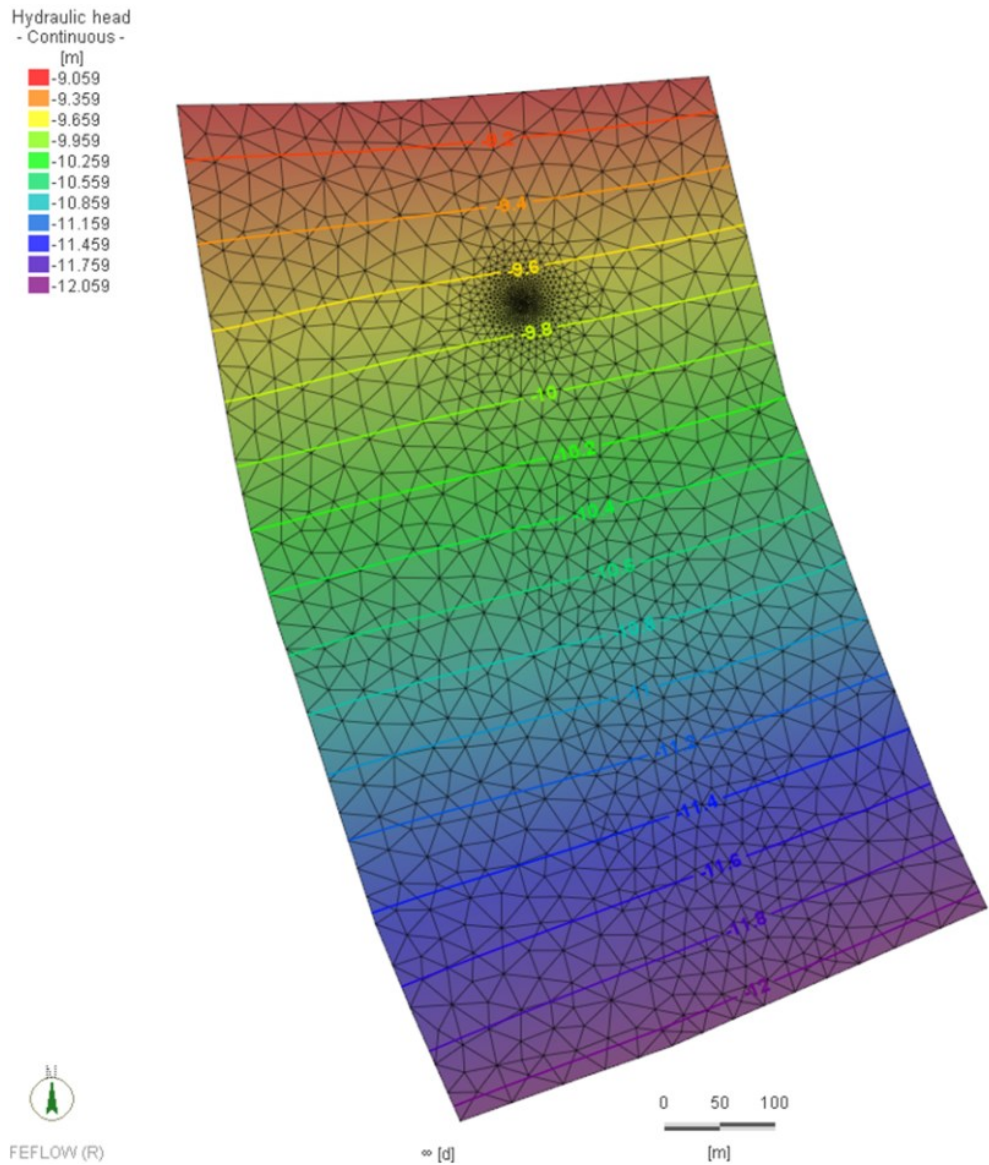


Abbildung 29: Grundwassergleichen des Simulationsmodells

Anhand des Schichtenverzeichnisses der Erkundungsbohrung und der Dokumentation der geophysikalischen Vermessung wurde ein vereinfachter geologischer Modellaufbau erstellt (siehe Abb. 30). Vorhandene Bohrprofile aus nahegelegenen Bohrungen, die sich ebenfalls im Modellgebiet befinden, wurden mit herangezogen.



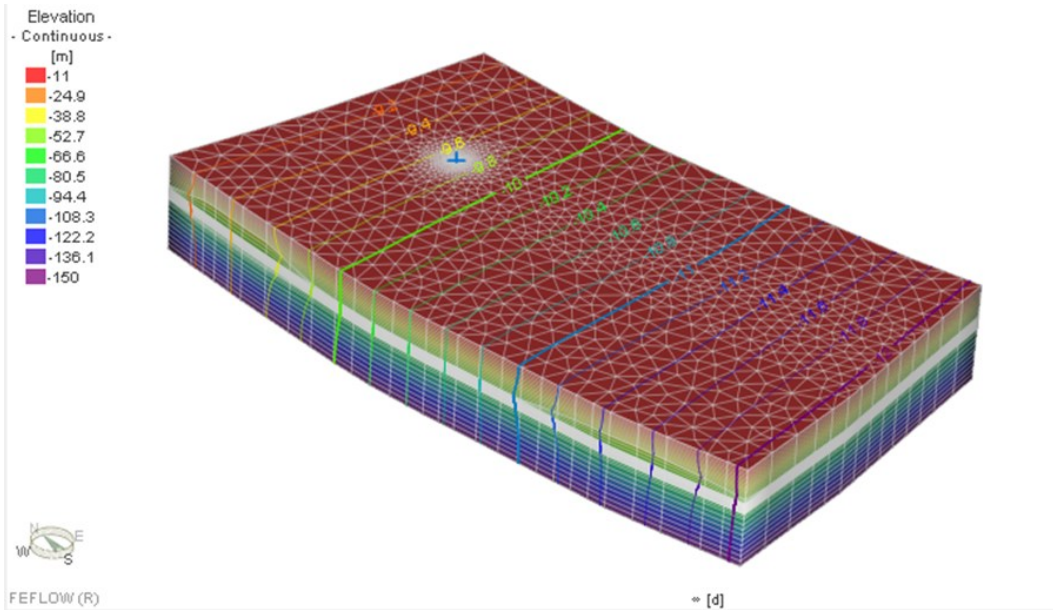


Abbildung 30: 3D-Simulationsmodell

Insbesondere im Niveau der Filterstrecken wurden hydraulische Durchlässigkeiten im Modell mitberücksichtigt, die mittels Siebkornanalysen aus Bohrproben bestimmt wurden. So gliedert sich der thermisch genutzte Grundwasserleiter im Modell wie folgt auf:

Tabelle 9: Aufbau des thermisch genutzten Grundwasserleiters im Modell

Lockersediment	Tiefe m u. GOK	kf-Wert in m/s
Schluff, sandig, tonig, kalkig (Geschiebemergel)	11,0 – 58,0	1,0E <sup>-08</sup>
Mittelsand, grobsandig, feinsandig	58,0 – 65,5	2,22E <sup>-04</sup>
Feinsand, schluffig	65,5 – 66,0	1,00E <sup>-04</sup>
Schluff, sandig, kiesig	66,0 - 66,4	1,00E <sup>-05</sup>
Mittelsand, grobsandig, feinsandig	66,4 – 74,4	6,05E <sup>-04</sup>
Schluff, sandig, tonig, kalkig (Geschiebemergel)	74,4 – 150,0	1,0E <sup>-08</sup>

Die hydraulischen Leitfähigkeiten der bindigen Schichten (Geschiebemergel) wurden geschätzt. Ein wichtiger Eingabeparameter ist die Anisotropie in der hydraulischen Leitfähigkeit, die Voraussetzung für die Funktion einer Integralsonde ist. Die Anisotropie wurde mit dem Faktor 0,3 zwischen der horizontalen und vertikalen hydraulischen Leitfähigkeit berücksichtigt. Bindige Schichten mit einem Durchlässigkeitsbeiwert  $< 1 \cdot 10^{-5}$  m/s wurden bezüglich deren hydraulischer Leitfähigkeit als isotrop betrachtet.

Der Spezifische Speicherkoeffizient wurde mit 0,0001 [1/m] festgelegt. Sofern zu den weiteren Materialeigenschaften der jeweiligen Schichten keine genaueren Kenntnisse aus Felduntersuchungen vorlagen, wurden Literaturwerte aus der VDI 4640 (2010) bzw. Erfahrungswerte herangezogen.

Das 3-D-Grundwasserströmungsmodell wurde um den gekoppelten Wärmetransport erweitert. Thermisch ist das Modell an den Seiten und an Ober- und Unterfläche dicht, wobei ein Temperatureaustausch mit der gering durchlässigen Deck- und Basisschicht möglich ist. Das ungestörte Temperaturfeld wurde mit 11,3°C festgelegt, dies entspricht der vom Anlagenbetrieb unbeeinflussten Temperatur, welche initial zu Beginn des Temperatur-Monitorings gemessen wurde. Die Temperatur von 11,3°C wurde dem gesamten Modell als Anfangsbedingung und an der Schnittfläche des Modells im Grundwasseranstrom des Grundwasserleiters als ständiger Temperatureintrag (Randbedingung 1. Ordnung) zugewiesen.

Des Weiteren wurden im Modell die longitudinale Dispersivität  $\alpha_L$ , die transversale Dispersivität  $\alpha_T$ , die spezifischen Wärmekapazitäten, Wärmeleitfähigkeiten und durchflusswirksamen Porositäten berücksichtigt. Die Gesamtporositäten wurden nach Helmbold (2002) mit folgender Gleichung berechnet:

$$n = 0,29 * kf^{-0,03}[-]$$

Anhand der berechneten Gesamtporosität wurde nach Lejbenson (1947) die durchflusswirksame Porosität ermittelt:

$$nf = n \left( 1 - 0,114 \frac{1-n}{n} \right) [-]$$

Die spezifischen Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten sind den empfohlenen Rechenwerten der VDI 4640 Blatt 1 entnommen worden. In der folgenden Tabelle 10 sind die Modellparameter der Simulation aufgelistet.

Tabelle 10: Zusammenfassung der wichtigsten Eingangsparameter für den Grundwasserleiter

Modellparameter	
Teufenlage Top Nutzgrundwasserleiter [m u. GOK]:	58
mittlere effektive Mächtigkeit Nutzgrundwasserleiter [m]:	16,4
Anisotropiefaktor für vertikale hydraulische Leitfähigkeit (Aquifer)	0,3
Grundwasserdruckhöhe [m u. GOK]:	9,7
hydraulischer Gradient I [-]:	0,0034
Schichttemperatur Nutzgrundwasserleiter [°C]:	11,3
Wärmeleitfähigkeit Matrix Aquifer [W/m*K]:	2,4

Wärmeleitfähigkeit Matrix Aquitard [W/m*K]:	2,4
Wärmeleitfähigkeit Fluid [W/m*K]:	0,65
Vol. Wärmekapazität Matrix Aquifer [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]:	2,5
Vol. Wärmekapazität Matrix Aquitard [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]:	2,5
Vol. Wärmekapazität Fluid [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]:	4,2
Porosität [%]:	5 - 29
Longitudinale Dispersivität [m]:	5
Transversale Dispersivität [m]:	0,5

### Thermischer Impact im Grundwasserleiter nach Planung und Anlagenauslegung:

Anhand einer durchgeführten Gebäudesimulation wurden in der Planungsphase Bedarfe für Gebäudeheizung und –Kühlung berechnet, derer zufolge dem Grundwasserleiter in einem Norm-Betriebsjahr 42,3 MWh Wärme entzogen und durch passive Gebäudekühlung 32,5 MWh Wärme zugeführt werden. Diese Bedarfe für Energieentzug bzw. Energieeintrag aus/in den Grundwasserleiter sollten nach Planung mit einer Integralsonde abgedeckt werden. Am Wärmetauscher würde das zirkulierende Grundwasser um max. 4 Kelvin abgekühlt (Heizperiode) bzw. aufgewärmt (Kühlperiode) werden. Durch eine numerische Simulation wurde in der Planungsphase der hydraulische und thermische Einfluss auf den Grundwasserleiter veranschaulicht. Die Abbildung 31 zeigt die projektierten Jahresarbeiten für Heizen und Kühlen der einzelnen Monate eines Betriebsjahres.

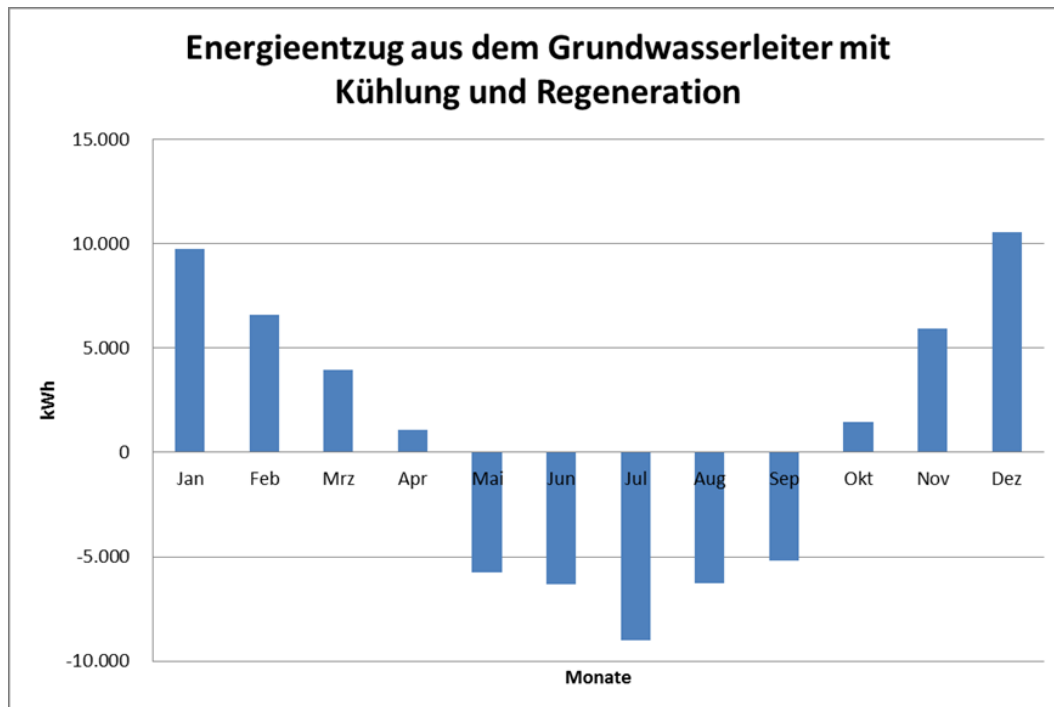


Abbildung 31: Lastprofil unter Berücksichtigung des Kühlbedarfs

Angesichts der durch die Erdwärmeanlage zu erbringenden Leistung müssen bei Anlagenbetrieb unter Berücksichtigung einer Temperaturspreizung von 4 Kelvin zwischen Grundwasservorlauf und Rücklauf 9 m<sup>3</sup>/h Grundwasser im Grundwasserleiter zirkuliert werden. Um die langfristigen thermischen Auswirkungen des projektierten Anlagenbetriebs auf den Grundwasserleiter zu beurteilen, wurde unter Berücksichtigung des dargestellten Lastgangs zunächst ein 10-jähriger Anlagenbetrieb simuliert. Im Zuge der Simulation wurden fortlaufend die zu erwartenden Vor- und Rücklauftemperaturen der Integralsonde aufgezeichnet und in einem Diagramm gegen die Zeit von 10 Jahren aufgetragen (siehe Abb. 32).

