

# Dimensionierung und Prognose der Umweltauswirkung der ATES Anlage Bremerskamp in Kiel

Gefördert von der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz  
Schleswig-Holstein GmbH (EKSH)

Projekt Nr. 08/12-49

Laufzeit 01.01.2021 – 30.04.2023

## Abschlussbericht

Dr. D. Schäfer  
J. Struß  
Dr. J. O. Delfs  
Dr. M. Ebert  
Dr. R. Köber  
K. Lüders  
Prof. Dr. A. Dahmke

Kiel, 30.10.2023



## Danksagung

Wir bedanken uns bei allen, die an der Planung des untertägigen Wärmespeichers im Bremerskamp mitgewirkt haben und deren Ergebnisse in diesen Bericht eingeflossen sind. Ohne die finanzielle, organisatorische und inhaltliche Unterstützung wäre dieser Bericht nicht möglich gewesen oder zumindest deutlich weniger umfangreich. Die Ergebnisse folgender Forschungsprojekte sind in den Bericht mit eingeflossen:

- Kompetenzzentrum für Geo-Energie (WT.SH (LPW-E/1.1.1/692))
- IW3 - Integrierte WärmeWende Wilhelmsburg; Teilverbundvorhaben: IWs – Systemintegration; Teilvorhaben: Wissenschaftlich-technische Begleitung beim Bau und Betrieb eines Aquifer-Wärmespeichers (BMW i - Reallabore der Energiewende, Fkz: 03EWR006SD)
- ANGUS II: Auswirkungen der Nutzung des Geologischen Untergrundes als thermischer, elektrischer oder stofflicher Speicher – Integration unterirdischer Speichertechnologien in die Energiesystemtransformation am Beispiel des Modellgebietes Schleswig-Holstein (BMW i, Fkz: 03ET6122A)
- Umweltwirkungen und umweltverträglicher Ausbau der oberflächennahen Geothermie (UBA, Fkz: 3716 43 104 2)
- TestUM-II - Geophysikalisches und hydrogeologisches Testfeld zur Untersuchung und zum Monitoring durch die Nutzung des Untergrundes induzierter reaktiver Mehrphasentransportprozesse in oberflächennahen Aquiferen - Zyklischer HT-ATES-Versuch; Vorhaben: Hydrogeochemisches Monitoring (BMBF, Fkz: 03G0898A)

Ein besonderer Dank gilt dem Gebäudemanagement der CAU, das früh von der Sinnhaftigkeit eines untertägigen Wärmespeichers überzeugt war und unsere Arbeiten unterstützt hat.

Wir danken den am Projekt beteiligten Vertretern der GM.SH, die alle Arbeiten koordinieren und unsere Wünsche bei der Beauftragung von Standortarbeiten berücksichtigt haben.

Ebenfalls bedanken wir uns bei den Vertretern der unteren Wasserbehörde Kiel, der Umweltbehörde Kiel und des Landesamts für Umwelt Schleswig-Holstein für die fachlichen Diskussionen und die Unterstützung.

Vielen Dank der GeoC GmbH, die die Feldarbeiten am Standort und die geologische Ansprache mit viel Erfahrung unterstützt hat.

Dank auch an die Firma NORD Bohr und Brunnenbau GmbH für die Unterstützung auf dem Bohrplatz.

Wir möchten uns auch bei den Vertretern der Averdung Ingenieure & Berater GmbH und der Hamburg Institut Consulting GmbH bedanken, die die Anlagentechnik des Wärmespeichers und die Wärmeflüsse zwischen den Gebäuden planen.

Last but not least danken wir der EKSH für die Bewilligung und Finanzierung dieses Projekts (08/12-49).

## Inhalt

1	Aufgabenstellung, Zielsetzungen und Zusammenfassung .....	6
2	Empfehlungen für Voruntersuchungen zur Planung eines UTEs (best practice) .....	7
2.1	Definition des Bauvorhabens .....	7
2.2	Erstellung eines energetischen Konzepts.....	8
2.3	Vorabuntersuchungen der geologischen Verhältnisse .....	9
2.4	Erkundungsbohrungen .....	12
2.5	Messstellenausbau .....	17
2.6	Entnahme und Lagerung von Sonderproben .....	25
2.7	Untersuchungen zur Eignung des Untergrunds als untertägiger Wärmespeicher .....	27
2.7.1	Geologische Struktur .....	27
2.7.2	Geologische und hydrogeologische Parameter.....	28
2.7.2.1	Hydraulischer Gradient.....	28
2.7.2.2	Temperatur.....	31
2.7.2.3	Hydraulische Durchlässigkeit.....	32
2.7.2.4	Effektive Porosität .....	38
2.7.2.5	Abstandsgeschwindigkeit.....	39
2.7.2.6	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität .....	40
2.7.3	Chemische Untersuchungen.....	41
2.7.3.1	Thermisch induzierte Konzentrationsänderungen von Hauptinhaltsstoffen im „Grundwasser“ .....	42
2.7.3.2	Minerallösung / -fällung .....	43
2.7.3.3	Freisetzung organischen Materials .....	48
2.7.3.4	Freisetzung von Spurenelementen und Schwermetallen .....	48
2.7.3.5	Veränderung der geochemischen/mineralogischen Sedimentzusammensetzung...	51
2.8	Numerische Simulationen .....	55
2.8.1	Anforderungen an Modellprogramme zur Simulation von ATEs-Anlagen.....	55
2.8.2	Numerische Simulation der untertägigen Wärmespeicher .....	62
2.8.3	Parametervariation .....	67
2.9	Regulative Hemmnisse .....	72
3	Fazit .....	74
4	Literatur .....	76

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Neubauten im Bremerskamp mit jährlichem Wärmeüberschuss (rot) und Wärmebedarf (grün) .....	7
Abbildung 2: Leistung der Wärmebelastung und –entladung des Wärmespeichers in 5-Tages-Mittelung für ein Betriebsjahr (nach Daten Hamburg Consulting GmbH).....	9
Abbildung 3: Lage der vor der Untersuchung vorhandenen Bohrprofile mit einer Tiefe > 20m, rot gefüllte Symbole: Bohrung mit Teufe >200m, blaue Linie: Lage des Profilschnitts in Abbildung 4 .....	11
Abbildung 4: Erster stark vereinfachter geologischer Profilschnitt, Hellbraun: hydraulisch durchlässige Schicht, Violett: hydraulisch gering durchlässige Schicht. Höhenangaben in m ü. NN .....	12
Abbildung 5: Geplante (ungefüllte Kreise) und finale Ansatzpunkte (gefüllte Kreise) der Erkundungsbohrungen, vorhandene Bebauung in dunkelgrau, geplante in hellgrau .....	15
Abbildung 6: Verwendetes Drehbohrgerät DSB 2/7 Raupe .....	16
Abbildung 7: Sicherung des Rammkernrohrs zur Entnahme des Liners .....	16
Abbildung 8: Ausgelegtes erbohrtes Sediment.....	19
Abbildung 9: Bohrprofil nach geol. Ansprache der erbohrten Sedimente und Messstellenausbau CAU 1/21 .....	20
Abbildung 10: Bohrprofil nach geol. Ansprache der erbohrten Sedimente und Messstellenausbau CAU 2/21 .....	21
Abbildung 11: Bohrprofil nach geol. Ansprache der erbohrten Sedimente und Messstellenausbau CAU 3/21 .....	22
Abbildung 12: Obertägiger Ausbau Grundwassermessstelle CAU 3/21 .....	23
Abbildung 13: Geologischer Schnitt mit ursprünglich vorhandenen und neu errichteten Messstellen .....	24
Abbildung 14: Röntgendiffraktometemessung von Tixoton und Standortsediment (Beispiel CAU 3/21 L26) .....	26
Abbildung 15: Aufbereitung, Dokumentation und geologische Ansprache der Liner .....	27
Abbildung 16: Geologische Ansprache des erbohrten Sediments (links) und detaillierte Ansprache der Liner (rechts) am Beispiel CAU 2/21 .....	28
Abbildung 17: Im Aufzeichnungszeitraum ermittelte Druckhöhen. Tagesmittelwerte des Luftdrucks Station Holtenau (DWD).....	29
Abbildung 18: Stärke des hydraulischen Gradienten in ‰ und Richtung in ° gegen Nord (360°) .....	30
Abbildung 19: Druckgleichen (Druckhöhe m ü. NN) und Gradient des Druckspiegels für mittlere Strömungsverhältnisse.....	31
Abbildung 20: Hydraulische Durchlässigkeit ermittelt aus der Korngrößenverteilung (DIN EN ISO 17892-4) nach Beyer und Hazen über die Teufe des Speicherhorizonts.....	34
Abbildung 21: Aus Permeametermessungen ermittelte mittlere hydraulische Durchlässigkeit (Punkte) mit Standardabweichung (Balken) der Mehrfachmessungen über die Teufe des Speicherhorizonts .....	35
Abbildung 22: Anisotropiefaktor horizontale / vertikale hydraulische Durchlässigkeit über die Teufe des Speicherhorizonts.....	36

Abbildung 23: Gemittelte $k_f$ -Werte mit Korrekturfaktor (Bemessungswert) in Abhängigkeit von der gewählten Methodik (Sieblinienauswertung= 0,2, Permeameter= 1) nach DWA-A 138 (2005) über die Teufe des Speicherhorizonts .....	37
Abbildung 24: Gemessene Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität über die Teufe des Speicherhorizonts .....	41
Abbildung 25: Ablaufkonzentrationen von temperierten Säulenversuchen und Konzentrationen in Batchversuchen mit unterschiedlichen sandigen Lockersedimenten .....	43
Abbildung 26: Potentielle Fällungsmengen bei Erwärmung auf 20°C unter Sauerstoffabschluss (oben) und bei Kontakt mit Sauerstoff (unten) entsprechend der definierten Szenarien .....	46
Abbildung 27: Temperaturabhängigkeit berechneter und gemessener Kalzitausfällungen für unterschiedliche Sättigungsindizes ab deren Überschreitung die Ausfällung beginnt.....	47
Abbildung 28: Zusammenstellung der temperaturabhängig in unterschiedlichen Laborversuchen eingestellten Spurenelementkonzentrationen .....	49
Abbildung 29: Mittlere Reversibilität der Konzentrationsänderungen von Spurenkomponenten bei einwöchiger Erwärmungen auf 25, 40 und 70 °C und anschließender Rückkühlung auf 10 °C (Lüders et al. (2020)).....	50
Abbildung 30: Errechnete CaCO <sub>3</sub> -Gehalte, linker Balken: Annahme Ca liegt nur als CaCO <sub>3</sub> vor, rechter Balken: TIC liegt nur als CaCO <sub>3</sub> vor .....	53
Abbildung 31: Gesamt Eisen-Gehalt in 10 ausgewählten Sedimentproben .....	54
Abbildung 32: Gesamt Mangan-Gehalt in 10 ausgewählten Sedimentproben .....	54
Abbildung 33: Schematischer Aufbau des Modells mit thermischen und hydraulischen Randbedingungen .....	57
Abbildung 34: Leistungsbedarf und tatsächliche Leistung des ATES-Systems berechnet mit dem FEFLOW OpenLoopDesign-PlugIn für eine max. Pumprate von 100 m <sup>3</sup> /h (Linien deckungsgleich).....	58
Abbildung 35: Leistungsbedarf und tatsächliche Leistung des ATES-Systems berechnet mit der OGS Well-Doublet-Control für eine max. Pumprate von 100 m <sup>3</sup> /h (Linien deckungsgleich) .....	58
Abbildung 36: Pumprate des ATES Systems am warmen Brunnen (WW) für eine max. Pumprate von 100 m <sup>3</sup> /h.....	59
Abbildung 37: Injektions- und Extraktionstemperaturen am warmen (WW) und kalten Brunnen (CW) für eine max. Pumprate von 100 m <sup>3</sup> /h.....	59
Abbildung 38: Leistungsbedarf und tatsächliche Leistung des ATES-Systems berechnet mit dem FEFLOW OpenLoopDesign-PlugIn für eine max. Pumprate von 20 m <sup>3</sup> /h .....	60
Abbildung 39: Leistungsbedarf und tatsächliche Leistung des ATES-Systems berechnet mit der OGS Well-Doublet-Control für eine max. Pumprate von 20 m <sup>3</sup> /h.....	60
Abbildung 40: Pumprate des ATES Systems am warmen Brunnen (WW) für eine max. Pumprate von 20 m <sup>3</sup> /h.....	61
Abbildung 41: Injektions- und Extraktionstemperaturen am warmen (WW) und kalten Brunnen (CW) für eine max. Pumprate von 20 m <sup>3</sup> /h.....	61
Abbildung 42: Senkrechter Schnitt durch das Modell; Temperaturzunahme und -abnahme gegenüber natürlichen Verhältnissen am warmen und kalten Brunnen nach Wärmebeladung und -entladung.....	64
Abbildung 43: Vereinfachtes geologisches setup für die Simulation des BTES .....	65
Abbildung 44: Wärmeausbreitung im BTES am Ende der Be- und Entladung bei einer Abstandsgeschwindigkeit von 36 m/a in der gut durchlässigen Schicht, oben: Draufsicht, unten: Vertikalschnitt.....	66

Abbildung 45: Temperatur in der Mitte des Speicherhorizonts nach 15 Jahren im Basismodell .....	69
Abbildung 46: Injektions- und Extraktionstemperaturen am warmen und kalten Brunnen im Basismodell .....	69
Abbildung 47: Temperatur in der Mitte des Speicherhorizonts nach 15 Jahren im Szenario mit erhöhter Grundwasserfließgeschwindigkeit (links) und verringerter Wärmekapazität (rechts) .....	71

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Güteklassen der Probenahme zur Ermittlung von Parametern zur Bemessung eines Wärmespeichers (nach Siebenborn (2011)) .....	13
Tabelle 2: Aufmaß der Messstellen (NBB / GMSH) .....	19
Tabelle 3: Über den Aufzeichnungszeitraum gemessene mittlere Grundwassertemperatur .....	32
Tabelle 4: Gemittelte Durchlässigkeiten aus der Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4 .....	34
Tabelle 5: Gemittelte Durchlässigkeit ermittelt aus den Permeametermessungen nach DIN 18130-1 .....	35
Tabelle 6: Bemessungs- $k_f$ -Werte ermittelt aus Permeametermessungen und Siebanalysen .....	38
Tabelle 7: Abstandsgeschwindigkeit [m/a] für unterschiedliche Gradienten und hydraulische Durchlässigkeiten (effektive Porosität 20%) .....	40
Tabelle 8: Chemische Analysen der Grundwasserproben .....	45
Tabelle 9: Ergebnisse der röntgenfluoreszenzspektrometrischen Untersuchungen und TC/TIC-Messung, Angaben in Massen-%, aus Glühverlust und TC-Messung berechnete C-Gehalte [mol C / kg <sub>sediment</sub> ] .....	52
Tabelle 10: Im Modell berücksichtigte Schichtenabfolge, vertikale Diskretisierung (Mächtigkeit), sowie thermische und hydraulische Modellparameter .....	56
Tabelle 11: Thermische und hydraulische Modellparameter des Standortmodells ( <sup>1</sup> VDI4640 Blatt1 (2010), <sup>2</sup> Busch und Luckner (1974) zitiert nach Garling und Dittrich (1997)) .....	63
Tabelle 12: Im Modell für BTES angenommene Parameter .....	65
Tabelle 13: Variation der hydraulischen und thermischen Parameter des Speicherhorizonts .....	68

# 1 Aufgabenstellung, Zielsetzungen und Zusammenfassung

Zur Gewinnung der oberflächennahen und tiefen Erdwärme liegen in Schleswig-Holstein eine Reihe von Leitfäden und Empfehlungen vor (Landesamt für Natur- und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (2001, 2004, 2006), Thomsen & Liebsch-Dörschner (2014)). Auch wenn sich einige der darin beschriebenen Empfehlungen auf die Speicherung von Wärme im oberflächennahen geologischen Untergrund zum Teil übertragen lassen, fehlte bisher eine Studie, die praxisnah und anhand eines Beispiels die zur Planung und Genehmigung erforderlichen Untersuchungen eines untertägigen Wärmespeichers beschreibt. Bewusst wurde dabei auf eine ausführliche und vertiefte Diskussion zu Umweltauswirkungen und/oder betrieblichen Aspekten und/oder regulativen Gesichtspunkten verzichtet. Diesbezüglich wird auf Studien des UBA (z.B. Dahmke et al. (in prep)) oder entsprechend andere Publikationen verwiesen.

Die Planung eines untertägigen saisonalen Wärmespeichers im Bremerskamp (Kiel) wurde in dieser Studie als Beispiel genutzt, um die zur Planung und Genehmigung erforderlichen Untersuchungsschritte für ähnliche Wärmespeicher in Schleswig-Holstein zu veranschaulichen und gegebenenfalls auch kritisch zu diskutieren. Dies umfasst am Standort und im Labor durchgeführte Arbeiten zur Gewinnung von Eingangsdaten für numerische Modelle und zur Abschätzung der Umweltauswirkungen, als auch numerische Simulationen zur Prognose des Anlagenbetriebs und der Umweltauswirkungen. Nicht alle der beschriebenen Arbeiten im Labor und am Standort wurden im Rahmen des EKSH-Projekts durchgeführt, Arbeiten des Kompetenzzentrums für Geo-Energie, der CAU und der GM.SH und ihren beauftragten Unternehmen wurden zur Vollständigkeit ebenfalls hier aufgeführt.

Eine besondere Fragestellung im Hinblick auf die numerischen Simulationen war, wie empfindlich das modellierte Betriebsverhalten und die Wärmeausbreitung im Untergrund auf Veränderungen der Eingabeparameter reagieren, die in der Praxis aufgrund der Heterogenität der Gesteine intrinsisch unter anderem aufgrund der zur Verfügung stehenden Mittel für eine Untersuchung immer nur mit einer bestimmten „Unschärfe“ ermittelt werden können. Die Modellergebnisse zeigten sich dabei robust gegenüber Veränderungen der Eingabeparameter, sie hängen überwiegend von grundlegenden System- und Betriebsparametern wie Grundwasserfließgeschwindigkeit, Pumpraten und Beladungstemperaturen ab.

Da in geologischen Büros überwiegend das Programm FEFLOW zur Simulation von Wärmespeichern verwendet wird, stellte sich im Hinblick auf die Praxisnähe die Frage, ob FEFLOW die gleichen oder ähnliche Ergebnisse wie die in der Wissenschaft verwendete Software OpenGeoSys liefert und ob beratende Geologen somit ebenfalls in der Lage wären, die durchgeführten Simulationen zu leisten. Im Vergleich ergaben sich erst bei einer komplexen Steuerung der Pumprate der Brunnen geringfügige Unterschiede, die auf praktische Fragestellung jedoch kaum Auswirkungen haben. Wesentliche Unterschiede in den Simulationsergebnissen können sich durch die Annahmen des Modellierers ergeben.

Die Arbeiten wurden durch das Kompetenzzentrum für Geo-Energie, die GM.SH und das Gebäudemanagement der CAU unterstützt. Bis zum Ende des EKSH-Projekts wurde am Standort noch keine Entscheidung gefällt, welche Speichertechnik eingesetzt werden soll. Diese Entscheidung, die erforderliche behördliche Genehmigung und der Anlagenbau können zusätzliche Untersuchungen erforderlich machen, die diese Studie nicht enthalten kann.

## 2 Empfehlungen für Voruntersuchungen zur Planung eines UTES (best practice)

### 2.1 Definition des Bauvorhabens

Vor ersten geologischen Untersuchungen sollten im Falle eines Neubaus Anzahl, Größe und Funktion der geplanten Gebäude möglichst genau bekannt sein, damit ein energetisches Konzept aufgestellt werden kann. Sollten Erkundungsbohrungen benötigt werden, ist ein Lageplan geplanter Gebäude inkl. Ver- und Entsorgungsleitungen erforderlich, damit die als Messstelle oder Erdwärmesonde genutzten Bohrungen später nicht rückgebaut werden müssen.

#### Beispiel Bremerskamp

Im Bremerskamp errichtet die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) und die Bundesrepublik Deutschland in den nächsten Jahren auf ca. 10 ha einen neuen Stadtteil (Abbildung 1) (CAU 2022). Zu den Neubauten gehören ein Rechenzentrum und Labore, die insbesondere im Sommer klimatisiert werden müssen und somit über das Jahr einen Wärmeüberschuss haben, der mit anhaltendem Klimawandel zunehmen wird. Dem gegenüber stehen Wohn- und Bürogebäude, die im Winter einen Wärmebedarf haben.

Funktion, Größe und Positionen der Gebäude waren vor der Positionierung der zusätzlichen Messstellen bekannt (s. Kap. 2.4), veränderten sich jedoch noch in der Detailplanung, was zur Folge hatte, dass die untere Wasserbehörde den Rückbau einer Messstelle verlangte, da sie zu nahe an einem neu gebauten Gebäude liegen würde. In Diskussionen mit dem geologischen Landesamt wurde beschlossen, die Messstelle zunächst nicht rückzubauen, sondern nach Errichtung des Gebäudes ihre Funktionsfähigkeit zu überprüfen.



Abbildung 1: Neubauten im Bremerskamp mit jährlichem Wärmeüberschuss (rot) und Wärmebedarf (grün) (CAU (2022))

## 2.2 Erstellung eines energetischen Konzepts

Vor detaillierten und ggf. aufwändigen Untersuchungen zum Bau eines UTES sollte ein erstes (ggf. noch grobes) energetisches Konzept für den Standort vorliegen, das zeigt, ob ein Speicher sinnvoll ist oder unter welchen Bedingungen er sinnvoll wird. Weiterhin ist eine Abschätzung zum angestrebten Temperaturniveau im Speicher und zur speichernden Energiemenge erforderlich, da diese Parameter den Untersuchungsaufwand für den Untergrund beeinflussen.

### **Beispiel Bremerskamp**

Die CAU und das Land Schleswig-Holstein haben sich die Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes als Ziel gesetzt, daher sollte bereits vor Kenntnis erster Energiebilanzen untersucht werden, ob ein hochkapazitärer untertägiger Wärmespeicher errichtet werden kann, der im Sommer Wärme speichert und im Winter zum Heizen zur Verfügung stellt. Erst nach Beginn erster geologischer Untersuchungen wurde der zunächst aus Labor-, Büro- und Wohngebäuden bestehende Gebäudekomplex um ein Rechenzentrum erweitert, was erhebliche Konsequenzen für die Wärmebilanz hatte. Das Rechenzentrum hat nach aktueller Planung eine über das Jahr weitestgehend konstante Wärmeabgabe von ca. 2MWh, so dass sich für das gesamte Neubaugebiet ein Wärmeüberschuss über das gesamte Jahr ergibt. Die Zielsetzung des Wärmespeichers änderte sich so von der Bereitstellung von Wärme zum Heizen in die Bereitstellung von Kühlleistung für das Rechenzentrum. Die erzeugte Wärme wird weiterhin gespeichert und im Winter zum Heizen verwendet, die überschüssige gespeicherte Wärme wird zunächst bei günstigen Temperaturgradienten im Winter an die Luft abgegeben, um eine ausgeglichene Wärmebilanz des Speichers zu erreichen. Mit zunehmender Renovierung vorhandener Gebäude der CAU sollen langfristig weitere Gebäude an den Speicher angeschlossen werden, so dass die gesamte gespeicherte Wärmeenergie sinnvoll genutzt werden kann.

Die Firma Averdung Ingenieure & Berater GmbH wurde beauftragt, ein Energiekonzept für alle neu geplanten Gebäude zu erstellen. Als Unterauftragnehmer erstellte die Hamburg Institut Consulting GmbH (HIC) ein numerisches Modell des Energieversorgungssystems und errechnete mit typischen Heiz- und Kühlverläufen der Gebäude eine Lastkurve zur Be- und Entladung des Speichers (Abbildung 2), die für die Simulationen der Wärmeausbreitung im Grundwasserleiter verwendet wurde. Die Temperaturspreizung wurde nach dem Bedarf der Gebäude festgelegt, wobei der Bedarf des Rechenzentrums maßgeblich war. Zur späteren Kühlung des Rechenzentrums soll im Winter kaltes Grundwasser von 1-4°C gespeichert werden. Während der Kühlung des Rechenzentrums in Frühjahr bis Herbst wird das aus der Kühlung des Rechenzentrums stammende erwärmte Wasser mit 20°C im Aquifer eingespeichert. Die Berechnungen wurden erst nach Abschluss erster geologischer Untersuchungen abgeschlossen, bestätigen jedoch die Erwartung, dass ein Wärmespeicher am Standort sinnvoll ist und bei der geplanten Bereitstellung von Kühl- und Heizleistung deutliche Kosteneinsparungen ermöglicht.

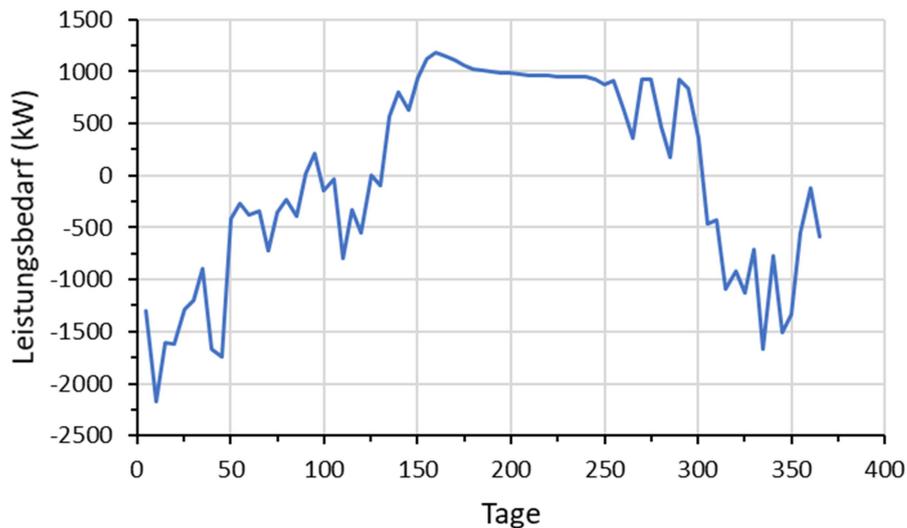


Abbildung 2: Leistung der Wärmebelastung und -entladung des Wärmespeichers in 5-Tages-Mittelung für ein Betriebsjahr (nach Daten Hamburg Consulting GmbH)

### 2.3 Vorabuntersuchungen der geologischen Verhältnisse

Eine erste Sichtung und Einschätzung der geologischen Verhältnisse am Standort im Hinblick auf ihre Eignung als Wärmespeicher zeigt, ob ein UTES am Standort überhaupt möglich ist und ob eine ATES- oder BTES-Anlage die voraussichtlich sinnvollste Speicherlösung ist.

Die geologischen Landesämter stellen die dazu erforderlichen Daten kostenlos im Internet oder auf Anfrage zur Verfügung. In Schleswig-Holstein stellt das Land geologische Daten auf seinem Umweltportal (Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur (2023)) bereit. Ansatzpunkte vorhandener Bohrungen werden unter dem Thema „Geologie“ in einer Karte dargestellt, durch Anklicken kann für viele Bohrungen das Bohrprofil angezeigt werden. Ähnliche Informationsmöglichkeiten bietet die Bohrpunktekarte Deutschland der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2023). Weitere themenbezogene Informationen des Umweltatlas SH ist z.B. die Wärmeleitfähigkeit in 0-50 m und 0-100 m Tiefe u. GOK, die eine erste Einschätzung zur Gewinnung von Erdwärme darstellt. Unter dem Stichpunkt „geologischer Untergrund“ ist die Lage von Salzstrukturen zu finden, in deren Nähe eine ATES-Anlage im Hinblick auf eine potentielle Salzlösung zu prüfen ist. Unter dem Thema „Wasser“ sind Grundwasserentnahmen der Wasserversorger, Trinkwassergewinnungsgebiete und -schutzgebiete zu finden, die bei einer wasserrechtlichen Genehmigung zu beachten sind.

Nicht alle Bohrprofile sind in der Umweltdatenbank enthalten. Das Landesamt für Umwelt (LfU) kann auf Anfrage eventuell zusätzliche Daten zur Verfügung stellen. Bei einer Datenabfrage sind die Gauss-Krüger Koordinaten des Standorts, der gewünschte Suchradius für Messstellen und deren Mindesttiefe anzugeben. Der Suchradius sollte nicht zu klein (>1000 m) gewählt werden, um auch eine großräumige Einschätzung der Geologie zu ermöglichen. Es sollten nur Bohrungen mit ausreichender Teufe (>20 m) abgefragt werden, da es sehr viele flache Bohrungen (<10 m) zur Baugrunderkundung gibt, die keine große Aussagekraft für einen Wärmespeicher haben. Die

gefundenen Bohrprofile werden als PDF per E-Mail übermittelt. Die Qualität der Bohrprofile ist je nach Bohrverfahren und aufzeichnendem Bohrmeister unterschiedlich. Die Ansprachen sind nicht immer durch einen Geologen interpretiert und geochronologisch datiert.

Zur Ermittlung der Grundwasserströmungsrichtung und des Gradienten stehen im Umweltportal SH Grundwasserstandsmessungen des Messstellennetzes des Landes zur Verfügung. Ähnlich wie bei der Abfrage von Bohrprofilen lassen sich unter dem Thema „Wasser“ die Lokationen der Messstellen anzeigen. Durch Anklicken werden weiterführende Informationen, wie Ausbauzeichnung, die letzten 100 gemessenen Grundwasserstände und eine Ganglinie des Grundwasserstands angezeigt. Das Messstellennetz ist jedoch sehr dünn und die Messstellen können in unterschiedlichen Grundwasserstockwerken verfiltert sein, so dass die Daten zur Ermittlung der Grundwasserströmungsrichtung und des Gradienten in den meisten Fällen nicht ausreichen.

Anhand der gewonnenen Daten kann eine erste Überprüfung der Eignung des geologischen Untergrunds für eine Speicherbauart erfolgen, oder es lassen sich Ausschlusskriterien prüfen. Für einen ATES muss eine ausreichend mächtige und durchlässige Schicht mit ausreichend lateraler Erstreckung vorhanden sein, die aufgrund eines möglichen Wärmeverlustes nicht zu weit an der Geländeoberfläche, aber aufgrund der Bohrkosten auch nicht zu tief liegen sollte. Im Hangenden und Liegenden sollte der Speicherhorizont durch Geringleiter begrenzt sein. Die Abstandsgeschwindigkeit im Speicherhorizont sollte nicht zu hoch sein, da bei ausgeglichener Injektions- und Entnahmerate ein Abtransport des gespeicherten warmen Wassers möglich sein kann. Bisher liegen nur wenige Arbeiten vor, die diese rein qualitativen Anforderungen mit Werten untersetzen und vorhandene Empfehlungen (Barthel (2000), Schmidt & Müller-Steinhagen (2005), Holstenkamp et al. (2016)) legen nicht dar, worauf die angegebenen Werte basieren oder sie verwenden stark vereinfachende Abschätzungen.

Mächtigkeit, Tiefenlage und hangende/liegende Geringleiter lassen sich anhand der Bohrprofile einschätzen, die hydraulische Durchlässigkeit erfordert sedimentologisch einen Feinsand oder besser eine gröbere Körnung. Die Abstandsgeschwindigkeit ergibt sich aus vermuteter hydraulischer Durchlässigkeit, effektiver Porosität und Gradient des Druckspiegels. Die laterale Erstreckung ist in quartären Grundwasserleitern schwer einschätzbar, Störungen, Flanken eiszeitlicher Rinnen oder Salzstöcke können Hinweise auf ein Ausstreichen des Grundwasserleiters sein. Ein erhöhter Salzgehalt des Grundwassers kann korrosionsfeste Materialien in den Brunnen und im obertägigen Teil der ATES-Anlage erfordern.

Ein BTES stellt andere Anforderungen an den geologischen Untergrund. Die Erdwärmesonden geben von der Geländeoberkante bis zur Endteufe Wärme ab, jede durchteufte Schicht beeinflusst die Effektivität des Speichers. Bereits eine gut durchlässige Schicht kann bei ausreichendem Gradienten dazu führen, dass die gespeicherte Wärmeenergie in dieser Schicht aus dem Speicher in den Abstrom transportiert wird, daher ist ein BTES eher für gering durchlässige Sedimente und/oder geringe hydraulische Gradienten geeignet.

## Beispiel Bremerskamp

Zur ersten Vorerkundung des geologischen Untergrunds wurden Bohrlochdaten der BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2023)) gesichtet und weitere Bohrlochdaten mit mehr als 20 m Tiefe beim LLUR (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume) angefragt. In der Umgebung des Neubaugebiets liegen nur wenige Bohrungen mit ausreichender Tiefe vor (Abbildung 3). Die meisten Bohrungen sind nur ca. 30-50 m tief, drei Bohrungen erreichen mehr als 200 m Tiefe, liegen aber in mehr als 600 m Entfernung vom Neubaugebiet. Die Bohrprofile lassen einen sandig/kiesigen Grundwasserleiter in ca. -80 bis -110 m ü. NN erwarten, der im Hinblick auf Mächtigkeit, Tiefe, voraussichtliche hydraulischer Durchlässigkeit und Porosität die Anforderungen an einen Speicherhorizont für eine ATES-Anlage erfüllt (Abbildung 4).

Zu Grundwasserspiegel- bzw. Druckhöhen und zur Grundwasserströmung lagen für die oberflächennäheren Grundwasserleiter und zu dem möglicherweise als Speicher nutzbaren Horizont keine Daten vor. Es wurde ein geringer hydraulischer Gradient erwartet und mit der erwarteten hydraulischen Durchlässigkeit eine für ATES ausreichend geringe Abstandsgeschwindigkeit.

Aufgrund der oberflächennahen Sandlagen bis ca. -60 m ü. NN wurde eine BTES-Anlage zunächst als weniger erfolgversprechend angesehen, da die Grundwasserströmung in diesen Schichten die eingespeicherte Wärme bei ausreichendem hydraulischen Gradient in den Abstrom abtransportieren kann. Die geschätzte große Anzahl erforderlicher Erdwärmesonden würde darüber hinaus hohe Bohrkosten verursachen.