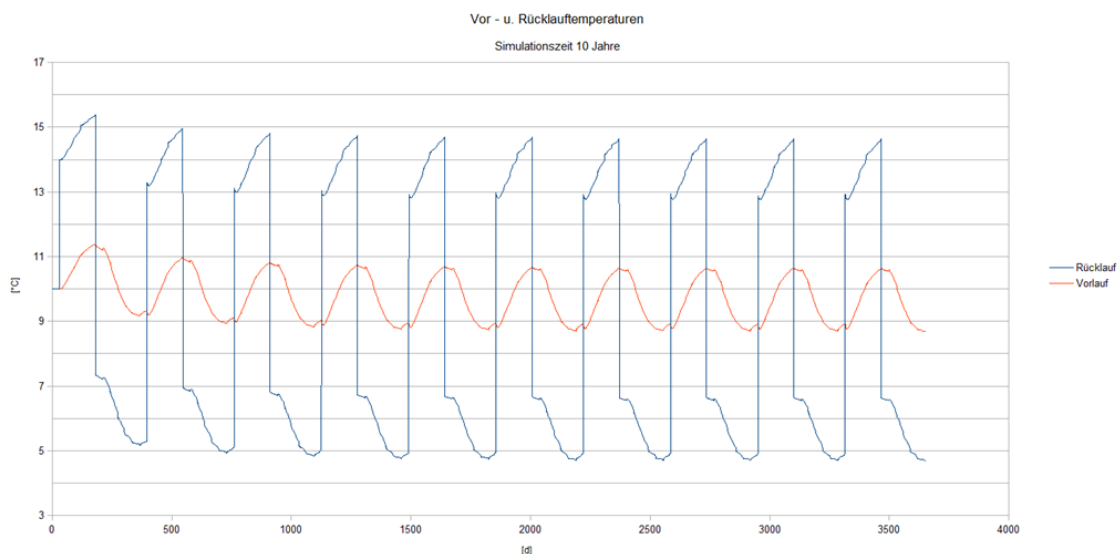


Abbildung 32: Vor- und Rücklauftemperaturen nach 10 Jahren Simulationszeit (Planungsergebnis)

Das Diagramm zeigt die sich saisonal ändernden Temperaturen zwischen den Heiz- und Kühlperioden eines Jahres und das Langzeitverhalten der Grundwassertemperaturen. Die höchsten Vor – und Rücklauftemperaturen treten innerhalb der von Anfang Mai bis Ende September reichenden Kühlperiode zum Ende der Kühlperiode auf. Die niedrigsten Vor – und Rücklauftemperaturen hingegen treten am Ende der jeweiligen Heizperiode von Anfang Oktober bis Ende April auf. Der saisonale Wechsel zwischen Heiz- und Kühlbetrieb führt nach 4 Jahren zu einem gleichförmigen Temperaturverlauf um ein Temperaturmittel von 9,8 °C. Aufgrund dieses dynamischen Gleichgewichts ist im langjährigen Simulationszeitraum kein Temperaturtrend nachzuweisen.

### **Thermischer Impact im Grundwasserleiter bei realem Anlagenbetrieb:**

Für den Betriebszeitraum Sept. 2014 bis Ende 2017 wurden kontinuierlich die Grundwasservorlauf- und Rücklauftemperaturen, die Temperaturdifferenz zwischen dem Vorlauf und dem Rücklauf sowie der Durchfluss aufgezeichnet.

Die im realen Anlagenbetrieb entzogenen und eingeleiteten Wärmemengen weichen vom geplanten Anlagenbetrieb ab. So wurde im Jahr 2017 statt 42,3 MWh ca. 53 MWh Wärme entzogen. Die zugeführte Wärmemenge im Jahr 2017 mit 23 MWh liegt unter der in der Planung angenommenen Wärmemenge von 32,5 MWh (siehe Abb. 33). Auch die

Betriebsparameter Temperaturdifferenz zwischen dem Vorlauf und dem Rücklauf und der Durchfluss weichen vom geplanten Betrieb ab.

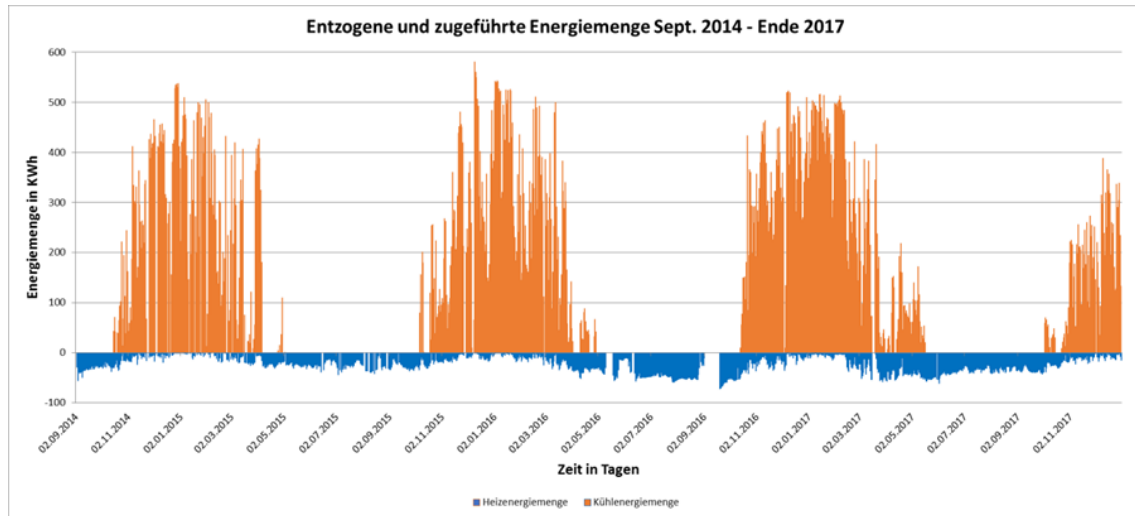


Abbildung 33: Entzogene und zugeführte Energiemenge für den Betriebszeitraum Sept. 2014 bis Ende 2017

Trotz größerer entzogener und geringerer zugeführter Wärmemengen aus bzw. in den Grundwasserleiter im Realbetrieb zeigt das Temperatur-Monitoring geringere Temperaturmaxima und Temperaturamplituden in den gemessenen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen als in der Planungssimulation berechnet wurden (Abb. 34).

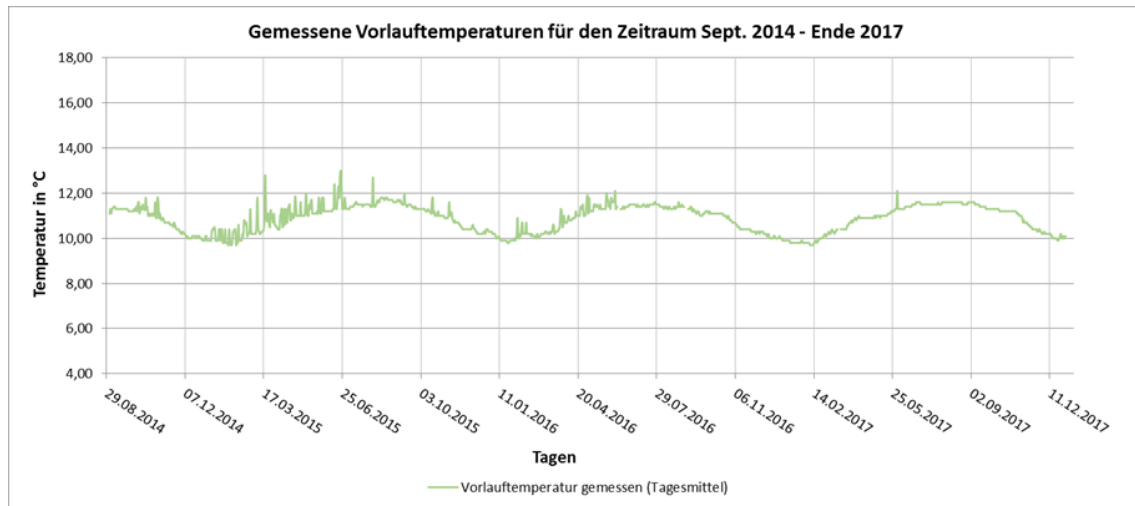


Abbildung 34: Vorlauftemperatur gemessen für den Zeitraum Sept. 2014 bis Ende 2017

Anhand der Messwerte der Vorlauftemperaturen konnte das im Forschungsprojekt aktualisierte Simulationsmodell kalibriert und der thermische Impact auf den Grundwasserleiter durch den Anlagenbetrieb simuliert werden.

Die mit der Nachsimulation des Realbetriebes berechneten Vorlauftemperaturen decken sich weitgehend mit den gemessenen Temperaturen im Realbetrieb (siehe folgende Abb. 35). Bereits nach dem dritten Jahr hat sich sowohl im gemessenen also auch im



simulierten Temperaturgang des Vorlaufs der Integralsonde ein quasi-stationäres Temperaturgleichgewicht eingestellt.

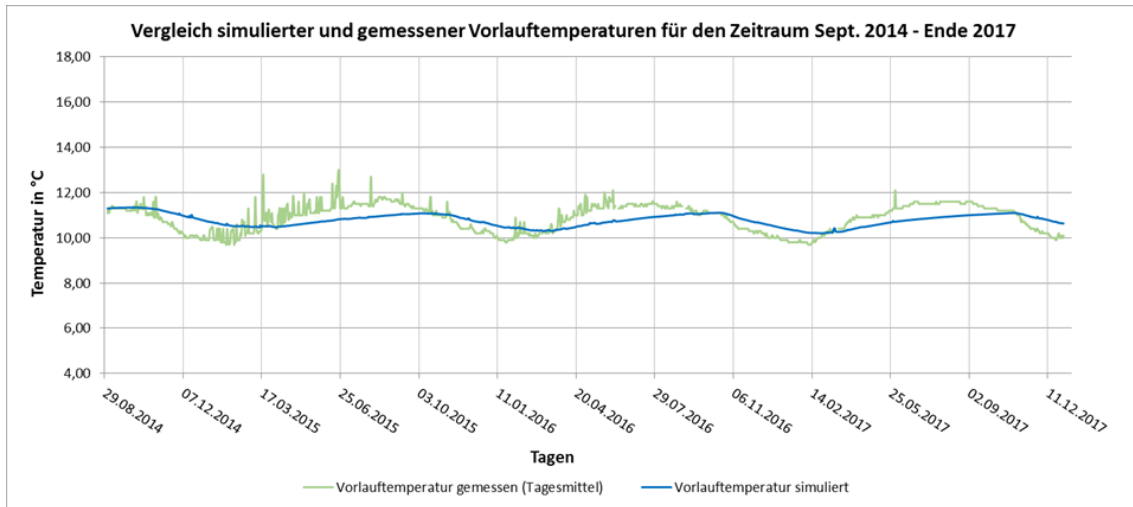


Abbildung 35: Vergleich simulierter und gemessener Vorlaufemperaturen

Die Vorlaufemperaturen schwanken zwischen 9,9 und 11,2 °C. Das thermische Monitoring und die Simulationsergebnisse zeigen, dass die thermischen Auswirkungen des Anlagenbetriebs auf den Grundwasserleiter klein sind und die technisch bedingten Temperaturgrenzen im Grundwasserleiter innerhalb der Betriebszeit eingehalten werden. Die Grundwasserzirkulationsanlage zeigt im saisonalen Betrieb nur geringe Temperaturschwankungen und bietet aufgrund des Temperaturniveaus zudem sehr gute Voraussetzung für den passiven Kühlbetrieb.

Der Energieentzug und der Energieeintrag sind über das Jahr nicht bilanziert. Von Inbetriebnahme im September 2014 bis zum Ende 2017 bildete sich eine Kältefahne von maximal 153 m Länge im Teufenbereich der wassergesättigten Sande in Grundwasserfließrichtung aus. In 59 m u. GOK erreicht der Bereich der Kältefahne, der  $\geq 1,5$  Kelvin im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur abgekühlt ist, eine maximale Länge von ca. 16 m. Der Bereich der Kältefahne, der  $\geq 1,0$  Kelvin im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur abgekühlt ist, erreicht eine maximale Länge von ca. 50 m (siehe Abb. 36).

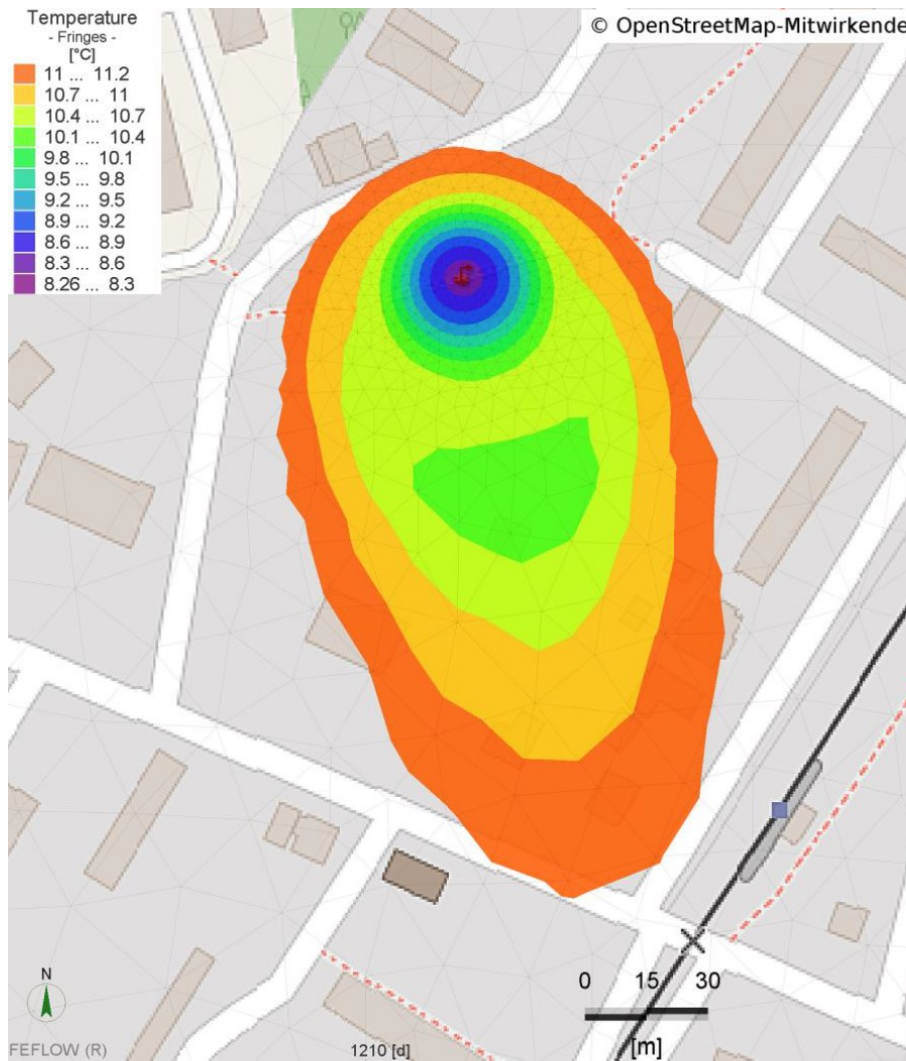


Abbildung 36: Temperaturverteilung um die Einleitfilterstrecke des GWZ-Brunnen nach 3 Jahren und 3 Monaten Anlagenbetrieb

An der Grundstücksgrenze in GW-Abstrom und in einer Tiefe von 59 m wurde im Modell ein Beobachtungspunkt implementiert. Der Beobachtungspunkt liegt 30 m von der Integralsonde entfernt. An der Grundstücksgrenze ist das Grundwasser im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur zeitweise nur um maximal 1,5 Kelvin abgekühlt. Das Ergebnis (Abb. 36 und Abb. 37) zeigt, dass die Temperaturänderungen durch den Anlagenbetrieb nicht maßgeblich über die Grundstücksgrenze hinausreichen. Nachbargrundstücke werden durch den Betrieb der Geothermieanlage nicht negativ beeinflusst.

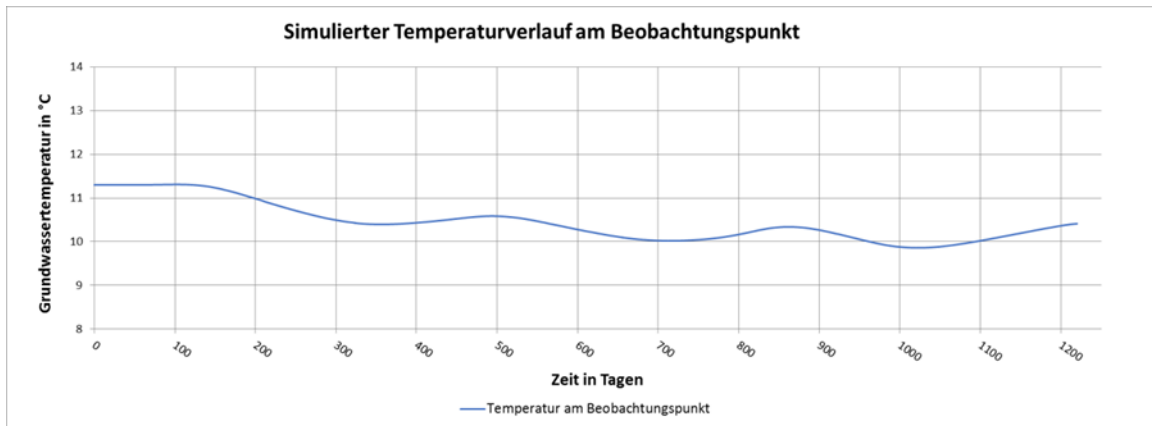


Abbildung 37: Simulierter Temperaturverlauf am Beobachtungspunkt

Anhand des verbesserten und auf die gemessenen realen Betriebsdaten kalibrierten Modells wurde eine Prognose für den thermischen Impact für die folgenden 21 Jahre erarbeitet. Die Temperaturentwicklung ist nach etwa dem dritten Jahr „quasi-stationär“, und die Vorlauftemperaturen schwanken um eine mittlere Temperatur von 10,5 °C (siehe Abb. 38).

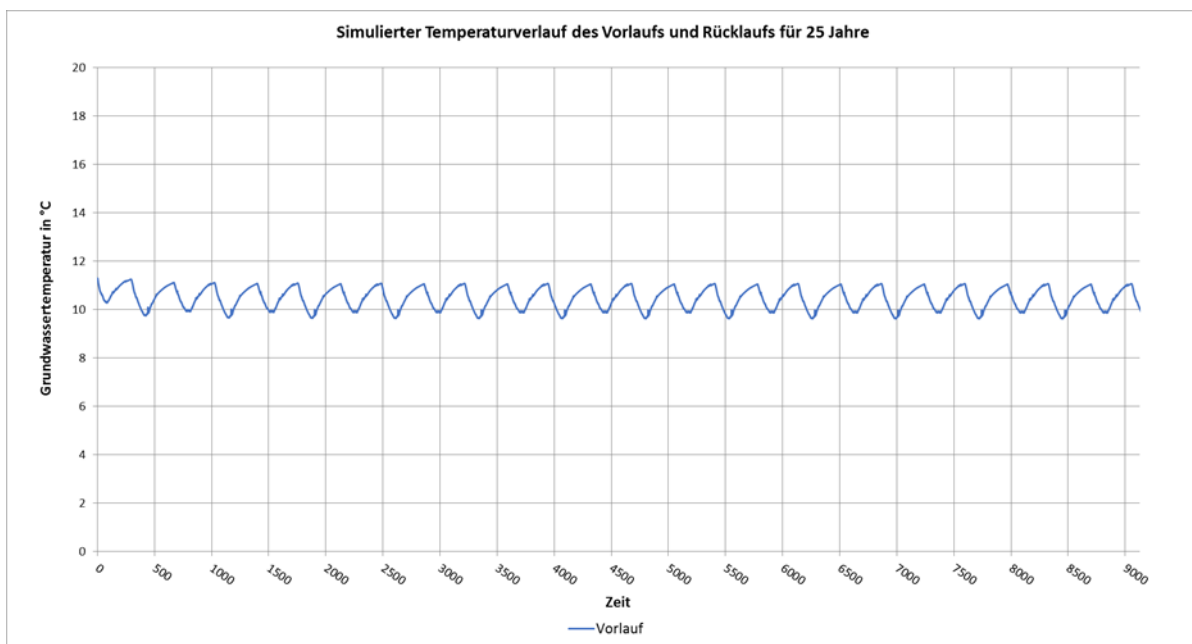


Abbildung 38: Simulierte Vorlauftemperaturen für 25 Jahre Anlagenbetrieb

Bei einem Anlagenbetrieb von 25 Jahren bildet sich eine Kältefahne im Tiefenbereich der wassergesättigten Sande in Grundwasserfließrichtung von ca. 640 Metern Länge (siehe Abb. 39).

In 59 m u. GOK erreicht der Bereich der Kältefahne, der  $\geq 1,5$  Kelvin im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur abgekühlt ist, nun eine maximale Länge von ca. 20 m. Der Bereich der Kältefahne, der  $\geq 1,0$  Kelvin im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur abgekühlt ist, erreicht eine maximale Länge von ca. 80 m (siehe Abb. 39).

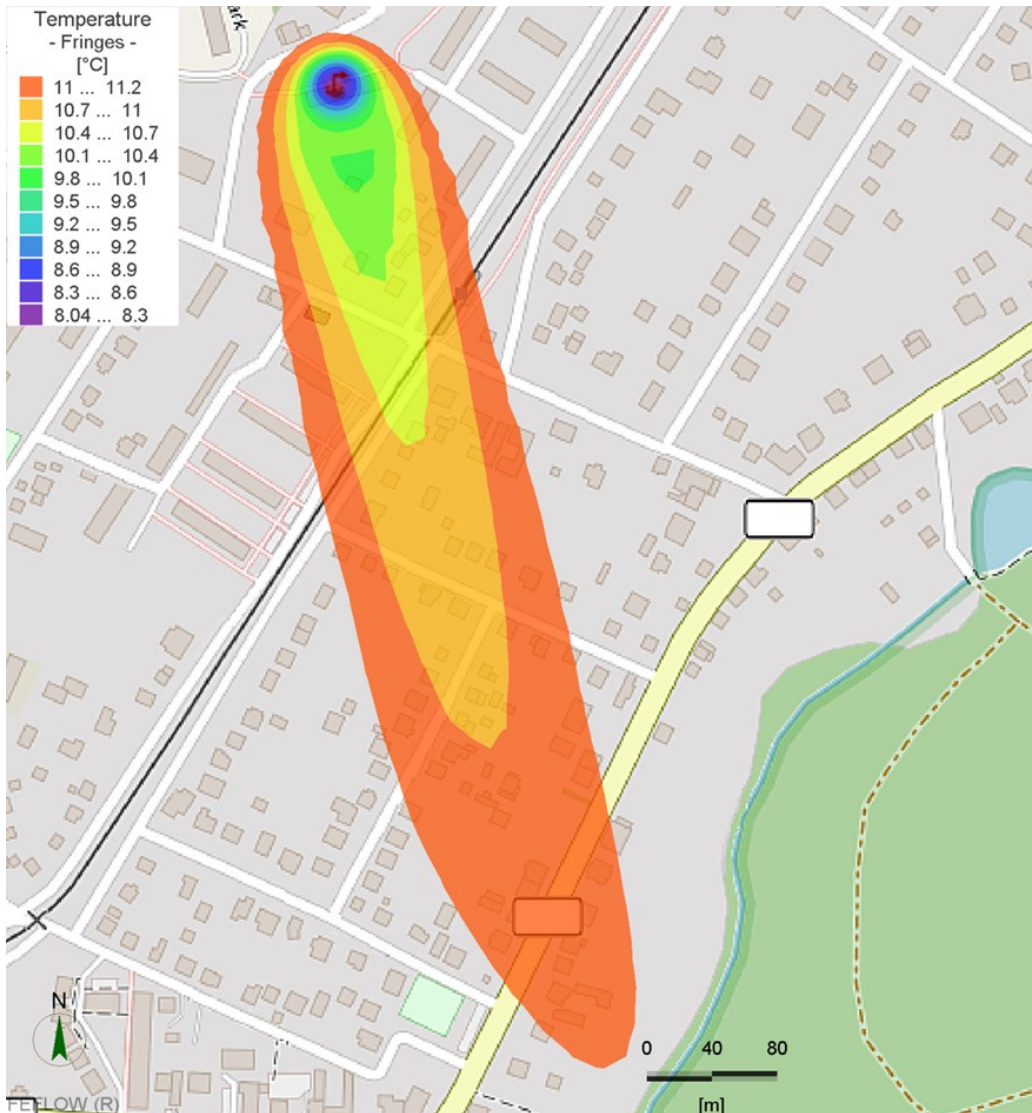


Abbildung 39: Temperaturverteilung um die Einleitfilterstrecke des GWZ-Brunnen nach 25 Jahren Anlagenbetrieb

Saisonale Temperaturunterschiede aufgrund des Anlagenbetriebs beschränken sich auf den Nahbereich der Anlage im Radius kleiner 20 m. An der Grundstücksgrenze ist das Grundwasser im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur zeitweise um maximal 1,7 Kelvin abgekühlt (siehe Abb. 40).

Auch für die Langzeitprognose zeigt das Ergebnis, dass die Temperaturänderungen durch den Anlagenbetrieb nicht maßgeblich über die Grundstücksgrenze hinaus reichen (Abb. 40 und 41).

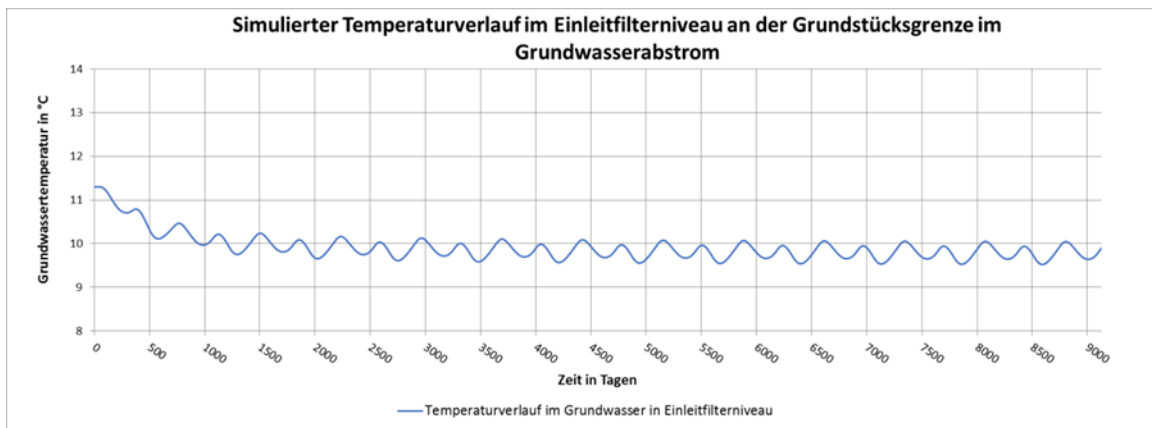


Abbildung 40: Simulierter Temperaturverlauf am Beobachtungspunkt für 25 Jahre Anlagenbetrieb

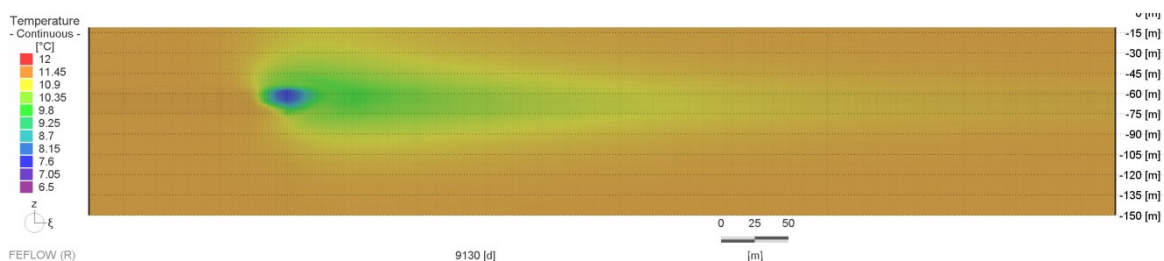


Abbildung 41: 2D-Schnitt aus der Simulation zur Temperaturverteilung im Untergrund entlang der Temperaturfahne nach 25 Jahre unverändertem Anlagenbetrieb.

### 1.2.8.2 Thermal Impact eines Integralsondenfeldes, Bsp. Kreis Stormarn

Für ein Verwaltungsgebäude auf einem Grundstück im Kreis Stormarn (Standort 4 nach Tabelle 2) wird der Energiebedarf für Heiz- und Kühlzwecke durch geothermische Nutzung des oberen Grundwasserleiters mittels 7 Integralsonden gedeckt. In der Planungsphase wurde zur Abschätzbarkeit der thermischen Veränderungen im Grundwasserleiter infolge des projektierten Anlagenbetriebs eine hydrothermodynamische Simulation mit dem Programm FEFLOW 6.2 durchgeführt. Als Grundlage dienten die Ergebnisse aus einer Pilotbohrung. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde das Simulationsmodell aus der Planung anhand der umfangreichen geologischen/hydrogeologischen Kenntnisse, die im Zuge der Erstellung der Anlage gewonnen wurden, angepasst. Verwendet wurden hierzu u. a. Bohrprofile, Bohrproben, Siebkornanalysen, Ergebnisse aus geophysikalischen Bohrlochvermessungen, gemessene Untergrundtemperaturen, Standrohrspiegelhöhen-Stichtagsmessungen. Um den thermischen Impact auf den Grundwasserleiter bei realem Anlagenbetrieb zu explorieren, wurde der Betrieb der Anlage mit realen Betriebsdaten des Nutzungsjahres 2017 simuliert und basierend auf diesen Nutzungsdaten eine Prognose für den thermischen Impact für die folgenden 20 Betriebsjahre erarbeitet.



Das Grundstück liegt ca. 2,6 km östlich der Hamburger Stadtgrenze im Landkreis Stormarn in Schleswig-Holstein. Das für diese Untersuchung festgelegte Bezugsniveau entspricht in etwa der Geländehöhe am jeweiligen Bohrsatzpunkt der Bohrungen und wurde auf +50,0 mNN festgelegt.

### **Geologisch-Hydrogeologische Verhältnisse:**

Der Anlagenstandort befindet sich in der Norddeutschen Tiefebene. Das gesamte norddeutsche Tiefland wie auch die Gegend im Landkreis Stormarn ist durch Ablagerungen aus den letzten Kaltzeiten gekennzeichnet. Der oberflächennahe Untergrund in dieser Gegend besteht aus Moränenmaterial, Schmelzwassersanden und Seenablagerungen. Das Moränenmaterial, der kalkhaltige Geschiebemergel, besteht aus unterschiedlichen und unsortierten Anteilen an Sand, Schluff und Ton, häufig mit größeren Komponenten wie Kies und Steinen. Der Geschiebemergel ist als bindiges Lockergestein für Wasser grundsätzlich schwach bis sehr schwach durchlässig.

Die Schmelzwassersande, auch glazifluviatile Sande, wurden je nach Transportenergie der Schmelzwässer in Schichten aus Feinsand, Mittelsand, Grobsand oder Kies abgelagert. Die Schmelzwassersande sind im Allgemeinen für Wasser durchlässig bis stark durchlässig. Bei sehr geringer oder fehlender Transportenergie während der Sedimentation, wie dies z. B. auf Seen zutrifft, werden nur sehr feine Körner als limnische Sedimente abgelagert. Es bilden sich unter solchen Bedingungen Schluff- oder Tonschichten, die für Wasser schwach bis sehr schwach durchlässig sind.

Der geologische Profilschnitt „Fuhlsbüttel 3“, dessen Schnittlinie (von West nach Ost) 1 km nördlich der Baufläche verläuft, zeigt den oberflächennahen Untergrund in der Gegend mit seinen vorwiegend kaltzeitlichen Ablagerungen differenziert. Nach dem Profilschnitt (siehe Abb. 42) befindet sich unterhalb einer etwa 25 m mächtigen Deckschicht aus Geschiebelehm und Geschiebemergel eine etwa 43 m mächtige Schicht aus fluvioglazialen Sanden (gelbe Farbgebung). Unter dieser saalekaltzeitlichen Folge lagert der hier etwa 77 m mächtige Lauenburger Ton. Hierbei handelt es sich um eine in dieser Gegend weit verbreitete limnische Ablagerung.

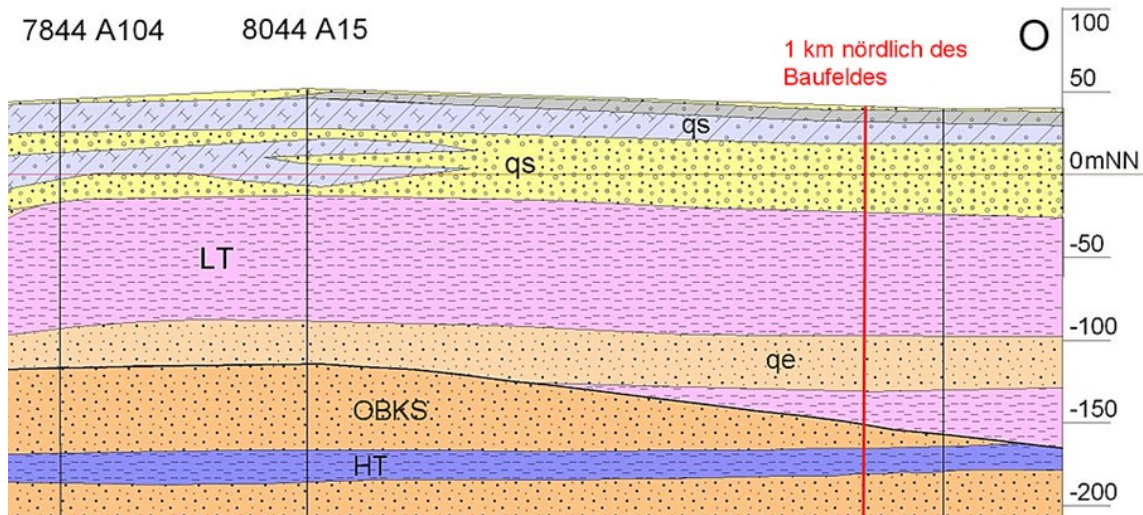


Abbildung 42: Geologisches Profil der Gegend vom Landkreis Stormarn (aus: Bohrdatenportal, BSU Hamburg)

Es folgt zur Tiefe eine etwa 30 m mächtige Sandschicht, die ebenfalls der Elsterkaltzeit zugeordnet ist, durch Schmelzwässer abgelagert wurde und von einer etwa 25 m mächtigen bindigen Schicht unterlagert wird.