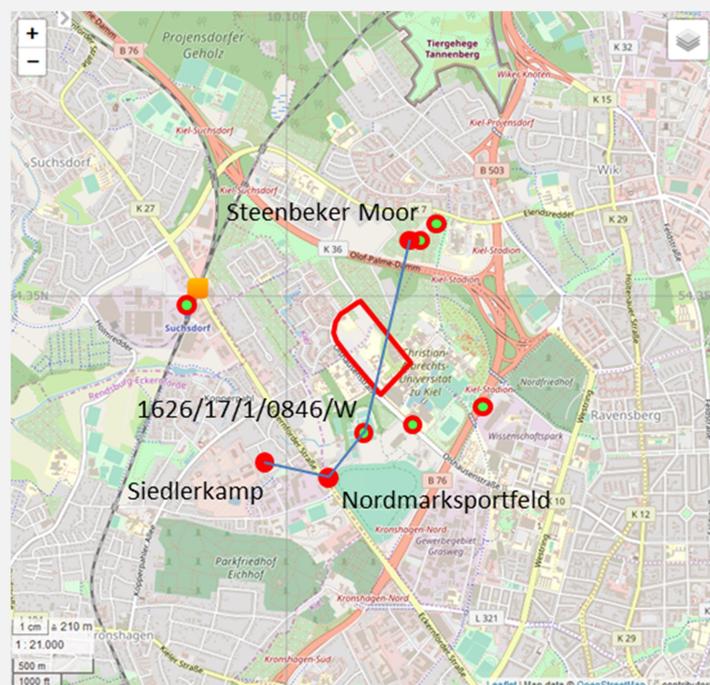
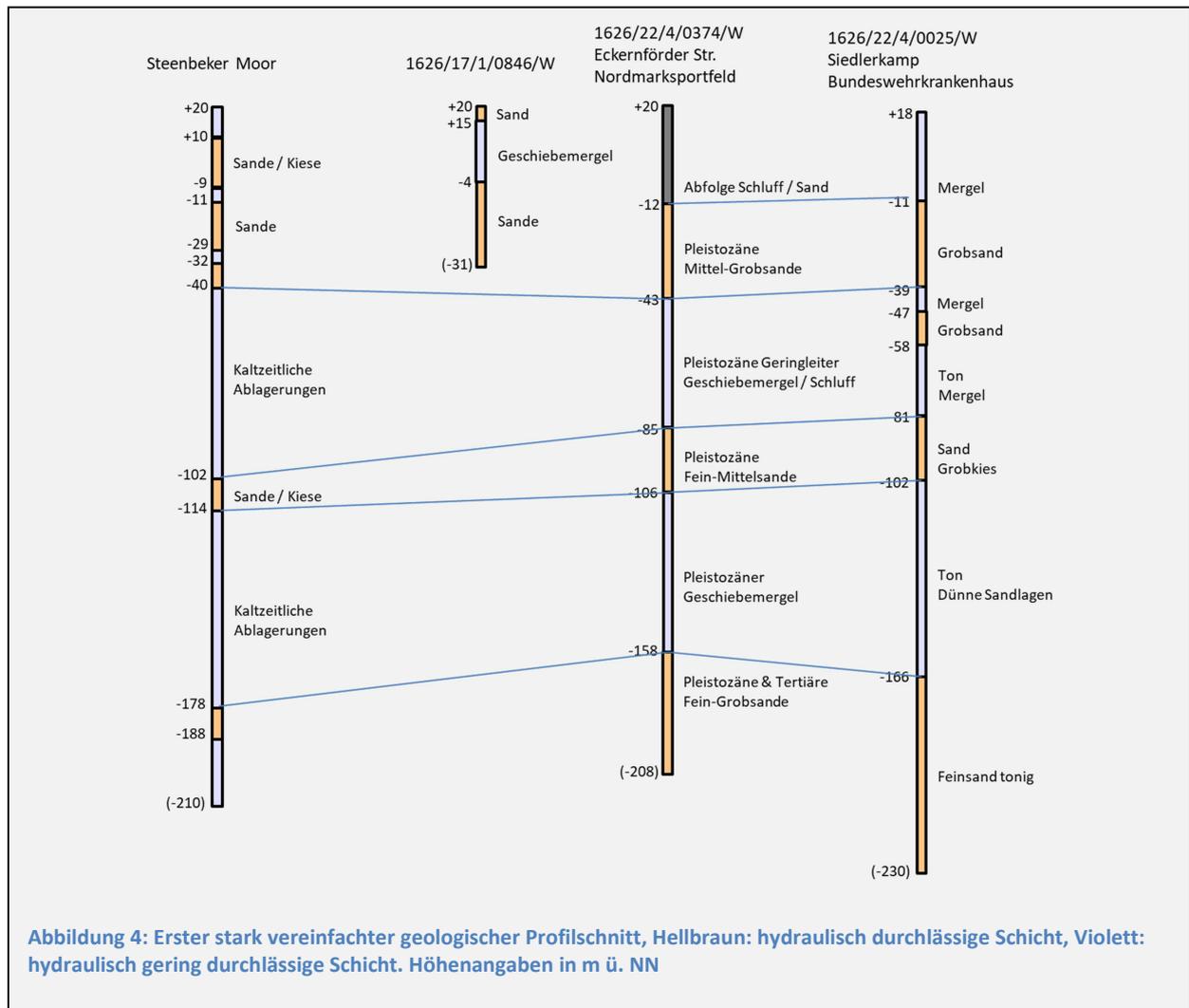


Abbildung 3: Lage der vor der Untersuchung vorhandenen Bohrprofile mit einer Tiefe > 20m, rot gefüllte Symbole: Bohrung mit Teufe >200m, blaue Linie: Lage des Profilschnitts in Abbildung 4



## 2.4 Erkundungsbohrungen

In vielen Fällen werden in direkter Nähe des geplanten Wärmespeichers keine ausreichend tiefen Bohrungen vorhanden sein, aus denen Informationen zum geologischen Aufbau ersichtlich sind. Die zur Bemessung eines Speichers erforderlichen Parameter stehen fast nie in hinreichender Genauigkeit zur Verfügung. Zur Verringerung des Investitionsrisikos werden daher Erkundungsbohrungen empfohlen.

Falls nur Informationen zur lokalen Geologie und zu geologischen Parametern gewonnen werden sollen, ist eine Bohrung ausreichend. Wenn auch Richtung und Stärke des hydraulischen Gradienten ermittelt werden sollen, sind mindestens drei Grundwassermessstellen erforderlich, die im gleichen Grundwasserleiter verfiltert sein müssen, um ein hydrologisches Dreieck aufzuspannen.

Bereits bei der Planung der Bohransatzpunkte sollte eine spätere Nutzung der Bohrungen berücksichtigt werden. Eine einzelne Bohrung zur Gewinnung geologischer Daten kann als Erdwärmesonde ausgebaut werden, falls zur Planung eines BTES ein thermal response test durchgeführt werden soll. Auch ein Ausbau zur Grundwassermessstelle ist möglich, was zur Gewinnung von Grundwasserproben ohnehin erforderlich ist. Messstellen können zur Durchführung

eines Pumpversuchs und/oder zur Überwachung des geplanten Betriebs des Speichers oder zur Überwachung der Umweltauswirkungen eingesetzt werden.

Bei der Wahl geeigneter Bohransatzpunkte sollte die vorhandene, aber auch die geplante Bebauung, (elektrische) Leitungen, Wasserver- und Entsorgung, sowie Wege berücksichtigt werden. An den gewählten Bohrplätzen muss ausreichend Platz zum Aufstellen des Bohrgeräts mit Abständen zur Bebauung, elektrischen Freileitungen und Bäumen sein. Der Bohrplatz muss mit schwerem Gerät befahrbar und erreichbar sein. Je nach Bohrverfahren ist eine Wasserver- und -entsorgung erforderlich oder Container zum Auffangen der Spülflüssigkeit. Ist die Errichtung von drei Messstellen zur Ermittlung des hydrogeologischen Gradienten vorgesehen, sollten die Messstellen so weit voneinander entfernt sein, dass beim vermuteten Gradienten ausreichend große Unterschiede der Wasserstände in den Messstellen messbar sind. Die zunächst geplante Teufe der Bohrungen ergibt sich aus der Lage des vermuteten Zielhorizonts für ATES bzw. aus der voraussichtlichen Länge der Erdwärmesonden für BTES. Falls in der ersten Bohrung kein geeigneter Horizont für einen ATES angetroffen wird, muss entschieden werden, ob weitere Bohrungen sinnvoll sind.

Vor Baubeginn ist in Schleswig-Holstein eine Kampfmittelfreigabe des Bohrplatzes durch ein Fachbüro erforderlich. Zum Abteufen von Bohrungen und dem Ausbau als Grundwassermessstelle ist eine wasserrechtliche Erlaubnis erforderlich, die früh genug (min. 4-8 Wochen) bei der unteren Wasserbehörde beantragt werden muss. Eine Auflage zur Bewilligung kann sein, dass ein hydrogeologisches Fachbüro mit der Überwachung der Bohrungen und dem Messstellenausbau beauftragt werden muss. Ebenso können Anforderungen an das zu verwendende Bohrverfahren gestellt werden.

Vor Preis Anfrage, Ausschreibung und Beauftragung der Bohrungen muss zur Auswahl des Bohrverfahrens durch das Bohrunternehmen bekannt sein, welche Untersuchungen am Bohrmaterial durchgeführt werden sollen. Sollen keine Untersuchungen durchgeführt werden, kann in Schleswig-Holsteinischen Sedimenten in Abhängigkeit von den Kosten bei der beabsichtigten Bohrtiefe meistens ein Trocken- oder Spülbohrverfahren verwendet werden. Soll die hydraulische Durchlässigkeit durch Siebversuche abgeschätzt werden, ist die Gewinnung gestörter Sedimentproben (Güteklasse 4 oder besser, Tabelle 1) erforderlich. Eine detaillierte Ansprache der Sedimentschichtung, die Messung von Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität oder die Messung der hydraulischen Durchlässigkeit mit Hilfe eines Permeameters erfordern bereits ungestörte Sonderproben (Güteklasse 2 oder 1) und damit ein dünnwandiges Entnahmegerät für Kunststoffliner. Die geforderte Güteklasse sollte im Auftrag festgeschrieben werden.

**Tabelle 1: Güteklassen der Probenahme zur Ermittlung von Parametern zur Bemessung eines Wärmespeichers (nach Siebenborn (2011))**

Gesuchter Parameter	Erforderliche Güteklasse				
	1	2	3	4	5
Geologische Schichtung (grob)	✓	✓	✓	✓	✓
Geologische Feinschichtgrenzen	✓	✓	✓		
Hydraulische Durchlässigkeit (Siebversuch)	✓	✓	✓	✓	
Hydraulische Durchlässigkeit (Permeameter)	✓	✓			
Wärmeleitfähigkeit / Wärmespeicherkapazität	✓	✓			
Geochemische Versuche am Sedimentmaterial	✓				

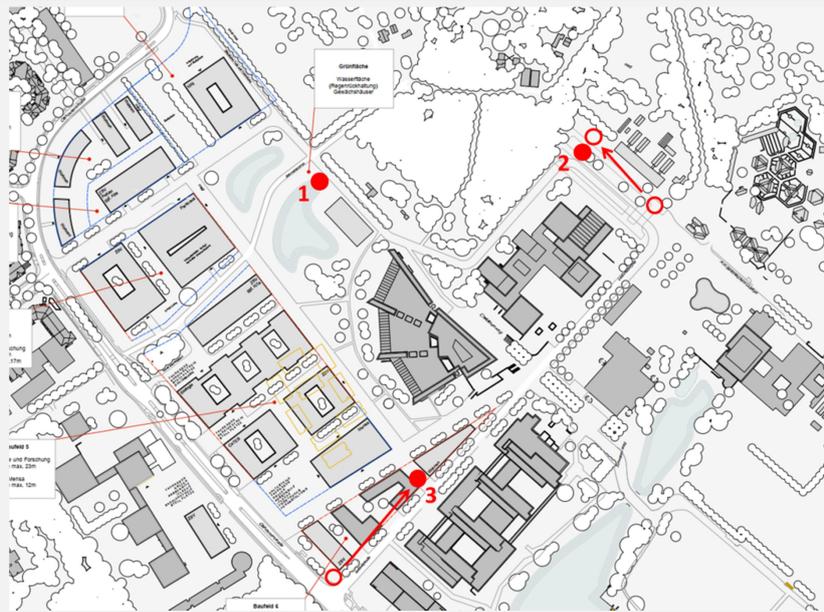
### **Beispiel Bremerskamp**

Zur Planung eines untertägigen Wärmespeichers lagen aus der Vorerkundung keine ausreichend sicheren Daten zur Geologie und Hydrogeologie vor. Es wurde beschlossen, drei Erkundungsbohrungen abzuteufen, mit der Zielsetzung, die lokale Geologie detailliert zu erkunden. Die drei Bohrungen sollten weiterhin zur Gewinnung hydrogeologischer Informationen als Grundwassermessstellen ausgebaut werden und in einer potentiell als Speicherhorizont geeigneten Schicht verfiltert werden. Die erste Bohrung sollte bis 200 m u. GOK abgeteuft werden, um auch Informationen über den tieferen Untergrund zu gewinnen, aber im unteren Bereich verfüllt und im voraussichtlichen Speicherhorizont verfiltert werden. Die beiden anderen Bohrungen sollten nur bis in den Zielhorizont abgeteuft und dort verfiltert werden, falls in der ersten Bohrung eine zur Wärmespeicherung geeignete Schicht angetroffen wurde.

Die erste tiefe Bohrung 1 (Abbildung 5) wurde an einer Stelle positioniert, in deren Nähe später der Bau eines Injektions- bzw. Entnahmehauptbrunnens möglich wäre, so dass die Messstelle zum Monitoring des Speichers nutzbar sein könnte. Da ein hydraulischer Gradient in Richtung Kieler Förde, also in nordöstlicher bis südöstlicher Richtung erwartet wurde, sollten die Bohrungen 2 und 3 in diese Richtungen platziert werden. Das von den Messstellen gebildete hydrologische Dreieck sollte ungefähr gleichschenkelig sein. Es wurde in den Grundwasserleitern ein geringer hydraulischer Gradient erwartet, daher wurden Abstände von mehr als 200m angestrebt, um Druckspiegelunterschiede sicher messen zu können. Mit diesen Vorgaben liegt Bohrung 2 außerhalb des Neubaugebiets und Bohrung 3 an seinem Rand, so dass sie die Bauarbeiten voraussichtlich nicht behindern. Bei der Positionierung der Bohransatzpunkte wurden die vorhandene und der aktuelle Stand der geplanten Bebauung berücksichtigt. An den gewählten Positionen ist ausreichend Platz zum Aufbau eines Bohrturms mit Containern für die Spülflüssigkeit und der Untergrund ist mit schwerem Gerät befahrbar und erreichbar.

Eine Auflage der unteren Wasserbehörde Kiel für die Erstellung der Bohrungen war die Beteiligung eines geologischen Standortbüros, das die Bohrungen und die Errichtung der Messstellen fachlich überwacht und einen Bericht für die Behörden erstellt. Im Rahmen einer öffentlichen Ausschreibung wurde das Büro GeoC GmbH (Kiel) beauftragt, das auch die Ausschreibung für die Bohrungen, die erforderlichen Anträge und Bohrprofile erstellte.

Bei einer gemeinsamen Begehung der Bohransatzpunkte mit GeoC wurden die zunächst geplanten Positionen von Bohrung 2 und 3 verschoben, da an den vorgesehenen Stellen vermutlich Strom-, Wasser- oder Abwasserleitungen lagen (Abbildung 5). Die Lage von Bohrung 2 wurde zum Beginn der Bohrungen erneut um einige Meter verschoben, da an der vorgesehenen Stelle ein Busch wuchs, der im Frühjahr aus Vogelschutzgründen nicht entfernt werden durfte. An allen drei Lokationen waren in der Nähe Hydranten zur Versorgung der Bohrungen mit Wasser vorhanden. Weder Bäume noch elektrische Freileitungen behinderten das Aufstellen des Bohrgeräts. Für alle Bohransatzpunkte wurde vor Aufbau des Bohrgeräts eine Kampfmittelfreigabe durch ein qualifiziertes Büro durchgeführt.



**Abbildung 5: Geplante (ungefüllte Kreise) und finale Ansatzpunkte (gefüllte Kreise) der Erkundungsbohrungen, vorhandene Bebauung in dunkelgrau, geplante in hellgrau**

Nach einer öffentlichen Ausschreibung wurde die Firma NORD Bohr und Brunnenbau GmbH (NBB) mit der Erstellung der Bohrungen beauftragt. Entsprechend der Auflagen der unteren Wasserbehörde wurden die Bohrungen bis zur Sohle des obersten Grundwasserleiters (je nach Bohrung 15 m bis 35 m u. GOK) in verrohrter Trockenbohrung ( $\varnothing$  324 mm) erstellt. Danach wurde in Bohrung 1 und 2 auf eine Lufthebebohrung  $\varnothing$  300 mm gewechselt, aufgrund eines technischen Problems des Bohrturms wurde in Bohrung 3 eine Lufthebebohrung mit  $\varnothing$  260 mm verwendet. Bei Erreichen des Zielhorizonts wurde auf eine Rammkernbohrung gewechselt, bei der Kunststoffrohre (Liner,  $\varnothing$  100mm, L= 1 m) in einem Rammkernrohr aus Stahl (Abbildung 7) durch Schläge einer Freifall-Seilschlagvorrichtung in den Untergrund getrieben wurden. Ist das innenliegende Kunststoffrohr gefüllt, wird es gezogen und von beiden Seiten mit einem Kunststoffdeckel verschlossen. Diese Bohrmethode ermöglicht üblicherweise die Entnahme ungestörter Sonderproben des Sediments mit hoher Güteklasse 1-2, wie sie z.B. für geochemische Untersuchungen erforderlich sind. Erst bei späteren Untersuchungen zeigte sich, dass die Proben mit Spülflüssigkeit in Kontakt gekommen sein müssen, was Einfluss auf die ursprünglich geplanten geochemischen Untersuchungen hatte (s.u.). Es wurden insgesamt 64 Liner gewonnen, 26 Bohrmeter in Bohrung 1 und jeweils 19 Bohrmeter in den Bohrungen 2 und 3. Nach Durchteufen des Zielhorizonts unter Entnahme von Sedimentproben wurde dieser Bereich durch Lufthebebohrung überbohrt und so die Bohrung über die gesamte Tiefe auf gleichen Durchmesser gebracht.



Abbildung 6: Verwendetes Drehbohrgerät DSB 2/7 Raupe



Abbildung 7: Sicherung des Rammkernrohrs zur Entnahme des Liners

## 2.5 Messstellenausbau

Sollen Druckspiegel und Grundwassertemperatur gemessen oder Grundwasserproben entnommen werden, müssen die Bohrungen als Grundwassermessstellen ausgebaut werden, wobei technische Regeln wie z.B. DVGW Arbeitsblatt W 121 (2003) zu beachten sind.

Während der Bohrung werden für jeden Bohrmeter Proben des Bohrguts entnommen und ausgelegt, wobei diese Proben bei Spülbohrungen durchmischt und geologisch verändert sind. Die geologische Ansprache des ausgelegten Bohrguts ist während der laufenden Bohrung die einzige verfügbare Information über die angetroffenen Sedimente und damit die einzige Entscheidungsgrundlage, ob der Zielhorizont erreicht oder durchteuft wurde, so dass der Messstellenausbau beginnen kann. Auch während der Rammkernbohrung sind Informationen zum angetroffenen Sediment nur an der oberen und unteren Öffnung der Liner sichtbar. Erst wenn an 1-2 Linern das Sediment des vermuteten liegenden Stauers angesprochen wird, ist davon auszugehen, dass der zu erkundende Grundwasserleiter durchteuft wurde. Die Liner, die detaillierte Informationen zu den angetroffenen geologischen Schichten liefern, werden meistens erst nach Fertigstellung der Bohrung geöffnet. Um einen besseren Überblick über den Bohrfortschritt zu erhalten, kann die geologische Ansprache des Bohrguts über die Teufe kontinuierlich grafisch dargestellt und in Relation zu umgebenden Bohrungen gesetzt werden.

Nach Fertigstellung des Bohrlochs werden geophysikalische Messungen empfohlen, um die Qualität des Bohrlochs zu überprüfen und um unterschiedliche geologische Schichten genauer voneinander abzugrenzen, als es durch die Ansprache des Bohrguts möglich ist. Einen Überblick über Messmethoden gibt das DVGW Arbeitsblatt W 110 (A) (2019). Da offene Bohrlöcher bis zum Messstellenausbau nur durch die Spülflüssigkeit stabilisiert werden, steht für die geophysikalischen Messungen nur ein kurzes Zeitfenster von wenigen Tagen zur Verfügung. Danach besteht die zunehmende Gefahr, dass das Bohrloch kollabiert.

Aus diesem Grund wird auch die Verfilterung der Grundwassermessstelle direkt nach Abschluss der geophysikalischen Messungen festgelegt. Entscheidungsgrundlage sind die geologische Ansprache des ausgelegten Bohrguts und die Ergebnisse der geophysikalischen Messungen zur Abgrenzung der geologischen Schichten.

Soll die Bohrung als Grundwassermessstelle ausgebaut werden, muss als Verrohrung ein Material verwendet werden, das auch bei den geplanten Speichertemperaturen temperatur- und korrosionsbeständig ist. Einfaches PVC ist korrosionsfest und für den Bau regulärer, oberflächennaher Brunnen geeignet (Amt für Umweltschutz Hamburg (1999), aber nur bis ca. 45°C temperaturbeständig. Niedriglegierte Stähle wie API L80 oder UNS G41300 Stahl sind unter der Bedingung niedriger Chlorid-Konzentrationen ( $\leq 1$  g/L), wie sie im Grundwasser auftreten können, für den Einsatz als Verrohrung in Anlagen bis ca. 100 °C geeignet (Vallejo Vitaller et al. (2019), Keserovic et al. (2014), Klapper et al. (2013)). Für höhere Salzgehalte existieren vor allem Erfahrungen aus dem Bereich der (tiefen) Geothermie, wobei in Abhängigkeit der vorliegenden Chloridkonzentration verschiedene Edelstähle (z.B. V4A Stähle, Duplex- und Superduplex Stähle sowie hochlegierte Austenite) (z.B. Keserovic et al. (2014), Bäßler et al. (2013), Mundhenk et al. (2013)) oder auch GFK Verbundwerkstoffe (z.B. Kabus et al. (2005), Degenhart et al. (2019), Fleuchaus et al. (2021)) für Verrohrung und Anlagenkomponenten in Frage kommen.

Nach dem Klarpumpen der Messstelle kann eine zweite geophysikalische Vermessung sinnvoll sein, um die ordnungsgemäße und plangemäße Erstellung der Messstellen zu überprüfen. Nach Fertigstellung der Grundwassermessstellen werden Oberkanten der Messstellenkappen, Geländehöhe, sowie Rechts- und Hochwert eingemessen. Alle Unterlagen zur Messstelle müssen an das geologische Landesamt übermittelt werden.

### **Beispiel Bremerskamp**

Während der Trocken- oder Lufthebebohrung legte die Bohrmannschaft für jeden Bohrmeter eine Sedimentprobe aus (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Da die Sedimente bei der Lufthebebohrung durch eine Spülflüssigkeit an die Erdoberfläche transportiert wurden, war in den ausgelegten Proben der Feinkornanteil verringert. Die geologische Ansprache des Bohrguts wurden so schnell wie möglich grafisch dargestellt und in Relation zu den weiter entfernten Bohrungen gesetzt, um einen Überblick über den Bohrfortschritt zu erlangen und um zu entscheiden, ob der Zielhorizont erreicht wurde.

Nach Erreichen des Zielhorizonts wurde die Bohrung direkt am nächsten Tag geophysikalisch vermessen. Es wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Bohrlochabweichung (BA) – Messung von Azimut und Neigung über die Bohrtiefe zur Ermittlung der Abweichung von der Senkrechten
- Kaliber (CAL) – Messung des Bohrlochdurchmessers, Abweichung vom Sollwert, um Nachfall von Lockersedimenten zu erkennen
- Gamma Ray (GR) – Messung der natürlichen Gammastrahlung des Sediments zur Unterscheidung von Sand und Schluff
- Gamma-Gamma-Dichte (GG-D) – Einbringen einer Gammastrahlenquelle und Messung der gestreuten Gammastrahlung an zwei Detektoren zur Ermittlung der Raumdichte des Sediments, woraus sich die Porosität ergibt
- Neutron-Neutron (NN) – Einbringen einer Neutronenquelle und Messung der gestreuten Neutronenstrahlung an zwei Detektoren zur Ermittlung des Wassergehalts und damit der Porosität
- ES-16° / ES-64° – Tiefeindringende Messung des spezifischen elektrischen Widerstands in zwei Normalenrichtungen zur Ermittlung unterschiedlicher geologischer Schichten
- Fokussiertes Elektrolog (FEL) – Hochauflösende Messung des spezifischen elektrischen Widerstands zur Ermittlung geringmächtiger Schichten mit unterschiedlicher Korngröße
- Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur der Spülflüssigkeit (LF, T)

Basierend auf den ausgelegten Sedimentproben und den geophysikalischen Messergebnissen wurde die Verfilterung der Messstellen sofort nach der geophysikalischen Vermessung beschlossen und direkt danach mit dem Ausbau der Messstelle begonnen, um die Wahrscheinlichkeit zu verringern, dass das Bohrloch kollabiert.



**Abbildung 8: Ausgelegtes erbohrtes Sediment**

In Bohrung 1 wurde 65,00 – 83,00 m u. GOK eine Schicht aus Grob- und Mittelsanden angetroffen, die im Hinblick auf Mächtigkeit und voraussichtliche hydraulische Durchlässigkeit als Wärmespeicher geeignet erschien. Die CAU 1/21 benannte Messstelle wurde in dieser Schicht verfiltert, wobei die Verfilterung etwas Abstand zu den hangenden und liegenden Geschiebemergelschichten einhält, um einen Eintrag von Feinkorn in die Messstelle zu minimieren (Abbildung 9). Der tiefere Bereich der Bohrung wurde mit Quellton verfüllt. In Bohrung 2 wurde mit 65,00 – 86,70 m u. GOK in ähnlicher Tiefe eine Schicht aus Grob- und Mittelsanden erbohrt, die im tieferen Bereich Feinsande enthält. Die Verfilterung der Messstelle CAU 2/21 wurde im grobsandigen Bereich gewählt (Abbildung 10). In Bohrung 3 wurden 56,00 – 80,00 m u. GOK Fein- bis Grobsande und eine eingelagerte Schlufflinse erbohrt. Die Messstelle CAU 3/21 wurde überwiegend im Grobsand verfiltert (Abbildung 11). Zur Verringerung eines Eintrags von Feinkorn wurde im Bereich der Schlufflinse ein unverfiltertes Messstellenrohr gesetzt.

Die Messstellenrohre haben einen Innendurchmesser von 115 mm, sind aus PVC gefertigt und somit widerstandsfähig gegenüber Korrosion und dem gewählten Temperaturniveau (20 °C) des Wärmespeichers. Obertägig wurde über das Messstellenrohr ein Stahlrohr gestülpt (Abbildung 12), das mit einer Peilrohrkappe („Seba Kappe“) verschlossen wurde, um Fremdzugriffe zu erschweren. Das Stahlrohr wurde in einen Betonring einbetoniert, damit die Messstellen während der geplanten Bauarbeiten geschützt sind. Nach Fertigstellung der Grundwassermessstellen wurden die Messstellen klargepumpt und Oberkanten, Geländehöhe, sowie Rechts- und Hochwert eingemessen (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Aufmaß der Messstellen (NBB / GMSH)**

Messstelle	Rechtswert	Hochwert	OK Messstelle [m ü. NN]	Geländehöhe [m ü. NN]
<b>CAU 1/21</b>	572053,739	6022848,477	25,469	24,66
<b>CAU 2/21</b>	572328,382	6022874,732	25,063	24,05
<b>CAU 3/21</b>	572163,596	6022539,001	24,674	23,89

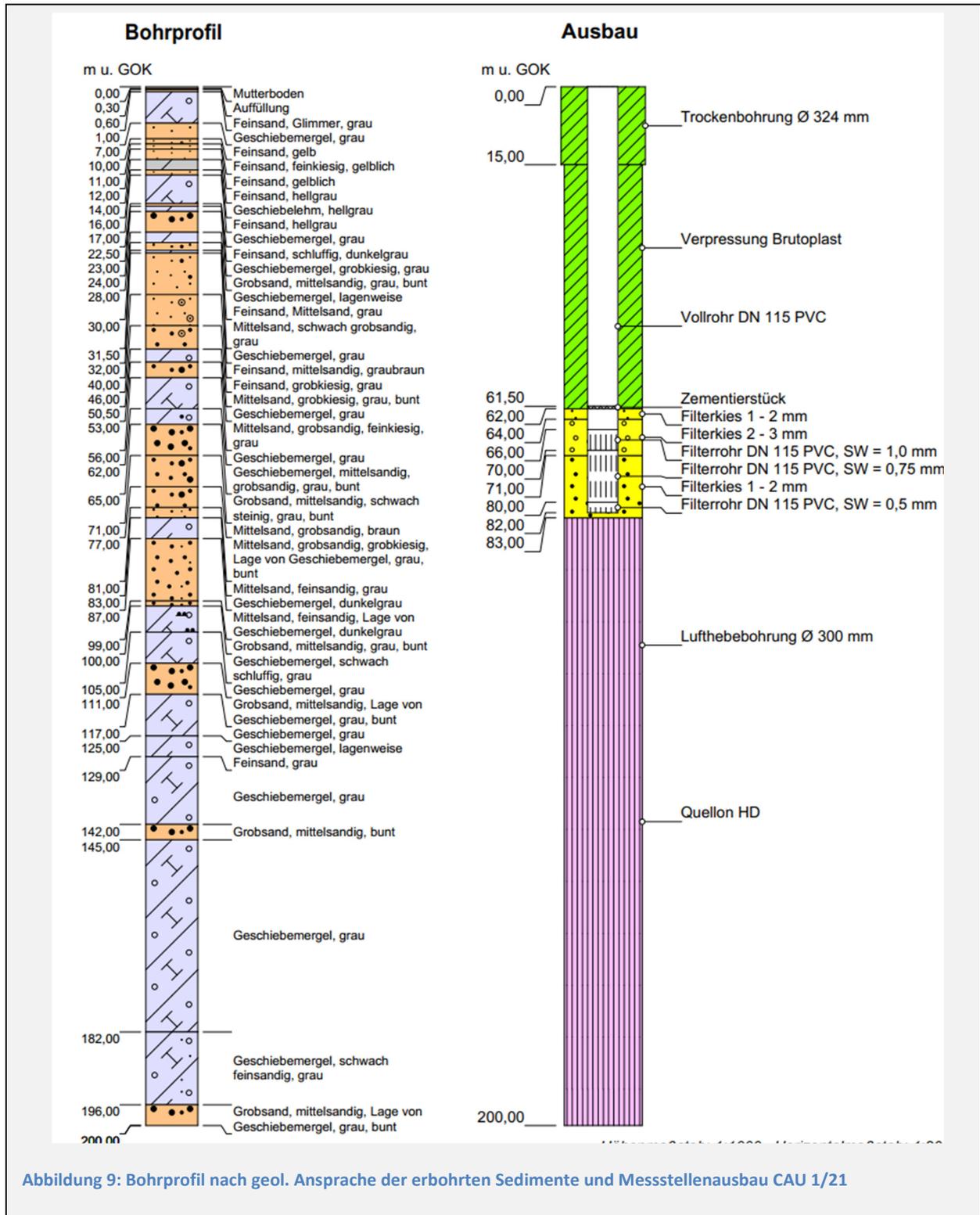


Abbildung 9: Bohrprofil nach geol. Ansprache der erbohrten Sedimente und Messstellenausbau CAU 1/21

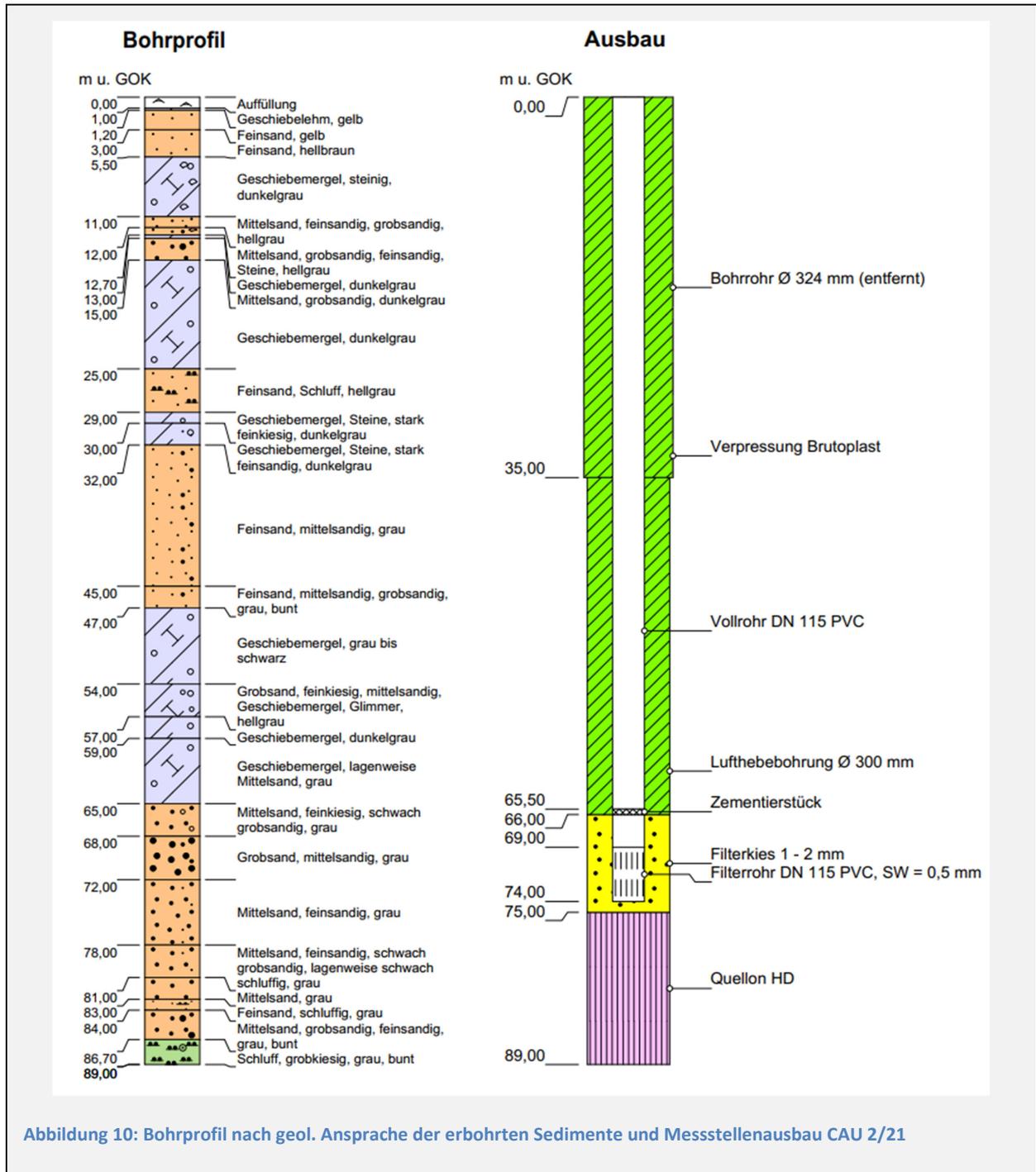


Abbildung 10: Bohrprofil nach geol. Ansprache der erbohrten Sedimente und Messstellenausbau CAU 2/21

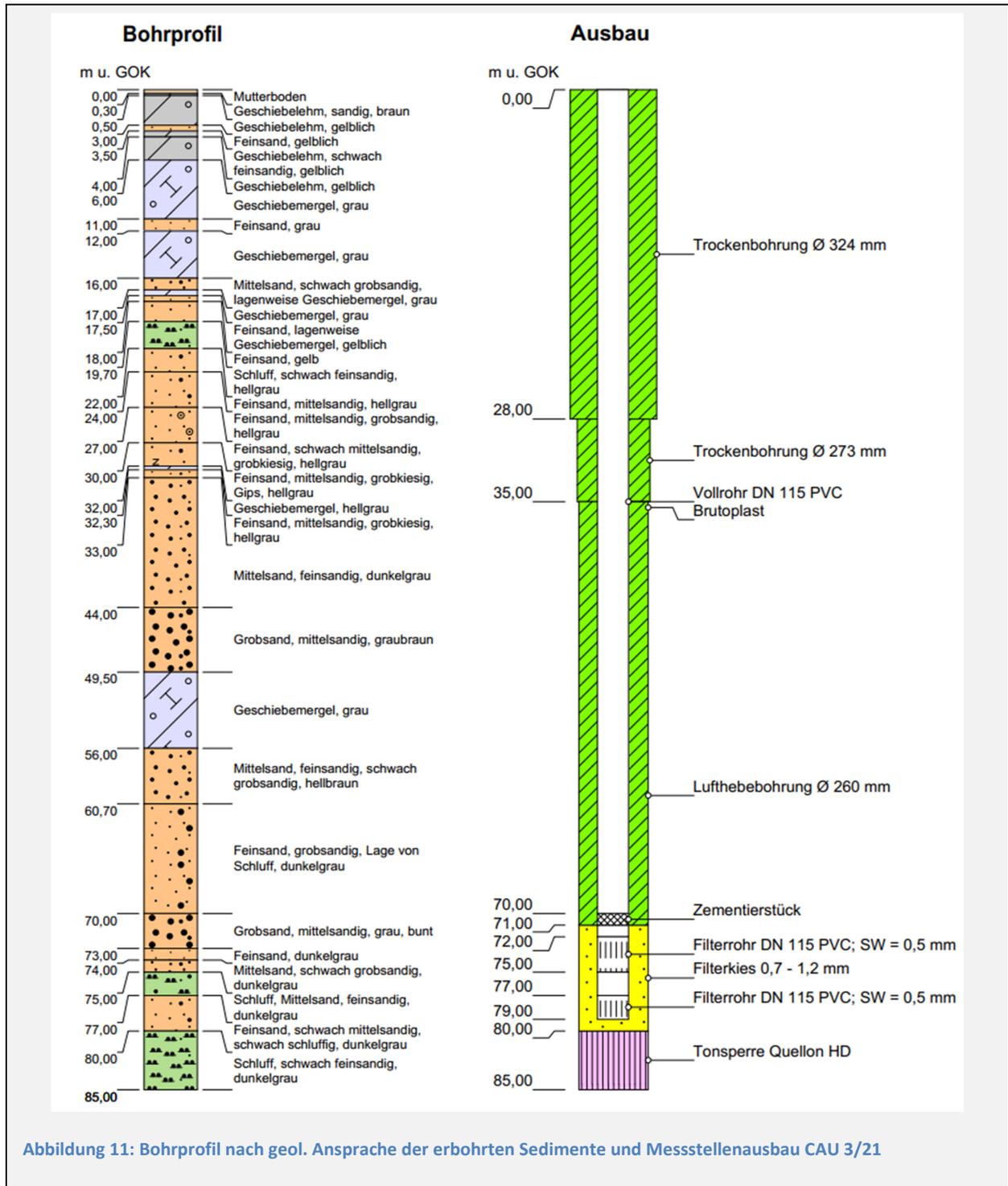


Abbildung 11: Bohrprofil nach geol. Ansprache der erbohrten Sedimente und Messstellenausbau CAU 3/21



Abbildung 12: Obertägiger Ausbau Grundwassermessstelle CAU 3/21

Auf Empfehlung der unteren Wasserbehörde der Stadt Kiel und des Landesamts für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) wurden die Grundwassermessstellen nach Fertigstellung erneut geophysikalisch vermessen und durch eine Brunnenkamera befahren, um sicherzustellen, dass Brunnenausbau und Verfüllung des Ringraums den Vorgaben entsprach. Bei dieser geophysikalischen Vermessung wurden folgende Verfahren verwendet:

- Kamerabefahrung (OPT) – Sichtkontrolle der Rohrwandungen zur Kontrolle der Rohrverbindungen und Filterschlitz
- Elektrolog (PVC-FEL) – Messung des spezifischen elektrischen Widerstands zur Ermittlung unterschiedlicher Korngrößen im Ringraum
- Segmentiertes Gamma-Ray-Log (SGL) – Messung der natürlichen Gammastrahlung zur Identifikation eingebauter Tonsperren und bindiger Sedimente in Kiesschüttungen
- Neutron-Neutron (NN) – Einbringen einer Neutronenquelle und Messung der gestreuten Neutronenstrahlung an zwei Detektoren zur Ermittlung des Wassergehalts und Porosität zur Abgrenzung von Tonsperren und Identifikation bindiger Sedimente in Kiesschüttungen
- Gamma-Gamma-Dichte (GR) – Einbringen einer Gammastrahlenquelle und Messung der gestreuten Gammastrahlung an zwei Detektoren, um Aussagen über Rohrmaterial und Lagerungsdichte der Verfüllung im Ringraum zu ermöglichen

Die Kamerabefahrung zeigte eine ordnungsgemäße Verschraubung aller Brunnenrohre und einen kleinen unbekanntem Fremdkörper am Boden der Messstelle CAU 1/21. In CAU 2/21 war die Filterkiespackung nach geophysikalischer Messung 0,5m weniger mächtig als geplant, was aber keine Auswirkungen auf die Funktion der Messstelle hat. Die Ringraumverfüllungen entsprachen ansonsten den Vorgaben. Alle Filterschlitz sind offen, in einigen waren leichte dunkle Ablagerungen erkennbar, bei denen es sich vermutlich um Eisen- oder Manganoxide handelt. Insgesamt wurden die Messstellen ordnungsgemäß und bis auf die kleine Abweichung in CAU 2/21 entsprechend der Planung erstellt.

Als Ergebnis der geologischen Ansprache der erbohrten Sedimente wurde zwischen ca. -32 und -62 m ü. NN Tiefe eine voraussichtlich gut durchlässige ca. 15 - 22 m mächtige Schicht von Grob- und Mittelsanden angetroffen, die als Speicherhorizont geeignet erscheint (Abbildung 13). Gegenüber den ursprünglich vorhandenen geologischen Informationen aus weiter entfernt liegenden Messstellen (s. auch Abbildung 4) liegt die Schicht rund 50 m näher an der Geländeoberfläche als erwartet, hat aber eine ähnliche Mächtigkeit. Aus der tieferen Bohrung CAU 1/21 ist erkennbar, dass in der ursprünglich erwarteten Tiefe nur eine gering mächtige Grobsandschicht vorhanden ist.

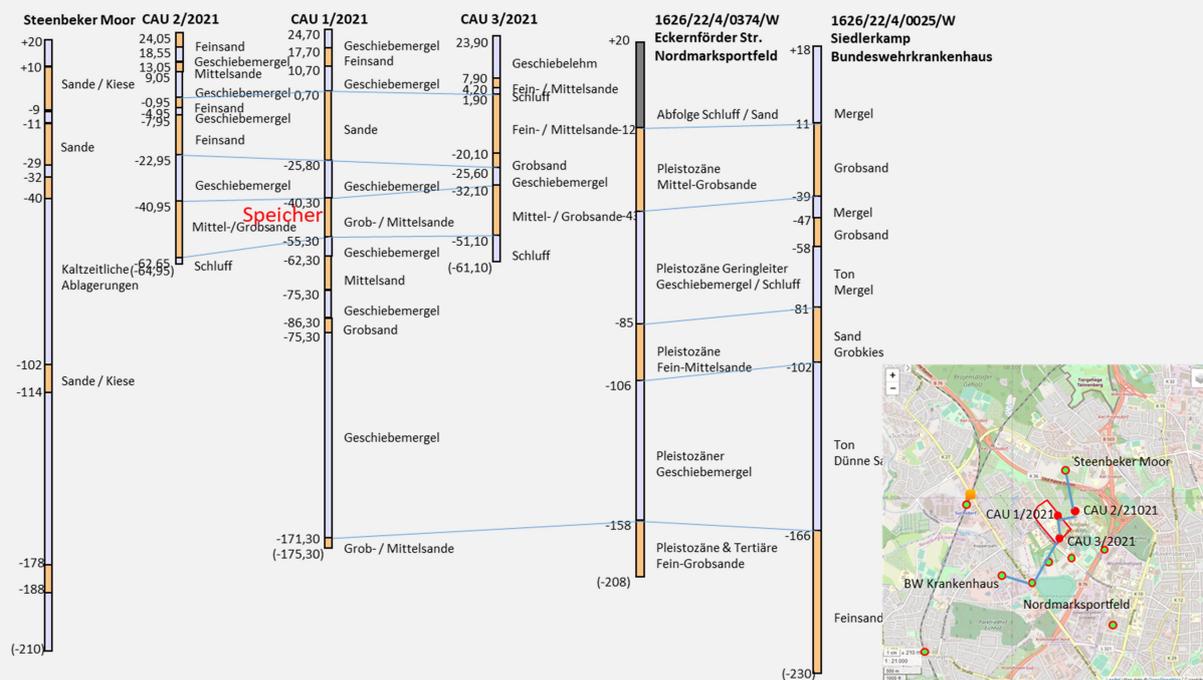


Abbildung 13: Geologischer Schnitt mit ursprünglich vorhandenen und neu errichteten Messstellen

## 2.6 Entnahme und Lagerung von Sonderproben

Ungestörte Sonderproben der Güteklasse 1-2 erlauben eine weitaus detailliertere Ansprache der geologischen Schichtung am Bohrloch als die Ansprache des Bohrguts und geophysikalische Bohrlochmessungen. Sie sind für Untersuchungen zur hydraulischen Durchlässigkeit, Wärmeleitfähigkeit und -speicherkoefizient oder geochemische Untersuchungen erforderlich.

Für die Entnahme von Sonderproben muss der Bohrvorgang unterbrochen werden, sie ist zeit- und kostenaufwändig. Vom Bohrpersonal ist darauf zu achten, dass die Kunststoffliner vollständig gefüllt werden, so dass die Sedimente beim Transport nicht gestört werden. Sollen geochemische Untersuchungen mit dem Sediment durchgeführt werden, darf es nicht in Kontakt mit der bei der Bohrung verwendeten Spülflüssigkeit kommen. Diese Anforderungen sind bei der Einholung eines Angebots klar zu kommunizieren und im Auftrag festzuschreiben. Zur Sicherheit sollte auch das Personal am Bohrplatz erneut auf diese Anforderungen hingewiesen werden.

Die gewonnenen Sedimentproben müssen in Abhängigkeit von den geplanten Untersuchungen gelagert werden. Sind Untersuchungen zur geologischen Schichtung und/oder Siebversuche vorgesehen, muss eine Störung und Vermischung der Sedimente vermieden werden. Für Messungen der hydraulischen Durchlässigkeit mit einem Permeameter oder Wärmeleitfähigkeit / -speicherkapazität muss zusätzlich eine Mineralumlagerung in den Linern vermieden werden. Die Liner sollten daher am Bohrplatz schattig gelagert und möglichst schnell maximal bei Raumtemperatur gelagert werden. Die Proben sollten nicht austrocknen, d.h. die Liner sollten luft- und wasserdicht verschlossen sein. Sind geochemische Untersuchungen geplant, müssen zusätzlich chemische Veränderungen des Sediments verhindert werden. Zur Verringerung mikrobieller und chemischer Reaktionen sollten die Proben gekühlt oder eingefroren werden. Proben aus anaeroben Aquiferen dürfen nicht in Kontakt mit Luftsauerstoff kommen und müssen z.B. unter Argon-Atmosphäre gelagert werden.

### Beispiel Bremerskamp

Aus den drei Bohrungen wurden 64 Liner mit Sedimenten aus dem Zielhorizont für den Wärmespeicher gewonnen, nach Möglichkeit am Tag der Gewinnung abgeholt und am Institut für Geowissenschaften gelagert. 47 der Liner wurden ungekühlt im Kernregal gelagert, wobei die Kappen der Liner zusätzlich mit Panzertape abgedichtet wurden, um ein Auslaufen von Porenwasser zu vermeiden. Insbesondere Liner mit (grob-) sandigen Sedimenten wurden für spätere geochemische Analysen speziell konserviert: 5 wurden gedrittelt, in luftdichte Beutel verpackt, die mit Argon geflutet wurden und tiefgefroren. 12 wurden ebenfalls gedrittelt, in mit Argon geflutete Kisten verpackt und im Kühlraum eingelagert.

Für geochemische Untersuchungen müssen die Sedimente geochemisch unverändert sein, daher wurde ein hoher Aufwand betrieben, um einen Kontakt mit Sauerstoff zu vermeiden. Bei ersten Voruntersuchungen des Porenwassers der Sedimentproben, die für geochemische Untersuchungen vorgesehen waren, zeigten sich jedoch sehr hohe Konzentrationen gelösten organischen Materials (NPOC – non purgeable organic carbon), hohe Natrium- und erhöhte Chloridkonzentrationen, die nicht geogen begründbar waren. Ein Kontakt mit der bei den Bohrungen verwendeten Spülflüssigkeit war wahrscheinlich, da sie Tixoton (Natrium-Bentonit), Viscopol® (Natrium-Carboxymethylcellulose) und Soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) zur Erhöhung von Dichte und Viskosität enthielt. Da Menge und Belegung der Ionenaustauscher im Sediment durch die Spülflüssigkeit verändert wurden, konnte keine der Sedimentproben für weiterführende geochemische Versuche verwendet werden. Weiterhin war zu befürchten, dass der in der Spülflüssigkeit enthaltene Bentonit die hydraulische Durchlässigkeit der Proben verringert hatte.

Zur Untersuchung, ob detektierbare Mengen von Bentonit in den Sedimenten enthalten waren, wurden eine vom Hersteller GWE zur Verfügung gestellte Probe Tixoton und Sedimentproben röntgendiffraktometrisch vermessen. Die Tixoton-Probe zeigte erwartungsgemäß durch den im Hauptanteil enthaltenen Montmorillonit einen deutlichen Peak bei  $7^\circ 2\theta$  (Abbildung 14). Da die Sedimentproben an dieser Stelle keinen Peak aufweisen, ist Tixoton nicht in detektierbaren Mengen in der Sedimentprobe vorhanden. Messungen zur hydraulischen Durchlässigkeit konnten also an den Sedimenten durchgeführt werden.

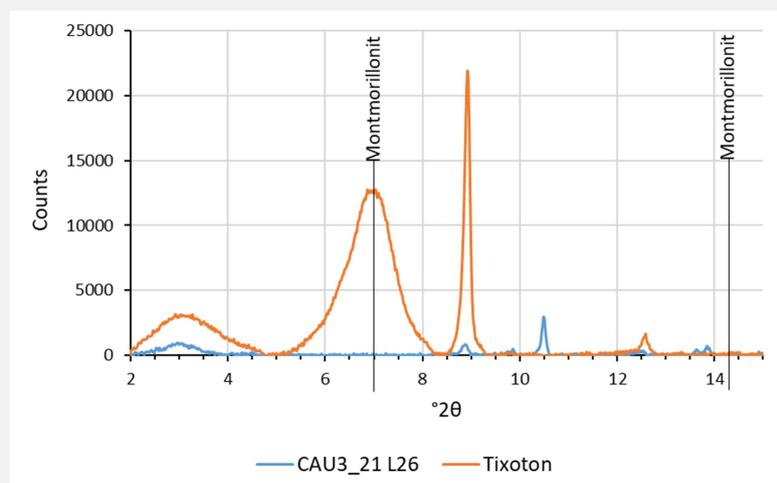


Abbildung 14: Röntgendiffraktometremessung von Tixoton und Standortsediment (Beispiel CAU 3/21 L26)

## 2.7 Untersuchungen zur Eignung des Untergrunds als untertägiger Wärmespeicher

### 2.7.1 Geologische Struktur

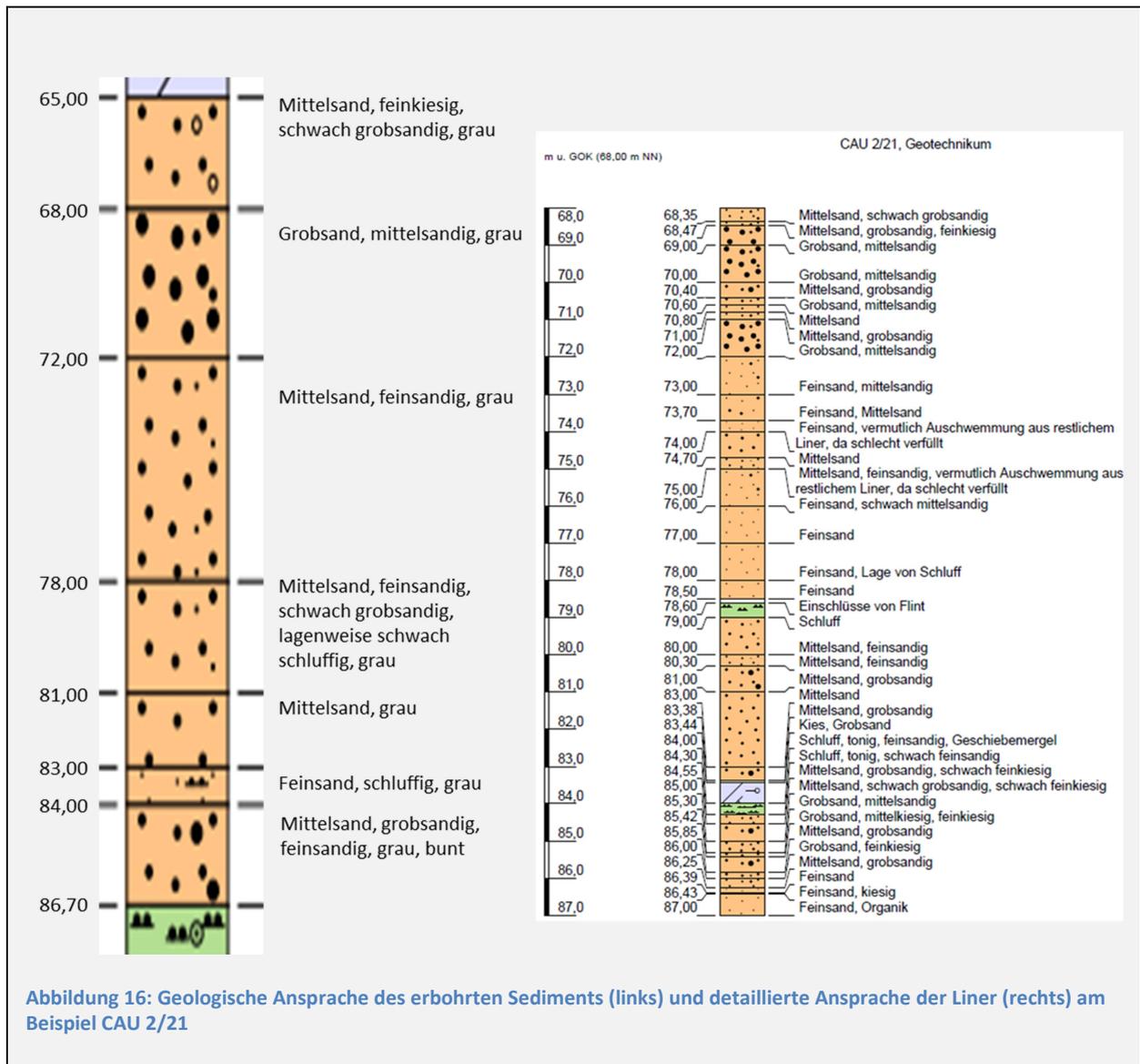
Eine detaillierte geologische Ansprache nach DIN 4022 oder nach der seit 2007 gültigen ISO 14688 (1&2) ermöglicht das Erkennen von Teilschichten eines Grundwasserleiters mit anderer Sedimentation und damit auch anderen Parametern (z.B. hydraulische Durchlässigkeit). Die geologische Ansprache der Liner ist detaillierter als die des Bohrguts und liefert zum Teil auch abweichende Sedimentansprachen.

#### Beispiel Bremerskamp

Die nicht für geochemische Untersuchungen vorgesehenen 47 Liner wurden geöffnet, zur Ansprache aufbereitet (Abtragen und Glattstreichen des Sedimentes) und fotografisch dokumentiert (Abbildung 15). Die Sedimente wurden in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro GeoC nach DIN 4022 geologisch angesprochen und mit dem Programm GeoDin dokumentiert. Statt des aus der Ansprache des Bohrmaterials erwarteten Grobsandes wurden in den Linern deutlich mehr Mittel- und Feinsande angesprochen. Das Ergebnis ist eine detaillierte Aufzeichnung der geologischen Struktur an den Messstellen (Abbildung 16).



Abbildung 15: Aufbereitung, Dokumentation und geologische Ansprache der Liner



## 2.7.2 Geologische und hydrogeologische Parameter

### 2.7.2.1 Hydraulischer Gradient

Der hydraulische Gradient beeinflusst die Abstandsgeschwindigkeit, die eingespeicherte Wärme sowohl bei ATES- als auch bei BTES-Anlagen aus dem Speicher transportieren kann, wobei für ATES die Abstandsgeschwindigkeit im Speicherhorizont relevant ist, während bei BTES alle von den Erdwärmesonden durchteuften Aquifere betrachtet werden müssen. Der Gradient kann zunächst aus hydrogeologischen Gutachten, Modellen oder Messungen in hangenden oder liegenden Aquiferen abgeschätzt werden, um über worst case Annahmen zu prüfen, ob die Abstandsgeschwindigkeit zu hoch sein kann. Liegen zu wenige Daten vor oder ist die Möglichkeit zu hoher Abstandsgeschwindigkeiten gegeben, werden Messungen am Standort empfohlen. Messungen sind ebenfalls sinnvoll, wenn aufgrund der vermuteten Strömungsrichtung Altlasten beeinflusst werden können. Für ATES ist eine Ermittlung der Strömungsrichtung im Speicherhorizont erforderlich, um die Brunnendublette in Strömungsrichtung ausrichten zu können.

Die Messung des hydraulischen Gradienten erfordert drei möglichst in einem gleichschenkligen Dreieck angeordnete Grundwassermessstellen, die alle im gleichen Horizont verfiltert sind. Stichtagsmessungen der Druckspiegel mit einem Lichtlot sind möglich, ein kontinuierliches Messen mit Dataloggern ermöglicht mit geringem Aufwand ein Verfolgen der Drücke und damit des Gradienten in Stärke und Richtung über die Zeit. Durch einen Messzeitraum von einem Jahr lassen sich jahreszeitliche Schwankungen erkennen.

### Beispiel Bremerskamp

Die Wasserstände in den Grundwassermessstellen wurden mehrfach zur Kontrolle per Hand mit Hilfe eines Lichtlots gemessen. Am 17.11.2021 wurden Messgeräte und Datensammler der Fa. Hydrotechnik GmbH eingesetzt, die in Messintervallen von 15 Minuten Grundwassertemperatur, sowie die Differenz zwischen Absolutdruck an der Sohle der Messstelle und Atmosphärendruck aufzeichneten. Diese Druckdifferenz entspricht dem vom überstehenden Grundwasser ausgeübten Druck, wird in Meter Wassersäule umgerechnet und aufgezeichnet. Die Daten wurden zuletzt am 16.05.2023 ausgelesen und umfassen somit mehr als ein Jahr. Die Messungen werden fortgeführt.

Der zeitliche Verlauf der Druckhöhen ist sehr ähnlich, wobei die Drücke in CAU 3/21 (Leibnizstraße) höher als die Drücke in CAU 1/21 (hinter der Bibliothek) und CAU 2/21 (Parkplatz) sind (Abbildung 17). Die Wasserstände in den Messstellen werden durch den Luftdruck beeinflusst, ein hoher Luftdruck drückt z.B. das in den Messstellenrohren stehende Wasser, das im Kontakt zur Atmosphäre steht, zurück in den Grundwasserleiter.

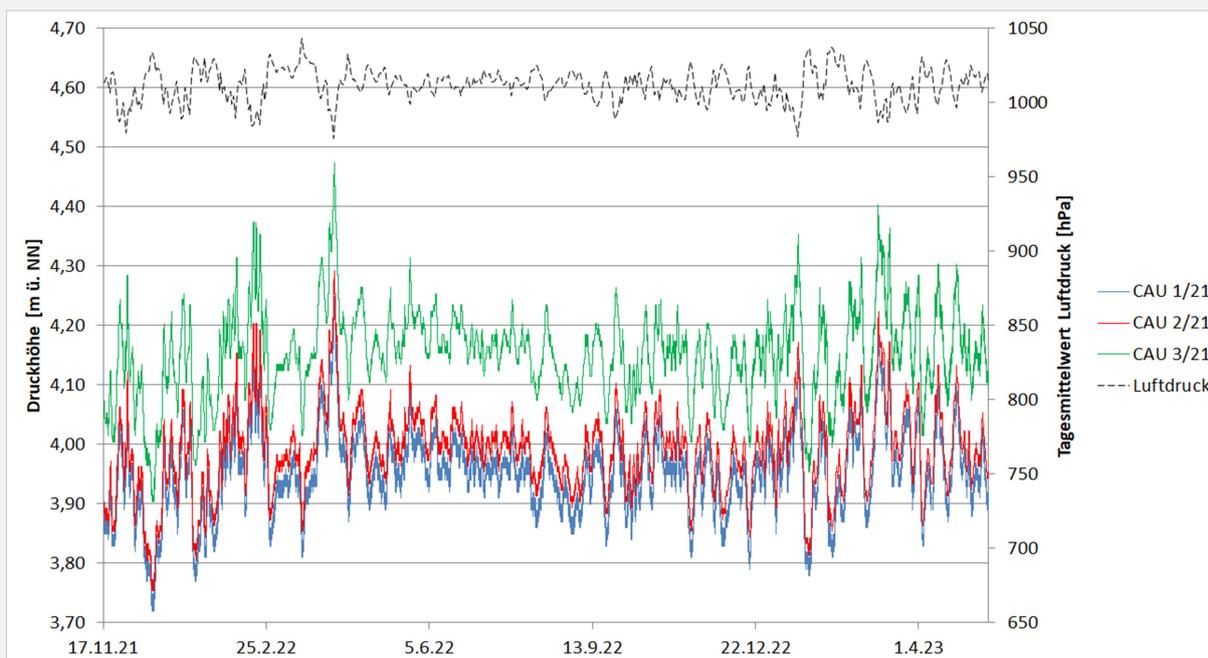
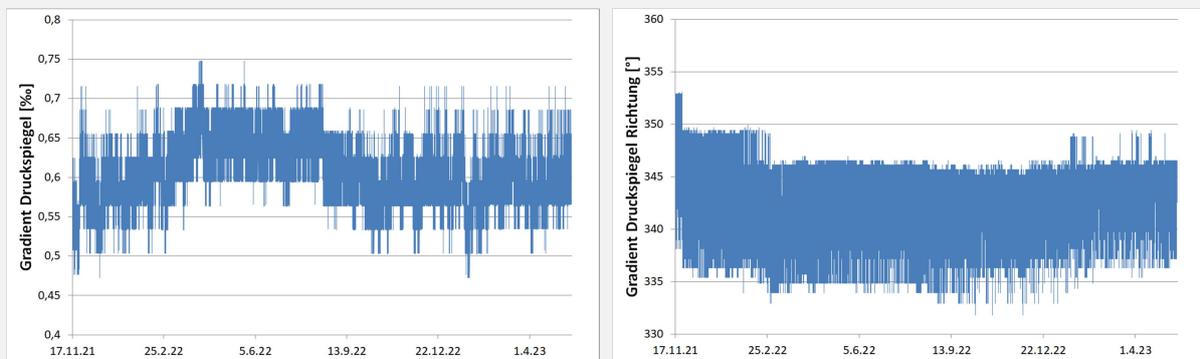


Abbildung 17: Im Aufzeichnungszeitraum ermittelte Druckhöhen. Tagesmittelwerte des Luftdrucks Station Holtenau (DWD)

Die untere Wasserbehörde befürchtete, dass der für den Wärmespeicher geeignete Aquifer eine hydraulische Verbindung zum tieferen Grundwasserstockwerk haben könnte, das vom Wasserwerk Wik genutzt wird, oder eine Verbindung zum Nutzhorizont des Brunnens der CAU. In diesem Fall könnte sich durch den über den Tag veränderlichen Pumpbetrieb ein typischer Tagesverlauf im Druckspiegel abzeichnen, der sich jedoch anhand der Messungen auch bei detaillierter Betrachtung von Tagesverläufen nicht nachweisen ließ.

Berechnet man aus allen über die Zeit gemessenen Druckhöhen die hydraulischen Gradienten des Druckspiegels, zeigt der Druckgradient nur eine geringe Fluktuation in Stärke und Richtung über die Beobachtungszeit (Abbildung 18). Die Stärke des hydraulischen Gradienten schwankt zwischen 0,47 ‰ und 0,75 ‰ bei einem Mittelwert von 0,59 ‰. Die Richtung schwankt zwischen 332° und 353° bei einem Mittelwert von 343° gegenüber der Nordrichtung (360°).



**Abbildung 18: Stärke des hydraulischen Gradienten in ‰ und Richtung in ° gegen Nord (360°)**

Zur grafischen Darstellung von Druckgleichen und Gradient des Druckspiegels wurde exemplarisch der Strömungszustand vom 15.12.2021 10:45 Uhr ausgewählt, der mit 0,58 ‰ und 342° in guter Näherung die Mittelwerte wiederspiegelt (Abbildung 19). In allen Strömungszuständen zeigt der hydraulische Gradient nach NNW, also entgegen der ursprünglichen Annahme nicht in Richtung Kieler Förde, sondern eher in Richtung Nordostseekanal. Für den Standort ist die Strömungsrichtung wichtig, da in der Nähe eine Altblagerung und eine Altlast bekannt sind, die jedoch nicht im Abstrom des Neubaugebiets liegen.

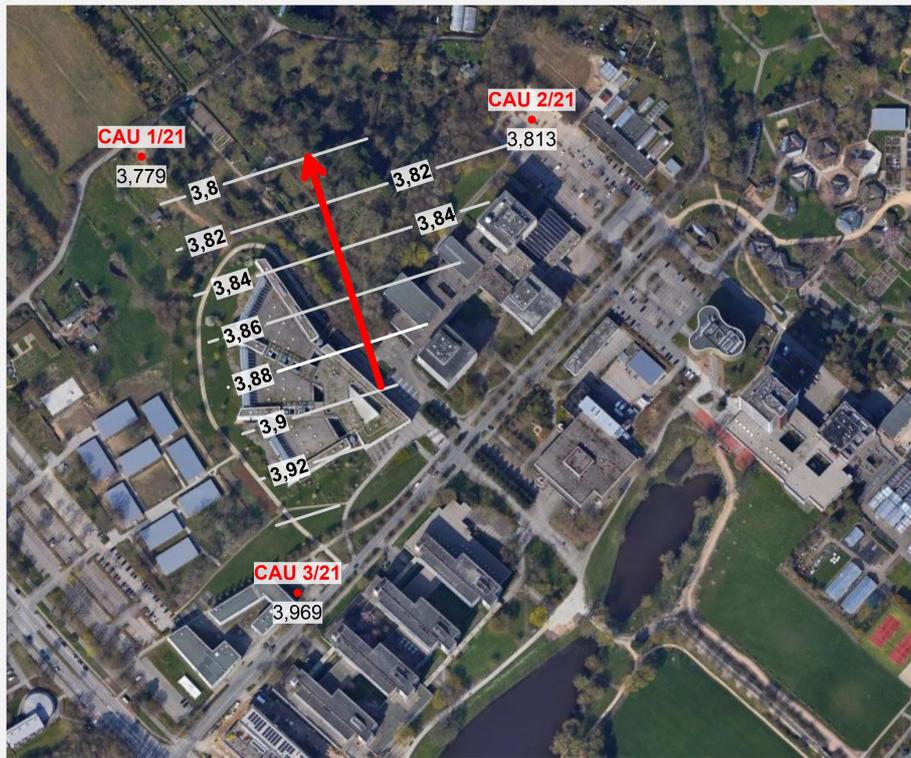


Abbildung 19: Druckgleichen (Druckhöhe m ü. NN) und Gradient des Druckspiegels für mittlere Strömungsverhältnisse

### 2.7.2.2 Temperatur

Die natürliche Temperatur des Grundwassers bzw. auch des umgebenden Aquifermaterials ist der Startpunkt bei einer Erwärmung bzw. Abkühlung des Untergrunds. Ohne Daten kann für oberflächennahe Wärmespeicher von der durchschnittlichen Jahrestemperatur ausgegangen werden, die in Schleswig-Holstein bei ca. 10°C liegt und ab ca. 20 m Tiefe nicht mehr durch die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen beeinflusst wird. Eine Messung ist zusammen mit den Wasserständen oder bei Entnahme einer Wasserprobe leicht möglich.

### Beispiel Bremerskamp

Im Aufzeichnungszeitraum wurde in allen drei Messstellen kontinuierlich die Temperatur gemessen. Innerhalb jeder Messstelle ist die Grundwassertemperatur bis auf geringe Schwankungen von  $\pm 0,5$  °C konstant und unbeeinflusst von den Jahreszeiten, es zeigen sich jedoch räumliche Unterschiede. Die unter unbebautem Gelände liegende Messstelle CAU 1/21 zeigt die geringste Temperatur, während die Temperaturen in der unter dem Parkplatz gelegenen Messstelle CAU 2/21 und in der in Nähe von Bebauung gelegenen Messstelle CAU 3/21 erhöht sind (Tabelle 3). Im Mittel herrscht im Bremerskamp eine Grundwassertemperatur von 10,3 °C.