Unterhalb der kaltzeitlichen Ablagerungen folgen flachmarine und marine Sande und Tone des Neogen und Paläogen, den erdgeschichtlich nächst älteren Zeitabschnitten. Durch eine auf dem Grundstück gelegene Erdwärmesondenbohrung wurde bis in 30 m Tiefe Geschiebelehm/-mergel festgestellt, darunter bis in 50 m Tiefe eine 20 m mächtige Sandschicht.

Eine Ende Februar 2013 abgeteufte Probebohrung bestätigt den Untergrundaufbau im Bereich der Erdwärmesondenbohrung bezogen auf die oberflächennahen Ablagerungen weitgehend. Durch die Probebohrung wurden bis 24 m Tiefe unter Gelände bindige Ablagerungen (Geschiebelehm, Schluffe) erbohrt. Unterhalb dieser Deckschicht folgen bis 43,5 m Tiefe Sande, zunächst vorwiegend Mittelsande, dann ab 37 m Tiefe vorwiegend Feinsande. Innerhalb dieser Sande wurden zwischen 30 und 31 m Tiefe kompakte Schluffaggregate, Grobsande, Kiese und Steine erbohrt. Möglicherweise handelt es sich bei diesem Schluffvorkommen um einen durch Schmelzwasser aufbereiteten Geschiebemergelrest. Zum Liegenden folgen bis zur Bohrendteufe in 54 m ausschließlich Schluffe. Die Schichtenverzeichnisse der Bohrungen für die Integralsonden bestätigen diesen geologischen Untergrundaufbau ebenfalls. In allen Bohrungen wurde eine Deckschicht aus bindigen Ablagerungen erbohrt. Diese Deckschicht reicht bis 24 m u. Gelände (Bohrung 1) und 32,5 m u. Gelände (Bohrung 4). Die unterhalb der Deckschicht folgenden Schichten bestehen aus vorwiegend Mittelsanden, die mit zunehmender Tiefe in Feinsande übergehen. Die Sandschichten reichen in der Bohrung 3 bis 43,5 m u. Gelände und in der Bohrung 4 bis 49,0 m u. Gelände. Zur Feststellung der  $k_f$ -Werte als Maß für die hydraulische Leitfähigkeit des Untergrundes in unterschiedlichen Teufen

wurden Siebkornanalysen durchgeführt. Die ausgesuchten Teufen entsprechen den Profilabschnitten, die für den späteren Ausbau mit Filterstrecken relevant waren.

Der hydraulische Gradient des ungestörten Strömungsfeldes wurde anhand der Standrohrspiegelhöhen der Bohrungen nach Errichtung neu bestimmt. Anhand der Messwerte wurde ein hydrogeologisches Dreieck erstellt und der hydraulische Gradient  $i = 0,0038$  abgeleitet (siehe Abb. 43).

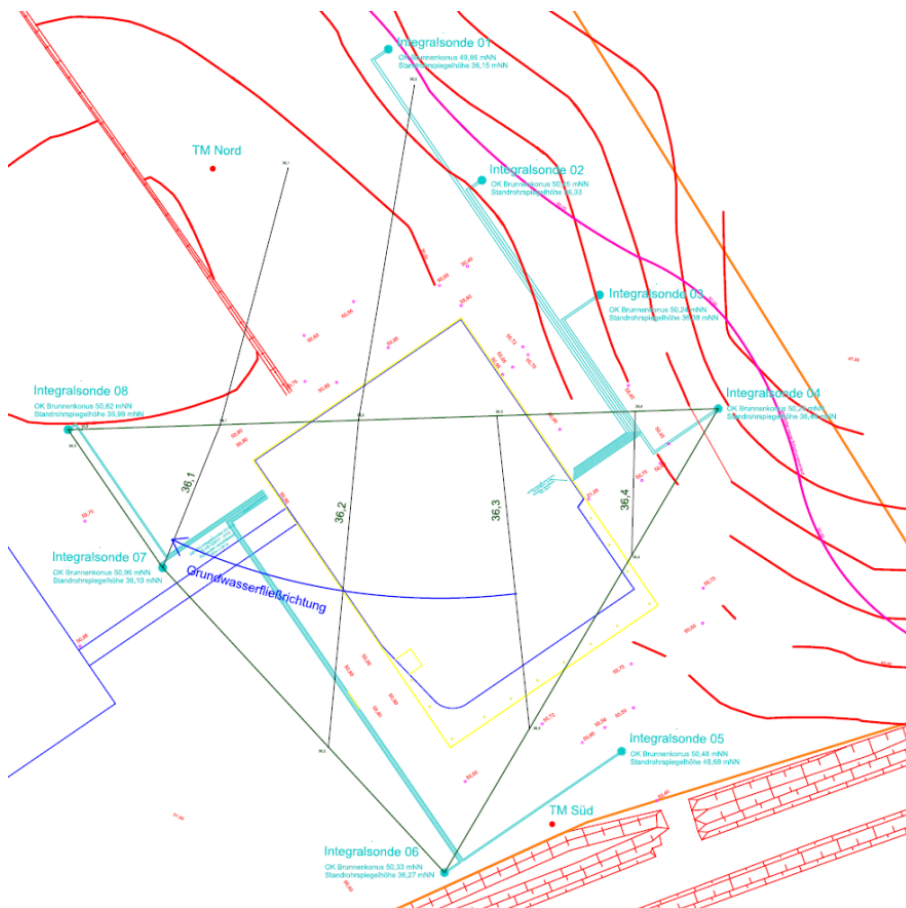


Abbildung 43: Hydraulischer Gradient des ungestörten Strömungsfeldes am Standort

Im Zusammenhang mit der Probebohrung wurde am 8. März 2013 im ausgebauten Brunnen eine Standrohrspiegelhöhe von 14,43 m unter Geländeoberkante gemessen. Dies entspricht einer absoluten Höhe von 35,57 m NN. Da diese Höhe im Niveau der erbohrten bindigen Deckschicht liegt, ist das Grundwasser gespannt. Die Oberkante dieses Grundwasserleiters liegt im Mittel bei 24 m NN, so dass auch bei Niedrigwasserstand eine vollständige Wassersättigung des Grundwasserleiters gewährleistet ist.

An einer nahe gelegenen Grundwassermessstelle wurden im Jahr 2012 im Jahresgang bezogen auf den gleichen Grundwasserleiter Schwankungen der Grundwasserdruckhöhe zwischen 36,6 und 38,1 mNN gemessen. Die mittlere Standrohrspiegelhöhe, gemessen in den ausgebauten Brunnen, betrug 36,2 m NN.



### **Ungestörte Untergrundtemperatur:**

Zwischen dem 7.03.2013 und dem 10.03.2013 waren die durch einen Datenlogger in 37 m Tiefe während eines Pumpversuches aufgezeichneten Temperaturen konstant und betragen 8,86 °C. In 18 m Tiefe unter Gelände wurden durch die dort installierten Datenlogger Temperaturen von 8,89 °C gemessen. Es wird angenommen, dass die gemessenen Temperaturen repräsentativ für den gesamten Grundwasserleiter im Einflussbereich der projektierten Erdwärmeanlage und vom Jahresgang der Lufttemperatur weitgehend unbeeinflusst sind. Bei der Inbetriebnahme wurde eine Temperatur von 9,1 °C aufgezeichnet.

### **Modellaufbau FEFLOW 6.2:**

- Grundwasserströmungsmodell

Das Zentrum der projektierten Integralsondenanordnung wurde innerhalb der Modellfläche unter Berücksichtigung des hydraulischen Gradienten so festgelegt, dass in Abstromrichtung des Grundwassers genügend Modellfläche zur Verfügung steht. Zusätzlich wurde eine ausreichend große Ausdehnung des Simulationsmodells gewählt, um numerische Randeinflüsse weitestgehend zu vermeiden. Die Ausdehnung des Modells beträgt 500 m x 650 m.

Die Integralsonden wurden vermessen und entsprechend ihrer Lage gemeinsam mit den Temperaturmessstellen im Grundwasseranstrom und -abstrom der Anlage in die Modellgeometrie integriert. Das Finite-Elemente-Netz wurde mit 352526 Tetraeder-Elementen aufgebaut, wobei sichergestellt wurde, dass im Nahbereich der Integralsonden besonders engmaschige und gleichmäßige Maschen generiert wurden (siehe Abb. 44).

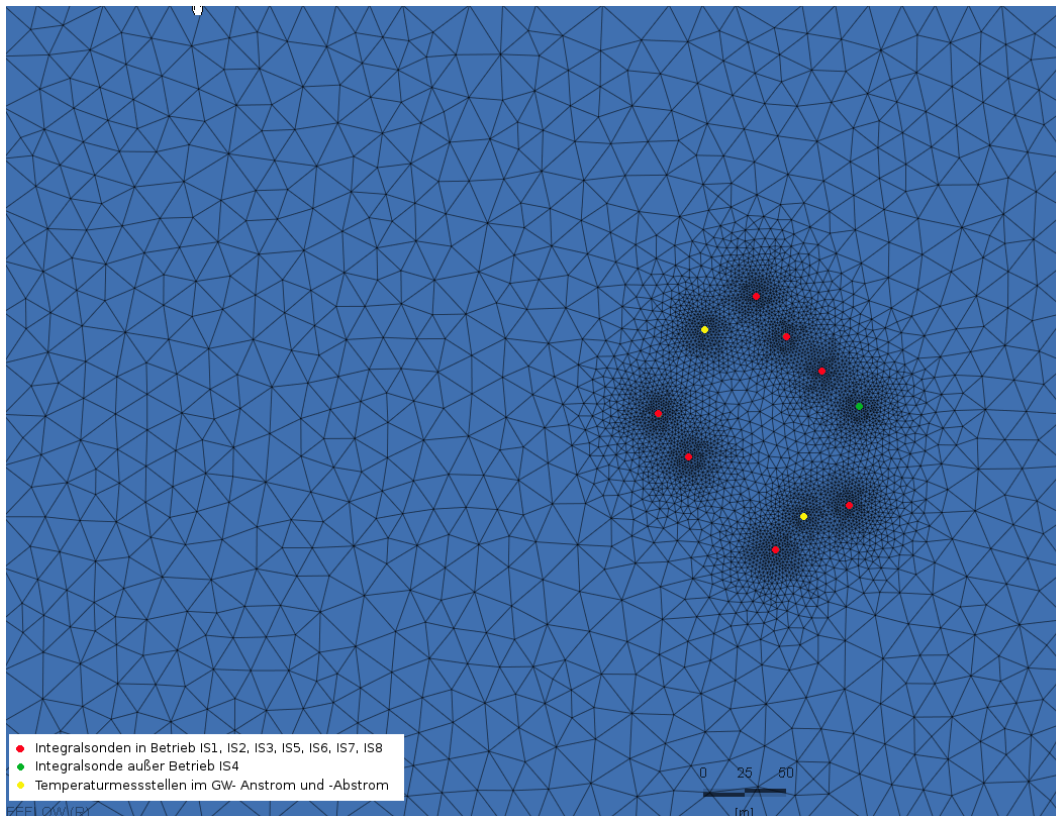


Abbildung 44: Finite-Element-Netz des Modells mit Anordnung der Integralsonden und Temperaturmessstellen

Ein vereinfachtes geologisches Modell konnte anhand der Schichtenverzeichnisse der Probebohrung, der Erdwärmesondenbohrung und der Integralsondenbohrungen erstellt werden. Vorhandene Bohrprofile aus nahegelegenen Bohrungen, die sich ebenfalls im Modellgebiet befinden und vom geologischen Landesamt zur Verfügung gestellt wurden, sind mitberücksichtigt worden. Die Aufteilung des Modells in der Vertikalen erfolgte in 3 geologischen Schichten, mit der die bindige Deckschicht ab 13 m u. GOK, der Grundwasserleiter und eine Schluffschicht als Modellbasis bis in 80 m u. GOK abgebildet werden. Weitere Zwischenschichten unterteilen die jeweiligen Modellschichten, sodass insgesamt 38 Schichten und 39 Zwischenschichten das Modell aufbauen. Die feine vertikale Auflösung der Schichten ergibt sich aus den geometrischen und numerischen Anforderungen an das Modellgitter, wobei insbesondere in der Vertikalen im Profilabschnitt des Nutzgrundwasserleiters (Lage der Filterstrecken) die Modellschichtung feiner aufgelöst wurde (siehe Abb. 45 und Tabelle 11).

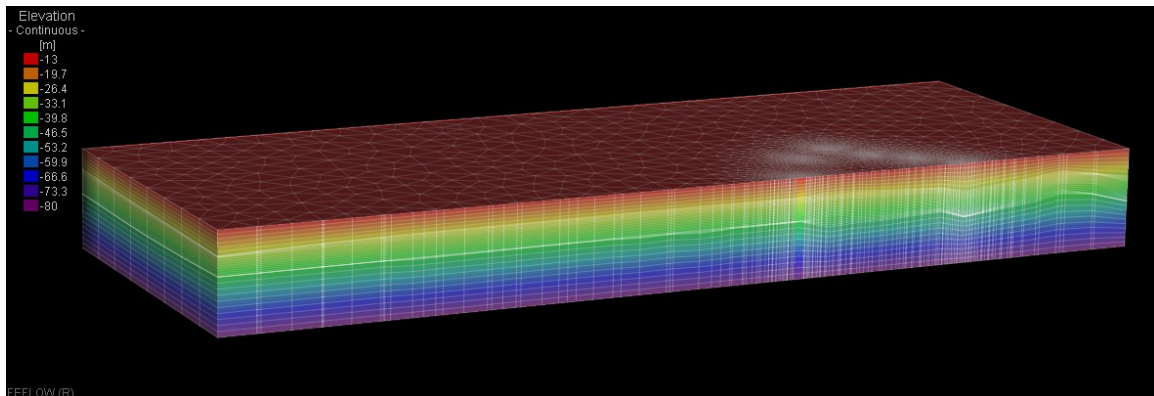


Abbildung 45: 3D-Simulationsmodell

Das Modell besteht aus einem im Mittel ca. 17 m mächtigen Nutzgrundwasserleiter, der zum Hangenden und zum Liegenden durch eine gering durchlässige Lockergesteinschicht begrenzt wird.

Tabelle 11: Generalisierte Schichtenfolge geologisches Modell

Teufe m u. GOK	Teufe m NN	Lockergestein	Hydraulische Durchlässigkeit $k_f$
13 bis 26	37 bis 24	Deckschicht Geschiebemergel	$1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s
26 bis 49	24 bis 1	Nutz-GWL Mittelsand/ Feinsand	$2,2 \cdot 10^{-4}$ m/s
49 bis 80	1 bis -30	Modell Basisschicht Schluff	$1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s

Um im Modell die unbeeinflusste Grundwasserströmung zu erzeugen, wurde dem Anstromrand eine Grundwasserdruckhöhe von 13,30 m u. GOK und dem Abstromrand eine Grundwasserdruckhöhe von 15,79 m u. GOK als Randbedingung 1. Ordnung zugewiesen. Die sich hierdurch im ganzen Modell einstellenden Druckhöhen wurden als Initialwerte übernommen. Im Zentrum der Integralsondenanordnung stellt sich eine unbeeinflusste Druckhöhe von ca. 13,9 m u. GOK ein.

Das Modell wurde den natürlichen Verhältnissen entsprechend als „gespannt“ definiert. Hydraulisch ist das Modell an der Modellbasis sowie an den Seiten dicht. Der Abstromrand ist offen. So kann das Wasser in dem Maße, wie es dem Modell am Anstromrand zufließt, mit dem Grundwasserstrom frei aus dem Modell ausfließen. Die stationär berechnete Druckhöhenverteilung dient als Druckhöhenverteilung zum Zeitpunkt  $t_0$  für die anschließende instationäre Simulation.

Insbesondere im Niveau der Filterstrecken wurden hydraulische Durchlässigkeiten im Modell mitberücksichtigt, die mittels Siebkornanalysen aus Bohrproben bestimmt wurden. Die hydraulischen Leitfähigkeiten der bindigen Schichten (Geschiebemergel) wurden geschätzt.

Ein wichtiger Eingabeparameter ist die Anisotropie in der hydraulischen Leitfähigkeit, die die Funktion einer Integralsonde wesentlich begünstigt. Die Anisotropie wurde mit dem Faktor 0,3 zwischen der horizontalen und vertikalen hydraulischen Leitfähigkeit berücksichtigt. Bindige Schichten mit einem Durchlässigkeitsbeiwert  $< 0,00001$  m/s wurden bezüglich deren hydraulischen Leitfähigkeit als isotrop betrachtet. Der spezifische Speicherkoeffizient im Modell für den Grundwasserleiter beträgt 0,0001 [1/m]. Sofern zu den Materialeigenschaften der jeweiligen Schichten keine genaueren Kenntnisse aus Felduntersuchungen vorlagen, wurden Literaturwerte bzw. Erfahrungswerte herangezogen.