Tabelle 3: Über den Aufzeichnungszeitraum gemessene mittlere Grundwassertemperatur

Messstelle	Temperatur [°C]
CAU 1/21	9,4
CAU 2/21	11,1
CAU 3/21	10,4

### 2.7.2.3 Hydraulische Durchlässigkeit

Die hydraulische Durchlässigkeit geht in die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit ein und ist somit sowohl bei ATES- als auch bei BTES-Anlagen für den möglichen Abtransport von Wärme in gut durchlässigen Sedimenten relevant. Bei ATES ist sie darüber hinaus zusammen mit der Mächtigkeit des Aquifers (Transmissivität) einer der wesentlichen Parameter, der die maximale Entnahme- bzw. Injektionsrate der Brunnen bestimmt und so die Anzahl der erforderlichen Brunnendubletten definiert.

Eine erste Abschätzung der hydraulischen Durchlässigkeit kann zunächst über die geologische Ansprache des Bohrguts oder der Liner unter Verwendung von Literaturdaten erfolgen, was jedoch außerordentlich ungenau ist, mit möglichen Abweichungen um Größenordnungen.

Zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit stehen bewährte Methoden im Labor und am Standort zur Verfügung:

- Permeameter-Versuch (Darcy-Versuch) an ungestörten Sedimentproben
- Empirische Gleichungen zur Berechnung aus der Korngrößenverteilung der Sedimente (z.B. nach Beyer, Hazen, Bialas, Seelheim)
- Pumpversuch (Wasserentnahme oder Auffüllversuch)
- Slug/Bail-Test (Schnelle Veränderung des Drucks im Brunnen, z.B. durch Druckluft)

Laborversuche ermitteln die hydraulische Durchlässigkeit kleiner Probevolumina über die Tiefe der Bohrung und sind geeignet, um z.B. Schichten mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten innerhalb eines Zielhorizonts zu bestimmen. Permeameterversuche ermöglichen darüber hinaus die Ermittlung

horizontaler und vertikaler hydraulischer Durchlässigkeiten. Ein gewichtetes arithmetisches Mittel der Messungen ergibt die über die Tiefe gemittelte hydraulische Durchlässigkeit des Horizonts.

Zur Durchführung von Pumpversuchen ist nach Wasserhaushaltsgesetz eine Erlaubnis der unteren Wasserbehörde erforderlich, ebenso erfordert die Einleitung des geförderten Wassers in die Kanalisation oder in einen Vorfluter eine Erlaubnis. Das Ergebnis der Versuche am Standort ist eine mittlere Transmissivität bzw. hydraulische Durchlässigkeit über ein größeres Aquifervolumen und ist für die Auslegung und den Betrieb insbesondere einer ATES-Anlage die geeignetere Bestimmungsmethode für die mittlere hydraulische Durchlässigkeit.

### **Beispiel Bremerskamp**

Anhand von Siebanalysen wurde nach DIN EN ISO 17892-4 die Korngrößenverteilung an 43 Sedimentproben aus den gewonnenen Linern bestimmt. Es wurden je nach Sediment Trocken- oder Nasssiebungen durchgeführt, bei ausreichend hohem Feinkornanteil wurden zusätzlich Sedimentationen durchgeführt, um die Massenanteile der enthaltenen Körnungsgruppen zu bestimmen. Anhand der ermittelten Massenanteile aus Siebung und Sedimentation wurde über die die Körnungslinie nach Hazen und nach Beyer der  $k_f$ -Wert bestimmt (Abbildung 20), der im Mittel über alle Messungen in allen drei Bohrungen bei  $2,4 \cdot 10^{-4}$  m/s liegt (Tabelle 4). Nach DIN 4022 handelt es sich bei den untersuchten Proben im Hauptanteil der Korngrößenverteilung um Mittel- und Feinsande, wobei in Bohrung CAU 3/21 Feinsande im Hauptanteil der Siebproben stärker vertreten waren als in den anderen Bohrungen. Es zeigt sich zudem, dass ab einer Teufe von ca. 78 m der Feinsandanteil der Proben insgesamt deutlich zunimmt.

Zusätzlich zur Auswertung der Siebkurven wurden Permeameterversuche durchgeführt, wobei der  $k_f$ -Wert in horizontaler und vertikaler Richtung ermittelt wurde. Die Bestimmung des  $k_f$ -wertes erfolgte nach DIN 18130-1, indem an beiden Seiten einer gesättigten Probe ein unterschiedlicher Wasserdruck erzeugt und der durch die Probe entstehende Wasserfluss in einem offenen System gemessen wurde. Die Proben wurden mit Stechzylindern von 5,0 cm Durchmesser und 5,1 cm Länge (Inhalt:  $100 \text{ cm}^3$ ) aus 34 Linern gestochen, woraus sich 68 Vertikal- und Horizontalproben ergaben. Nach dem Ausstechen der Proben wurden diese vor Beginn der Messungen in einem Permeameter der Fa. Eijkelkamp über Nacht mit Wasser gesättigt und durchströmt. Die vollständig gesättigten Probenzylinder wurden durch einen angelegten konstanten Höhenunterschied des Wasserstandes zwischen Proben und Wasserbehälter des Permeameters von unten nach oben kontinuierlich mit Wasser durchflossen. Dabei wurde der Druckhöhenunterschied möglichst klein ( $< 2 \text{ cm}$ ) gehalten, um eine Störung der Probenstruktur zu verhindern. Über den Proben stehendes Wasser wurde in Büretten abgeleitet, um den Durchfluss über die Zeit zu messen. Da die Viskosität des Wassers temperaturabhängig ist und somit einen Einfluss auf die gemessene Durchlässigkeit hat, wurde eine Temperaturkorrektur durchgeführt, bei der die  $k_f$ -Werte von einer im Labor vorherrschenden Temperatur von  $18\text{-}20 \text{ }^\circ\text{C}$  auf eine Grundwassertemperatur von  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  korrigiert wurden.

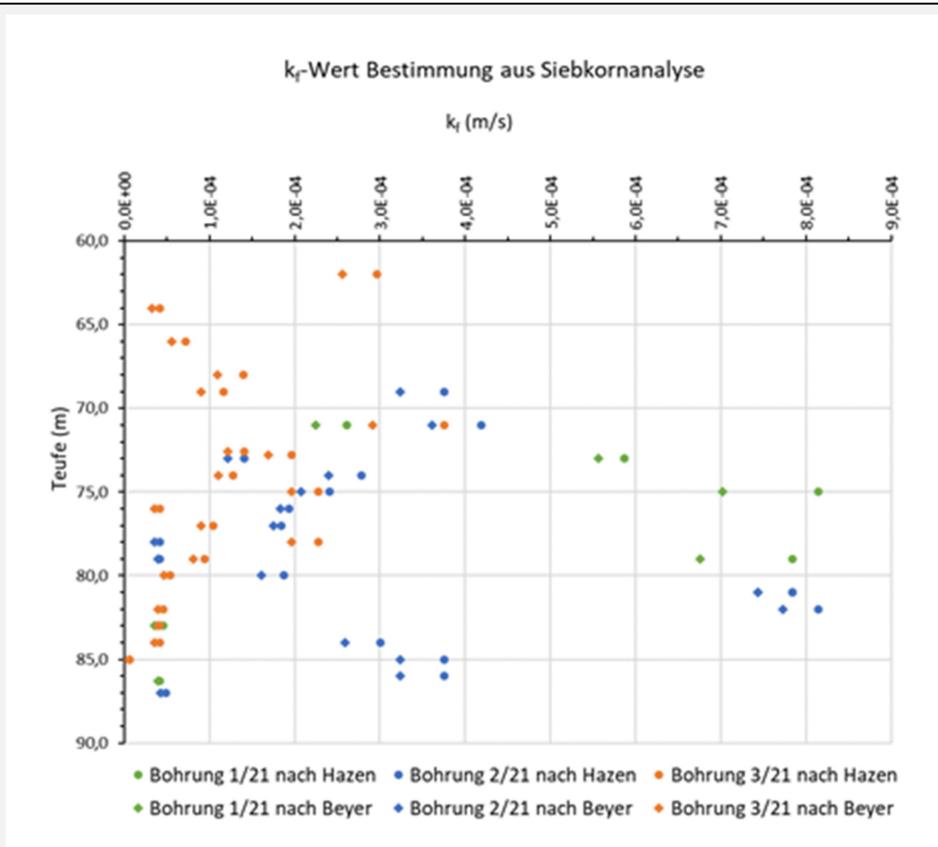


Abbildung 20: Hydraulische Durchlässigkeit ermittelt aus der Korngrößenverteilung (DIN EN ISO 17892-4) nach Beyer und Hazen über die Teufe des Speicherhorizonts

Tabelle 4: Gemittelte Durchlässigkeiten aus der Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4

	CAU 1/21	CAU 2/21	CAU 3/21
$k_f$ -Wert gemittelt (m/s)	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$

Der mittlere  $k_f$ -Wert über alle Messungen der drei Bohrungen liegt bei  $1,7 \cdot 10^{-5}$  m/s, wobei tendenziell eine Abnahme der  $k_f$ -Werte über die Tiefe zu erkennen ist (Abbildung 21). Die im Permeameter gemessenen  $k_f$ -Werte (Tabelle 5) sind somit im Mittel um eine Größenordnung kleiner als die durch Korngrößenanalysen berechneten Werte ( $2,4 \cdot 10^{-4}$  m/s).

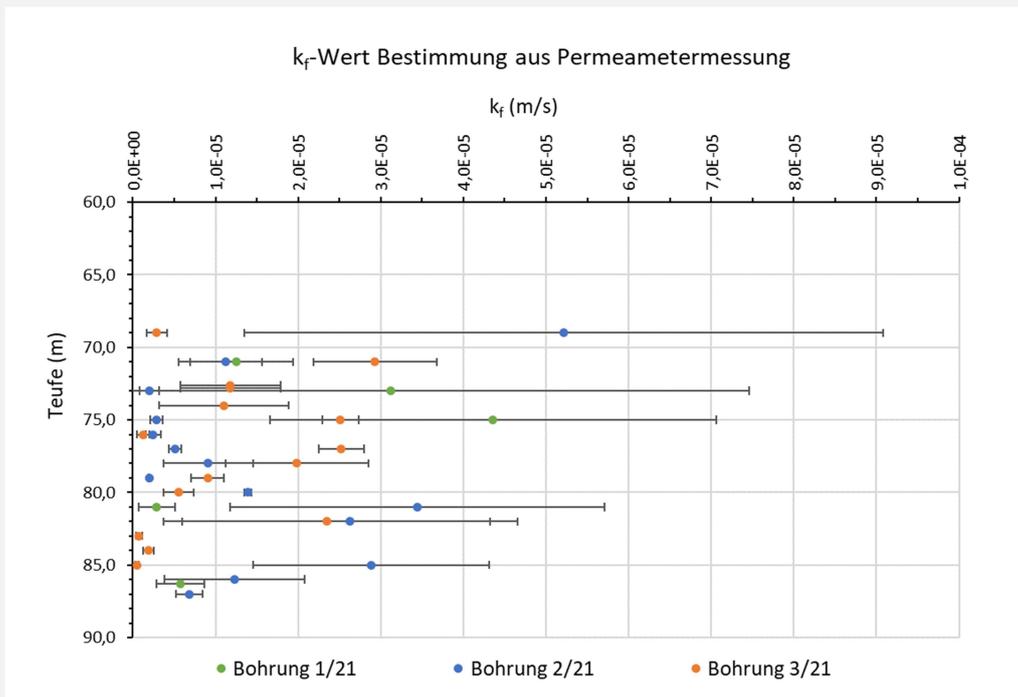
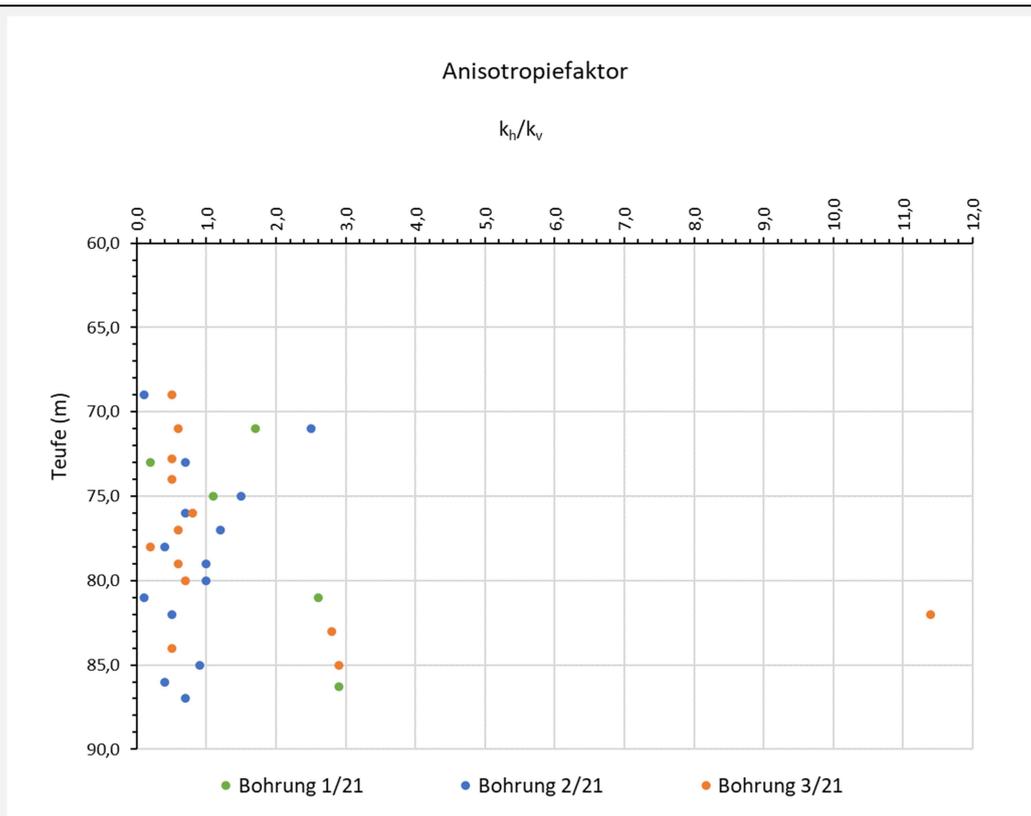


Abbildung 21: Aus Permeametermessungen ermittelte mittlere hydraulische Durchlässigkeit (Punkte) mit Standardabweichung (Balken) der Mehrfachmessungen über die Teufe des Speicherhorizonts

Tabelle 5: Gemittelte Durchlässigkeit ermittelt aus den Permeametermessungen nach DIN 18130-1

	CAU 1/21	CAU 2/21	CAU 3/21
$k_f$ gemittelt (m/s)	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

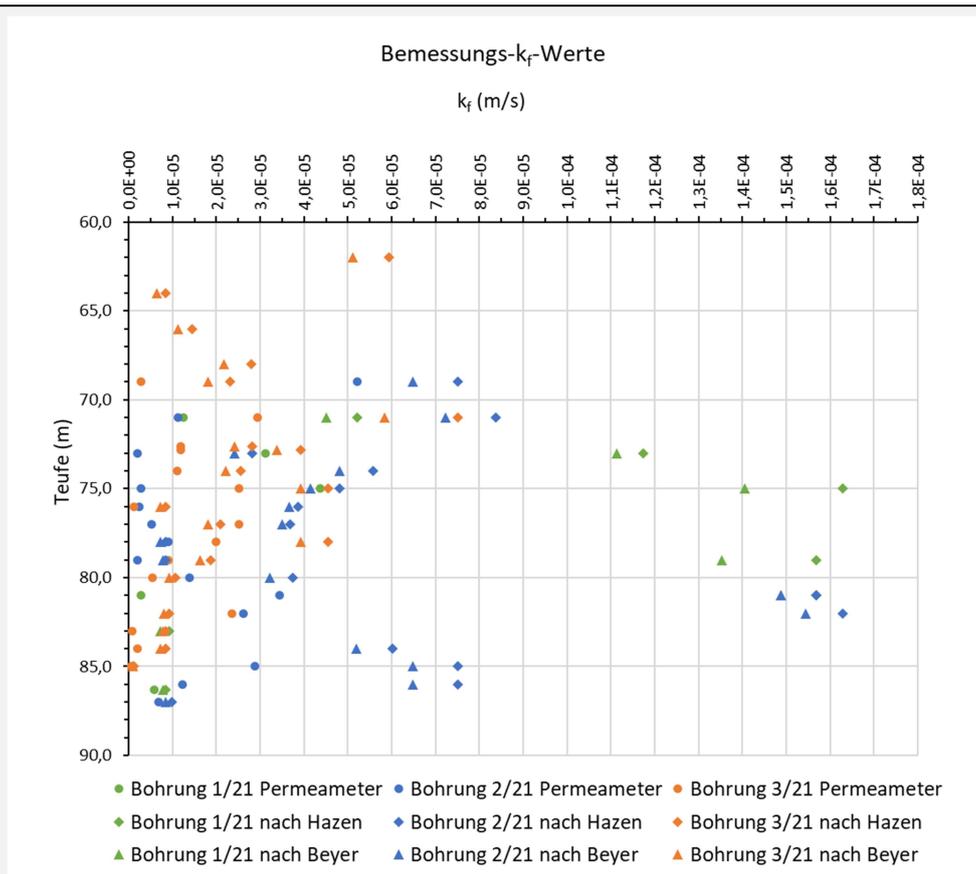
Der aus horizontaler und vertikaler Durchlässigkeit ermittelte Anisotropiefaktor ( $k_{\text{horizontal}}/k_{\text{vertikal}}$ ) variiert zwischen 0,1 und 11,4 und beträgt im Mittel 1,4. Eine Abhängigkeit der Größe der Anisotropie von der Tiefe ist dabei nicht erkennbar (Abbildung 22). Ein insbesondere in der numerischen Modellierung oft angenommenes Verhältnis von  $k_{\text{horizontal}}/k_{\text{vertikal}}$  zwischen 2 und 10 für Lockergesteins-Aquifere (Schäfer, 2022; Sitzenfrei, 2007) konnte mit den Messungen nicht nachvollzogen werden, was vermutlich auf einen Skaleneffekt zurückzuführen ist. In sandigen Sedimenten ist die vertikale hydraulische Durchlässigkeit gegenüber der horizontalen geringer, weil sich plattige Sandkörner horizontal ablagern und weil bei der Sedimentation dünne gering durchlässige Schichten in die Sande eingelagert werden können. Den Effekt einer dünnen Schluffschicht kann man jedoch nur messen, wenn eine derartige Schicht in der kleinen ausgestochenen Sedimentprobe enthalten war. Erst auf größerer Skala ist mit höherer Wahrscheinlichkeit die Anwesenheit gering durchlässiger Schichten zu erwarten.



**Abbildung 22: Anisotropiefaktor horizontale / vertikale hydraulische Durchlässigkeit über die Teufe des Speicherhorizonts**

Da unterschiedliche Bestimmungsmethoden des  $k_f$ -Wertes nicht von gleichen Randbedingungen ausgehen, wurde der Bemessungswert herangezogen, der aus dem Produkt des methodisch ermittelten  $k_f$ -Wertes und einem empirischen Wichtungsfaktor in Abhängigkeit von der gewählten Methodik (Sieblichenauswertung= 0,2, Permeameter= 1, Feldmethoden=2) nach DWA-A 138 (2005) hervorgeht. Der mittlere Bemessungs- $k_f$ -Wert über alle Messungen liegt für die Sieblichenauswertung somit bei  $4,7 \cdot 10^{-5}$  m/s, für die Permeametermessungen ist er identisch mit dem mittleren Messwert von  $1,7 \cdot 10^{-5}$  m/s (Tabelle 6, Abbildung 23). Der Bemessungswert liegt im Mittel über alle Permeametermessungen und Siebanalysen in allen drei Bohrungen bei  $2,5 \cdot 10^{-5}$  m/s.

Nach Auswertung der Ergebnisse aus Siebanalysen und Permeameterversuchen und unter Berücksichtigung des Bemessungswertes sind die anstehenden untersuchten Schichten somit nach DIN 18130-1 (1998) als durchlässig zu klassifizieren, fallen jedoch durch den unerwartet hohen Feinsandanteil geringdurchlässiger aus als aus der Ansprache des Bohrguts erwartet. Proben aus Bohrung CAU 3/21, in denen Feinsande im Hauptanteil stärker vertreten waren als in den anderen Bohrungen, weisen im Mittel die geringste Durchlässigkeit auf, während Proben aus Bohrung CAU 1/21, die hauptsächlich Mittelsande aufwiesen, im Mittel die höchste Durchlässigkeit zeigen (Tabelle 6).



**Abbildung 23: Gemittelte  $k_f$ -Werte mit Korrekturfaktor (Bemessungswert) in Abhängigkeit von der gewählten Methodik (Sieblinienauswertung= 0,2, Permeameter= 1) nach DWA-A 138 (2005) über die Teufe des Speicherhorizonts**

Die  $k_f$ -Werte, die mithilfe der Permeametermessungen bestimmt wurden, waren im Mittel um eine Größenordnung kleiner als aus der Korngrößenanalyse abgeleitete Werte. Auch in anderen Studien wie Storz et al. (2017) oder Lewin et al. (2014) waren aus Siebanalysen bestimmte  $k_f$ -Werte um eine Zehnerpotenz größer als in Permeameterversuchen oder großskaligen Feld- und Laborversuchen (z.B. Pumpversuch) bestimmte hydraulische Durchlässigkeiten, weshalb letztere daher als repräsentativer betrachtet werden als Werte, die aus empirisch hergeleiteten Gleichungen der Auswertung von Siebkurven resultieren (z. B. Englert et al. 2000; Lewin et al. 2014). Mögliche Ursachen für eine Abweichung der aus Siebanalysen bestimmten  $k_f$ -Werte in dieser Größenordnung könnte zum einen die Vernachlässigung eines heterogenen Schichtenaufbaus des Aquifers (Lewin et al. 2014) und somit der natürlichen Lagerung der Sedimente, als auch Messunsicherheiten und die Wahl der Berechnungsmethoden sein (Matthes et al., 2012). Den größten Einfluss auf den  $k_f$ -Wert hat jedoch nach Matthes et al. (2012) die Wahl des Labors, in dem die Korngrößenanalysen durchgeführt werden. Storz et al. (2017) empfehlen für eine präzise und zuverlässige Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit eine Bestimmung mithilfe von Permeametermessungen oder Pumpversuchen nach DIN 18130-1/-2 (1998).

**Tabelle 6: Bemessungs- $k_f$ -Werte ermittelt aus Permeametermessungen und Siebanalysen**

	<b>CAU 1/21</b>	<b>CAU 2/21</b>	<b>CAU 3/21</b>
Bemessungs- $k_f$ -Wert Permeametermessungen gemittelt (m/s)	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Bemessungs- $k_f$ -Wert Siebanalysen gemittelt (m/s)	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Bemessungs- $k_f$ -Wert gemittelt (m/s)	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$

Auch Permeametermessungen unterliegen einer Messunsicherheit. Bei der Durchführung der Messungen ist vor allem darauf zu achten, dass die Probe nicht zu schnell gesättigt wird, da es sonst zu einer Verringerung der Durchlässigkeit aufgrund von Verschlammung kommen kann (Eijkelkamp, 2017). Ebenso kann durch die Probenahme die natürliche Lagerung gestört werden, wodurch an den Rändern der Probe ein bis zu 5 mm mächtiger Bereich verändert werden kann (Verdichtung, Risse, Verschmierungen) (Matthies, 1996; Amt für Landwirtschaft und Natur Zürich, 1998). Die gemessene Durchlässigkeit hängt zudem von dem verwendeten Permeameter und der Länge der Probe ab, daher charakterisieren nach dem Amt für Landwirtschaft und Natur Zürich (1998)  $k_f$ -Werte den Untergrund in der Regel nur innerhalb der gleichen Methode.

Für den Standort Bremerskamp wurde die Durchführung eines Pumpversuchs empfohlen, der im Gegensatz zu den an kleinen Probenmengen durchgeführten Siebungen und Permeametermessungen einen großräumigen Mittelwert der hydraulischen Durchlässigkeit des Speicherhorizonts ergibt. Leider wurde der Pumpversuch zum Abschluss des Projekts noch nicht begonnen, so dass ein Vergleich der Ergebnisse mit den durchgeführten Laboruntersuchungen nicht möglich ist.

#### **2.7.2.4 Effektive Porosität**

Auch die effektive Porosität geht in die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit ein. Eine Abschätzung über Literaturwerte oder empirische Poroperm-Beziehungen (z.B. Kozeny-Carman) ist oft ausreichend, da die effektive Porosität von Sanden nur über einen kleinen Wertebereich (ca. 10% - 25%) variiert und somit nur einen geringen Einfluss auf die Abstandsgeschwindigkeit und die Wärmeausbreitung im Untergrund hat.

### **Beispiel Bremerskamp**

Für die am Standort im Speicherhorizont angetroffenen Sande wurde nach Hölting & Coldewey (2009, nach Busch/Luckner (1974)) eine effektive Porosität von 20% angenommen. Dieser Wert wurde in Sensitivitätsanalysen in einem Bereich von 10-25% variiert (s. Kap. 0), was aber nur geringe Auswirkungen auf die Wärmeausbreitung im Untergrund hatte.

#### **2.7.2.5 Abstandsgeschwindigkeit**

Mit hydraulischer Durchlässigkeit ( $k_f$ ), Gradient ( $I$ ) und effektiver Porosität ( $n_e$ ) lässt sich die Abstandsgeschwindigkeit ( $v_a$ ) im Grundwasserleiter berechnen.

$$v_a = k_f \cdot I / n_e$$

Bei ATES ist dabei die Abstandsgeschwindigkeit im Speicherhorizont relevant, bei BTES-Anlagen in allen von den Erdwärmesonden durchteuften Horizonten. Falls nicht alle erforderlichen Parameter für alle Schichten gemessen wurden oder zur Berücksichtigung von Messungenauigkeiten, kann eine worst case Abschätzung durchgeführt werden. Bei zu hoher Abstandsgeschwindigkeit kann die eingespeicherte Wärme aus dem Speicher heraustransportiert werden, was den Wirkungsgrad des Speichers verringern würde. Da der Wirkungsgrad eines Wärmespeichers nicht nur von der Abstandsgeschwindigkeit abhängt, sondern z.B. auch vom Speicherbetrieb, Beladungstemperaturen, bei ATES von den Pumpraten und bei BTES von der räumlichen Anordnung der Erdwärmesonden, werden in diesem Fall detaillierte Untersuchungen durch ein numerisches Modell empfohlen.

### Beispiel Bremerskamp

Mit den ermittelten Gradienten, den hydraulischen Durchlässigkeiten und einer angenommenen effektiven Porosität von 20% wurden die Abstandsgeschwindigkeiten berechnet (Tabelle 7). Mit der hohen hydraulischen Durchlässigkeit aus dem Mittelwert aller Siebungen und dem maximalen gemessenen Gradienten ergeben sich eine Abstandsgeschwindigkeit von 28,3 m/a (worst case), mit dem mittleren Bemessungswert der Durchlässigkeit und mittlerem Gradienten 2,3 m/a. Lokal, z.B. in gut durchlässigen Schichten oder Linsen, kann die Abstandsgeschwindigkeit höher als der Mittelwert sein.

Tabelle 7: Abstandsgeschwindigkeit [m/a] für unterschiedliche Gradienten und hydraulische Durchlässigkeiten (effektive Porosität 20%)

		Hydraulische Durchlässigkeit [m/s]				
		Siebung		Permeametermessung		Bemessungswert
		Mittelwert	Bemessungswert	Mittelwert	Bemessungswert	Mittelwert
Gradient [%]		<b>2,4E-04</b>	<b>4,7E-05</b>	<b>1,7E-05</b>	<b>1,7E-05</b>	<b>2,5E-05</b>
min	<b>0,47</b>	17,9	3,5	1,3	1,3	1,9
mittel	<b>0,59</b>	22,5	4,4	1,6	1,6	2,3
max	<b>0,75</b>	28,3	5,5	2,0	2,0	2,9

#### 2.7.2.6 Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität

Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der Sedimente haben nur einen geringen Einfluss auf die Effektivität eines Wärmespeichers. Sie liegen für unterschiedliche Sedimente in einem engen Wertebereich, so dass Literaturwerte (z.B. nach VDI4640 Blatt1 (2010)) oft ausreichen. Wurden ungestörte Sedimentproben entnommen, lassen sich beide Parameter mit geringem Aufwand messen. Dabei werden zwei Nadeln in eine ausreichend durchfeuchtete Probe gesteckt und ein Messgerät ermittelt innerhalb weniger Minuten die gewünschten Parameter. Aussagekräftiger für die Wärmegewinnung durch Erdwärmesonden sind thermal response tests, die jedoch den Bau einer Erdwärmesonde erfordern und somit deutlich kostenintensiver sind. Für die Planung von BTES-Anlagen mit vielen Erdwärmesonden ist dieser zusätzliche Untersuchungsaufwand zur Erhöhung der Planungssicherheit sinnvoll, insbesondere wenn die Erdwärmesonde für den thermal response test später für den BTES genutzt wird.

### Beispiel Bremerskamp

In Abhängigkeit von der angetroffenen geologischen Schichtung wurde an mehreren Stellen eines Sedimentkernes die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der Sedimente mit dem Gerät „Thermal Properties Analyzer“ von Decagon Devices gemessen (Abbildung 24). Die mittlere gemessene Wärmeleitfähigkeit beträgt 2,5 W/(m·K) und liegt damit innerhalb der aus der Literatur erwarteten Spannweite (z.B. VDI 4640, 2010; Geo-Pot, 2010; Bohne, 2004) für wassergesättigten Sande (1,7– 5,0 W/(m·K)). Die spezifische Wärmekapazität liegt im Mittel bei 3,0 MJ/(m<sup>3</sup>·K) (Literatur: 2,0 – 3,1 MJ/(m<sup>3</sup>·K)), wobei ab einer Tiefe von 80 m höhere Werte gemessen wurden, was auf ein Vorkommen schluffiger Sedimente und einer damit verbundenen höheren Wärmekapazität zurückzuführen sein kann (Schluff: 1,6-3,6 MJ/(m<sup>3</sup>·K)), worauf auch die Siebungen hinweisen.

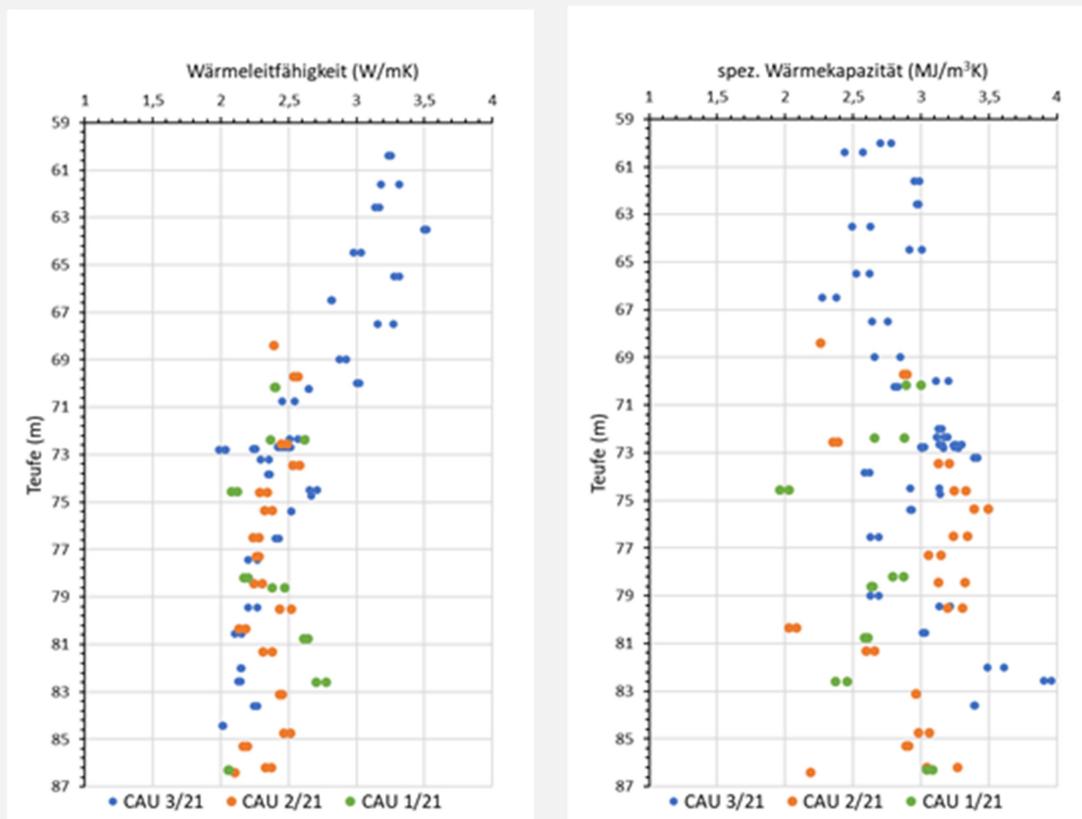


Abbildung 24: Gemessene Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität über die Tiefe des Speicherhorizonts

### 2.7.3 Chemische Untersuchungen

Die Temperaturveränderung kann innerhalb des thermisch beeinflussten Aquiferbereichs von ATES- oder BTES-Anlagen chemische oder mikrobiell katalysierte Reaktionen auslösen, deren Ausmaß vom Temperaturniveau und von der Zusammensetzung des Grundwassers und des Sediments abhängt. Diese Veränderungen können ein Einwand der genehmigenden Behörden gegen den Bau und Betrieb von UTES-Anlagen sein, wenn nachteilige und nicht reversible geochemische Veränderungen der

hydrochemischen Grundwasserzusammensetzung oder des Grundwasserleiterbioms befürchtet werden. Bei ATES-Systemen sind darüber hinaus Reaktionen des gefördertem Wassers in der obertägigen Anlage oder bei der Reinjektion des veränderten Wassers in den Grundwasserleiter möglich, was jedoch eher ein technisches und beherrschbares Problem darstellt. Eine umfassendere Bewertung der thermisch induzierten hydrochemischen, mikrobiologischen und faunistischen Veränderungen in Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern findet sich in Dahmke et al. (in prep.).

Bisher beschränken sich Untersuchungen zum Einfluss von Temperaturveränderungen auf wenige Grundwasserleitertypen (i.d.R. jungtertiäre und pleistozäne quarzreiche Sande aus Norddeutschland und den Niederlanden). Bei den Untersuchungen handelt es sich meistens um Batch- oder Durchflusssäulenversuche im Labor, deren Ergebnisse nicht einfach auf Anlagen im Feldmaßstab übertragbar sind, da sie folgende Prozesse vernachlässigen:

- Komplexe Strömungs- und Temperaturmuster als auch damit verbundene hydrochemische Prozesse durch transiente Strömungen und den heterogenen hydrogeologischen und geochemischen Aufbau der Grundwasserleiter
- Zyklischer Austausch des überwiegend selben Wasservolumens zwischen den Brunnen einer ATES-Anlage
- (bisher nur schwer quantifizierbare) Zumischungsprozesse aufgrund der Grundwassergrundströmung
- Veränderung des Sediments über die Betriebszeit in seiner hydrogeochemischen Reaktivität und Zusammensetzung
- potentiell signifikante Ent- und Begasungs- und Ausfällungsprozesse im obertägigen Wärmetauscher

Zur Untersuchung der Auswirkungen einer Erwärmung des Grundwassers auf Feldskala wurde im Rahmen des BMBF-Vorhabens TestUM-Aquifer 70 °C warmes Wasser in dynamischem Wechsel zwischen infiltrierenden und exfiltrierenden Bedingungen in einen 10-15 m mächtigen Aquifer injiziert, der aus glazigenen Wechselfolgen von Geschiebemergel bzw. Geschiebelehm und quarzreichen,  $C_{org}$ -armen Sandersedimenten besteht. Trotz aller zuvor genannten Einschränkungen konnten Lüders et al. (2021) zeigen, dass auf experimentellen Labordaten basierende Prognosen zum (initialen) Betrieb dieser HT-ATES-Anlage durchaus zutreffend sind.

Folgende geochemische Veränderungen finden bei einer Erwärmung des Grundwassers und des Sediments statt:

### ***2.7.3.1 Thermisch induzierte Konzentrationsänderungen von Hauptinhaltsstoffen im „Grundwasser“***

Hauptkomponenten der Grundwasserinhaltsstoffe, zu denen in erster Linie die gelösten Komponenten Kalzium, Magnesium, Natrium, Kalium, Silizium, TIC (anorganischer Kohlenstoff), Sulfat, Chlorid und DOC (organischer Kohlenstoff), teilweise aber auch Nitrat, Mangan und Eisen zählen, können durch Abkühlung oder Erwärmung des Grundwassers potentiell zu Veränderungen der Grundwasserqualität oder zu Beeinträchtigungen im technischen Betrieb geothermischer

Systeme führen. Temperaturbedingte Konzentrationsänderungen können v.a. durch Minerallösungen und -fällungen, Sorption/Desorption und Redoxprozesse auftreten (s. auch folgende Kapitel).

Die Untersuchungen beschränkten sich bisher auf Säulenversuche mit Grundwasser und Sedimenten aus pleistozänen, glazialen bzw. jungtertiären Grundwasserleitern in einem Temperaturbereich von 10-70°C. Im Auslauf der Säulenversuche bzw. in den Batchversuchen sind bei den meisten Hauptinhaltsstoffen nur geringe temperaturbedingte Konzentrationsveränderungen zu sehen, die die natürliche Schwankungsbreite der Konzentrationen im Aquifer nicht überschreiten (Abbildung 25). Eine (schwache) positive Korrelation zwischen der gelösten Konzentration und dem Temperaturanstieg ist lediglich bei den gelösten Hauptkomponenten K, Si und DOC erkennbar.

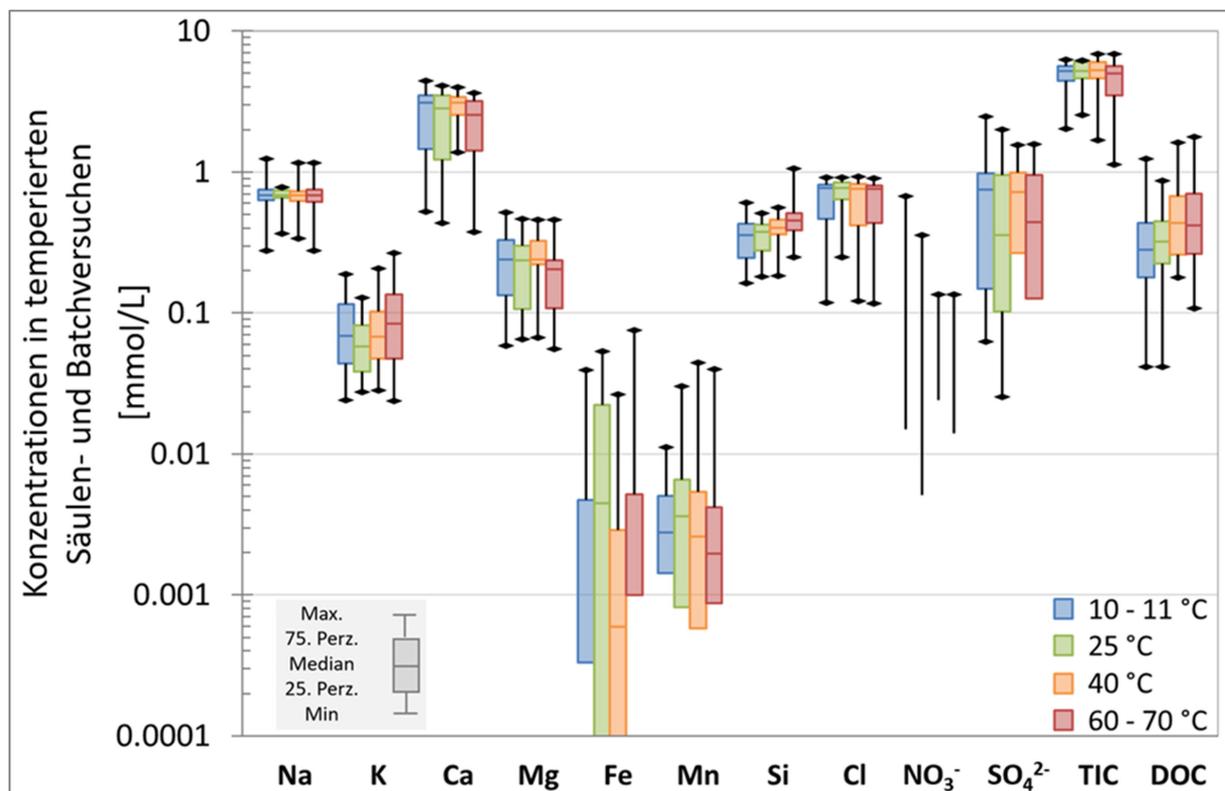


Abbildung 25: Ablaufkonzentrationen von temperierten Säulenversuchen und Konzentrationen in Batchversuchen mit unterschiedlichen sandigen Lockersedimenten (Bonte et al. (2013 a), Jesušek et al. (2013), Lüders et al. (2016, 2020, 2021))

### 2.7.3.2 Minerallösung / -fällung

Mineralausfällungen von Karbonaten, sowie Eisen- und Mangan-(hydr)oxiden im Bereich von Brunnen, Rohrleitungen und Wärmetauschern von ATES-Anlagen (z.B. Sinterkalke, Brunnenverockerung), sowie daraus resultierende Leistungseinbußen sind eingehend beschrieben (z.B. VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 (2019)), ihre Minimierung bzw. Vermeidung wird aber immer noch als wichtige Aufgabe im Rahmen der Planung und des Betriebs von ATES-Anlagen angesehen (Hooghart & Posthumus (1990), Jenne et al. (1992), Kallesøe et al. (2019)). Technische Maßnahmen zur Minimierung bzw. Vermeidung von Mineralfällungen (z.B. Wasserenthärtung, Druckhaltung, Inertgasbeaufschlagung) sind bekannte Technologien der Wasseraufbereitung (VDI-Richtlinie 4640

Blatt 2 (2019)), erhöhen aber die Kosten des Speicherbetriebs. Bei Wahl der Aufbereitungsmethode ist zu berücksichtigen, dass das behandelte Wasser in den Grundwasserleiter reinjiziert wird, was unter Umständen zu einer Minerallösung im Aquifer führen kann.

BTES-Anlagen werden durch Minerallösung und -fällung weniger beeinflusst, da es keinen direkten Kontakt zwischen Wärmeträgerfluid und Grundwasser gibt und da eine Mineralfällung im Sediment den Betrieb der Erdwärmesonden nicht nachteilig beeinträchtigt.

### *Karbonate*

Bei einer Temperaturerhöhung im Zuge einer Wärmespeicherung nehmen die Löslichkeiten von Karbonaten und  $\text{CO}_2$  ab, bei Abkühlung des Wassers nehmen die Löslichkeiten zu. Entscheidend für das Ausmaß einer Karbonatfällung und die Ausfällungsraten sind der pH-Wert, der  $\text{CO}_2$ -Partialdruck, die Ionenstärke und die sich aus der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers ergebende Übersättigung beispielsweise gegenüber Kalzit. Eine Ausgasung von  $\text{CO}_2$  führt hierbei zu einer weiteren Steigerung der Übersättigung.

Der Beginn der Karbonatfällung bei ansteigenden Temperaturen wird in natürlichen Gesteins-Wasser-Systemen in der Regel erst ab einer leichten Übersättigung ablaufen. Für Kalzit tritt z.B. eine messbare Kalzitfällung oft erst bei einer Übersättigung  $>0,6$  auf. Als Grund dafür wird die Gegenwart von Fällungsinhibitoren wie z.B. organischen Säuren, Phosphat oder  $\text{Mn}^{2+}$  (Dromgoole & Walter (1990), Inskeep & Bloom (1986)) diskutiert, aber auch kinetische Ursachen wie die Überwindung einer bestimmten Aktivierungsenergie kommen als Ursachen in Betracht (z.B. Griffioen & Appelo (1993)). Unter Annahme solcher „Mindestübersättigungen“ lassen sich die zu erwartenden Karbonat-Ausfällungen mit Hilfe thermodynamischer Modellprogramme berechnen, so dass belastbare Prognosen zur Menge der Karbonatfällung möglich sind.

### *Eisen(III) und Mangan(IV)*

Gelöstes  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Mn}^{2+}$  können in norddeutschen Aquiferen überwiegend unter anaeroben Bedingungen in erhöhten Konzentrationen auftreten und bei Erhöhung des Eh-Werts in Form gering löslicher Eisen(III)- und Mangan(IV)-Minerale ausfallen. Die Ursache kann ein Kontakt mit Luftsauerstoff in der obertägigen ATES-Anlage oder Atmosphäreneintritt in den Aquifer bei übermäßiger Grundwasserabsenkung sein, oder eine Zumischung von Grundwasser mit höheren Eh-pH-Bedingungen.

### *Silikate*

Aus geochemischen Untersuchungen zu Projekten mit hohen Speichertemperaturen ist bekannt, dass bei einer Temperaturerhöhung die Löslichkeiten von Silikaten, Quarz und amorphem  $\text{SiO}_2$  bis zu Temperaturen von  $250^\circ\text{C}$  generell zunehmen (z.B. Fleming & Crerar (1982), Jesušek (2012)). Lösungs- und Fällungspotenzial sind zwar bei geringeren Temperaturen kleiner als von Kalzit, aber die Auswirkungen dieser Reaktionen auf die obertägige ATES-Anlage sind bisher kaum bekannt.

## Beispiel Bremerskamp

Das Grundwasser aus Messstelle CAU 1/21 wurde dreimal beprobt, das Grundwasser aus den Messstellen CAU 2/21 und CAU 3/21 jeweils einmal und die Proben wurden auf ihre Inhaltsstoffe hin analysiert (Tabelle 8). Die Grundwasserprobe aus CAU 1/21 vom 24.11.2021 wurde zusätzlich auf typische organische Schadstoffe und deren Abbauprodukte hin analysiert (BTEX, PCE, TCE, DCE, VC, Ethen, Ethan), um eine mögliche Kontamination des Untergrunds zu detektieren, es konnte jedoch keine dieser Substanzen nachgewiesen werden.

Tabelle 8: Chemische Analysen der Grundwasserproben

Messstelle	Datum	Probenehmer	T_Beginn	T_Ende	Gerät	Pumpdauer	P.Strom	P.Menge	T <sub>w</sub>	pH	el. Leitf.	O <sub>2</sub>	RedOx-Sp.	RedOx-Pot.
	[dd.mm.jj]		[hh:mm]	[hh:mm]		[min]	[L/min]	[L]	[°C]		[µS/cm]	[mg/l]	[mV]	[mV]
CAU 1/21	24.11.2021	CAU	13:30	15:45	MP1	135	10	1350	9,6	7,49	760	0,90	-36	182
CAU 1/21	16.02.2022	CAU	10:30	12:00	MP1	90	16	1440	9,6	7,45	747	[6.01]	[195]	[413]
CAU 1/21	21.04.2022	CAU	10:30	11:20	MP1	50	15	750	9,7	7,26	740	0,08	123	341
CAU 2/21	16.02.2022	CAU	14:30	16:00	MP1	90	16	1440	10,7	7,44	585	0,11	-80	137
CAU 3/21	16.02.2022	CAU	15:45	17:15	MP1	90	16	1440	10,4	7,42	621	0,25	-26	191

Messstelle	Datum	NPOC	TIC	TC	Ac <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Fe <sub>diss</sub>	Mn <sub>diss</sub>	Si <sub>diss</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
	[dd.mm.jj]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
CAU 1/21	24.11.2021	9,42	68,8	78,2	n.a.	27,2	<0,4	<0,4	<4	75,6	3,7	34,2	10,7	126	1,49	0,371	15,1	n.a.
CAU 1/21	16.02.2022	2,9	62,5	65,4	<0,3	29	<0,15	<0,3	<0,15	85,1	3,44	15,9	10,9	139	<0,015	0,331	14,5	n.a.
CAU 1/21	21.04.2022	6,11	65,7	71,8	<0,4	28,1	<0,1	<0,2	<0,4	80,2	3,33	14,1	10,3	135	1,54	0,31	14,3	0,34
CAU 2/21	16.02.2022	1,3	57,3	58,6	<0,3	18,1	<0,15	<0,3	<0,15	40,8	2,88	12,1	8,3	105	<0,015	0,297	14,4	n.a.
CAU 3/21	16.02.2022	3,3	61	64,3	<0,3	20,5	<0,15	<0,3	<0,15	31,2	2,99	14,9	9,16	112	1,41	0,229	15,2	n.a.

Betrachtet man die Analyseergebnisse des Grundwassers aus Messstelle CAU 1/21 vom 24.11.2021, so zeigt sich, dass dieses bereits leicht gegenüber Kalzit (SI= 0,35), Rhodochrosit (SI=0,53) und Siderit (SI=0,19) übersättigt ist. Bei einer Erwärmung von 9,6°C auf eine Zieltemperatur von 20°C verschiebt sich das Kalkkohensäuregleichgewicht und die Übersättigung der Karbonate nimmt zu, was neben Rhodochrosit, Siderit, Apatit und Vivianit insbesondere zu einer Ausfällung von Kalzit führen kann. Bei Erhöhung der Eh-pH-Bedingungen werden gelöstes Fe(II) und Mn(II) zu Fe(III) und Mn(IV) oxidiert, deren Minerale geringer löslich sind und ausfallen können.

Weitergehende Simulationen wurden mit dem Programm Phreeqc durchgeführt. Hierbei wurden zwei verschiedene Herangehensweisen genutzt:

- Eine Potentialberechnung zur Abschätzung maximal möglicher Mineralausfällungen unter Berücksichtigung verschiedener typischer Minerale und unter Annahme von Ausfällungen bis zum Ausgangssättigungszustand oder bis zu einem vollkommenden Gleichgewicht (Sättigungsindex = 0), jeweils bei Annahme von für CO<sub>2</sub> geschlossene, halboffene und offene Systeme.
- Ein kombinierter Labor- und Simulations-Ansatz zur möglichst genauen Abschätzung tatsächlich zu erwartender Kalzit-Ausfällungen.

Um die zunächst noch unbekanntesten Bedingungen in der obertägigen Anlage zu adressieren, wurden für die Potentialberechnungen aus Ansatz a) unterschiedliche Szenarien definiert:

- **Szenarien 1 bis 4**  
Fällungsmöglichkeit für Kalzit, Rhodochrosit, Siderit,  $\text{Fe(OH)}_3(\text{a})$ , Apatit und Vivianit ohne Unterschreitung der initialen Übersättigung ( $\text{SI}_{\text{Ziel}} = \text{SI}_{\text{Start}}$ )
- **Szenarien 1a bis 4a**  
Fällungsmöglichkeit für Kalzit, Rhodochrosit, Siderit,  $\text{Fe(OH)}_3(\text{a})$ , Apatit und Vivianit bis zum vollständigen Ausgleich der Übersättigung ( $\text{SI}_{\text{Ziel}} = 0$ )
- **Szenarien 1/1a bis 4/4a**  
Für  $\text{CO}_2$  geschlossenes System (1/1a) sowie halboffene Systeme mit abnehmendem  $\text{CO}_2$ -Partialdruck (2/2a =  $10^{-2,5}$  atm, 3/3a =  $10^{-3}$  atm, 4/4a =  $10^{-3,5}$  atm)
- **Szenarien 5 bis 8**  
Wie 1 bis 4 aber mit Zutritt von  $\text{O}_2$  zur Oxidation von Fe(II)
- **Szenarien 5a bis 8a**  
Wie 1a bis 4 a aber mit Zutritt von  $\text{O}_2$  zur Oxidation von Fe(II)

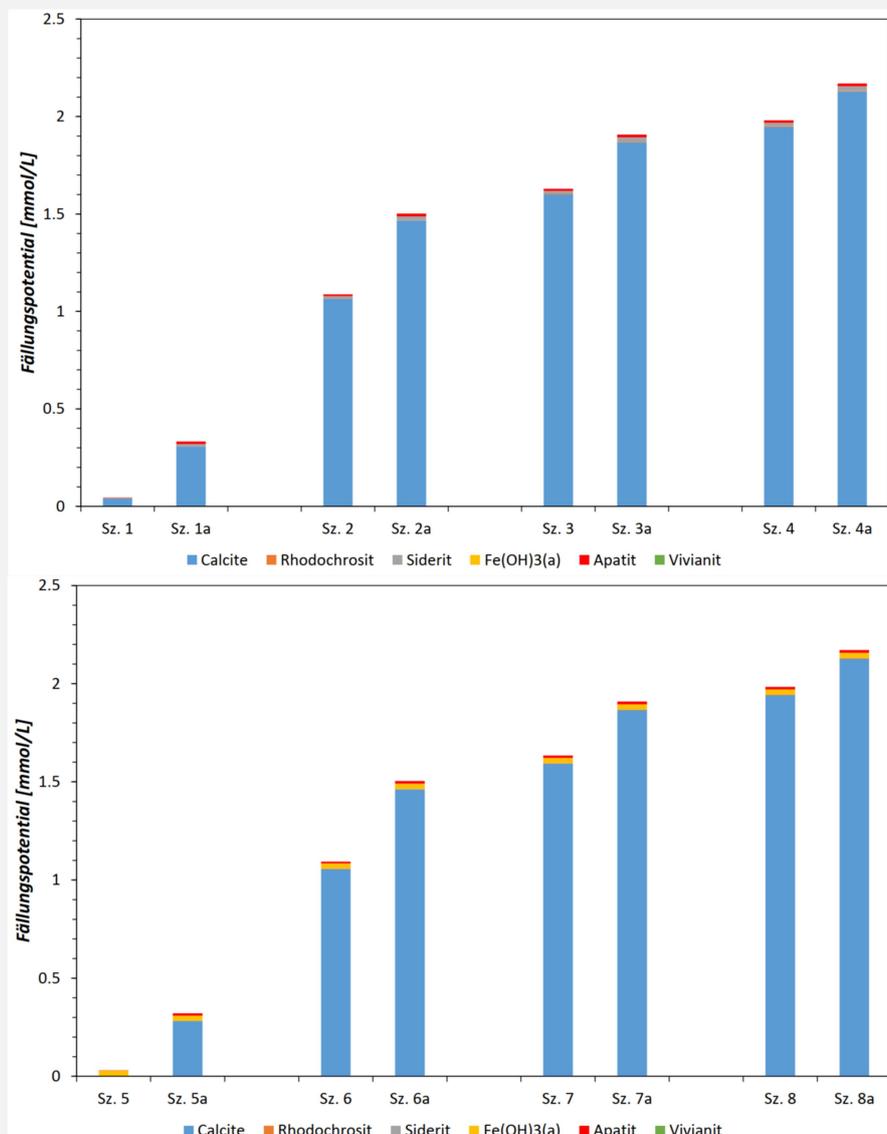
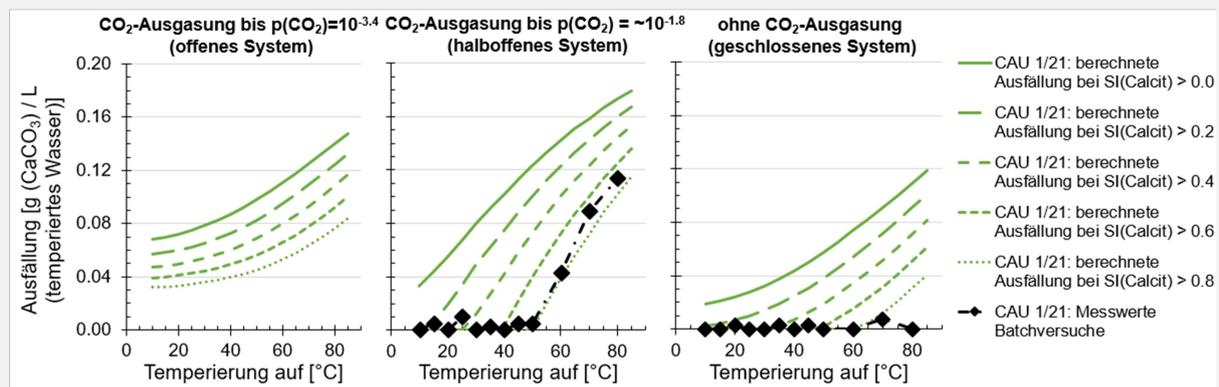


Abbildung 26: Potentielle Fällungsmengen bei Erwärmung auf 20°C unter Sauerstoffabschluss (oben) und bei Kontakt mit Sauerstoff (unten) entsprechend der definierten Szenarien

Szenario 1 zeigt, dass Karbonate bei einer Erwärmung ausfallen können, wenn die ursprünglich vorhandene Übersättigung erhalten bleibt (Abbildung 26). Die potentielle Karbonatfällung nimmt zu, wenn ein Ziel-Sättigungsindex von Null angenommen wird (Szenario 1a), bzw. wenn CO<sub>2</sub> als Gasphase aus dem Wasser entweichen kann (Szenario 2-4 / 2a-4a). Bei einem Kontakt mit Sauerstoff können zusätzlich Eisenhydroxide (Fe(OH)<sub>3</sub>) gefällt werden. Kalzit dominiert jedoch mengenmäßig die Mineralfällung.

Ansatz a) konnte aufzeigen, dass die Mineralausfällungen im Wesentlichen von Kalzit dominiert werden. Um die tatsächlich zu erwartenden Kalzit-Ausfällungen abschätzen zu können, wurden für Ansatz b) zunächst zusätzliche Laborversuche mit Standortwasser durchgeführt. Wasserproben aus den Messstellen CAU 1/21 und CAU 3/21 wurden schrittweise von 10°C auf 85 °C erwärmt und die Kalzitfällung über die gelösten Ca<sup>2+</sup>- und TIC-Konzentrationen bilanziert. Dabei wurden zwei Versuchsansätze unterschieden, eine gegenüber der Atmosphäre halboffene Versuchsreihe (halb wassergefüllt und Ablassung von Überdruck) und eine gegenüber CO<sub>2</sub> geschlossene Versuchsreihe (vollständig wassergefüllt und druckhaltend). Die Messungen wurden durch Simulationen mit PhreeqC ergänzt, um aufzuzeigen, welche Übersättigungen erreicht werden müssen, um eine Fällung auszulösen. Die Ergebnisse zeigen, dass im halboffenen System eine Kalzitfällung erst ab 50 °C auftritt und dass dabei eine hohe Übersättigung gegenüber Kalzit (SI von 0,6 bis 0,8) überschritten werden muss, bevor eine Fällung eintritt (Abbildung 27 Mitte). In einem druckhaltenden System (Abbildung 27 rechts) traten bis 80 °C keine Kalzit-Ausfällungen auf. Im Vergleich zu einem simulierten ATES-System mit offenem Gasaustausch zur Atmosphäre (Abbildung 27 links) lassen sich Karbonatausfällungen durch eine Druckhaltung somit voraussichtlich verhindern bzw. stark minimieren, zumal das Temperaturniveau nur bei 20 °C liegen soll.



**Abbildung 27: Temperaturabhängigkeit berechneter und gemessener Kalzitausfällungen für unterschiedliche Sättigungsindizes ab deren Überschreitung die Ausfällung beginnt.**

Die Berechnungen ohne CO<sub>2</sub>-Ausgasung (rechts) repräsentieren ein druckhaltendes System, die Berechnungen mit einer CO<sub>2</sub>-Ausgasung bis zu einem pCO<sub>2</sub> = ca. 10<sup>-1.8</sup> ein halboffenes System (bspw. Undichtigkeiten; Mitte) und die mit einer CO<sub>2</sub>-Ausgasung bis zu einem Gleichgewicht mit der Atmosphäre (pCO<sub>2</sub> = 10<sup>-3.4</sup>; links) ein System mit Entgasungsvorrichtung.

### **2.7.3.3 Freisetzung organischen Materials**

In den meisten Säulenversuchen mit jungtertiären und pleistozänen quarzreichen Sanden aus Norddeutschland führte eine Temperaturerhöhung zu einem Anstieg der Konzentration gelösten organischen Materials (DOC), wobei es bei Temperaturen bis 25°C maximal zu einer Verdoppelung und im Temperaturbereich 40-70°C in maximalen Fällen zu einer Verdrei- bis zu Vervierfachung kam (Bonte et al. (2013a, 2013b), Brons et al. (1991), Jesušek et al. (2013), Lüders et al. (2020)). Die Freisetzung von DOC ist unmittelbar nach dem Temperaturanstieg am stärksten und geht mit der Zeit und zunehmender Elution zurück. Das Ausmaß des DOC-Anstiegs korreliert nach den bisherigen Untersuchungen jedoch nicht mit der sedimentären  $C_{org}$ -Konzentration, sondern ist vermutlich abhängig von dessen Art und Bindungsform. Es ist noch unklar, wie lange und mit welchem Ausmaß eine DOC-Freisetzung in einer langfristig und zyklisch betriebenen UTES-Anlage anhält. Die Ergebnisse des zyklisch betriebenen Feldversuchs im TestUM-Projekt deuten jedoch darauf hin, dass die DOC-Freisetzung unter Feldbedingungen wesentlich geringer als in Laborversuchen ist.

Die (initiale) DOC-Freisetzung führte in den Laborexperimenten zum mikrobiellen Abbau der bioverfügbaren Anteile des organischen Materials, je nach Standortbedingungen durch Sauerstoffzehrung, Nitrat-, Sulfat-, Mangan-, Eisenreduktion oder Methanogenese (Bonte et al. (2013b), Jesušek et al. (2013)). Dies hat bei Reduktion vorhandener Fe(III)- und Mn(IV)-Mineralphasen eine Erhöhung der gelösten  $Fe^{2+}$ - und  $Mn^{2+}$ -Konzentrationen zur Folge und damit unter Umständen eine Erhöhung der Mineralfällung im obertägigen Teil einer ATES-Anlage (s. Kap. 2.7.3.2). Die Lösung von Fe(III)-Mineralphasen kann Spurenstoffe wie Arsen freisetzen, die an den mineralischen Oberflächen adsorbiert oder in den Mineralen eingebaut sind (s. Kap. 2.7.3.4). Findet eine Sulfatreduktion statt, führt sie zur Bildung gelösten Schwefelwasserstoffs ( $HS^-$ ), der mit Fe(II) als Eisensulfid gefällt werden kann. Eine Bildung von Methan ist möglich, wurde jedoch nur in wenigen Laborversuchen nachgewiesen. Im zyklischen betriebenen Feldversuch des TestUM-Projekts fand auch innerhalb des zweijährigen Monitoringzeitraums keine Nitrat- oder Sulfatreduktion statt, da in dem aeroben Aquifer auch die Sauerstoffkonzentrationen im direkten Nahbereich des warmen Brunnens weitgehend konstant blieben und nur im direkten Abstrom um 2-3 mg/L abnahmen.

### **2.7.3.4 Freisetzung von Spurenelementen und Schwermetallen**

Bei einer Erwärmung des Untergrunds können nach den Ergebnissen der Laborversuche Spurenelemente oder Schwermetalle von mineralischen Oberflächen desorbieren oder durch Minerallösung (auch Lösung von z.B. Fe- und Mn-(Hydr-)Oxiden) freigesetzt werden, was möglicherweise am Standort zum kleinräumigen und temporären Überschreiten geltender Schwellenwerte führen kann. Die Freisetzung von Spurenelementen und Schwermetallen wurde in Laborversuchen mit jungtertiären und pleistozänen quarzreichen Sanden aus Norddeutschland in einem Temperaturbereich von 10 – 70 °C untersucht und erwies sich als stark vom Sediment abhängig, was Prognosen für andere Standorte erschwert. Insbesondere bei hohen Speichertemperaturen sind daher Laborversuche mit Standortsedimenten zu empfehlen, um zumindest das ortsspezifische Emissionspotenzial der genutzten Aquifere einschätzen zu können. Ob und inwieweit entsprechende Laborversuche tatsächlich langfristig das Emissionspotenzial von ATES-Anlagen in Feldversuchen prognostizieren können, ist derzeit Gegenstand laufender Forschungen

Nach den bisherigen Ergebnissen verhalten sich die einzelnen Spurenelemente und Schwermetalle bei Erwärmung des Untergrunds unterschiedlich. As zeigt in den meisten Sedimenten einen

deutlichen Konzentrationsanstieg. V, Mn und Mo zeigen nur in einigen Sedimenten Konzentrationsanstiege. Die Konzentrationen von B, F, Cr, Co, Sb, Ba, Tl und U nehmen in einigen Sedimenten leicht zu, während die Konzentrationen von Al, Ni, Cu, Zn, Se, Cd, Hg, Pb von der Temperatur unbeeinflusst bleiben oder abnehmen (Abbildung 28).

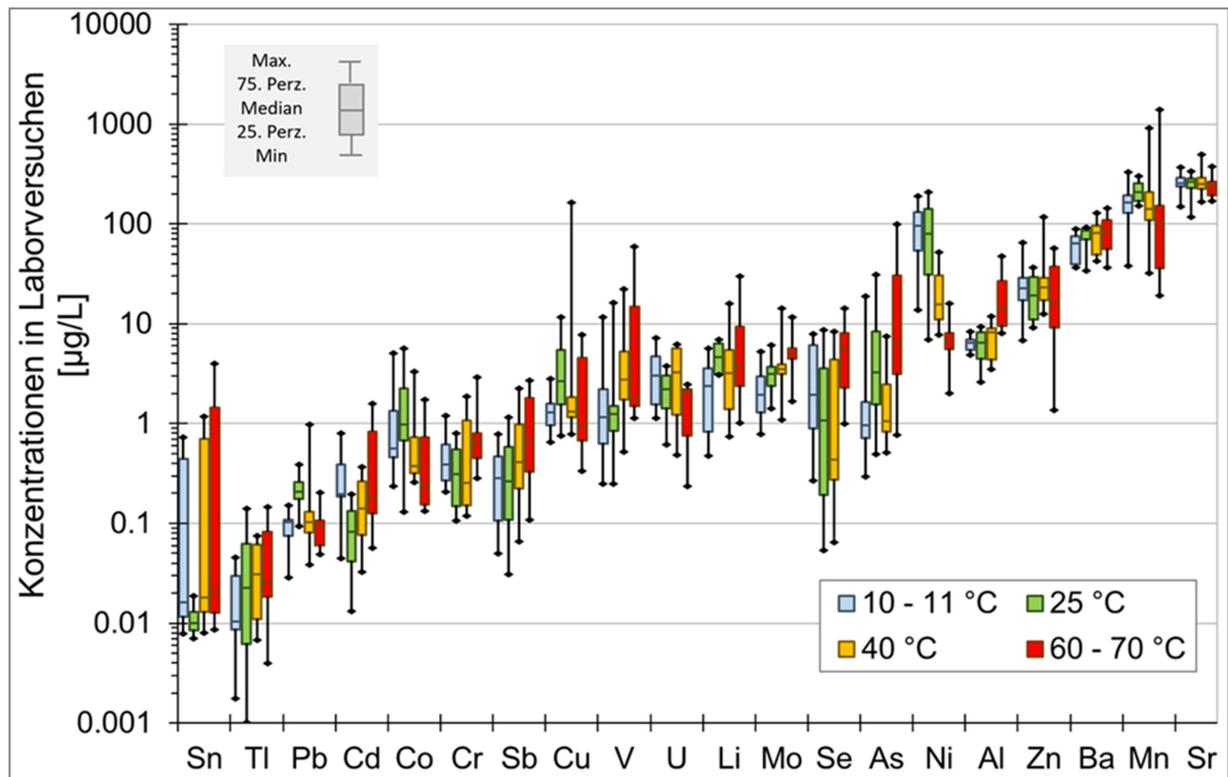


Abbildung 28: Zusammenstellung der temperaturabhängig in unterschiedlichen Laborversuchen eingestellten Spurenelementkonzentrationen  
Basierend auf Untersuchungen von Bonte et al. (2013a) (3 Sedimente, Säulenversuche), Lüders et al. (2020) (4 Sedimente, Kreislaufversuche) und Lüders et al. (2021) (3 Sedimente, Batchversuche)

Kommt es in Laborexperimenten zu einer temperaturinduzierten Freisetzung von Spurenelementen und Schwermetallen, so erfolgt diese in der Regel zu Beginn der Erwärmung und nimmt über die Laufzeit des Experiments ab (ohne Abb.) (Lüders et al. (2020)). Die Konzentrationsveränderungen erwiesen sich in der bisher einzigen hierzu durchgeführten Laborstudie (Lüders et al. (2020)) als teilweise reversibel, wobei die mittlere Reversibilität stoffspezifisch ist (Abbildung 29). Bei hohen Temperaturen ins Grundwasser freigesetzte Spurenelemente und Schwermetalle werden somit bei Abkühlung zum großen Teil wieder festgelegt.