- Wärmetransportmodell

Das 3-D-Grundwasserströmungsmodell wurde um den gekoppelten Wärmetransport erweitert. Thermisch ist das Modell an den Seiten und an Ober- und Unterfläche dicht, wobei ein Temperatureaustausch mit der gering durchlässigen Deck- und Basisschicht möglich ist. Das ungestörte Temperaturfeld wurde mit 9,1 °C festgelegt, der Temperatur, die initial zu Beginn des Temperatur-Monitorings aufgezeichnet wurde. Die Temperatur von 9,1 °C wurde dem gesamten Modell als Anfangsbedingung und am Anstromrand des Modells als ständiger Temperatureintrag (Randbedingung 1. Ordnung) zugewiesen.

Des Weiteren wurden im Modell die longitudinale Dispersivität  $\alpha_L$ , die transversale Dispersivität  $\alpha_T$ , die spezifischen Wärmekapazitäten, Wärmeleitfähigkeiten und effektiven Porositäten berücksichtigt. Gesamtporosität und durchflusswirksame Porosität wurden analog zum vorhergehenden Kapitel nach Helmbold (2002) resp. Lejbenson (1947) berechnet.

In der folgenden Tabelle 12 sind die Parameter des Modells aufgelistet.

Tabelle 12: Zusammenfassung der wichtigsten Eingangsparameter für den Grundwasserleiter

Modellparameter	
Teufenlage Top Nutzgrundwasserleiter [m u. GOK]:	26,0
mittlere effektive Mächtigkeit Nutzgrundwasserleiter [m]:	17,3
Hydraulische Leitfähigkeit $K_{xx}$ (Aquifer) [m/s]:	$2,22 \cdot 10^{-4}$
Hydraulische Leitfähigkeit $K_{yy}$ (Aquifer) [m/s]:	$2,22 \cdot 10^{-4}$
Hydraulische Leitfähigkeit $K_{zz}$ (Aquifer) [m/s]:	$0,66 \cdot 10^{-4}$
Anisotropiefaktor für vertikale hydraulische Leitfähigkeit (Aquifer)	0,3
Grundwasserdruckhöhe [m u. GOK]:	13,9
hydraulischer Gradient $i$ [-]:	0,0038
Schichttemperatur Nutzgrundwasserleiter [°C]:	9,1
Wärmeleitfähigkeit Matrix Aquifer [W/m · K]:	2,4

Wärmeleitfähigkeit Matrix Aquitard [W/m · K]:	2,4
Wärmeleitfähigkeit Fluid [W/m · K]:	0,65
Vol. Wärmekapazität Matrix Aquifer [MJ/(m <sup>3</sup> · K)]:	2,5
Vol. Wärmekapazität Matrix Aquitard [MJ/(m <sup>3</sup> · K)]:	2,5
Vol. Wärmekapazität Fluid [MJ/(m <sup>3</sup> · K)]:	4,2
Porosität [%]:	30
Longitudinale Dispersivität [m]:	5,0
Transversale Dispersivität [m]:	0,5

- Implementierung der Integralsonden

Die Filterstrecken der Integralsonden wurden dem Modell anhand der Multilayer-Well-Randbedingung zugewiesen. Die Filterstrecken der 7 Integralsonden liegen im Teufen-Niveau von 25,3 m bis 31,5 m u. Gelände (Einleitfilterstrecke) und von 32,7 m bis 42,9 m unter Gelände (Entnahmefilterstrecke) und wurden dem Modell entsprechend übertragen. Der Vertikalabstand zwischen den Filterstrecken beträgt 7,4 m. Ausnahmen: Der Vertikalabstand zwischen den Filterstrecken der IS1 beträgt 4,5 m und der der IS5 beträgt 5,4 m. Wegen des Integralsondenprinzips mit gleichen Entnahme- und Einleitwassermengen ändert sich im Modell infolge der Simulation an dem Grundwasserhaushalt nichts.

**Messdaten des Anlagenmonitorings zum Realbetrieb:**

Die realen Betriebsdaten wurden aus einer Betriebsparameteranalyse für den Zeitraum 30.11.2016 bis 01.01.2018 ermittelt. Für diesen Zeitraum wurden die aufgezeichneten Grundwassertemperaturen, die Temperaturdifferenzen zwischen dem Vor- und Rücklauf sowie die Durchflüsse ausgewertet und die dem Untergrund entzogenen (winterlicher Heizbetrieb) und zugeführten (sommerlicher Kühlbetrieb) Wärmemengen in kWh berechnet.

Der Realbetrieb weist eine stark unausgewogene Bilanz mit einem Überschuss der Heizenergiemenge auf. Durch den geringeren Kühlbedarf wird der Untergrund im Vergleich zur Planung nur wenig thermisch regeneriert. Dennoch ergeben sich gemessene Temperaturmaxima und Temperaturamplituden ähnlich der in der Planungssimulation ermittelten Grenztemperaturen. Im Realbetrieb wird eine Abkühlung des Grundwassers auf 4,3 °C infolge des Heizbetriebs nicht unterschritten. Im Kühlbetrieb wird eine Erwärmung des Grundwassers überwiegend bis 14 °C erreicht (siehe Abb. 46 bis 49). Sehr kurzzeitige gemessene höhere Temperaturen resultieren aus Temperaturmessungen zum Zeitpunkt einer sehr kurzen Schaltung der Grundwasserpumpe. Gemessen wird in solchen Fällen durch Raumtemperatur erwärmtes Wasser in den Leitungen.



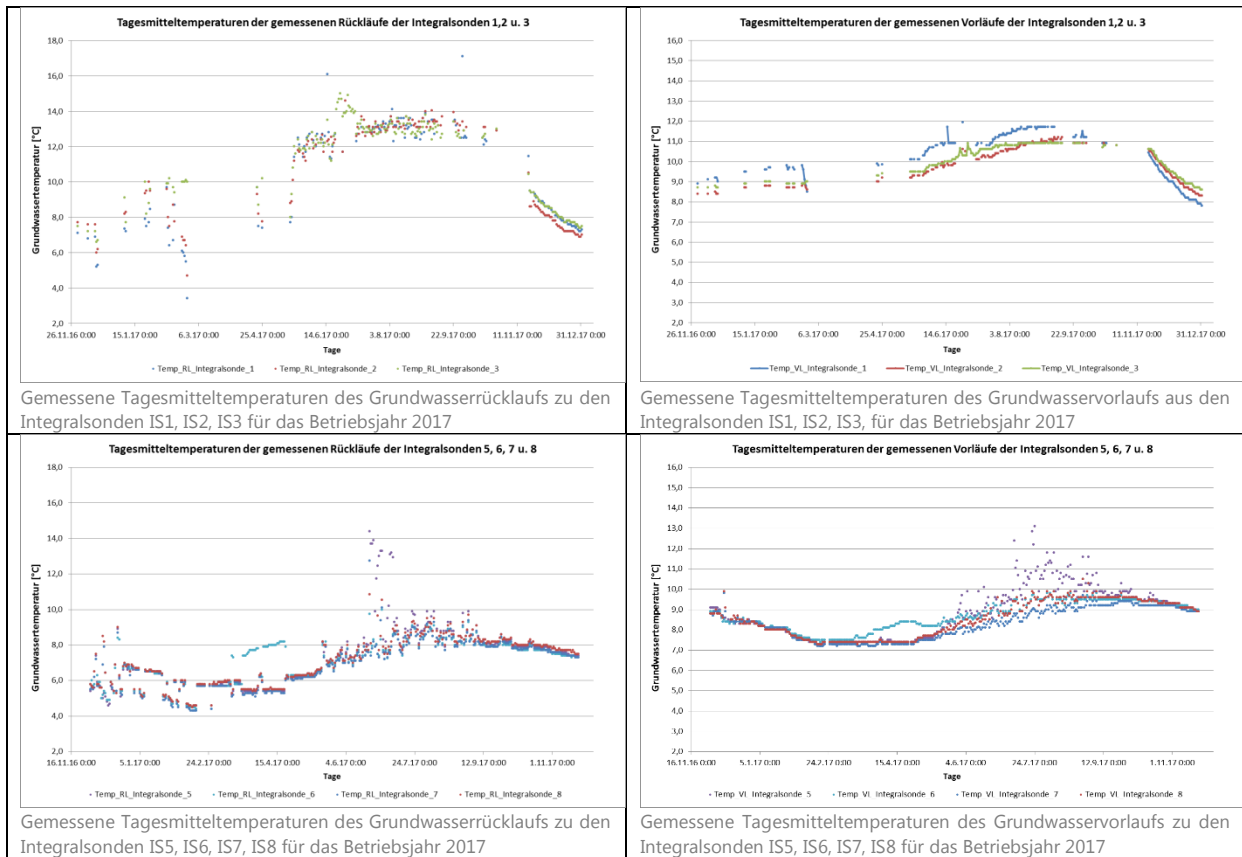


Abb. 46-49: Gemessene Tagesmitteltemperaturen in Vor- und Rücklauf der 7 Sonden

### Simulationsergebnis:

Um den thermischen Impact auf den Grundwasserleiter bei realem Anlagenbetrieb zu explorieren, wurde der Betrieb der Anlage mit realen Betriebsdaten des Nutzungsjahres 2017 simuliert und basierend auf diesen Nutzungsdaten eine Prognose für den thermischen Impact für die folgenden 20 Jahre erarbeitet.

Die im realen Anlagenbetrieb entzogenen und zugeführten Wärmemengen weichen vom ursprünglich geplanten Anlagenbetrieb ab. So wurden im Betriebsjahr 2017 dem Grundwasserleiter statt 308 MWh ca. 278 MWh Wärme entzogen und statt 384 MWh lediglich rund 50 MWh an Wärme zugeführt. Auch die Betriebsparameter Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf und der Durchfluss weichen vom geplanten Betrieb ab.

Die sieben Integralsonden am Standort sind in zwei Gruppen aufgeteilt, von denen jede an eine Wärmepumpe gekoppelt ist. Die beiden Wärmepumpen werden mit voneinander abweichenden Lasten betrieben. Die Integralsonden 1 bis 3 sind der Wärmepumpe 1 zugeschaltet und die Integralsonden 5 bis 8 der Wärmepumpe 2. Eine Integralsonde Nr. 4 – ursprünglich geplant – wurde nicht realisiert.

Für den Betriebszeitraum vom 30.11.2016 bis 01.01.2018 ergeben sich simulierte Vorlauftemperaturen je Integralsonde, die sich mit den gemessenen Vorlauftemperaturen weitestgehend decken (siehe Abb. 50 und 51).

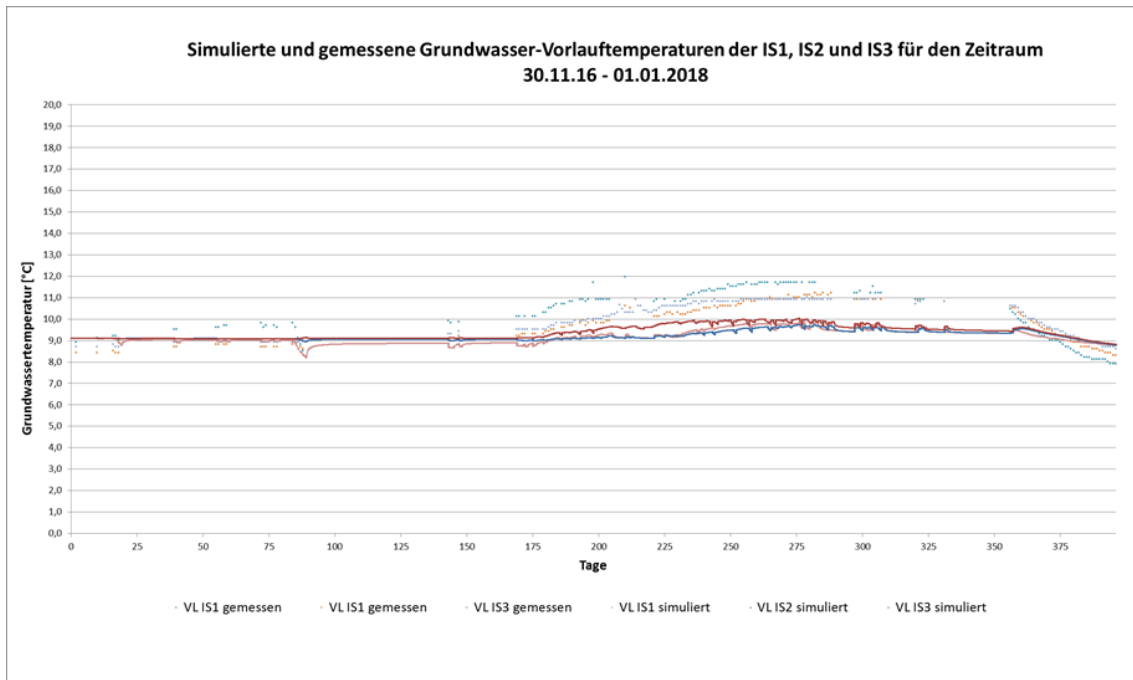


Abbildung 50: Vgl. gemessene und simulierte Temperaturen des Grundwasservorlaufs aus den Integralsonde IS1, IS2 und IS3 für den Betriebszeitraum 30.11.2016 bis 01.01.2018

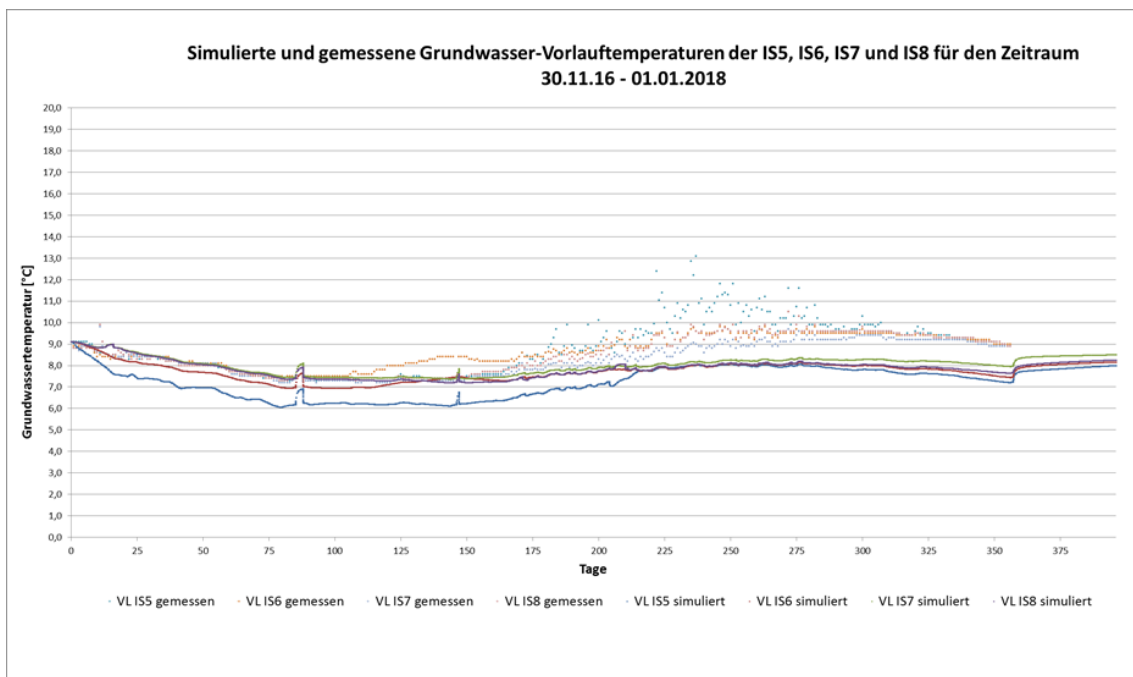


Abbildung 51: Vgl. gemessene und simulierte Temperaturen des Grundwasservorlaufs aus der Integralsonde IS5, IS6, IS7 und IS8 für den Betriebszeitraum 30.11.2016 bis 01.01.2018

Die Mitteltemperaturen der gemessenen und simulierten Vorläufe der IS1, IS2 und IS3 sowie IS5, IS6, IS7 und IS8 weichen geringfügig um bis zu 1,3 Kelvin voneinander ab. Die Simulation berechnet für die Betriebszeit eine maximale Abkühlung auf 8,8 °C der Mitteltemperatur der Grundwasservorläufe der Gruppe 1 mit der IS1, IS2 und IS3 während der Heizperiode und eine maximale Erwärmung auf 9,8 °C zum Ende der Kühlperiode (siehe Abb. 52).