Bei BTES-Anlagen werden die gelösten Konzentrationen mit dem jahreszeitlichen Temperaturwechsel fluktuieren, auch wenn das Ausmaß und die dahinter stehende Prozesse dafür bisher nur wenig untersucht wurden. Entsprechende Laboruntersuchungen zur temperaturabhängigen Veränderung der hydrochemischen Zusammensetzung von Porenwässern in pleistozänen Geschiebemergeln bzw. -lehmen (Meier zu Beerentrop & Dahmke (in prep.)) deuten aber daraufhin, dass die hydrochemischen Auswirkungen z.B. Leckageprozesse vom Geschiebemergel in Grundwasserleiter auch bei höheren Temperaturunterschieden nicht besonders bedeutend sind. Findet ein Abstrom aus

dem warmen Bereich der ATES- oder BTES-Anlage statt oder wird die Anlage außer Betrieb genommen, ist bei Abkühlung des Wassers mit einer Angleichung der gelösten Konzentrationen im Abstrom an den ursprünglichen Zustand zu rechnen. Mit diesen Daten ist eine erste Abschätzung der Ausbreitung von Spurenelementen und Schwermetallen im Abstrom von UTES-Anlagen zumindest für quarzreiche pleistozäne Grundwasserleiter einschließlich ihrer pleistozänen Deckschichten möglich. Die räumlich und zeitlich begrenzten geringe Emission freigesetzter Spurenelemente und Schwermetalle im Abstrom einer HT-ATES-Anlage wurde auch im bisher einzigen Pilotversuch am Standort Wittstock des BMBF-Projekts TestUM-Aquifer nachgewiesen.

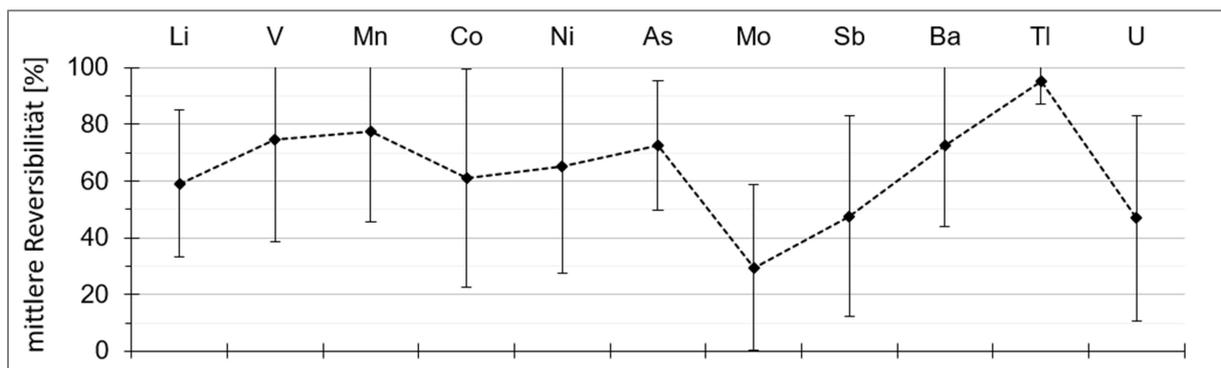


Abbildung 29: Mittlere Reversibilität der Konzentrationsänderungen von Spurenkompnenten bei einwöchiger Erwärmungen auf 25, 40 und 70 °C und anschließender Rückkühlung auf 10 °C (Lüders et al. (2020))

### Beispiel Bremerskamp

Die bisher an anderen norddeutschen pleistozänen Sedimenten durchgeführten Versuche lassen beim vorgesehenen Temperaturniveau im Speicher von 20 °C keine relevante Freisetzung von Spurenstoffen oder organischem Material erwarten. Aufgrund des angestrebten Beispielcharakters der Untersuchungen für die pot. UTES-Anlage am Bremerskamp waren jedoch entsprechende orientierende Laboruntersuchungen zunächst vorgesehen.

Leider stellte sich jedoch heraus, dass die mit den Linern entnommenen Sedimentproben in Kontakt mit Bohrspüllösung gekommen waren. Dadurch waren die Proben hydrochemisch deutlich verändert u.a. Art, Anzahl und Belegung des Austauschpotenzials, so dass keine Versuche zur Freisetzung von Spurenstoffen bei einer Erwärmung sinnvoll durchgeführt werden konnten. Ebenso waren aufgrund des organischen Materials in der Spüllösung keine interpretierbaren Versuche zur Freisetzung von DOC aus dem Sediment möglich. Da diese Bohrspüllösungsproblematik bisher bei entsprechenden Laboruntersuchungen von Aquifermaterial nicht aufgetreten war, wird aufgrund dieser Erfahrungen dringend angeraten, bei der Gewinnung von Bohrgut die Vermeidung des Bohrspülungszutritts bei der Gewinnung der Liner zum Teil der Ausschreibung zu machen.

#### **2.7.3.5 Veränderung der geochemischen/mineralogischen Sedimentzusammensetzung**

Insgesamt ist eine Veränderung der geochemischen-mineralogischen Festphasenzusammensetzung aufgrund zyklischer Temperaturveränderungen wenig untersucht. Bisherige Laborversuche deuten darauf hin, dass entsprechende Veränderungen der Festphasen auch bei einem längerfristigen Betrieb (z.B. 30 Jahre) und mit wesentlich höheren Einspeisetemperaturen (z.B. 60°C) maximal im niedrigen einstelligen Prozentbereich liegen.

Exemplarische Berechnungen zeigen für die in Lüders et al. (2016) und Popp et al. (2015) beschriebene Randbedingungen für Grundwasser bei einer Fließgeschwindigkeit von 0.02 m/d im direkten Anstrom (1 m horizontale Ausdehnung) von Erdwärmesonden aufgrund von Karbonatfällung Porositätsverringerungen von 0,4 -1 ‰ (Erwärmung von 40 auf 60°C).

Vergleiche der Si-Lösung zwischen mit verschiedenen pleistozänen Sanden durchgeführten Säulenversuchen (Lüders et al. (2016, 2020)) und NaOH-Extraktionen zeigten, dass sich die über die Versuchsdauer der Säulenversuche aufsummierten, bei 70°C gelösten Si-Massen dem in der NaOH-Extraktion bestimmten leicht löslichen Si-Anteil der Sedimente annähern. Somit könnte diese Methode eine erste Maximalabschätzung der zu erwartenden Si-Lösung bei angestrebten Temperaturen bis zu 70°C ermöglichen. Eine Extrapolation der Si-Lösung lässt über 30 Jahre eine Zunahme des Porenraums um 1,4 – 2,2 % erwarten. Bisher ist somit davon auszugehen, dass die Veränderungen der Porosität und damit auch der hydraulischen Durchlässigkeit gering bleiben, zumal Kalkfällung und Si-Lösung entgegengesetzt wirken. Weitere Untersuchungen sind jedoch erforderlich.

## Beispiel Bremerskamp

Für die geplanten Betriebstemperaturen am Standort Bremerskamp ist nach den bekannten Laborversuchen von keiner signifikanten Veränderung der Festphasen auszugehen. Aufgrund der Zielsetzung dieser Studie, nämlich Methoden zur Erkundung potentieller UTES-Standorte zu testen, wurde jedoch trotzdem eine mineralogisch-geochemische Charakterisierung des Festphase vorgenommen.

Aus den Linern der drei Bohrungen wurden 10 Sedimentproben entnommen, so dass unterschiedliche Tiefen des Speicherhorizonts und Grob-, Mittel- und Feinsande beprobt wurden. Die Proben wurden vom Labor CRB Analyseservice GmbH getrocknet, zermahlen, zu einer Tablette eingeschmolzen und durch Röntgenfluoreszenzspektrometrie auf 12 Elementoxide hin analysiert (DIN EN ISO 12677:2013-02) (Tabelle 9). Weiterhin wurde der Glühverlust nach DIN EN ISO 26845:2008-06 bestimmt. Aufgrund der bei dieser Methode verwendeten hohen Temperaturen werden auch Karbonate zu Oxiden umgewandelt, so dass sich der Glühverlust aus CO<sub>2</sub> aus den Karbonaten und CO<sub>2</sub> aus dem organischen Material (TOC) zusammensetzt. Zur Ermittlung des Gehalts anorganischen Kohlenstoffs (TIC) wurden durch Messung des C/N-Verhältnisses und Lösung der Karbonate durch mineralische Säure TC und TIC am Institut für Ökosystemforschung der CAU bestimmt (Tabelle 9).

**Tabelle 9: Ergebnisse der röntgenfluoreszenzspektrometrischen Untersuchungen und TC/TIC-Messung, Angaben in Massen-%, aus Glühverlust und TC-Messung berechnete C-Gehalte [mol C / kg Sediment]**

Bohrung	Teufe (m u GOK)	Ansprache	Röntgenfluoreszenzspektrometrie							
			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
CAU 1/21	70,40	Mittelsand	0,70	0,023	2,12	89,86	3,27	<0,003	0,128	0,056
CAU 1/21	74,60	Grobsand, mittelsandig	0,54	0,022	2,49	88,64	3,84	<0,003	0,081	0,049
CAU 1/21	80,40	Mittelsand, schwach feinsandig	0,35	0,014	1,29	92,95	2,55	<0,003	0,054	0,029
CAU 1/21	86,00	Feinsand	1,70	0,062	4,24	81,15	5,11	<0,003	0,406	0,099
CAU 2/21	68,60	Grobsand, mittelsandig	0,69	0,027	2,58	88,62	3,60	<0,003	0,098	0,051
CAU 2/21	76,60	Feinsand	1,04	0,032	2,75	85,78	4,82	<0,003	0,244	0,079
CAU 2/21	83,20	Mittelsand, grobsandig	0,56	0,021	2,01	89,43	3,81	<0,003	0,112	0,045
CAU 3/21	62,40	Feinsand, mittelsandig, schluffig	1,29	0,045	2,70	86,26	4,26	<0,003	0,231	0,074
CAU 3/21	70,20	Mittelsand, feinkiesig, schwach feinsandig	0,92	0,032	2,65	87,15	4,25	<0,003	0,158	0,069
CAU 3/21	79,40	Feinsand	1,38	0,045	3,22	84,45	4,75	<0,003	0,326	0,093

Bohrung	Teufe (m u GOK)							TC/TIC Messung		C [mol/kg Sediment]	
		MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Glühverlust	Summe	TC	TIC	aus Glühverlust	aus TC Messung
CAU 1/21	70,40	0,13	1,12	0,78	0,12	1,67	99,977	0,46	0,35	0,38	0,38
CAU 1/21	74,60	0,13	1,26	0,88	0,10	1,92	99,952	0,48	0,32	0,44	0,40
CAU 1/21	80,40	<0,08	0,88	0,61	0,10	1,08	99,907	0,68	0,44	0,25	0,56
CAU 1/21	86,00	0,32	1,75	1,00	0,15	3,89	99,877	1,07	0,57	0,88	0,89
CAU 2/21	68,60	0,14	1,18	0,81	0,09	2,07	99,956	0,43	0,39	0,47	0,36
CAU 2/21	76,60	0,23	1,64	1,06	0,07	2,19	99,935	0,53	0,37	0,50	0,44
CAU 2/21	83,20	0,11	1,32	0,89	0,07	1,57	99,948	0,46	0,28	0,36	0,38
CAU 3/21	62,40	0,20	1,37	0,84	0,14	2,53	99,940	0,55	0,31	0,57	0,46
CAU 3/21	70,20	0,19	1,35	1,00	0,07	2,10	99,939	0,38	0,28	0,48	0,31
CAU 3/21	79,40	0,26	1,60	1,02	0,11	2,66	99,914	0,31	0,18	0,60	0,26

Die Proben für die Röntgenfluoreszenzspektrometrie und die TC/TIC-Messung wurden zwar aus der gleichen Schicht entnommen, sie wurden vor der Probenverteilung aber nicht homogenisiert. Vor diesem Hintergrund stimmen der aus dem Glühverlust bestimmte Gesamt-Kohlenstoffgehalt und der gemessene TC-Gehalt in guter Näherung überein (Tabelle 9).

Der Kalzitgehalt ( $\text{CaCO}_3$ ) der Proben kann über die Annahme ermittelt werden, dass das in den Sedimentproben gemessene Element Ca ausschließlich in Form von  $\text{CaCO}_3$  vorlag (Abbildung 30), obwohl Ca in natürlichen Sedimenten auch in anderen Bindungsformen vorkommen kann, z.B. in Feldspäten und Tonmineralen oder auch adsorbiert auf Ionenaustauscherplätzen. Ebenso kann angenommen werden, dass der gemessene anorganische Kohlenstoff ausschließlich in Form von  $\text{CaCO}_3$  vorlag (Abbildung 30), obwohl in natürlichen Sedimenten auch andere Karbonate vorkommen.

In fast allen Proben ergibt sich aus der Bestimmung über den  $\text{Ca}^{2+}$ -Gehalt ein höherer  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt als über die TIC-Bestimmung. Das bedeutet, dass Ca-Ionen auch in anderen Bindungsformen als nur  $\text{CaCO}_3$  im Sediment vorliegen. Insbesondere in den Feinsanden mit hohem Feinkornanteil ist die Differenz besonders groß, was hier die Anwesenheit von Ca-Feldspäten oder anderen Ca-haltigen Mineralen (z.B. Tonminerale wie Montmorillonit) vermuten lässt. In einer Gesamtauswertung zeigt sich, dass im Mittel über alle Proben ein Gehalt von 0,28 mol  $\text{CaCO}_3$  / kg Sediment (28 g  $\text{CaCO}_3$  / kg Sediment) vorliegt.

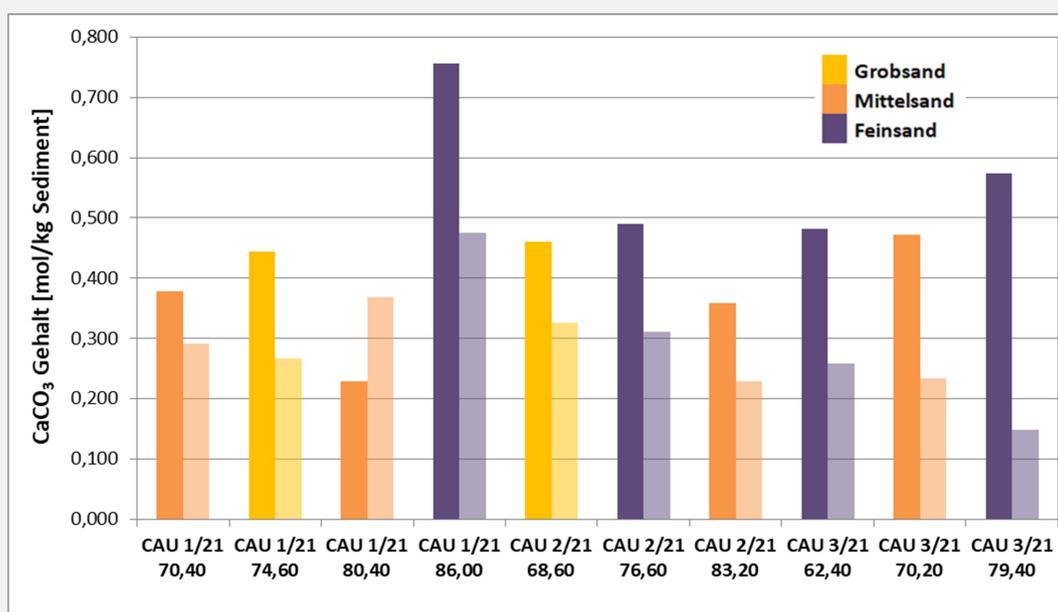


Abbildung 30: Errechnete  $\text{CaCO}_3$ -Gehalte, linker Balken: Annahme Ca liegt nur als  $\text{CaCO}_3$  vor, rechter Balken: TIC liegt nur als  $\text{CaCO}_3$  vor

Eisen- und Mangan-Gehalte der Sedimentproben wurden aus den Massenanteilen der jeweiligen gemessenen Oxide berechnet. Für Gesamt-Eisen (Abbildung 31) ergibt sich ein Mittelwert von 0,057 mol Fe / kg Sediment (3,2 g Fe / kg Sediment), für Gesamt-Mangan (Abbildung 32) ein Mittelwert von 0,0046 mol Mn / kg Sediment (0,25 g Mn / kg Sediment).

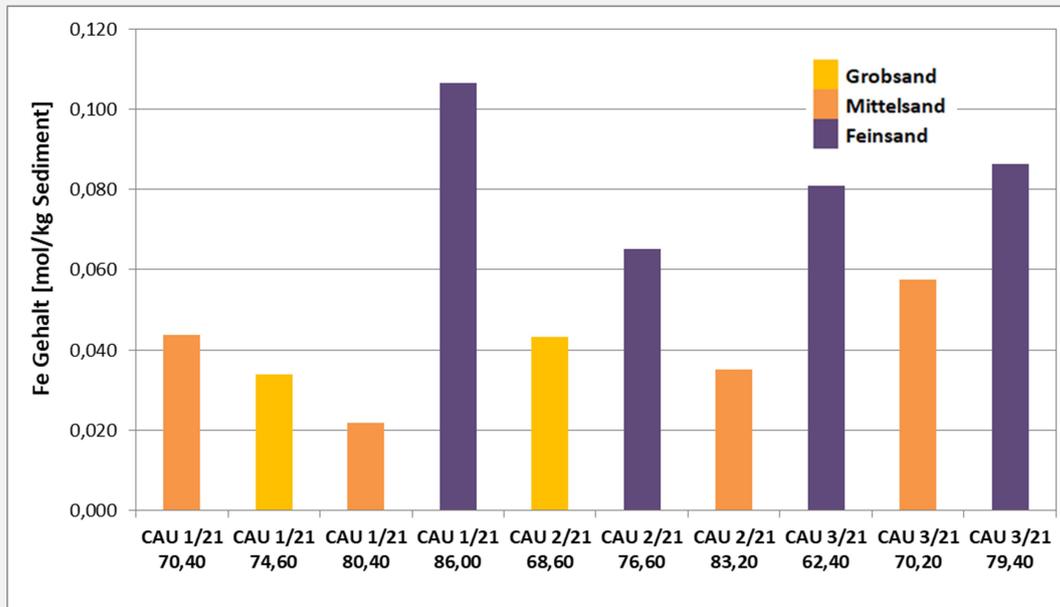


Abbildung 31: Gesamt Eisen-Gehalt in 10 ausgewählten Sedimentproben

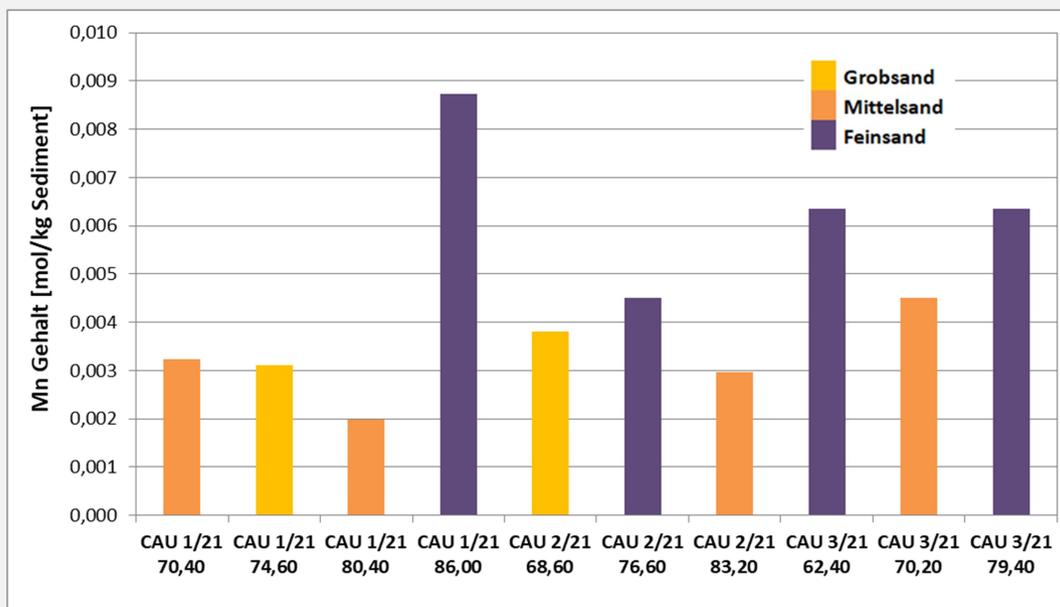


Abbildung 32: Gesamt Mangan-Gehalt in 10 ausgewählten Sedimentproben

## 2.8 Numerische Simulationen

### 2.8.1 Anforderungen an Modellprogramme zur Simulation von ATES-Anlagen

Viele Simulationsprogramme sind in der Lage, den Wärmetransport in einem durchströmten Grundwasserleiter zu berechnen. Zur Simulation untertägiger Wärmespeicher ist jedoch zusätzlich eine Datenschnittstelle zu Modellen erforderlich, die zur Simulation der Haustechnik verwendet werden (z.B. TRNSYS). Solche Modelle fordern basierend auf den Anforderungen der Gebäude eine zeitlich aufgelöste Heiz- und Kühllast an, die der Speicher erfüllen soll. Dieser energetische Bedarf erfordert eine automatische Anpassung der erforderlichen Pumprate des geförderten oder injizierten Wassers bei zeitlich veränderlicher Temperatur im Speicher. Es muss beispielsweise bei einer ATES-Anlage für einen gleichbleibenden Wärmeenergiestrom die Entnahmerate aus dem Speicher automatisch erhöht werden, da die Temperatur im Speicher mit der Zeit abnimmt. Beim BTES muss das Wärmeträgerfluid durch ausreichend viele Erdwärmesonden zirkulieren, damit sich die gewünschte Energiemenge ergibt. Zur Simulation eines BTES muss das Programm darüber hinaus eine Funktion zur Simulation von Erdwärmesonden und miteinander gekoppelten Erdwärmesonden besitzen, da Wärmeträgerfluid und Grundwasser zwei vollständig voneinander getrennte Fluide sind und eine exakte Simulation der unterschiedlichen Strömungen sehr rechenzeitaufwändig wäre.

Die Programme OpenGeoSys und FEFLOW erfüllen die Anforderungen an geeignete Simulationsprogramme und haben sich in Vergleichsrechnungen für eine ATES-Anlage am Standort Bremerskamp als gleichwertig erwiesen.

## Beispiel Bremerskamp

Es wurde mit OpenGeoSys und FEFLOW je ein Modell mit einer horizontalen Ausdehnung von 6x6 km und einer vertikalen Ausdehnung von 145 m aufgebaut, das die Geologie am Standort Bremerskamp vereinfacht abbildet. Simuliert wird ein 15 m mächtiger fein- bis mittelsandiger Speicherhorizont, der im Liegenden von einem 65 m mächtigen und im Hangenden von einem 15 m mächtigen Geschiebemergel begrenzt wird (Tabelle 10). Das Modell wurde durch Standortmessungen und Literaturwerte parametrisiert (Tabelle 10). Für den gespannten Speicherhorizont wurde ein Speicherkoeffizient von  $10^{-4}$  1/m angenommen. Abgeleitet aus den Wasserstandsmessungen am Standort wurde ein Grundwasserfluss von Süd nach Nord mit einem hydraulischen Gradienten von 0,58‰ angenommen, woraus sich für den Speicherhorizont eine Abstandsgeschwindigkeit von 2,4 m/a ergibt (Abbildung 33). Initial herrscht im Grundwasser eine Temperatur von 10°C. Im Modell wurde für die thermische longitudinale und transversale Dispersivität die Dispersivität für den Transport gelöster Stoffe nach Beims (1982) mit 1 m gewählt. Simuliert wird ein ATES-System bestehend aus einer Brunnendublette, die im Speicherhorizont in 65-80 m u. GOK verfiltert ist. Der „kalte“ Brunnen ist im Grundwasseranstrom positioniert und die Distanz der Brunnen zueinander beträgt 300 m (Abbildung 33).

**Tabelle 10: Im Modell berücksichtigte Schichtenabfolge, vertikale Diskretisierung (Mächtigkeit), sowie thermische und hydraulische Modellparameter**

<sup>1</sup>VDI4640 Blatt1 (2010), <sup>2</sup>Busch und Luckner (1974) zitiert in Garling und Dittrich (1997), <sup>3</sup>Mittelwert aus Permeametermessung, <sup>4</sup>gemessen mit „Thermal Properties Analyzer“)

	Layer	Tiefe u. GOK	Mächtigkeit [m]	$k_f^2$ [m/s]	Porosität $np_{eff}^{(2)}$ [-]	Dichte <sup>(1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität <sup>(1)</sup> [MJ/(m <sup>3</sup> K)]	Wärmeleitfähigkeit <sup>(1)</sup> [W/mK]
Mittelsand	1	15	15	$1 \cdot 10^{-4}$	0,15	2100	2,5	2,4
	2	30	15					
	3	40	10					
	4	50	10					
Geschiebemergel	5	55	5	$1 \cdot 10^{-14}$	0,08	2200	2,1	2,4
	6	60	5					
	7	62,5	2,5					
	8	65	2,5					
Fein-/Mittelsand (Speicherhorizont)	9	66,5	1,5	$2 \cdot 10^{-5(3)}$	0,15	2100	3 <sup>(4)</sup>	2,5 <sup>(4)</sup>
	10	68	1,5					
	11	69,5	1,5					
	12	71	1,5					
	13	72,5	1,5					
	14	74	1,5					
	15	75,5	1,5					
	16	77	1,5					
	17	78,5	1,5					
	18	80	1,5					
Geschiebemergel	19	82,5	2,5	$1 \cdot 10^{-14}$	0,08	2200	2,1	2,4
	20	85	2,5					
	21	90	5					
	22	95	5					
	23	105	10					
	24	115	10					
	25	130	15					
	26	145	15					

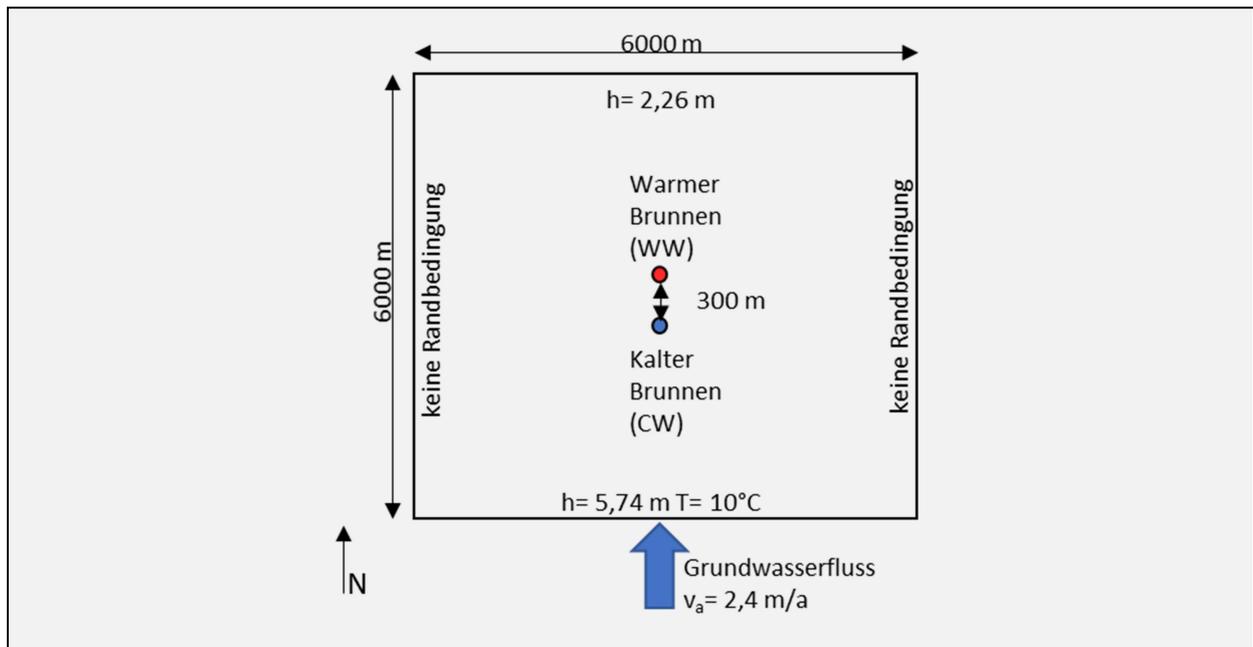


Abbildung 33: Schematischer Aufbau des Modells mit thermischen und hydraulischen Randbedingungen

Die horizontale Diskretisierung des FEFLOW-Modells weist an den ATES-Brunnen, sowie an den Beobachtungspunkten eine Elementgröße von 0,15 m auf. Für das OGS-Modell wurden Elemente von ca. 0,5 m um die ATES-Brunnen gewählt, die mit zunehmendem Abstand zur Brunnendublette größer werden, sodass die Elementgröße in 5 m, 10 m, 20 m und 50 m Entfernung 0,5 m, 0,8 m, 1,5 m und 4 m beträgt. Die max. Elementgröße am Rand des Simulationsgitters wurde in beiden Modellen auf 100 m festgelegt.

Das ATES-System wurde mit einem automatischen Steuerungstool simuliert, das den zeitlich variablen thermischen Lastgang berücksichtigt, der von Seiten der gebäudeseitigen Technik der Wärmeversorgung vorgegeben wurde (Abbildung 2). In FEFLOW wurde dazu das OpenLoopDesign-Plugin verwendet, in OGS die Well-Doublet-Control. Beide Kontrollmechanismen berechnen für jeden Zeitschritt die Entnahmetemperatur aus dem Speicher und ermittelt unter Berücksichtigung der vorgegebenen Wärmeentzugsleistung die erforderliche Entnahmerate für das Grundwasser. Dabei können Ziel- und Schwellenwerte für Temperatur und Pumprate vorgegeben werden. Als Randbedingung berücksichtigen beide Steuerungstools für das ATES-Systems eine minimale Injektionstemperatur von  $5^\circ\text{C}$  (kalter Brunnen) und eine maximale Injektionstemperatur von  $20^\circ\text{C}$  (warmer Brunnen), sowie eine maximale Pumprate von a)  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  (Szenario 1) und b)  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  (Szenario 2). Simuliert wird ein Speicherbetrieb über drei Betriebsjahre.

### Szenario 1

Mit der in diesem Szenario definierten maximal zulässigen Pumprate von  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  simulieren beide Programme, dass die geforderte Wärmeleistung auch in Spitzenlasten vom System vollständig gedeckt werden kann (Abbildung 34, Abbildung 35). Angeforderte Leistung und Systemleistung des Speichers sind somit in beiden Programmen jeweils identisch. Es ist auffällig, dass FEFLOW den zeitlichen Verlauf des Leistungsbedarfs bei gleichen Eingabedaten stärker glättet als OGS.

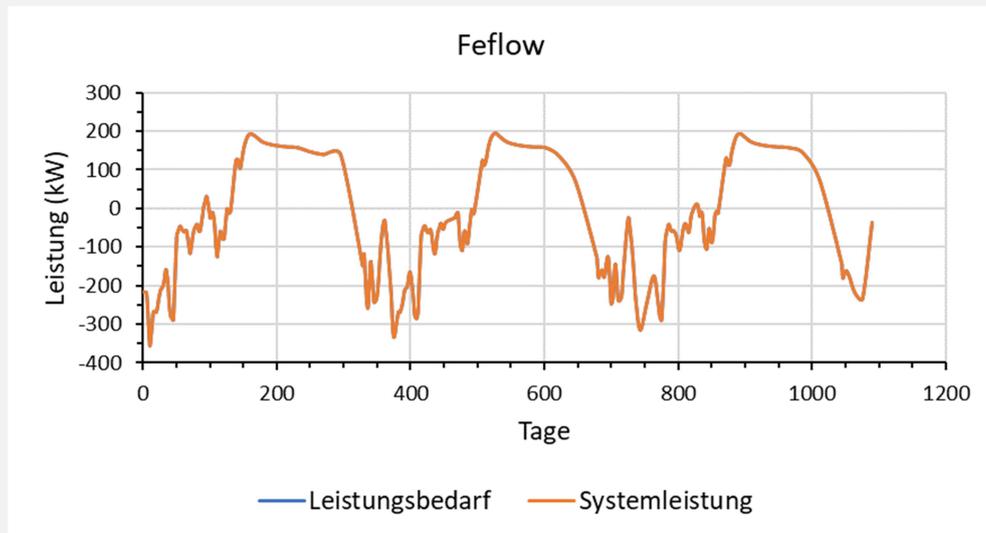


Abbildung 34: Leistungsbedarf und tatsächliche Leistung des ATEs-Systems berechnet mit dem FEFLOW OpenLoopDesign-Plugin für eine max. Pumprate von  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  (Linien deckungsgleich)

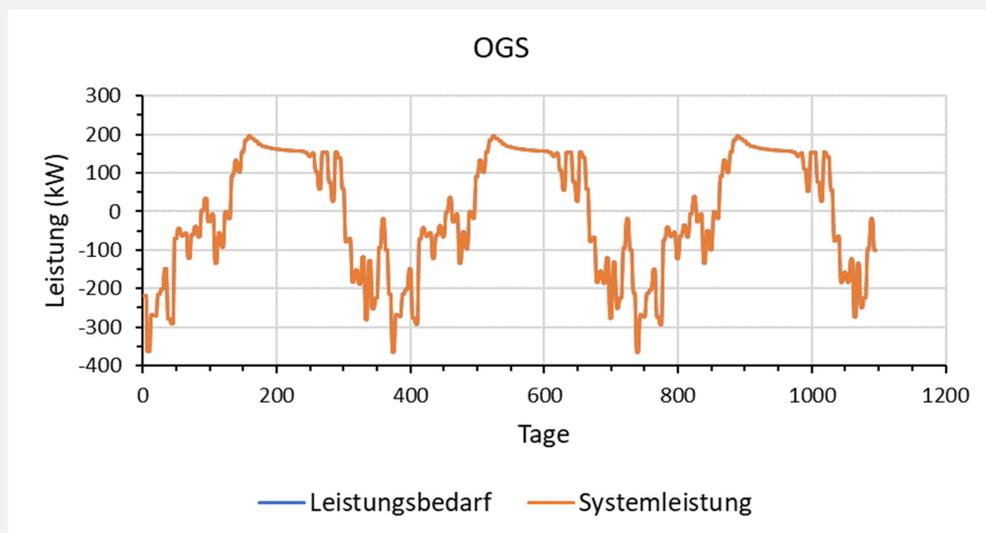


Abbildung 35: Leistungsbedarf und tatsächliche Leistung des ATEs-Systems berechnet mit der OGS Well-Doublet-Control für eine max. Pumprate von  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  (Linien deckungsgleich)

Beide Programme verwenden eine ähnliche angepasste Pumprate während der Injektions- und Extraktionsphasen, um den geforderten Leistungsbedarf zu decken (Abbildung 36). In FEFLOW ergibt sich aufgrund des geglätteten Leistungsbedarfs auch ein glatterer zeitlicher Verlauf der Pumprate.