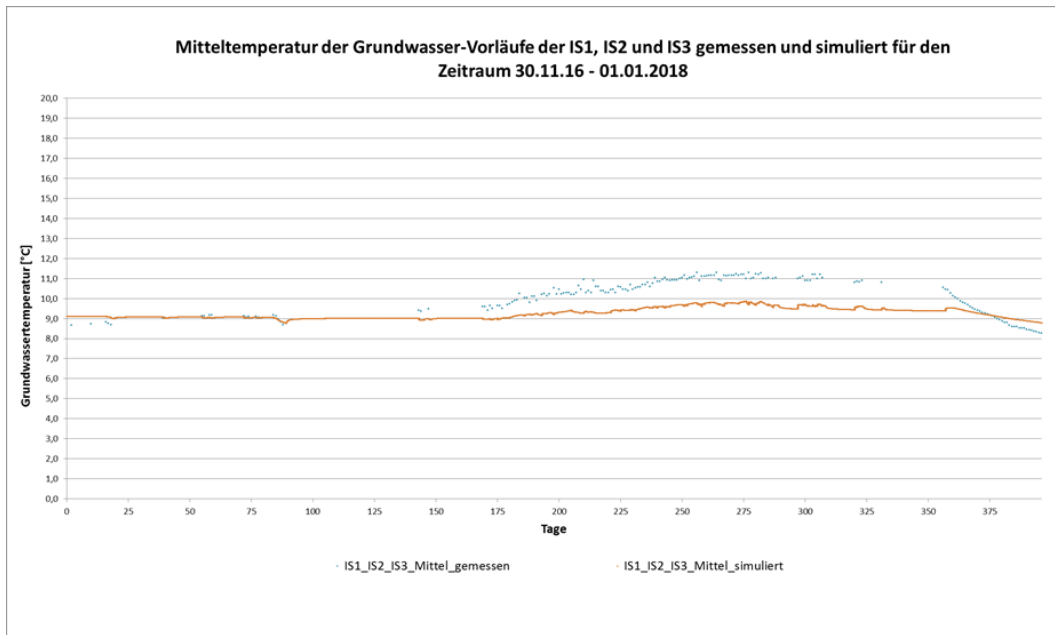


Abbildung 52: Gruppe 1 (IS1, IS2, IS3) Mitteltemperatur der Grundwasservorläufe gemessen und simuliert

Für die Gruppe 2 mit der IS5, IS6, IS7 und IS8 berechnet die Simulation für die Betriebszeit eine maximale Abkühlung auf 7,0 °C der Mitteltemperatur der Grundwasservorläufe während der Heizperiode und eine maximale Erwärmung auf 8,2°C zum Ende der Kühlperiode (siehe Abb. 53).

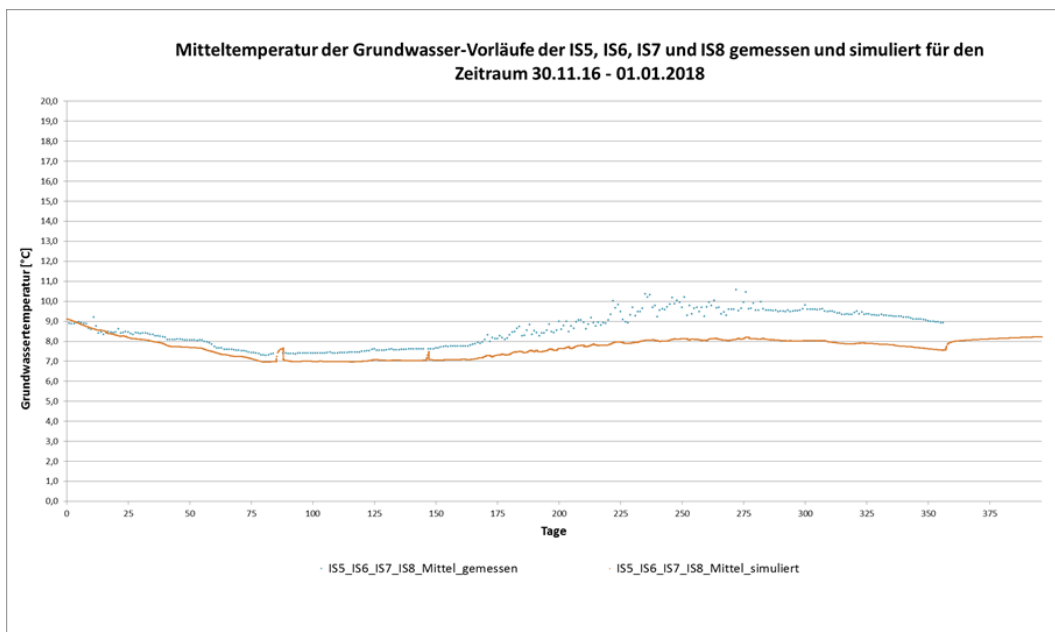


Abbildung 53: Gruppe 2 (IS5, IS6, IS7, IS8) Mitteltemperatur der Grundwasservorläufe gemessen und simuliert

Es wird angenommen, dass aufgrund der langen Leitungsführung der Anbindeleitungen durch das Gebäude mit dort vorherherrschenden Raumtemperaturen bis 20 °C das Förderwasser trotz der Wärmedämmung der Leitungen leicht erwärmt wird.

Der Energieentzug und der Energieeintrag sind über das Jahr entgegen der Planung nicht bilanziert. Im Betriebszeitraum vom 30.11.2016 bis 01.01.2018 bildeten die

Integralsonden IS5, IS6, IS7 und IS8 eine Kältefahne von maximal 70 m Länge im Tiefenbereich der wassergesättigten Sande in Grundwasserfließrichtung aus. In 29,5 m u. GOK, dem Teufenbereich, der thermisch am stärksten beeinflusst ist, erreicht der Bereich der Kältefahne, der  $\geq 1,5$  Kelvin im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur abgekühlt ist, eine maximale Länge von ca. 20 m. Der Bereich der Kältefahne, der  $\geq 1,0$  Kelvin im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur abgekühlt ist, erreicht eine maximale Länge von ca. 30 m (siehe Abb. 54).

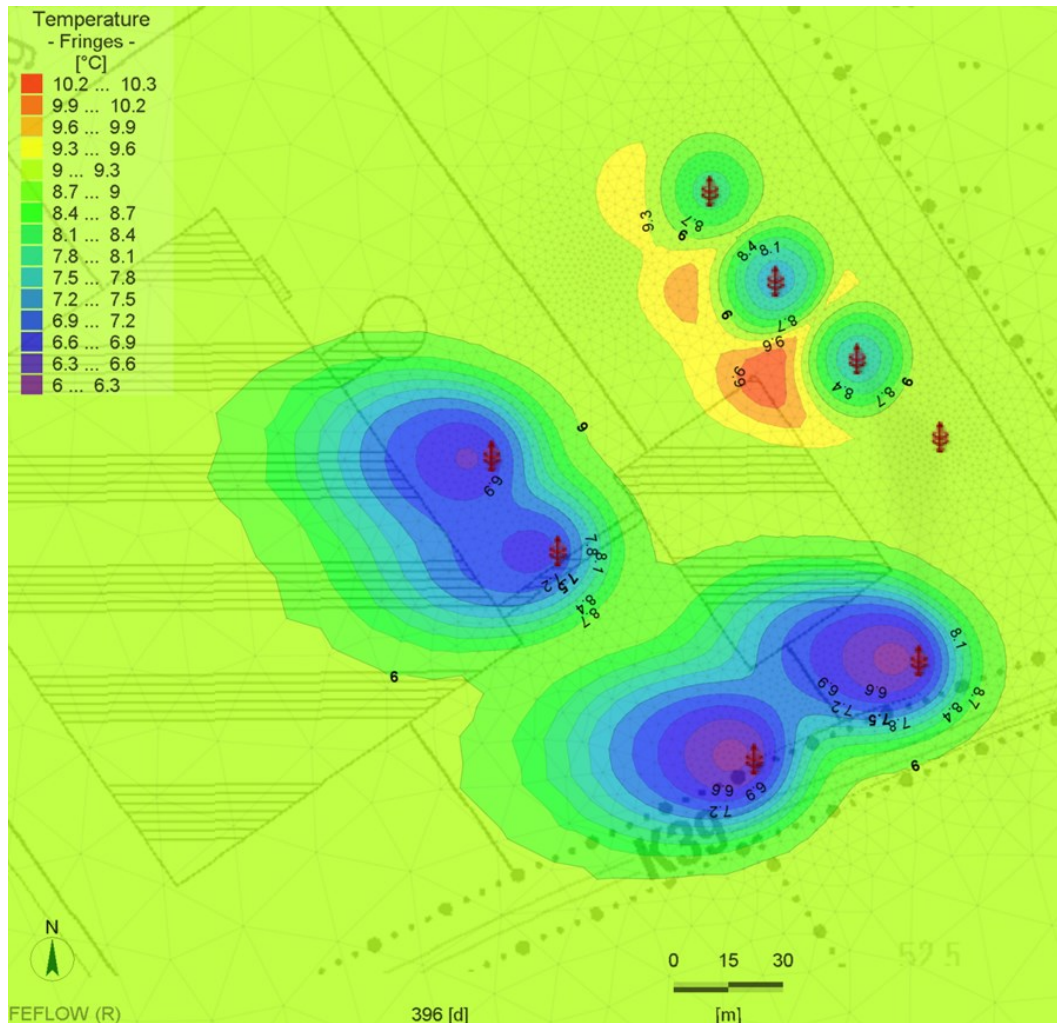


Abbildung 54: Temperaturverteilung im Grundwasserleiter nach 396 Tagen Anlagenbetrieb

Zur Untersuchung der langfristigen Temperaturverteilung im Grundwasserleiter wurde das Lastprofil für den Zeitraum 30.11.2016 bis 01.01.2018 auf 20 Jahre erweitert und die resultierenden Temperaturverteilungen im Grundwasserleiter erneut simuliert.

Die Simulation berechnet für 20 Jahre Betriebszeit eine maximale Abkühlung auf 8,9 °C der Mitteltemperatur der Grundwasservorläufe der Gruppe 1 mit der IS1, IS2 und IS3 während der Heizperiode und eine maximale Erwärmung auf 9,5 °C zum Ende der Kühlperiode (siehe Abb. 55).

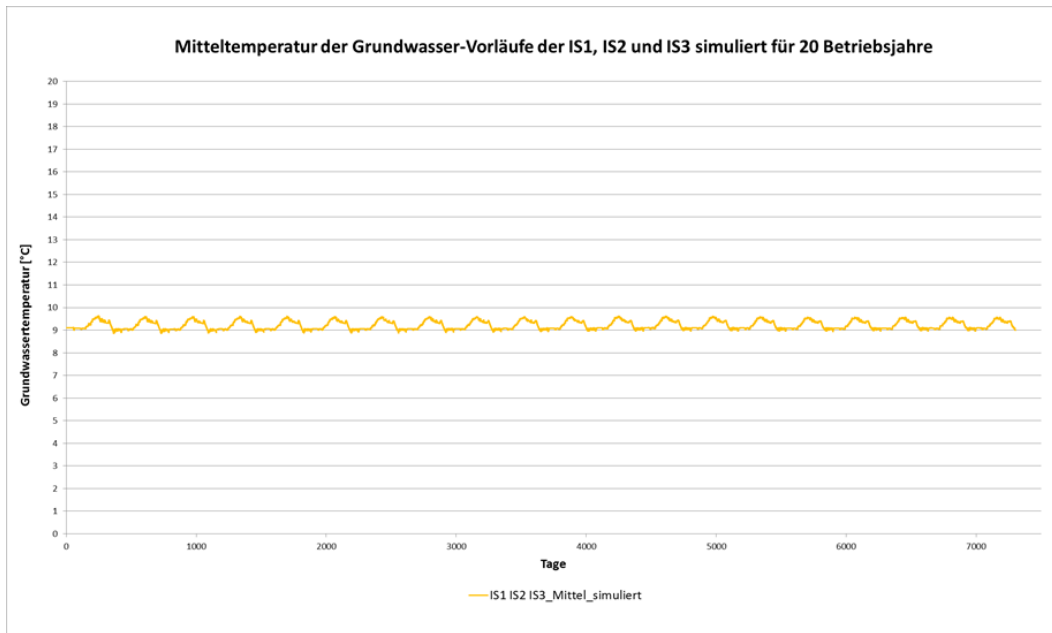


Abbildung 55: Temperaturverteilung im Grundwasserleiter nach 20 Jahren Anlagenbetrieb Gruppe 1

Für die Gruppe 2 mit der IS5, IS6, IS7 und IS8 berechnet die Simulation für die Betriebszeit von 20 Jahren eine maximale Abkühlung auf 6,3 °C der Mitteltemperatur der Grundwasservorläufe während der Heizperiode und eine maximale Erwärmung auf 8,2 °C zum Ende der Kühlperiode (siehe Abb. 56).

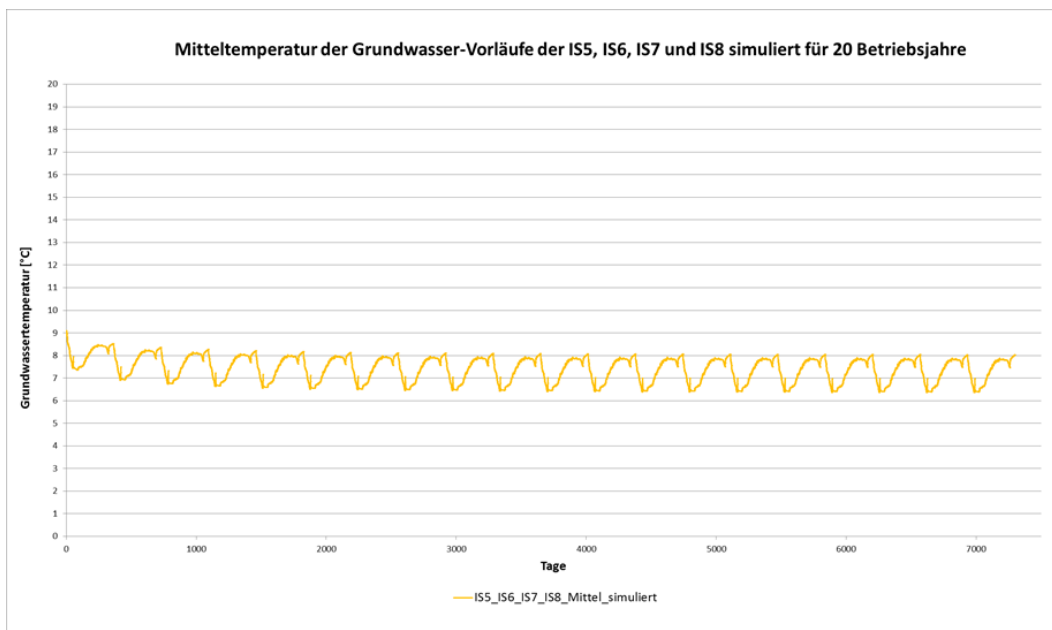


Abbildung 56: Temperaturverteilung im Grundwasserleiter nach 20 Jahren Anlagenbetrieb Gruppe 2

Nach 20 Jahren Anlagenbetrieb bilden die Integralsonden IS5, IS6, IS7 und IS8 eine Kältefahne von ca. 590 m Länge im Tiefenbereich der wassergesättigten Sande in Grundwasserfließrichtung aus. In 29,5 m u. GOK erreicht der Bereich der Kältefahne, der  $\geq 1,5$  Kelvin im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur abgekühlt ist, eine maximale Länge von ca. 215 m. Der Bereich der Kältefahne, der  $\geq 1,0$  Kelvin im Vergleich

zur ungestörten Untergrundtemperatur abgekühlt ist, erreicht eine maximale Länge von ca. 300 m (siehe Abb. 57).

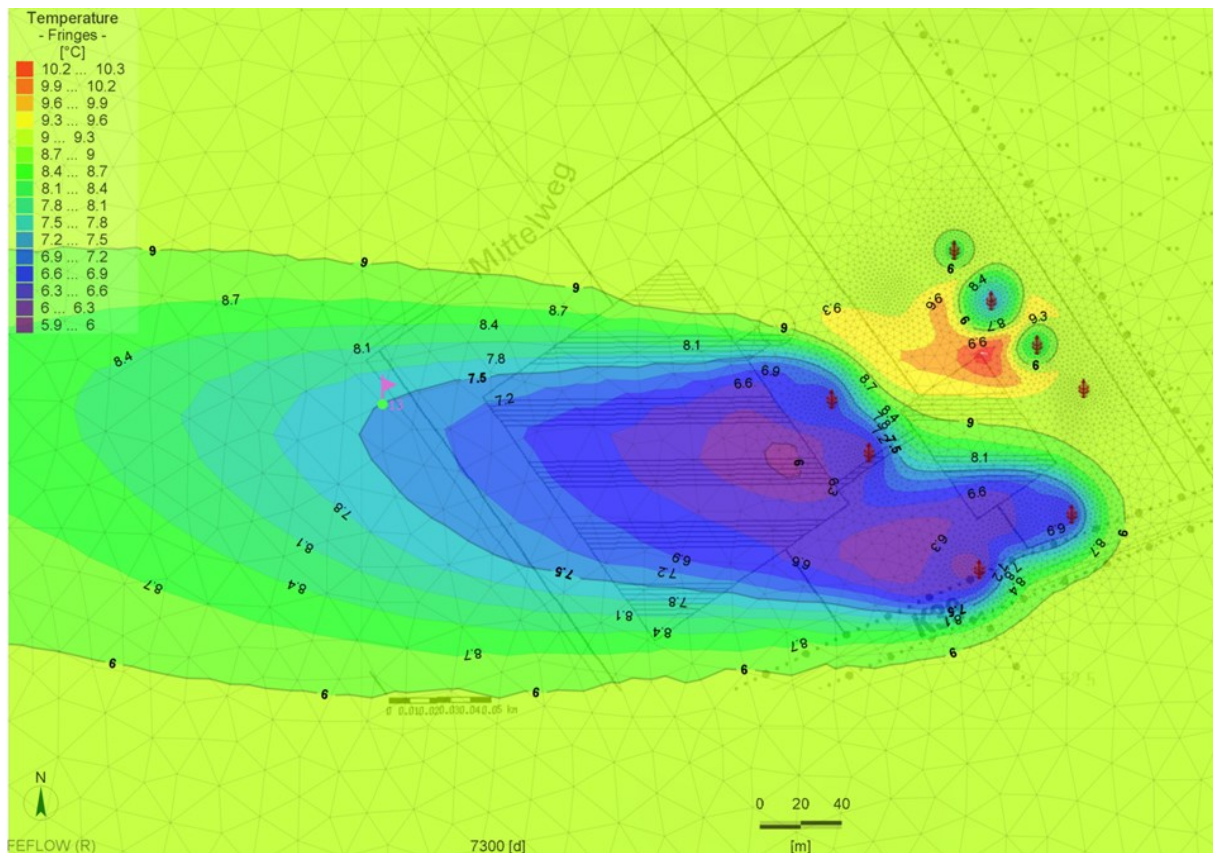


Abbildung 57: Temperaturverteilung im Grundwasserleiter nach 20 Jahren Anlagenbetrieb

An der abstromigen Grundstücksgrenze wurde in einer Tiefe von 29,5 m im Modell ein Beobachtungspunkt implementiert. Der Beobachtungspunkt liegt 223 m von der Integralsonde 8 entfernt.

An der Grundstücksgrenze wird das Grundwasser im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur maximal um 1,6 Kelvin abgekühlt (siehe Abb. 58).

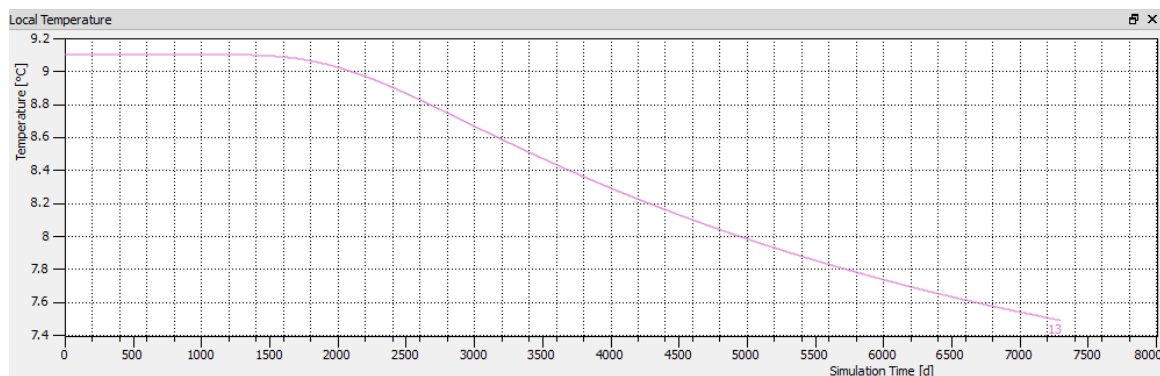


Abbildung 58: Temperaturentwicklung an der Grundstücksgrenze im Grundwasserabstrom



Das Ergebnis zeigt, dass die Temperaturänderungen durch den Anlagenbetrieb nicht maßgeblich über die Grundstücksgrenze hinausreichen. Nachbargrundstücke werden nach diesen Ergebnissen durch die Geothermieanlage nicht negativ beeinflusst.

Wird die Geothermieanlage weiterhin auf gleiche Art und Weise betrieben wie bisher, ergeben sich im Grundwasser für die Gruppe 1 mit den Integralsonden IS1, IS2, und IS3 minimale Temperaturen im Rücklauf bis 6,5 °C. Für die Gruppe 2 mit den Integralsonden 5 bis 8 ergeben sich minimale Temperaturen im Rücklauf bis 3,6 °C nach 20 Jahren Betriebszeit. Ursache ist die erwähnte unausgewogene Bilanz in Richtung Heizenergiemenge, die nach der Planung nicht vorgesehen war. Durch den geringeren Kühlbedarf wird der Untergrund im Vergleich zur Planung zu wenig thermisch regeneriert.

Durch eine in 2018 realisierte Umverteilung der Lasten von der Gruppe 2 auf die Gruppe 1 kann trotz stark unausgewogener Bilanz in Richtung Heizenergiemenge dennoch die Anlage betrieben werden, ohne dass die für diesen Standort relevanten Grenztemperaturen ( $\pm 3\text{K}$  Abweichung gegenüber der ungestörten Ausgangstemperatur, gemessen an der Grundstücksgrenze) langfristig über- bzw. unterschritten werden. Mit dem hier aufgesetzten Monitoring sowie dem Simulationsmodell lässt sich zukünftig einfach und schnell überprüfen, ob der Realbetrieb unsere hier aufgestellten Thesen bestätigt.

### 1.2.9 Leistungspumpversuch am Bsp. Berlin-Charlottenburg

Schwerpunkt der Entwicklung optimierter Diagnoseprogramme für Planung, Bau und Inbetriebnahme neu zu errichtender Integralsonden war die Durchführung und Bewertung eines Stufenpumpversuches in Kombination mit einer Probennahme dergestalt, dass zum einen die zu erwartende Brunnencharakteristik, und damit die Auslegung und Dimensionierung, besser berechnet werden kann, gleichzeitig aber auch die hydraulischen Eigenschaften des Untergrunds und die Beschaffenheit des Grundwassers gemessen werden können.

Durchgeführt wurde dieser kombinierte Pumpversuch im Rahmen einer in der Planungsphase einer geplanten neuen Geothermie-Brunnenanlage am Standort Berlin Charlottenburg durchgeführten Probebohrung. Um die hydrochemischen und mikrobiologischen Verhältnisse im Umfeld der Bohrung zu charakterisieren wurden zunächst aus verschiedenen Bohrteufen Grundwasserproben genommen und analysiert. Dabei wurden die Bohrtiefen so gewählt, dass diese in etwa den späteren Tiefen der Filterstrecken entsprechen. Im Anschluss an diese Probennahmen wurde der dreistufiger

Pumpversuch mit weiteren Probennahmen durchgeführt. So sollte es möglich sein, sowohl im Nah- als auch im Mittel- und Fernbereich um den zukünftigen Brunnen mögliche hydrochemische Reaktionen und Prozesse voraus zu sagen.

Am Standort wurden dazu in 14 bis 16 m Tiefe u. GOK und in 42 bis 44 m u. GOK die temporären Filterstrecken beprobt. Dabei zeigte sich, dass sich das Wasser im Bereich der oberen Filterstrecke am Übergang von der mangan- zur eisenreduzierenden Zone befindet. Dafür sprechen Gehalte von 0,6 mg/L Eisen, welche an der unteren Filterstrecke mit 0,2 mg/L deutlich geringer ausfallen. Hinzu kommt ein Redoxpotential von 142 mV  $E_H$ , welches eher für die Eisen reduzierende Zone spricht. An der unteren Filterstrecke liegt das Redoxpotential im Bereich zwischen 36 mV (vor dem Pumpversuch) und zwischen 70 und 62 mV  $E_H$  im Nah-, Mittel- und Fernbereich um die temporäre Filterstrecke und damit ebenfalls kennzeichnend für die eisenreduzierende Zone. Mit Sauerstoffgehalten unter 0,05 mg/L (untere Nachweisgrenze des Messgeräts) und Eisenkonzentrationen zwischen 3,8 – 5,3 mg/L muss eine Sauerstoffzufuhr unbedingt vermieden werden. Da sich die hydrochemischen Milieus der beiden Filterteufen jedoch sonst nicht gravierend unterscheiden, wäre der Betrieb an diesem Standort möglich. Eine Versetzung der oberen Filterstrecke um ca. 5 m tiefer sollte dazu führen, dass beide Filterstrecken sicher in der eisenreduzierenden Zone liegen und das Risiko einer Verockerung dadurch weiter minimiert wird.

Die mikrobiologischen Proben zeigen, dass sich die Häufigkeit der untersuchten Bakterien mit zunehmender Tiefe nicht verändert. Eubakterien wurden im Schnitt mit  $10^5$  Genkopien/mL detektiert, die Eisenreduzierer *Rhodoferrax* mit  $10^4$  Genkopien/mL, *Gallionella* mit  $10^2$  -  $10^3$  Genkopien/mL, *Geothrix* mit  $10^2$  Genkopien/mL und SRB mit  $10^4$  Genkopien/mL.

Die Auswertung des Pumpversuchs erfolgte unter der Voraussetzung eines zum Hangenden und zum Liegenden unvollkommenen Brunnens mit einer 2m-Filterstrecke, die eine Grundwasserbedeckung von etwa 40 m über der Unterkante der Filterstrecke aufwies.

Der temporäre Ausbau der Probebohrung mit kurzen Filterstrecken erfolgte primär zur Gewinnung teufenorientierter Grundwasserproben und erfüllt somit nicht die Anforderungen an einen Brunnen für eine einwandfreie Pumpversuchsauswertung. Dennoch wurden bei der Beprobung des unteren Filters die Absenkungsbeträge zu drei unterschiedlichen Pumpstufen gegen die Laufzeit gemessen und es wurde versuchsweise eine Auswertung vorgenommen. Anhand verschiedener Methoden wurden die folgenden Ergebnisse ermittelt:

Tabelle XIII: Ergebnisse des Pumpversuchs Marburger Straße, Berlin.

	<b>T [m<sup>2</sup>/s]</b>	<b>K<sub>f</sub> [m/s]</b>	<b>S [-]</b>
Thiem	5,3*10 <sup>-4</sup>	1,3*10 <sup>-5</sup>	
Theis	3,4*10 <sup>-4</sup>	8,3*10 <sup>-6</sup>	3,4*10 <sup>-2</sup>
Theis Wiederanstieg	1,0*10 <sup>-3</sup>	2,6*10 <sup>-5</sup>	
Cooper & Jacob	3,5*10 <sup>-4</sup>	8,7*10 <sup>-6</sup>	2,2*10 <sup>-2</sup>
<b>Mittelwert</b>	<b>5,6*10<sup>-4</sup></b>	<b>1,4*10<sup>-5</sup></b>	<b>2,8*10<sup>-2</sup></b>

Da die Absenkungsbeträge ausschließlich im Brunnen selbst gemessen werden konnten, wird den Ergebnissen aus den Verfahren nach Theis Wiederanstieg und Thiem, die unter dieser Voraussetzung die geringeren Fehleranfälligkeit haben, am ehesten vertraut. Daher wird der aus den Ergebnissen dieser Verfahren gebildete Mittelwert als Pumpversuchsergebnis konstatiert.

Der durch die Pumpversuchsauswertung ermittelte  $k_f$ -Wert von  $2 \cdot 10^{-5}$  m/s ist deutlich kleiner als der mittlere  $k_f$ -Wert von  $8,9 \cdot 10^{-5}$  m/s, wie er nach Standardverfahren ausgewerteten Siebkornanalysen ermittelt wurde. Auch die manuelle Ansprache der am Bohrplatz zusätzlich ausgelegten Bohrproben führte zu der Einschätzung, dass der nach der Pumpversuchsauswertung ermittelte  $k_f$ -Wert deutlich zu klein ist, denn die Bohrproben trockneten gut und waren rieselfähig.

Bei der Auswertung des Pumpversuchs kommt die große Grundwasserbedeckung oberhalb der Filterunterkante zum Tragen, die zur Mächtigkeit des Grundwasserleiters beiträgt und daher in die Berechnung eingeht. Das ist insofern in Frage zu stellen als bei Annahme einer vorwiegend horizontalen Anströmung der Filterstrecke die Profilabschnitte oberhalb und unterhalb der Filterstrecke an Bedeutung verlieren, was auch für die Pumpversuchsauswertung von Bedeutung ist.

Daher wurde in diesem Fall der mittlere  $k_f$ -Wert aus den Siebkornanalysen als Maß genommen, so dass über die Verringerung der Mächtigkeit als Eingangswert für die Pumpversuchsauswertung eine Annäherung an den hier maßgebenden  $k_f$ -Wert erfolgte. Erst bei einem als hydraulisch relevant konstatierten Profilabschnitt von etwa 6,2 m Mächtigkeit erhält man bei der Pumpversuchsauswertung über die Transmissivität einen  $k_f$ -Wert, dessen Wert gleich dem mittleren Wert aus der Siebkornanalyse ist. Mit diesem Vorgehen, bei dem der durch die Siebkornanalyse ermittelte  $k_f$ -Wert maßgebend ist, erhält man eine Vorstellung von der Profilmächtigkeit des Nutzgrundwasserleiters, welche von der Grundwasserentnahme durch den unteren Filter hydraulisch beeinflusst ist. Die vermeintlich relevante Profilmächtigkeit des Entnahmeniveaus im Nutzgrundwasserleiter deckt sich gut mit dem projektierten Vertikalabstand der beiden Filterstrecken, der einen thermo-hydraulischen Kurzschluss im Nebengestein zwischen den Filterteufenlagen verhindern soll. Interessant, in diesem Projekt aus Zeitgründen aber



nicht mehr durchgeführt, wäre nun ein Abgleich dieses Werts mit berechneten Werten aus einer numerischen Simulation des Brunnenbetriebs.

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In Tabelle 14 sind die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises aufgeführt.

Tabelle 14: Auflistung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.

<b>Projektpartner</b>	<b>Betrag [EUR]</b>
Geo-En Energy Technologies GmbH (01LY1507A)	407.249
Technische Universität Berlin (01LY1507B)	215.705
<b>Summe aller Ausgaben</b>	<b><u>622.954</u></b>

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren in Hinblick auf die erzielten Ergebnisse notwendig.

## 4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die bis heute den Markt oberflächennaher geothermischer Systeme dominierenden geschlossenen Erdwärmesonden sind mit voranschreitender Erwärmung des Untergrundes – in Großstädten wie Berlin besonders ausgeprägt durch Ausbildung von Wärmeinseln - immer weniger geeignet für die passive Gebäudekühlung. Gebäudekühlung wird im innerstädtischen und speziell im Gewerbe- und Bürobereich jedoch einen zunehmend größer werdenden Anteil am Gesamtenergiebedarf einnehmen.

Dabei lässt sich das kosteneffiziente und nahezu CO<sub>2</sub>-emissionsfreie passive geothermische Kühlen von Gebäuden an vielen Standorten in Großstädten wie Berlin schon heute nur noch anteilig über Erdwärmesonden und i. d. Regel nur in Kombination mit aktiver Kühlung über weitere CO<sub>2</sub>-emittierende Verfahren realisieren.

Die in diesem Projekt weiter entwickelte und standardisierte Technologie der Integralsonde ist hingegen ein offenes, oberflächennahes geothermisches System, bei dem in einem Bohrloch Grundwasser entzogen, und nach seiner thermischen Nutzung wieder eingeleitet wird. Aufgrund ihrer Funktionsweise als Zirkulationsbrunnen ermöglicht die Integralsonde eine hocheffiziente geothermische Nutzung des Grundwassers. Die platzsparende Bauweise, der Verzicht einer Netto-Grundwasserentnahme und insbesondere – wie im Projekt in der Praxis mehrfach nachgewiesen – langfristig gleichbleibende Grundwassertemperaturen sind entscheidende Gründe für die Nachhaltigkeit und die auch zukünftig gegebene hervorragende Eignung zum Heizen und passiven Kühlen von Gebäuden im innerstädtischen Bereich. Im Rahmen dieses Projektes konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die hydrochemischen als auch die mikrobiologischen Prozesse und Veränderungen im Grundwasser durch den Betrieb der Integralsonde äußerst gering sind.

Mittel- bis langfristig ist zu erwarten, dass die Nutzung von oberflächennaher Geothermie deutlich zunehmen wird. In einer mehrere Prognoserechnungen und Analysen verschiedener Institute zusammenfassend bewertenden Studie des Fraunhofer IWES/IBP vom Februar 2017 zum Thema "Wärmewende 2030 - Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor" (Fraunhofer IWES/IBP 2017) wird deutlich, dass es zu einem massiven Einsatz von Wärmepumpen – insbesondere erdgekoppelter Erdwärmepumpen – zur Bereitstellung von Heizwärme im Gebäudebereich kommen muss, sollen die Ziele zur Reduktion von Emissionen im Gebäudebereich im Rahmen der Wärmewende bis 2050 realisiert werden. Neben Energieeinsparmaßnahmen weisen alle hierin aufgeführten Analysen Wärmepumpen als die zukünftige Schlüsseltechnologie aus.