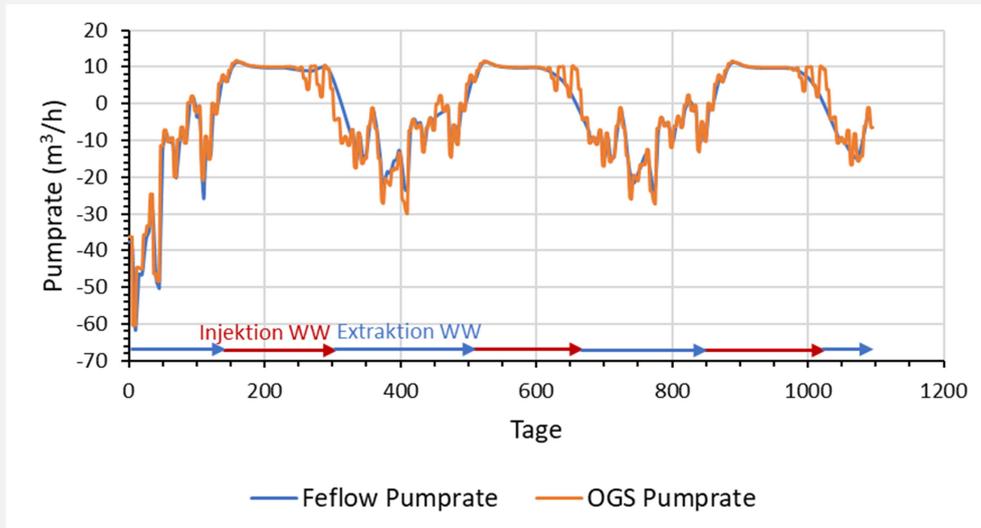


Abbildung 36: Pumprate des ATES Systems am warmen Brunnen (WW) für eine max. Pumprate von 100 m<sup>3</sup>/h

In beiden Programmen ergeben sich ähnliche Temperaturen am warmen und am kalten Brunnen (Abbildung 37), nur bei der Extraktion zeigen sich für den warmen Brunnen geringfügige Unterschiede zwischen den Modellen. Die Injektionstemperaturen entsprechen in beiden Modellen den vorgegebenen Systemrandbedingungen von min. 5°C und max. 20°C.

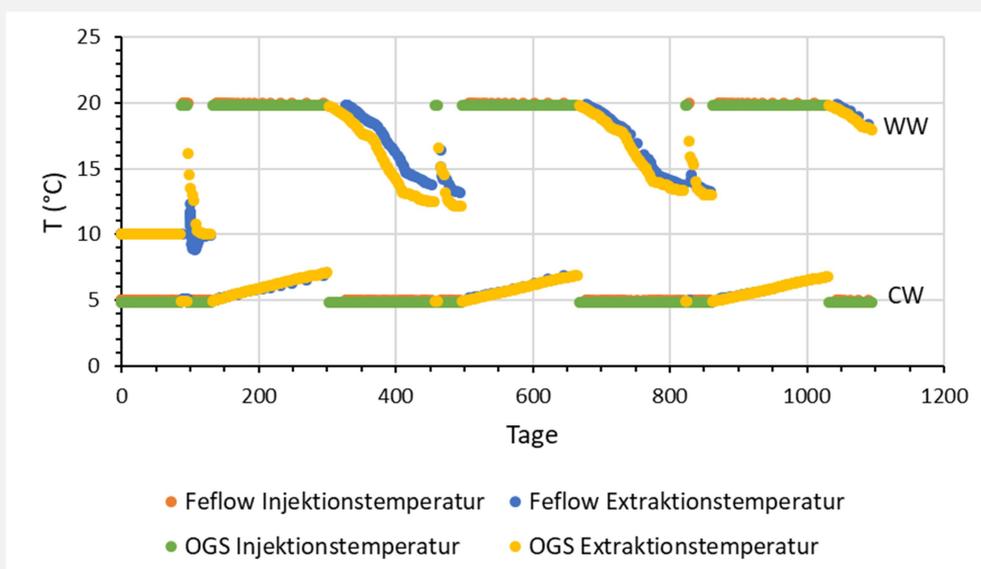


Abbildung 37: Injektions- und Extraktionstemperaturen am warmen (WW) und kalten Brunnen (CW) für eine max. Pumprate von 100 m<sup>3</sup>/h

## Szenario 2

Im zweiten Szenario wurde die maximal zulässige Pumprate auf  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  gesetzt, so dass die angefragte Wärmeleistung in den Spitzenlasten nicht immer gedeckt werden kann. Die Steuerungstools reagieren in beiden Programmen mit einer Reduktion der Leistung, wenn hohe Leistungen angefordert werden, die mit der maximal zulässigen Pumprate nicht gedeckt werden können (Abbildung 38, Abbildung 39). OGS simuliert dabei eine geringfügig bessere Deckung der Spitzenlasten als FEFLOW.

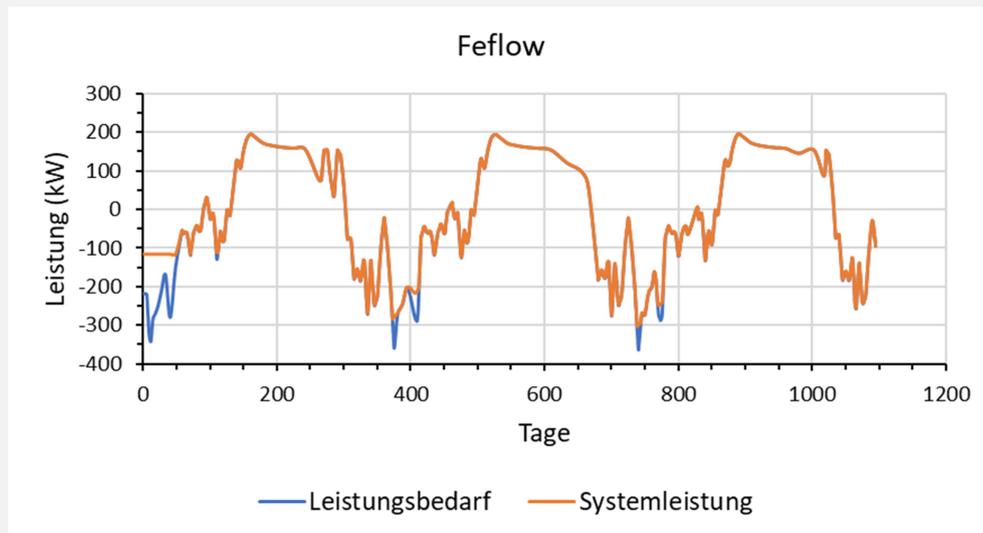


Abbildung 38: Leistungsbedarf und tatsächliche Leistung des ATES-Systems berechnet mit dem FEFLOW OpenLoopDesign-PlugIn für eine max. Pumprate von  $20 \text{ m}^3/\text{h}$

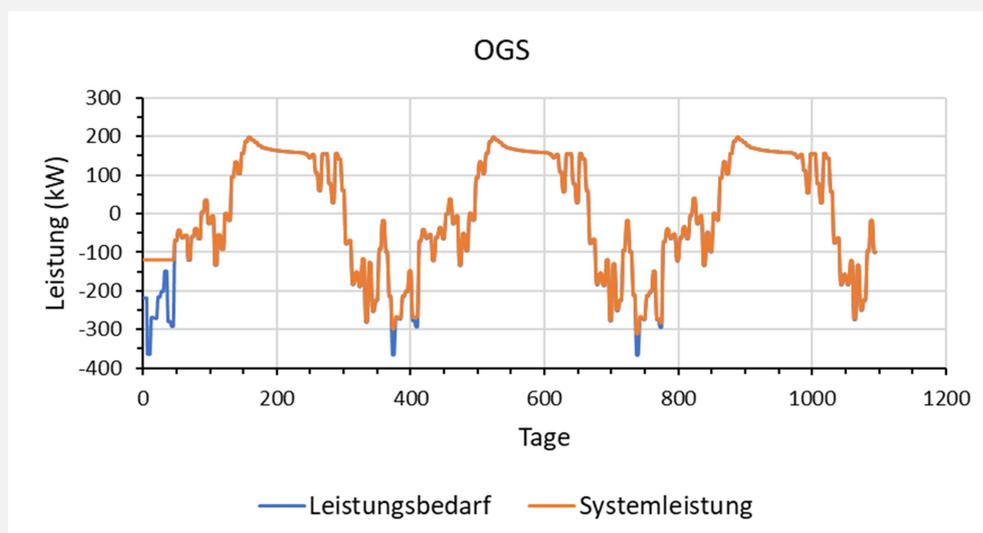


Abbildung 39: Leistungsbedarf und tatsächliche Leistung des ATES-Systems berechnet mit der OGS Well-Doublet-Control für eine max. Pumprate von  $20 \text{ m}^3/\text{h}$

Das Steuerungstool in OGS simuliert im Vergleich zu FEFLOW etwas höhere und zeitlich flexiblere Pumpraten, insbesondere um Spitzenlasten besser abzudecken (Abbildung 40).

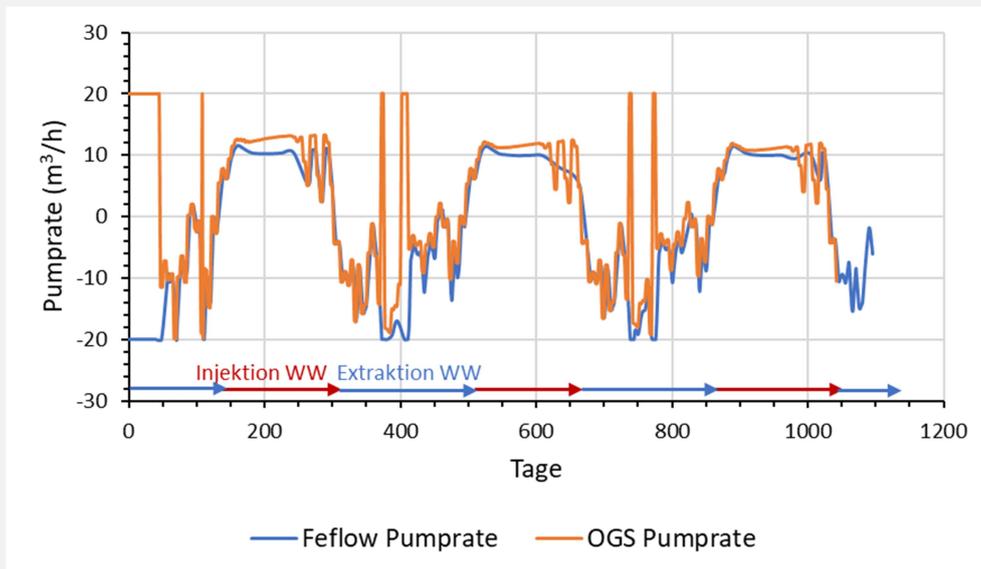


Abbildung 40: Pumprate des ATES Systems am warmen Brunnen (WW) für eine max. Pumprate von 20 m³/h

Dadurch ergeben sich in OGS etwas höhere Extraktionstemperaturen am kalten und am warmen Brunnen als in FEFLOW (Abbildung 41). Die Injektionstemperaturen, die durch die Systemrandbedingungen auf min. 5°C und max. 20°C begrenzt wurden, werden in beiden Programmen gleich zugewiesen.

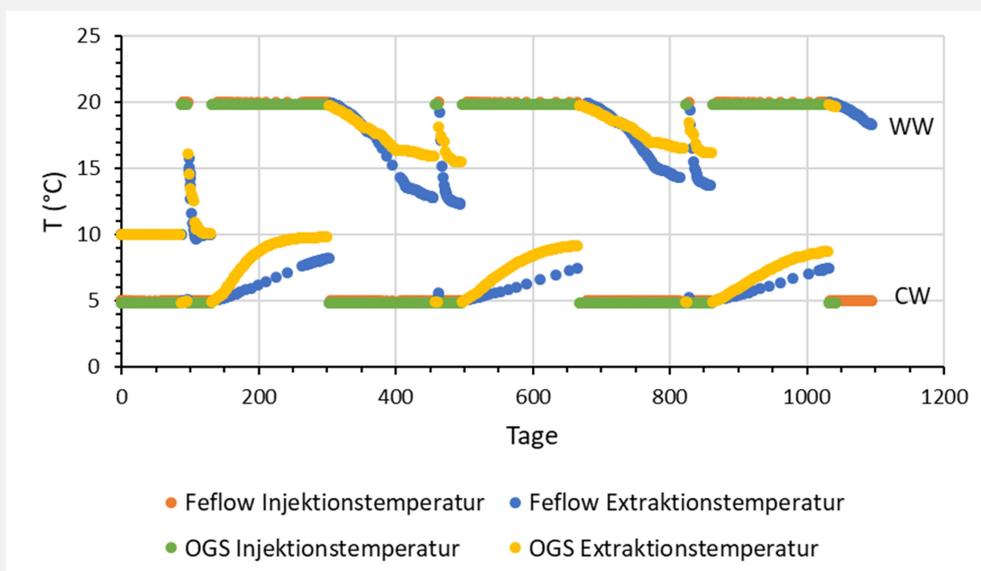


Abbildung 41: Injektions- und Extraktionstemperaturen am warmen (WW) und kalten Brunnen (CW) für eine max. Pumprate von 20 m³/h

Die in OGS und FEFLOW implementierten Tools zur automatisierten Steuerung der Pumprate einer ATES-Anlage erzeugen somit keine absolut identischen, aber sehr ähnliche Simulationsergebnisse, die für die Praxis gleichwertig sind. Im Rahmen des Modellvergleichs wurde zusätzlich untersucht, ob die Simulation von ATES-Systemen über eine feste Temperaturrandbedingung und zeitlich variable Pumpraten an der Brunnendublette mit beiden Programmen ähnliche Ergebnisse liefert (Ergebnisse nicht dargestellt). Bis auf eine geringe Abweichung in der Temperaturlausbreitung lieferten beide Programme identische Simulationsergebnisse, weichen allerdings in der Definition der Eingabedaten voneinander ab. In FEFLOW wird die Pumprate über die gesamte Verfilterung der Brunnen automatisch durch das Programm verteilt, wohingegen in OGS die Pumpraten manuell zugewiesen und für jeden einzelnen Knoten des Brunnens definiert werden müssen. Dadurch kann nicht ausgeschlossen werden, dass Unterschiede in der Temperaturlausbreitung auf eine leicht voneinander abweichende Zuweisung der Pumpraten zurückzuführen sind.

Als wesentlicher Grund für Unterschiede zwischen Modellergebnissen wurde vor allem der Anwender des Simulationsprogramms identifiziert, da jeder Modellierer mit unterschiedlichen Erfahrungswerten und anderer Herangehensweise arbeitet. Dieses zeigt sich z.B. bei der räumlichen Diskretisierung des Modells oder aber auch bei der Wahl von Literatur- und Schätzwerten beispielsweise für Dispersivität, Permeabilität oder Porosität, was je nach Sensitivität des Modells für die Parameter unterschiedlich große Differenzen der Modellergebnisse verursacht. Neben den tatsächlichen Unterschieden zwischen Eingabedaten des Modells und Realität ist dies ein weiterer Grund, die Modellergebnisse auf Änderungen der verwendeten Parameter zu überprüfen.

### **2.8.2 Numerische Simulation der untertägigen Wärmespeicher**

Numerische Simulationen des untertägigen Wärmespeichers quantifizieren und visualisieren die Ausbreitung der Wärme und des Drucks (bei ATES-Anlagen) im Untergrund und ermöglichen die Bestimmung des von Temperaturänderungen (thermischer Auswirkungsraum) und des durch hydraulische Druckänderungen betroffenen Untergrunds (hydraulischer Auswirkungsraum). Sie schätzen so bereits vor dem Bau der Anlage den Raum der Umweltauswirkungen ab und dienen z.B. der Diskussion mit Umweltbehörden oder der Auslegung eines Monitoringsystems. Werden für die Simulationen gebäudeseitige Wärme- und Kältelasten verwendet, ergeben sich für ATES-Anlagen die Pumpraten der Brunnendublette und für BTES-Anlagen die Pumpraten des Wärmeträgerfluids in den Erdwärmesonden. Aus den simulierten Temperaturen bei der Entspeicherung ergeben sich die Wärmerückgewinnung und damit die Effizienz der Anlage. Der Anlagenbetrieb lässt sich so während der Planungsphase ermitteln und optimieren.

Simulationen sollten bereits frühzeitig begonnen werden, auch wenn standortspezifische Parameter des Untergrunds noch nicht ermittelt wurden und die Modellergebnisse somit noch unsicher sind. Viele der erforderlichen Parameter haben nur einen geringen Einfluss auf die Wärmeausbreitung und die Wärmerückgewinnung, so dass Literaturwerte zunächst eine gute Näherung sind. Mit zunehmender Kenntnis der lokalen Parameter wird das Modell an die Gegebenheiten angepasst. Wird eine großräumige Wärmeausbreitung erwartet, z.B. aufgrund hoher Pumpraten einer ATES-Anlage, wird zusätzlich zu den Sedimenteigenschaften ein ausreichend großes geologisches Strukturmodell benötigt, wobei auch dieses aufgrund der üblicherweise geringen Bohrungsanzahl mit Unsicherheiten behaftet ist.

## Beispiel Bremerskamp

### ATES-Anlage

Für die aus den Bohrungen ersten abgeleiteten geologischen Standortgegebenheiten am Bremerskamp (Tabelle 11) wurde ein noch vereinfachtes numerisches Strömungsmodell ohne Berücksichtigung einer Grundwasserströmung mit der Software OpenGeoSys erstellt. Die Simulationen des Hamburg Instituts zu gebäudeseitigen thermischen Lastgängen bzw. den Betriebscharakteristika der zukünftigen Wärmeversorgung wurden als Lastkurven für die Entnahme bzw. Zugabe in den Brunnen der ATES-Anlage in das Modell integriert (Abbildung 2). Basierend auf diesen Betriebscharakteristika wurden Prognosen der thermischen und hydraulischen Umweltauswirkungen einer ATES-Anlage für eine Injektionstemperatur von 5°C am kalten und 20°C am warmen Brunnen berechnet. Die initiale Grundwassertemperatur beträgt 10°C.

**Tabelle 11: Thermische und hydraulische Modellparameter des Standortmodells (<sup>1</sup>VDI4640 Blatt1 (2010), <sup>2</sup> Busch und Luckner (1974) zitiert nach Garling und Dittrich (1997))**

	Mächtigkeit [m]	$k_f^2$ [m/s]	Porosität $np_{eff}^2$ [-]	Dichte <sup>1</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität <sup>1</sup> [MJ/(m <sup>3</sup> K)]	Wärmeleitfähigkeit <sup>1</sup> [W/mK]	Therm. Longitud. Dispersivität [m]	Therm. Transvers. Dispersivität [m]
Mittelsand	50	$1 \cdot 10^{-4}$	0,15	2000	2,5	2,4	1,5	0,15
Geschiebemergel	15	$1 \cdot 10^{-7}$	0,08	2000	2,1	2,4		
Fein-/Mittelsand (Speicherhorizont)	15	$1 \cdot 10^{-4}$	0,15	2000	2,5	2,4		
Geschiebemergel	70	$1 \cdot 10^{-7}$	0,08	2000	2,1	2,4		

Simulationen der radialen Ausdehnung der Temperaturabweichung von 1K um den warmen bzw. kalten Brunnen gegenüber einer Grundwassertemperatur von 10°C liegen bei ca. 140 bis 150 m, für eine Temperaturabweichung von 5K bei ca. 100 bzw. 0 m (Abbildung 42). Vertikale Temperaturveränderungen treten bei einer Temperaturabweichung von 1K zur Hintergrundtemperatur bis ca. ± 35-45 m und bei einer Temperaturabweichung von 5K bis ca. ± 10-15 m am warmen Brunnen der ATES-Anlage auf. Das simulierte ATES-System kann mit einer Gesamtpumprate von ca. 125 m<sup>3</sup>/h die energetische Lastanforderung bei den gegebenen Temperaturniveaus bedienen und erlaubt aufgrund der jährlich nahezu ausgeglichenen Energieflüsse einen langfristig stabilen Betrieb. Die Simulationen geben einen ersten Eindruck zum thermisch beeinflussten Untergrundvolumen und erwiesen sind bei Diskussionen mit Behörden hilfreich. Da sowohl die Lastkurve als auch die Kenntnis des geologischen Untergrunds noch Änderungen unterworfen ist, müssen die Simulationen für ein noch ausstehendes Genehmigungsverfahren aktualisiert werden.

Aufgrund der zu speichernden großen Wärmemenge und des geringen angestrebten Temperaturniveaus von nur 20°C ergibt sich eine große Wassermenge, die im Grundwasserleiter entnommen und gespeichert werden muss und auch bei ausgeglichener Wasserbilanz großräumige Auswirkungen auf die Druckverteilung hat. Das LfU (Landesamt für Umwelt SH) erstellt ein großräumiges geologisches Strukturmodell, das die Geologie am Standort besser wiedergibt als die bisher verwendeten vereinfachenden Annahmen. Dieses Strukturmodell soll in weiterführenden Simulationen verwendet werden, um den hydraulischen Auswirkungsraum besser beurteilen zu können, auch wenn es aufgrund der geringen Anzahl an Bohrprofilen Unsicherheiten unterliegt.

**Im April nach der Wärmeentladung:**

**Ende Oktober nach der Wärmebelastung:**

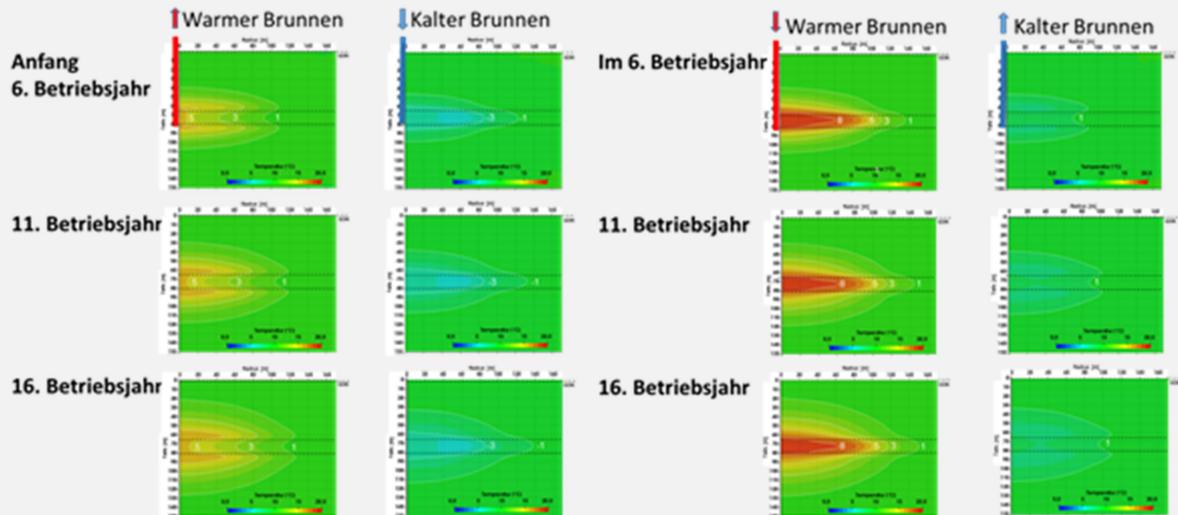


Abbildung 42: Senkrechter Schnitt durch das Modell; Temperaturzunahme und -abnahme gegenüber natürlichen Verhältnissen am warmen und kalten Brunnen nach Wärmebelastung und -entladung.

## BTES-Anlage

Für eine ebenfalls noch sehr einfache geologische Schichtung (Abbildung 43) wurde mit OpenGeoSys ein Modell einer BTES-Anlage erstellt, die aus  $18 \times 18 = 324$  Erdwärmesonden mit einer Länge von 50 m besteht, die in einem regelmäßigen quadratischen Raster mit Abständen von 3 m angeordnet sind. Die in den Simulationen verwendeten Parameter wurden den Messungen am Standort bzw. der Literatur für die bindigen Sedimente entnommen (Tabelle 12). Die Temperatur des Untergrundes beträgt vor der Speicherung  $10^\circ\text{C}$ . Für die Grundwasserströmung in der durchlässigen Schicht wurden Abstandsgeschwindigkeiten von 0, 18, 36 und  $72 \text{ m/a}$  angenommen.

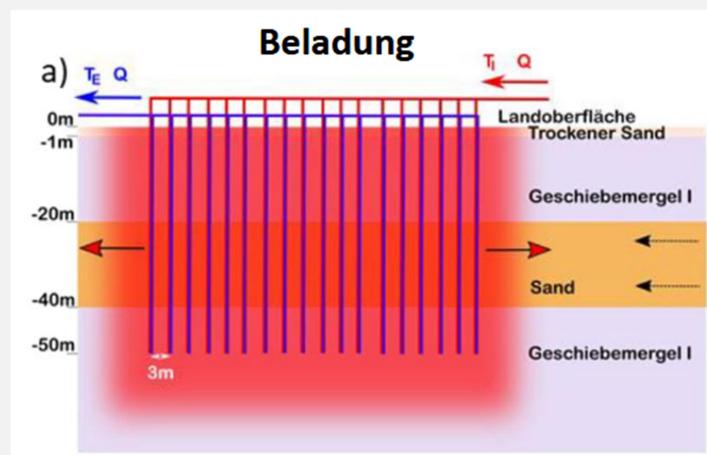


Abbildung 43: Vereinfachtes geologisches setup für die Simulation des BTES

Tabelle 12: Im Modell für BTES angenommene Parameter

Formation / Material	vol. Wärmekapazität <sup>a</sup> [MJ/m <sup>3</sup> /K]	Wärmeleitfähigkeit <sup>a</sup> [W/m/K]	Porosität <sup>b</sup> [-]
Geschiebemergel I	2.1	2.4	0.15
Sand	2.5	2.4	0.28
Bohrlochzement (12 cm Bohrungsdurchmesser, 2.62 cm Innenrohrdurchmesser)	0.0 <sup>c</sup>	2.3	0.0 <sup>c</sup>
Sand (Isolation)	2.1	0.4	0.28

<sup>a</sup> VDI 4640 (2010); <sup>b</sup> Fetter (2001) <sup>c</sup> da stationäres Sondenmodell

Der Speicher wird im halbjährigen Wechsel be- und entladen. Die Temperatur der Wärmequelle beträgt bei Beladung konstant  $15^\circ\text{C}$  und die Temperatur der Kältequelle bei Entladung konstant  $5^\circ\text{C}$ . Damit ergeben sich bei Abwesenheit von Grundwasserströmung Be- und Entladeleistungen von 0.1-0.5 MW, wobei die Maximalleistungen nach den Lastwechseln (zwischen Be- und Entladung) auftreten und die Speicherkapazität bei 1 GWh liegt. In der Simulation mit sehr hoher Grundwasserströmung von  $72 \text{ m/a}$  verbessert sich Maximalleistung des Speichers um 15%, da sich höhere Temperaturgradienten an den Sonden ausbilden können. Der Anteil der zurückgewonnenen

Wärme ist unbeeinflusst von der Grundwasserströmung stets 100%, was einen energetisch ausgeglichenen und somit langfristig stabilen Betrieb kennzeichnet. Die Erdwärmesonden erwärmen den Untergrund ab Geländeoberkante (Abbildung 44). Es treten abstromig des Speichers in geringen Abständen saisonale Temperaturschwankungen auf (1°C Temperaturänderung in max. 15 m Entfernung). Dies ist nur eine geringe zusätzliche thermische Beeinflussung gegenüber dem Fall ohne Grundwasserströmung. Aufgrund des energetisch ausgeglichenen Betriebs bildet sich in den Simulationen abstromig keine Wärmefahne aus.

An der potentiell geplanten BTES-Anlage am Standort Bremerskamp sind Temperaturspreizungen von 20°C/1°C vorgesehen, d.h. in einem ähnlichen Bereich wie in den Simulationen. Nach derzeitigem Kenntnisstand des Standortes sind für den untersuchten Speicherhorizont geringe Grundwasserabstandsgeschwindigkeiten von maximal 28,3 m/a zu erwarten, vermutlich jedoch 2-3 m/a. Zu den Strömungsgeschwindigkeiten in anderen Grundwasserleitern ist nichts bekannt. Die Simulationsergebnisse mit den Temperturfeldern in Abbildung 44 sind bei ausgeglichenem energetischen Betrieb somit derzeit als worst-case anzusehen und der Speicherbetrieb ist als langfristig stabil zu erwarten. Die Temperaturspreizung zwischen der Be- und Entladung sowie eine Grundwasserströmung in einer durchlässigen Sandschicht im Speicher haben gegenüber der jährlichen Wärmebilanz einen nachgeordneten Effekt auf die Bildung einer abstromigen

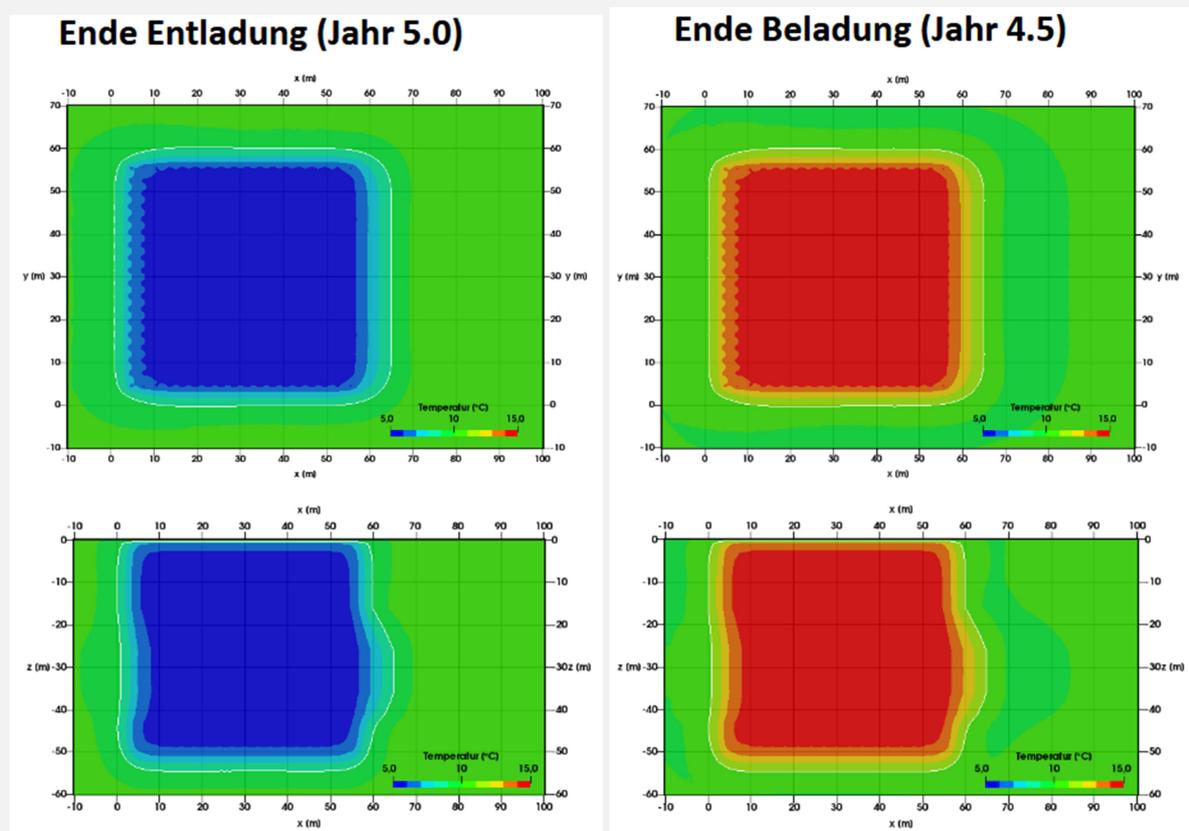


Abbildung 44: Wärmeausbreitung im BTES am Ende der Be- und Entladung bei einer Abstandsgeschwindigkeit von 36 m/a in der gut durchlässigen Schicht, oben: Draufsicht, unten: Vertikalschnitt

Wärmefahne. Im Fall eines energetisch unausgeglichenen Betriebs muss für die Prognose der Temperaturfelder und Speicherleistungen in künftigen Simulationen die tatsächliche geologische Schichtung am Standort, z.B. die sandigen Schichten in Oberflächennähe, und die räumliche Anordnung der Erdwärmesonden auf den zur Verfügung stehenden Flächen im Neubaugebiet beachtet werden.

Für den Standort wird diskutiert, ob eine Kombination von ATES und BTES zielführend ist. Eine kleinere Anzahl von Erdwärmesonden könnte den Speicherbedarf der bereits ab 2023 gebauten Gebäude erfüllen, ein ATES würde dann bei Fertigstellung weiterer Gebäude ergänzt werden. Es ist derzeit nicht abschätzbar, wie sich die beiden Speicher gegenseitig beeinflussen. Beispielsweise kann das im Speicherhorizont des ATES gepumpte Wasser im BTES eingespeicherte Wärme aus dem Speicherbereich heraus transportieren. Bei Wahl einer Kombination von ATES und BTES wären daher weitere Simulationen durchzuführen, die jedoch auf hinreichend genauen Daten zur Geometrie der beiden Speicherarten und auf der Verteilung der zu speichernden Wärme auf die ATES- bzw. BTES-Anlage basieren müssen. Bisher wurde von Seiten der Projektleitung noch keine Entscheidung zu dieser Kombination getroffen.

### 2.8.3 Parametervariation

Hydraulische und thermische Parameter, die in das Modell einfließen, basieren oft auf Literatur- und Schätzwerten, da die Werte für den Standort nicht genau bekannt sind. Aber auch gemessene Werte unterliegen Schwankungen, wie z.B. die natürliche Grundwasserströmung. Um den Einfluss dieser Parameterungenauigkeit und -variabilität auf das Modellergebnis zu untersuchen, werden sie innerhalb realistischer Grenzen variiert. Dabei wird z.B. die Veränderung der Wärmeausbreitung oder der Rücklaufemperatur aufgrund der Parametervariation beobachtet. Solche Sensitivitätsanalysen wurden für den Standort Bremerskamp, aber auch für andere Standorte durchgeführt. Bisher zeigten die meisten Parametervariationen nur einen geringen Einfluss auf die Wärmerückgewinnung und die Wärmeausbreitung im Speicherhorizont. Diese hängt, wie auch in der vom Umweltbundesamt (UBA) in Auftrag gegebenen Studie zu „Umweltwirkungen und umweltverträglicher Ausbau der oberflächennahen Geothermie“ (Dahmke et al., in prep.) gezeigt wird, vor allem von grundlegenden System- und Betriebsparametern wie der Grundwasserfließgeschwindigkeit, der Pumprate und der Beladungstemperatur ab.