Nimmt man diese Zahlen ernst – und nennenswerte Alternativen zu Wärmepumpensystemen werden in diesen Studien kaum genannt – so ist mit einer Vervielfachung (Faktor 10 bis 100) der jetzigen Anzahl von geothermischen Anlagen bzw. Bohrungen zu rechnen. Diese Aussage gilt, wenn es bei der momentanen Dominanz von geschlossenen Erdwärmesondensystemen mit Ihrer vergleichbar geringen Leistung pro Sonde bzw. Bohrung bleibt.

Wir gehen davon aus, dass sich während der Entwicklungen in den kommenden Jahren noch einmal verstärkt der große Vorteil der wesentlich höheren Leistung offener Systeme zeigen wird. Die oben genannte hohe Anzahl an neuen Bohrungen für Erdwärmesonden ist aus heutiger – wasserbehördlicher – Sicht wohl kaum vorstellbar. Offene Systeme,

speziell die Integralsonde mit Ihrer um den Faktor 10 und mehr höheren Leistung pro Bohrloch, könnten diese Zahl deutlich reduzieren.

Der gesellschaftlich/politische Druck nimmt weiter zu und findet sich in den aktuellen Regierungsprogrammen der Bundesregierung sowie der Länder und Kommunen immer stärker wieder. Beispielhaft sei hier noch einmal auf Berlin verwiesen, wo Geothermie politisch gefördert einen wesentlichen Beitrag zur Wärmewende beitragen soll - siehe dazu u.a. den Abschlussbericht „Neue Energie“ der Enquete-Kommission des Berliner Abgeordnetenhauses vom 3.11.2015 sowie das Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm 2030 (BEK 2030), verabschiedet am 20. Juni 2017 vom Senat.

Die Projektergebnisse finden Eingang in die Wirtschaftlichkeitskalkulationen zum System Integralsonde sowie in Produktbroschüren und Produktpräsentationen. Insbesondere die vielen Feldergebnisse und realen Betriebsdaten über mehrere Jahre belegen anschaulich die Effizienz, Stabilität und vielseitige Einsetzbarkeit von Integralsonden und schaffen dadurch Vertrauen bei Planern, Bauherren und auch Behörden. Darüber hinaus führt die Geo-En regelmäßige Anwenderforen durch, in denen Bauherren, TGA-Planer, Architekten, Anlagenbetreiber, Energieberater u.a. Interessierte bzgl. der möglichen Formen der Nutzung oberflächennaher Geothermiesysteme – auch in Kombination mit anderen erneuerbaren und konventionellen Energiewandlern – zum effizienten Heizen und Kühlen von Gebäuden und Quartieren geschult werden. Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse werden in die Schulungsinhalte aufgenommen und so an fachlich Interessierte weitergegeben.

Geo-En und TU streben in Zusammenarbeit mit weiteren wissenschaftlich/technologischen Partnern dieses Projekt ergänzende Untersuchungen, zum Beispiel im Rahmen eines Folgeprojektes, zu den möglichen Auswirkungen des Einsatzes von Grundwasserzirkulationsbrunnen in Bereichen erhöhter Hintergrundbelastung des Untergrunds und Grundwassers an. Es soll dabei u.a. untersucht werden, inwiefern die Integralsonde eine Möglichkeit darstellen kann, derart vorbelastete Standorte doch zukünftig auch geothermisch nutzen zu können, ohne die für die Trinkwassergewinnung genutzten Wasserressourcen dabei zu gefährden.

## 5. Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Die Zusammenarbeit zwischen der Geo-En als Planer, Erbauer und Betreiber des Systems Integralsonde und der TU Berlin als universitärer Einrichtung hat sich als sehr praxisnah und fruchtbar erwiesen und wurde, soweit uns bekannt ist, bisher für kein vergleichbares Geothermiesystem durchgeführt.

Unsere Betriebsanalysen und Simulationen zum "Thermal Impact" von Integralsonden bauen in Teilen auf den zwischenzeitlich publizierten Arbeiten des Forschungsvorhabens mit der Forschungskennzahl 371023204 mit dem Titel "Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung", durchgeführt und erstellt von C. Griebler et.al. (2015) im Auftrag des BMU, auf.

## 6. Verwendete Literatur und Projektpublikationen

### Verwendete Literatur:

- Appelo, C.A.J., Postma, D., 2013. *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2. ed., 10., corr. repr ed. CRC Press, Boca Raton, 649 pp.
- BEK 2030: Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm 2030
- Beretta, G.P., 2017. Groundwater recharge through wells in open loop geothermal system: Problems and solutions - part 1. *Acque Sott* 6 (2).
- Bonte, M., 2013. *Impacts of shallow geothermal energy on groundwater quality: a hydrochemical and geomicrobial study of the effects of ground source heat pumps and aquifer thermal energy storage*. Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam.
- Bonte, M., Stuyfzand, P.J., van den Berg, G.A., Hijnen, W.A.M., 2011. Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality and the consequences for drinking water production: A case study from the Netherlands. *Water Science & Technology* 63 (9), 1922.
- Brielmann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R., Lueders, T., 2009. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS microbiology ecology* 68 (3), 273–286.
- Crosby, H.A., Roden, E.E., Johnson, C.M., Beard, B.L. 2007. The mechanisms of iron isotope fractionation produced during dissimilatory Fe (III) reduction by *Shewanella putrefaciens* and *Geobacter sulfurreducens*. *Geobiol.* 5:169-189.
- Cullimore, D.R., McCann, A.E. 1978. The identification, cultivation and control of iron bacteria in ground water. In *Aquatic microbiology*. Skinner, F.A., Shewan, J.M. (eds). Academic, New York, pp 1-32.
- De Mendonca, M.B., Ehrlich, M., Cammarota, M.C. 2003. Conditioning factors of iron ochre biofilm formation on geotextile filters. *Can. Geotech. J.* 40:1225-1234.

- DVGW 2005: Technische Regel - Arbeitsblatt W 118: Bemessung von Vertikalfilterbrunnen. DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Bonn.
- European Geothermal Energy Council (Ed.), 2013. Field assessment of the impact of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) systems on chemical and microbial groundwater composition.
- Fraunhofer IWES/IBP 2017: Wärmewende 2030 - Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor
- Flemming, H.C. 1996. Economical and technical overview. In Microbially influenced corrosion of materials. Heitz, E., Flemming, H.C., Sand, W. (eds). Springer-Verlag, New York, pp. 6-14.
- Fujino, Y., Kawatsu, R., Inagaki, F., Umeda, A., Yokoyama, T., Okabe, Y., Iwai, S., Ogata, S., Ohshima, T., Doi, K. 2008. Thermus thermophilus TMY isolated from silica scale taken from a geothermal power plant. J. Appl. Microbiol. 104:70-78.
- García-Gil, A., Gasco-Cavero, S., Garrido, E., Mejías, M., Epting, J., Navarro-Elipé, M., Alejandre, C., Sevilla-Alcaine, E., 2018. Decreased waterborne pathogenic bacteria in an urban aquifer related to intense shallow geothermal exploitation. The Science of the total environment 633, 765–775.
- Gaylarde, C.C., Beech, I.B. 1988. Molecular basis of bacterial adhesion to metal, In Microbial corrosion. Sequeira, C.A.C., Tiller, A.K. (eds). Elsevier Applied Science, London and New York, pp. 20-28.
- Griebler, C., Brielmann, H., Haberer, C.M., Kaschuba, S., Kellermann, C., Stumpp, C., Hegler, F., Kuntz, D., Walker-Hertkorn, S., Lueders, T., 2016. Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. Environ Earth Sci 75 (20), 832.
- Griebler, C., Kellermann, C., Stumpp, C., Hegler, F., Kuntz, D., Walker-Hertkorn, S., 2015. Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften - Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung.
- Griffioen, J., Appelo, C.A.J., 1993. Nature and extent of carbonate precipitation during aquifer thermal energy storage. Applied Geochemistry 8 (2), 161–176.
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., Blum, P., 2013. Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. Energy Policy 59, 914–925.
- Hamilton, W.A., 1985. Sulphate-reducing bacteria and anaerobic corrosion. Annual review of microbiology 39, 195–217.
- Helmbold, F.: Beschreibung des Rechenprogrammes GWDREI, Programm zur Simulation der dreidimensionalen gesättigten Grundwassermengen- und Güteströmung, RWE Rheinbraun AG, unveröffentlicht (2002)
- Hem, J.D., Cropper, W.H., 1959. Survey of ferrous-ferric chemical equilibria and redox potentials. Chemistry of Iron in Natural Water 1459-A. U.S. Gov. Print. Off, Washington, D.C., 31 pp.
- Houben, G.J., 2003. Iron oxide incrustations in wells. Part 1: Genesis, mineralogy and geochemistry. Applied Geochemistry 18 (6), 927–939.
- Houben, G.J., 2006. The influence of well hydraulics on the spatial distribution of well incrustations. Ground water 44 (5), 668–675.

- Jesubek, A., Grandel, S., Dahmke, A., 2013. Impacts of subsurface heat storage on aquifer hydrogeochemistry. *Environ Earth Sci* 69 (6), 1999–2012.
- Kruseman, G.P., Ridder, N.A.d., 1994. Analysis and evaluation of pumping test data, 2. ed. (compl. rev.), repr ed. ILRI publication 47. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, 377 pp.
- Kwon, M.J., Sanford, R.A., Park, J., Kirk, M.F., Bethke, C.M., 2008. Microbiological response to well pumping. *Groundwater* 46 (2), 286–294.
- Lejbenson, L.S.: Die Bewegung natrlicher Flssigkeiten und Gase in porsen Medien (in Russisch). OGIS-Gostechisdat, Moskau (1947)
- Lienen, T., Lders, K., Halm, H., Westphal, A., Kber, R., Würdemann, H., 2017. Effects of thermal energy storage on shallow aerobic aquifer systems: Temporary increase in abundance and activity of sulfate-reducing and sulfur-oxidizing bacteria. *Environ Earth Sci* 76 (6), 403.
- Lovley, D.R., Phillips, E.J.P. 1986. Organic-Matter Mineralization with Reduction of Ferric Iron in Anaerobic Sediments. *Appl. Environ. Microbiol.* 51:683–689.
- Medihala, P.G., Lawrence, J.R., Swerhone, G.D.W., Korber, D.R., 2012. Effect of pumping on the spatio-temporal distribution of microbial communities in a water well field. *Water Research* 46 (4), 1286–1300.
- Navarro-Noya, Y.E., Suárez-Arriaga, M.C., Rojas-Valdes, A., Montoya-Ciriaco, N.M., Gmez-Acata, S., Fernández-Luqueo, F., Dendooven, L., 2013. Pyrosequencing analysis of the bacterial community in drinking water wells. *Microbial ecology* 66 (1), 19–29.
- Park, Y., Kim, N., Lee, J.-Y., 2015. Geochemical properties of groundwater affected by open loop geothermal heat pump systems in Korea. *Geosci J* 19 (3), 515–526.
- Pinto, A.J., Xi, C., Raskin, L., 2012. Bacterial community structure in the drinking water microbiome is governed by filtration processes. *Environ. Sci. Technol.* 46 (16), 8851–8859.
- Possemiers, M., Huysmans, M., Anibas, C., Batelaan, O., van Steenwinkel, J., 2016. Reactive transport modeling of redox processes to assess Fe(OH)<sub>3</sub> precipitation around aquifer thermal energy storage wells in phreatic aquifers. *Environ Earth Sci* 75 (8).
- Sand, W., Gehrke, T., 2003. Microbially Influenced Corrosion of Steel in Aqueous Environments. *Re/Views in Environmental Science and Bio/Technology* 2 (2-4), 169–176.
- Schippers, A., Reichling, J., 2006. Laboruntersuchungen zum Einfluss von Temperaturvernderungen auf die Mikrobiologie des Untergrundes. *Grundwasser* 11 (1), 40–45.
- Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und KlimaschutzBerlin, 2017. Erdwärmenutzung in Berlin: Merkblatt für Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren mit einer Heizleistung bis 30 kW außerhalb von Wasserschutzgebieten.
- Stroedter, J., 2015, Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Neue Energie für Berlin – Zukunft der energiewirtschaftlichen Strukturen“
- Stumm, W., Morgan, J.J. 1981. *Aquatic Chemistry*, 2nd edition. Wiley-Interscience, New York.



VDI, 2010. VDI Richtlinie 4640 Part 2 Thermal use of the underground: Ground source heat pump systems.

Wagner, R., Koch, M., Adinolfi, M., 1988. Chemische und biologische Prozesse in Aquifer-Wärmespeichern. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft 101. Oldenbourg, München, 106 pp.

Würdemann, H., Westphal, A., Kleyböcker, A., Miethling-Graff, R., Teitz, S., Kasina, M., Seibt, A., Wolfgramm, M., Eichinger, F., Lerm, S., 2016. Störungen des Betriebs geothermischer Anlagen durch mikrobielle Stoffwechselprozesse und Erfolg von Gegenmaßnahmen. Grundwasser 21 (2), 93–106.

### **Erfolgte und geplante Publikationen zum Projekt:**

04.2016: Posterpräsentation auf der Tagung der FH-DGG in Karlsruhe, Titel: „Effiziente Nutzung oberflächennaher Geothermie durch Zirkulationsbrunnen“, Autoren: Eva Dinkel, Traugott Scheytt

02.2017: Vortrag auf der Fachtagung GeoTherm in Offenburg, Titel: „Nutzung oberflächennaher Geothermie mittels Grundwasserzirkulationsbrunnen - Auswirkungen auf den Grundwasserleiter“, Autoren: Eva Dinkel, Josephin Schröder, Burga Braun, Winfried Reul, Alexander Meeder, Moritz Muhrbeck, Ulrich Szewzyk, Traugott Scheytt

04.2017: Vortrag auf dem Doktorandentreffen der FH-DGG in Erlangen, Titel: „Impact of Groundwater Circulation Wells for geothermal use on hydrochemical and microbiological processes in Berlin“, Autoren: Eva Dinkel, Traugott Scheytt

05.2017: Vortrag auf der 9. Norddeutschen Geothermietagung im Geozentrum Hannover, Titel: „Oberflächennahe Geothermie zum effizienten Heizen und Kühlen im – innerstädtischen – Quartier“, Autoren: Alexander Meeder, Winfried Reul, Moritz Muhrbeck

09.2017: Vortrag auf dem Deutschen Geothermiekongress 2017 in München, F 5.5, Titel: “Auswirkung von Grundwasserzirkulationsbrunnen zur geothermischen Nutzung auf die Grundwasserbeschaffenheit“, Autoren: Eva Dinkel, Alexander Meeder, Josephin Schröder, Burga Braun, Winfried Reul, Moritz Muhrbeck, Ulrich Szewzyk, Traugott Scheytt

12.2017: Publikation in der Fachzeitschrift Geothermische Energie Nr. 88, S 28/29, Titel: “Oberflächennahe Grundwasserzirkulationsbrunnen zur geothermischen Nutzung“, Autoren: Dinkel, E., Reul, W., Muhrbeck, M., Meeder, A., Braun, B., Szewzyk, U., Scheytt, T.

02.2018: Vortrag und PROCEEDINGS, 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, Titel: „Groundwater Circulation Wells for Geothermal Use: Preliminary Results of the Project Integralsonde Type II.“, Autoren: Dinkel, E., Braun, B., Muhrbeck, M., Meeder, A., Szewzyk, U., Scheytt, T.

03.2018: Vortrag “Grundwasserzirkulationsbrunnen zur Geothermischen Nutzung und deren Auswirkungen auf die Grundwasserbeschaffenheit” auf der Tagung der Fachsektion Hydrogeologie in der DGGV in Bochum, Autoren: Eva Dinkel, Traugott Scheyt

04.2018: Öffentlicher Projektworkshop “Nutzung oberflächennaher geothermischer Energie mittels Grundwasserzirkulationsbrunnen”, Berlin

06.2018: Publikation in der Fachzeitschrift bbr 06-2018, S 56-59, Titel: “Auswirkung von Zirkulationsbrunnen zur geothermischen Nutzung auf das Trinkwasser“, Autoren: Dinkel, E., A., Braun, B., Szewzyk, U., Scheytt, T., Reul, W., Muhrbeck, M., Meeder, A

06.2018: Vortrag “Groundwater Circulation Wells for Geothermal Use: Preliminary Results of the Project Integralsonde Type II” auf dem 28. Doktorandentreffen der Hydrogeologie an der FU Berlin, Autoren: Eva Dinkel, Traugott Scheyt

Darüber hinaus ist die Veröffentlichung weiterer wesentlicher Projektergebnisse des Forschungsprojektes in wissenschaftlichen Fachzeitschriften für 2019 geplant.