### Beispiel Bremerskamp

Aufbauend auf dem ersten Modell für die ATES-Anlage wurde ein OpenGeoSys-Modell mit einer horizontalen Ausdehnung von 6x6 km und einer vertikalen Ausdehnung von 145 m aufgebaut. Dieses berücksichtigt einen 15 m mächtigen fein- bis mittelsandigen Speicherhorizont, der im Liegenden von einem 65 m mächtigen und im Hangenden von einem 15 m mächtigen Geschiebemergel begrenzt wird. Das Modell wurde durch Standortmessungen und Literaturwerte parametrisiert (Tabelle 13). Für den Speicherhorizont wurde ein geschätzter Speicherkoeffizient für gespannte Grundwasserleiter von  $10^{-4}$  1/m angenommen. Abgeleitet aus den Druckspiegelmessungen am Standort wurde ein Grundwasserfluss von Süd nach Nord mit einem hydraulischen Gradienten von 0,58‰ angenommen, woraus sich für den Speicherhorizont unter Berücksichtigung des Bemessungs- $k_f$ -Wertes aus den Siebanalysen und Permeametermessungen eine Abstandsgeschwindigkeit von 2,2 m/a ergab. Die initial angenommene Grundwassertemperatur im Modell betrug 10°C.

Simuliert wurde ein ATES-System mit einer Brunnendublette, die im Speicherhorizont in 65-80 m u. GOK verfiltert ist. Der „kalte“ Brunnen ist im Grundwasseranstrom positioniert und die Distanz der Brunnen zueinander beträgt 300 m. Das ATES-System berücksichtigt mithilfe eines automatischen Steuerungstools den jährlichen zeitlich variablen thermischen Lastgang seitens der Gebäudetechnik der Wärmeversorgung (Abbildung 2), der aufgrund des Fassungsvermögens der Brunnen am Standort angepasst auf eine max. Pumprate von 20 m<sup>3</sup>/h in das Modell einfließt. Am warmen Brunnen wurde eine Injektionstemperatur von max. 20°C und am kalten Brunnen von 5°C angelegt (Abbildung 46).

**Tabelle 13: Variation der hydraulischen und thermischen Parameter des Speicherhorizonts**

<sup>1)</sup> Bemessungswert, <sup>2)</sup> Min= Mittelwert Permeametermessung, Max= Mittelwert Siebanalyse, <sup>3)</sup> Max=  $k_f$ -Mittelwert Siebanalyse, <sup>4)</sup> Beims (1982), <sup>5)</sup> Labormessung KD2 Pro, <sup>6)</sup> VDI4640 Blatt1 (2010), <sup>7)</sup> Sorensen et al. (2013), <sup>8)</sup> Tordrup et al. (2017), <sup>9)</sup> Hölting & Coldewey (2009) nach Busch/Luckner (1974)

$k_f$ [m/s]		$va$ (m/a)		Therm. Dispersivität [m]		Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	
Basismodell <sup>1)</sup>	Parameter-variation <sup>2)</sup>	Basismodell <sup>1)</sup>	Parameter-variation <sup>3)</sup>	Basismodell <sup>4)</sup>	Parameter-variation <sup>4)</sup>	Basismodell <sup>5)</sup>	Parameter-variation <sup>6) 7)</sup>
$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$	2,2	1-25	1	0,5-1,5	2,5	2,0-3,0

spez. Wärmekapazität [MJ/(m <sup>3</sup> K)]		Porosität $n_{peff}$ [-]	
Basismodell <sup>5)</sup>	Parameter-variation <sup>6) 7) 8)</sup>	Basismodell <sup>9)</sup>	Parameter-variation <sup>9)</sup>
3	2,2	0,2	0,1-0,25

Das Basismodell ohne Variation der Parameter zeigt eine Ausbreitung der Temperatur mit einer Differenz von 1K zur initialen Grundwassertemperatur von 46,4 m im Anstrom und 48,6 m im Abstrom des warmen Brunnens, sowie 65,1 m im Anstrom und 80,0 m im Abstrom des kalten Brunnens (Abbildung 45). Das in den Extraktionsphasen entnommene Wasser weist am warmen Brunnen nach 14 Jahren eine min. Temperatur von 13,4°C und am kalten Brunnen von max. 5,8°C auf (Abbildung 46). Ausgehend von diesem Modell wurden die Modellparameter entsprechend Tabelle 13 variiert und die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die Wärmeausbreitung und die Wärmerückgewinnung untersucht. Die realistische Spannweite der Modellparameter wurde mit Experten der unteren und oberen Wasserbehörde festgelegt.

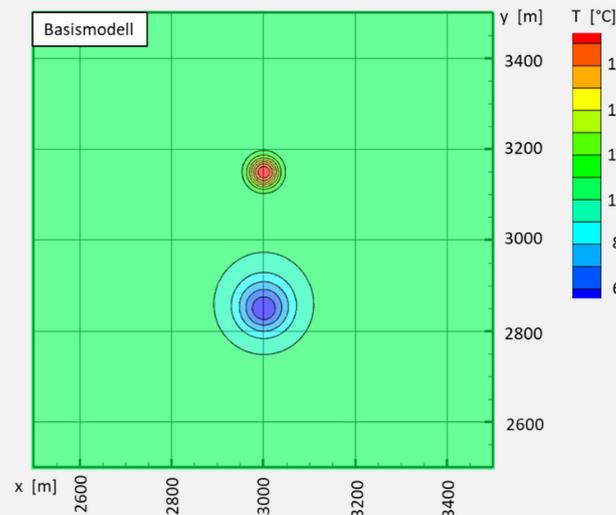


Abbildung 45: Temperatur in der Mitte des Speicherhorizonts nach 15 Jahren im Basismodell

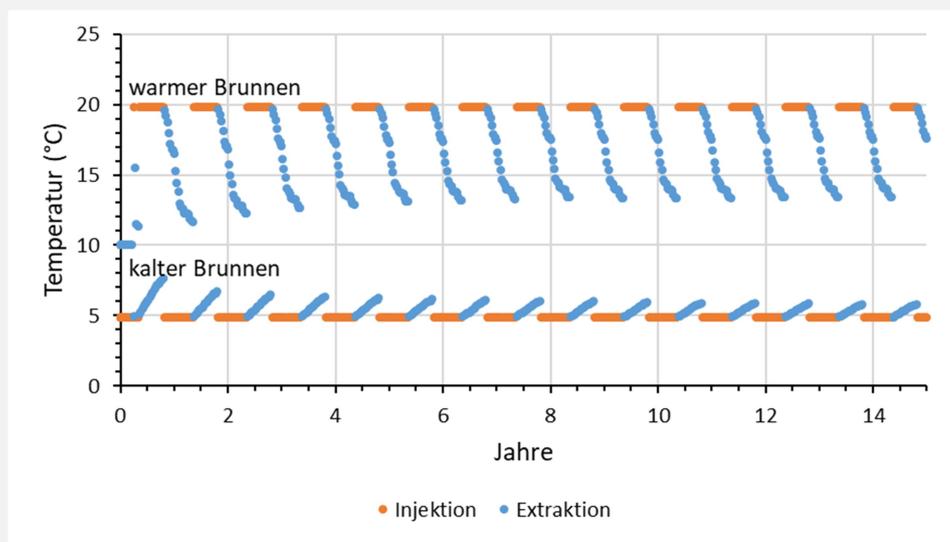


Abbildung 46: Injektions- und Extraktionstemperaturen am warmen und kalten Brunnen im Basismodell

Der kf-Wert wurde unter Berücksichtigung der am Standortsediment gemessenen hydraulischen Durchlässigkeit mittels Permeameterversuch und Siebanalysen variiert. Während im Basismodell der Bemessungswert von  $2 \cdot 10^{-5}$  m/s herangezogen wurde, wird in der Variation als geringster Wert die mittlere in den Permeameterversuchen ermittelte Durchlässigkeit ( $1 \cdot 10^{-5}$  m/s) und als höchster Wert die mittlere aus den Siebanalysen abgeleitete Durchlässigkeit ( $2 \cdot 10^{-4}$  m/s) verwendet.

Die im Basismodell angenommene Grundwasserfließgeschwindigkeit von 2,2 m/a ergibt sich aus dem mittleren hydraulischen Gradienten des Druckspiegels am Standort, einer angenommenen effektiven Porosität von 20% und dem mittleren Bemessungswert der hydraulischen Durchlässigkeit. Der angenommene Minimalwert der Parametervariation von 1 m/a orientiert sich am minimalen gemessenen hydraulischen Gradienten und der mittleren hydraulischen Durchlässigkeit aus den Permeameterversuchen, der Maximalwert von 25 m/a an dem maximalen gemessenen Gradienten und der hydraulischen Durchlässigkeit aus dem Mittelwert aller Siebungen.

Die effektive Porosität wurde sowohl für das Basismodell (20%) als auch die Parametervariation (10-25%) nach Literaturangaben aus Hölting & Coldewey (2009, nach Busch/Luckner (1974)) für sandige Lockergesteine gewählt.

Die im Basismodell verwendeten thermischen Parameter basieren auf den an den Sedimentkernen gemessenen mittleren Werten der Wärmeleitfähigkeit ( $2,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) und der spezifischen Wärmekapazität ( $3 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ) des Standortsediments. In der Parametervariation wurden zusätzlich Werte aus der Literatur zur Annahme einer möglichen Spannweite der Wärmeleitfähigkeit ( $2-3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) und spezifischer Wärmekapazität herangezogen (Min=  $2,2 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ), wobei bei der Wärmekapazität nur ein Minimalwert berücksichtigt wurde, da der mittlere gemessene Wert bereits über der aus der Literatur bekannten maximalen Spannweite für Sande lag (VDI4640 Blatt1 (2010), Sorensen et al. (2013), Tordrup et al. (2017)).

Studien, die die Dispersivität von Wärme- und Stofftransport untersucht haben, deuten auf ähnliche Dispersivitäten für beide Prozesse hin. Sauty et al. (1982) führten experimentelle in-situ-Untersuchungen zur Heißwasserspeicherung in einem gespannten Grundwasserleiter durch und bestimmten die Werte der thermischen Dispersivität indirekt durch Modellkalibrierung. Die Studie zeigte, dass der berechnete Wert der thermischen Dispersivität in der gleichen Größenordnung lag wie der mit einem Tracerversuch am gleichen Standort ermittelte. De Marsily (1986) führte einen Tracerversuch durch, der zeigte, dass die thermische und die gelöste longitudinale Dispersivität ähnlich sind und daher als äquivalente Parameter verwendet werden können. Sauty et al. (1982b) und de Marsily (1986) schlugen folglich einen zum Transport gelöster Stoffe ähnlichen thermischen Dispersionskoeffizienten vor. Ferguson (2007) und Hidalgo et al. (2009) brachten ebenfalls die thermische Dispersion mit der Heterogenität der Permeabilität in Verbindung, was darauf hindeutet, dass die thermische Dispersion mit der Feldskala verknüpft ist. Daher wurde nach Beims (1982) in Abhängigkeit der Dispersivität von der Längenskala eine longitudinale Dispersivität von 1 m für das Basismodell gewählt und in der Parametervariation eine Spanne von 0,5 – 1,5 m berücksichtigt. Die transversale Dispersivität wurde gleich der longitudinalen Dispersivität gesetzt.

Die in den Szenarien der Parametervariation ermittelten Rückholtemperaturen am kalten und am warmen Brunnen zeigen bei allen Parametervariationen nur eine geringe Abweichung zwischen  $-0,5$  und  $+0,7^{\circ}\text{C}$  vom Basismodell. Bei der Ausbreitung der Temperatur mit einer Differenz von  $1\text{K}$  zur initialen Grundwassertemperatur um den kalten und warmen Brunnen herum zeigt das Szenario mit einer erhöhten Grundwasserfließgeschwindigkeit von  $25\text{ m/a}$  die größte Abweichung vom Basismodell mit einer Differenz von bis zu  $-20,8\text{ m}$  im Anstrom und bis zu  $+38,6\text{ m}$  im Abstrom (Abbildung 47 links). Weiterhin bewirkte eine Verringerung der Wärmekapazität auf  $2,2\text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$  eine Vergrößerung der Ausbreitung der Temperatur um die Brunnen um bis zu  $6,7\text{ m}$  (Abbildung 47 rechts). In den weiteren Szenarien beläuft sich die Differenz der Temperaturentwicklung im Vergleich zum Basisfall lediglich auf eine Spanne von  $-3,7$  bis  $+2,7\text{ m}$ .

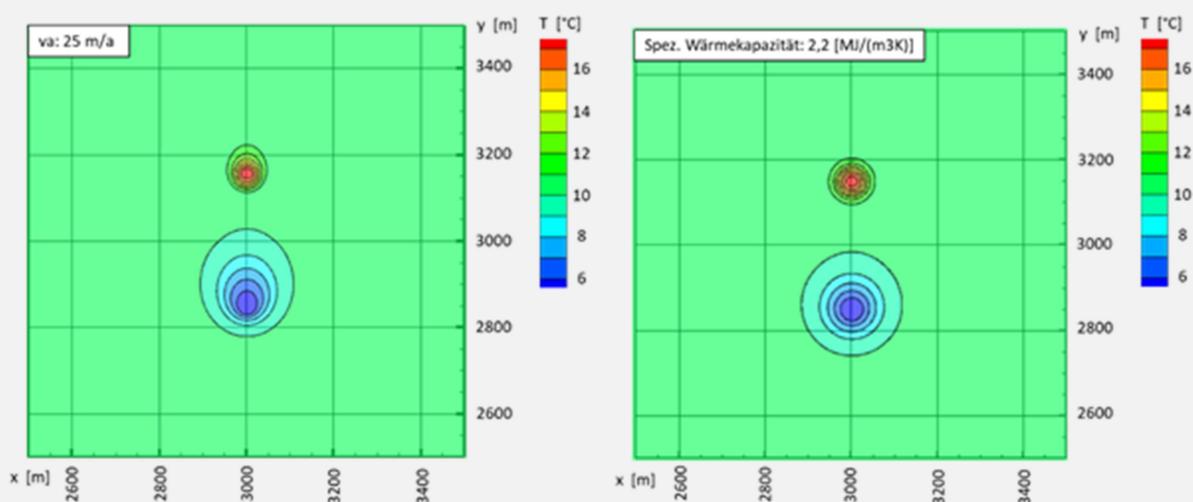


Abbildung 47: Temperatur in der Mitte des Speicherhorizonts nach 15 Jahren im Szenario mit erhöhter Grundwasserfließgeschwindigkeit (links) und verringerter Wärmekapazität (rechts)

Die Parametervariation zeigt, dass die Änderungen der hydraulischen und thermischen Parameter in einer für den Standort realistisch erscheinenden Spannweite nur einen geringen Einfluss auf die Wärmerückgewinnung des Speichers und die Wärmeausbreitung im Speicherhorizont haben.

## 2.9 Regulative Hemmnisse

Die Entscheidung, ob und mit welchen Auflagen eine UTES-Anlage gebaut werden kann, liegt bei den genehmigenden Behörden (untere Wasserbehörde und fachlich beratend obere Wasserbehörde). In Schleswig-Holstein wurde bisher keine ATES-Anlage genehmigt. Die Genehmigung von Erdwärmesonden zur Gewinnung von Erdwärme ist ein bekanntes Verfahren, als BTES-Anlage wurde bisher nur der Wärmespeicher im CITTI-Park genehmigt. Den Behörden fehlen daher Erfahrungen aus vergleichbaren Projekten, welche Anforderungen an die Bewilligung solcher Anlagen zu stellen sind. Ein bewilligtes Projekt als Vorlage, ein Leitfaden oder Vorgaben der Behörden wären dringend erforderlich, um die Planungssicherheit von UTES-Anlagen zu erhöhen.

Übergeordnet erscheint es angeraten, dass das Zusammenwirken von Klimaschutzmaßnahmen, insbesondere bei Nutzung des geologischen Untergrundes, und des bisherigen konventionellen Wasserrechts rechtlich neu definiert werden. Weder konnten bei der früheren Abfassung des Wasserrechts die heutigen Herausforderungen u.a. bei der thermischen Nutzung unterirdischen Wassers erahnt werden, noch bestehen hinreichend empirisch belastbare Daten, die generell eine restriktive Behandlung der thermischen Nutzung des unterirdischen geologischen Raumes rechtfertigen würde. Idealerweise sollte die Entscheidung über eine Priorisierung der Nutzung, als Wärmeversorgung und/oder Wasserversorgung, in der unteren Wasserbehörde liegen, um ortsspezifisch sinnvolle Entscheidungen zu treffen. Zu wünschen wäre dabei, dass das Potenzial zur hybriden Nutzung von Grundwasserkörpern (also Wärme- **und** Wasserversorgung) stärker erkundet und untersucht wird. Grundlage dafür wäre eine prozessorientierte quantifizierende Raumordnung des geologischen Untergrundes, die auf Basis numerischer Modelle und eines hinreichenden Monitorings die räumlichen und zeitlichen Veränderungen bei bestimmten Nutzungsszenarien prognostiziert.

Unabhängig von diesen übergeordneten Anmerkungen wurden in dieser Studie gute Erfahrungen damit gemacht, Behördenvertreter bereits frühzeitig und in regelmäßigen Treffen an den Planungen zu beteiligen, um mögliche Anforderungen und Vorgehensweisen zu diskutieren.

### **Beispiel Bremerskamp**

Untere und obere Wasserbehörde und untere Bodenbehörde wurden frühzeitig an Gesprächen zum Wärmespeicher im Bremerskamp beteiligt. An ATES-Anlagen wurden bisher Auflagen wie an den Bau von Brunnen gestellt, während Auflagen an eine BTES-Anlage aus Erfahrungen mit Erdwärmesonden zur Wärmegewinnung resultieren.

Die Gespräche bieten keine Sicherheit, dass bei Antragstellung nicht noch zusätzliche Anforderungen gestellt werden. Zur Genehmigung von Erdwärmesonden für einen thermal response test wurden z.B. zusätzliche Anforderungen an die Rückbaubarkeit gestellt, die jedoch in nachträglichen Gesprächen geklärt werden konnten.

Die Planungsgruppe des Projekts hat diskutiert, welche Anforderungen an die Genehmigung einer ATES- oder BTES-Anlage gestellt werden könnten und wie ein langwieriges Genehmigungsverfahren vermieden werden kann. Man ist jedoch bisher auf Vermutungen angewiesen, da bisher von Seiten der Behörden keine Vorgaben vorhanden sind. Die GMSH als Bauherr vermutet, dass eine ATES-Anlage schwieriger als eine BTES-Anlage zu bewilligen sein wird. Da in Schleswig-Holstein bisher keine ATES gebaut wurden, haben die Behörden weniger Erfahrung bei der Bewilligung und bei der Bewertung der Umweltauswirkungen (z.B. Temperatur und Hydraulik). Eine in der Nähe gelegene Altablagerung und eine Altlast könnten theoretisch hydraulisch durch den ATES beeinflusst werden, auch wenn der Speicherhorizont in einem tieferen Grundwasserstockwerk als die Schadstoffe liegt. Ein BTES verursacht eventuell geringere Umweltauswirkungen, da er nur geringe hydraulische Auswirkungen hat. Die Behörden haben bereits Erfahrung durch die Bewilligung von Erdwärmesonden, doch es bleibt abzuwarten, ob dies auch die Bewilligung eines Feldes mit mehr als 400 Erdwärmesonden erleichtert.

Die Befürchtung eines komplizierten und langwierigen Bewilligungsverfahrens ist auch ein Grund für das gewählte Temperaturniveau. Eine Temperaturdifferenz bis  $\pm 6^\circ$  zur natürlichen Grundwassertemperatur wird von den Behörden als unbedenklich eingeschätzt, obwohl die VDI4640 Blatt 2 (2010), die die Grundlage für diese Temperaturspanne ist, diese lediglich aufgrund einer nicht zu erwartenden Verringerung der Injektionsrate durch Kalkfällung angibt. Eine Temperaturspannbreite von  $1^\circ - 20^\circ\text{C}$  erscheint mit akzeptablem Aufwand genehmigungsfähig. Eine höhere Speichertemperatur hätte jedoch den Vorteil, dass für einen ATES weniger Wasser gespeichert werden müsste, was vermutlich auch weniger Brunnendubletten erfordern würde. Ein BTES würde bei höheren Temperaturen weniger Erdwärmesonden benötigen. Ohne Vorgaben durch die Behörden besteht die Gefahr, dass nicht die technisch und finanziell beste Anlage geplant wird, sondern die Anlage, von der man vermutet, dass sie genehmigungsfähig ist.

### 3 Fazit

Die thermische Nutzung des oberflächennahen Untergrundes als saisonaler Wärmespeicher ist in vielfacher Hinsicht eine vielversprechende, aber eben auch in der Breite relativ neue Technologie, zu der es in der Praxis noch nicht viel Erfahrung gibt. In der vorliegenden Studie wird am Beispiel eines potentiellen UTES-Standortes (Underground Thermal Energy Storage) am Bremerskamp (Kiel) gezeigt, welche Untersuchungen notwendig sind, um erste Eingangsparameter für die numerischen Simulationen des Betriebes einer UTES-Anlage und zur Prognose der Umweltauswirkungen zu ermitteln.

Die für eine fundierte Bewertung des UTES-Potenzials eines Standortes notwendigen Informationen, wie die Interpretation geologischer Daten, die Durchführung von Bohrungen und Messstellenausbau, die Messung und Interpretation von Druckspiegeln, sowie die Durchführung von Pumpversuchen gehören zum Standardrepertoire geologischer Fachbüros. Grundlegende Informationen dazu, wie Bohrungslokationen und Bohrprofile, Informationen zur Lage von Grundwasserschutz zonen und zu mittleren Wärmeleitfähigkeiten stehen in Schleswig-Holstein z.B. über das Umweltportal des Ministeriums für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur (2023) öffentlich im Internet zur Verfügung. Ebenso sind Wärmebedarfsdichtekarten von jeder Gemeinde in SH im Internet (Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein (2023)) abrufbar. Für den Hochlauf von saisonalen Wärmespeichern wäre es wünschenswert, wenn zukünftig zumindest für die größeren Kommunen auch belastbare geologische und hydrogeologische 3-D-Modelle erarbeitet werden, um ein Nutzungsmanagement der Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter für eine hybride Wärme- und Wasserversorgung zu ermöglichen.

Die praktische Verfügbarkeit einzelner Methoden zur Erkundung ist bzgl. ihrer Verfügbarkeit sehr unterschiedlich zu bewerten. Die (nicht immer notwendigen und sinnvollen) Messungen der Wärmeleitfähigkeit und -speicherkapazität können ebenfalls von geologischen Büros durchgeführt werden, entsprechende Messgeräte dafür sind erwerbbar, allerdings sind die Messungen stark davon abhängig, dass der Wassergehalt bei der Messung den ehemaligen in situ Bedingungen entspricht und das Korngefüge möglichst ungestört bleibt. Anders sieht es z.B. bzgl. der Verfügbarkeit von anerkannten Methoden z.B. zur Prognose der geochemischen Umweltauswirkungen oder der Wärmerückgewinnungs-Effizienz aus. Entsprechende Laborversuche wurden z.B. im KGE entwickelt und auf den Standort angewendet, sind jedoch weder offiziell akkreditiert noch werden sie von „normalen“ Geologischen Büros etc. als Dienstleistung aktuell angeboten. Dies gilt auch für die Ermittlung des  $k_{f(v)}/k_{f(h)}$ -Verhältnisses, dessen Kenntnis wichtig für die Prognose der untertägigen Wärmeausbreitung ist.

Numerische Simulationen des UTES-Anlagenbetriebs und der Wärmeausbreitung im Untergrund, die Grundlage für eine Dimensionierung der Anlage und Ermittlung der räumlichen Ausbreitung möglicher Umweltauswirkungen sind, sind auch unter Berücksichtigung komplexer Wärmelastkurven möglich. Als Simulationsprogramme stehen das in der Wissenschaft verwendete OpenGeoSys und das häufig kommerziell genutzte FEFLOW zur Verfügung, die unter einfachen Bedingungen identische Simulationsergebnisse liefern. Erst wenn eine automatisierte Steuerung der Pumpstraten einer ATES-Anlage genutzt wird, zeigen die Programme keine absolut identischen, aber immer noch sehr ähnliche Ergebnisse und sind für die Praxis somit gleichwertig.

Größere Abweichungen in den Modellergebnissen ergeben sich aufgrund der vergleichsweise neuen Aufgabenstellung durch unterschiedliche Kenntnisse, Herangehensweisen und Erfahrungen der

jeweils verantwortlichen Modellierer bzw. Modelliererinnen. Hier besteht eindeutig ein großer Fortbildungsbedarf, wenn UTES-Systeme zeitnah in der Breite eingeführt werden sollen. Die Modellergebnisse zum Standort sind weitestgehend robust gegenüber Variationen der Parameter in sinnvollen Spannbreiten, was sich mit anderen Simulationsergebnissen deckt, die am Institut für Geowissenschaften durchgeführt wurden. Die Betriebseigenschaften der Anlage und die Wärmeausbreitung im Untergrund hängen von grundlegenden System- und Betriebsparametern wie der Grundwasserfließgeschwindigkeit, der Pumprate und der Beladungstemperatur ab.

Die am Standort gemachten Erfahrungen, daraus resultierende Empfehlungen und Untersuchungen für vergleichbare Standorte wurden bis zum aktuellen Stand der Projektplanung im Bremerskamp im „best practice“ Bericht zusammengefasst. Dieser Bericht ist noch unvollständig, da wesentliche Untersuchungen wie z.B. ein Pumpversuch oder ein thermal response test am Standort noch nicht durchgeführt wurden. Aufgrund der fehlenden Ergebnisse steht noch immer eine Entscheidung aus, ob am Standort eine ATES- oder BTES-Anlage oder eine Kombination beider Systeme die wirtschaftlichste Lösung ist. Somit gibt es auch noch keine Detailplanung und ggf. detaillierte Folgeuntersuchungen für den Wärmespeicher. Da noch kein Antrag auf Genehmigung der Anlage gestellt wurde, ist auch unbekannt, welche zusätzlichen Untersuchungen von der genehmigenden Behörde (untere Wasserbehörde, fachlich unterstützt durch das LfU) gefordert werden. Die Entscheidungsfindung dauert aufgrund der vielen Beteiligten mit widersprüchlichen Zielsetzungen deutlich länger als bei Antragstellung erwartet.

Das Institut für Geowissenschaften wird auch in Zukunft die Planung des UTES im Bremerskamp begleiten und unterstützen. Das vom BMBF im Rahmen der Maßnahme GEO:N geförderte Projekt „SpeicherCity: Modelle zur Systemintegration von Aquiferspeichern in Städten“ (Förderkennzeichen 03G0911C) simuliert die Wärmeausbreitung und Rückgewinnungsrate unter komplexen Lastanforderungen. Dabei wird das vom Landesamt für Umwelt erstellte großräumige geologische Strukturmodell verwendet.

## 4 Literatur

- Amt für Landwirtschaft und Natur. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich (1998): Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit ksat. Fachbericht.
- Amt für Umweltschutz Hamburg (1999): Merkblatt Nr. 3. Bau von Grundwasserbeschaffenheitsmessstellen. Amt für Umweltschutz Hamburg.
- Bäßler, R., Sobetzki, J., Klapper, H.S. (2013): Corrosion Resistance of High-Alloyed Materials in Artificial Geothermal Fluids. In: CORROSION 2013: OnePetro.
- Barthel, R. (2000): Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) zur geologischen Standortbewertung, zur Analyse des regionalen Potentials und als Planungshilfsmittel für die thermische Nutzung des flachen Untergrundes bis 200m Tiefe als Wärmequelle und Wärmespeicher in Unterfranken/Bayern, Dissertation Julius-Maximilians-Universität, 356 S.
- Beims, U. (1983): Auswertung von Gütepumpversuchen. Zeitschrift für Angewandte Geologie.
- Bohne, D (2004): Thermische Speicherung und solare Gewinne. In: Ökologische Gebäudetechnik. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-322-97855-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-322-97855-4_3)
- Bonte, M., van Breukelen, B.M., Stuyfzand, P.J. (2013a): Environmental impacts of aquifer thermal energy storage investigated by field and laboratory experiments. Journal of Water and Climate Change 4 (2): 77–89. <https://doi.org/10.2166/wcc.2013.061>
- Bonte, M., Röling, W.F.M., Zaura, E., van der Wielen, P.W.J.J., Stuyfzand, P.J., van Breukelen, B.M. (2013b): Impacts of Shallow Geothermal Energy Production on Redox Processes and Microbial Communities. Environ. Sci. Technol. 47 (24), 14476–14484. <https://doi.org/10.1021/es4030244>
- Sorensen, P.A., Larsen, J., Thogersen, L., Dannemand Andersen, J., Ostergaard, C., Schmidt, T. (2013): Boreholes in Braedstrup. Final Report.
- Brons, H.J., Griffioen, J., Appelo, C.A.J., Zehnder, A.J.B. (1991): (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. Water Research 25 (6), 729-736. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90048-U](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90048-U)
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2023): Bohrpunktekarte Deutschland. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Geodatenmanagement/Bohrpunktkarte-Deutschland/bohrpunktkarte-deutschland\\_node.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Geodatenmanagement/Bohrpunktkarte-Deutschland/bohrpunktkarte-deutschland_node.html)
- Busch, K.F. & Luckner, L. (1974): Geohydraulik. 497 S., Enke, Stuttgart.
- CAU (2022): Bremerskamp: Ein neues Stadtviertel entsteht in Kiel. <https://www.uni-kiel.de/de/universitaet/baumassnahmen-campusentwicklung/grosse-baumassnahmen/bremerskamp>. aufgerufen 30.11.2022
- Dahmke, A., Dethlefsen, F., Schwanebeck, M., Delfs, J.O., Wang, B., Beyer, C., Bauer, S., Köber, R., Bohm, S., Schäfer, D., Struß, J., Strutz, T., Nordbeck, J., Menberg, K., Tissen, C., Radmann, K.J., Schneider, A., Hansen, C., Richnow, H.H., Vogt, C., Maaß, C. (in prep.): Umweltwirkungen und umweltverträglicher Ausbau der oberflächennahen Geothermie. Abschlussbericht. Forschungszeichen FKZ 3716 43 104 2
- De Marsily, G. (1986): Quantitative Hydrogeology. San Diego, California: Academic Press.
- Degenhart, H., Holstenkamp, L., Kohrs, A.K., Neidig, P., Opel, O., Schomerus, T. (2019): Entwicklung der Einsatzfelder für mitteltiefe Aquiferwärmespeicher in Norddeutschland unter wirtschaftlich /

finanziellen, geologisch / technischen, umweltchemischen und rechtlich / förderpolitischen Aspekten.  
Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Aquiferspeicher.

- DIN 18130-1 (1998): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche.
- DIN 4022-1 (1987): Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels.
- DIN EN ISO 12677 (2013): Chemische Analyse von feuerfesten Erzeugnissen durch Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) - Schmelzaufschluss-Verfahren.
- DIN EN ISO 14688-1 (2020): Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden — Teil 1: Benennung und Beschreibung.
- DIN EN ISO 14688-2 (2020): Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden — Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen.
- DIN EN ISO 17892-4 (2017): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung.
- Dromgoole, E.L., Walter, L.M. (1990): Iron and manganese incorporation into calcite: Effects of growth kinetics, temperature and solution chemistry. *Chemical Geology* 81 (4), 311-336. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90053-A](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90053-A)
- DWA-A 138 (2005): Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V..
- DVGW Arbeitsblatt W 121 (2003): Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen, Technische Regel Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V..
- DVGW Arbeitsblatt W 110 (A) (2019): Bohrlochgeophysik in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V..
- Eijkelkamp (2017): Labor Permeameter. Gebrauchsanweisung.
- Englert, A., Hashagen, U., Jaekel, U., Nitzsche, O., Schwarze, H., Vereecken, H. (2000): Transport von gelösten Stoffen im Grundwasser – Untersuchungen am Testfeld Krauthausen. *Grundwasser* 5(3), 115–124.
- Ferguson, G. (2007): Heterogeneity and Thermal Modeling of Ground Water, *Ground Water* 45 (4) 485–490.
- Fleming, B.A., Crerar, D.A. (1982): Silicic acid ionization and calculation of silica solubility at elevated temperature and pH application to geothermal fluid processing and reinjection. *Geothermics* 11 (1), 15 – 29. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(82\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0375-6505(82)90004-9)
- Fleuchaus, P., Schüppler, S., Stemmler, R., Menberg, K., Blum, P. (2021): Aquiferspeicher in Deutschland. In: *Grundwasser* 26 (2), 123–134. DOI: 10.1007/s00767-021-00478-y
- Garling, F. & Dittrich, J. (1979): *Gesteinsbemusterung*. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- GEO-Pot (2010): Geothermie Potenzial Österreichs. Endbericht.
- Griffioen, J. & Appelo, C.A.J. (1993): Nature and extent of carbonate precipitation during aquifer thermal energy storage. *Appl. Geochem.*, 8, 161-176. DOI: 10.1016/0883-2927(93)90032-C

- Hidalgo, J.J., Carrera, J., Dentz, M. (2009): Steady state heat transport in 3D heterogeneous porous media. *Adv. Water Resour.* 32 (8) 1206–1212.
- Hölting, B., Coldewey, W.G. (2013): *Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie.* Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Holstenkamp, L., Lauer, J.J., Neidig, P., Opel, O., Steffahn, J., Strodel, N., Vogel, M., Degenhart, H., Michalzik, D., Schomerus, T., Schönebeck, J., Növig, T. (2016): Querschnittstudie Erfolgsfaktoren für mitteltiefe Aquiferwärmespeicher, in Norddeutschland. Beitrag “Der Geothermiekongress DGK 2016” Essen, 29. Nov. - 01. Dez.
- Hooghart, J.C., Posthumus, C.W.S. (1990): *Hydrochemistry and energy storage in aquifers.* The Hague : TNO Committee on Hydrological Research. 142 S. <https://library.wur.nl/WebQuery/hydrotheek/535024>
- Inskeep, W.P., Bloom, P.R. (1986): Kinetics of Calcite Precipitation in the Presence of Water-soluble Organic Ligands. *Soil Science Society of America Journal* 50 (5), 1167 – 1172. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050015x>
- Jenne, E., Andersson, O., Willemsen, A. (1992): Well, Hydrology, and Geochemistry Problems Encountered in ATEs Systems and their Solutions. SAE Technical Paper 929152.
- Jesußek, A. (2012): Temperaturbedingte Auswirkungen unterirdischer Wärmespeicherung auf hydrogeochemische Sediment-Wasser-Wechselwirkungen in einem oberflächennahen Grundwasserleiter. Dissertation CAU Kiel.
- Jesußek, A., S. Grandel, A. Dahmke (2013): Impacts of subsurface heat storage on aquifer hydrogeochemistry. *Environ Earth Sci* 69, 1999–2012. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2037-9>
- Kabus, F., Hoffmann, F., Möllmann, G. (2005): Aquifer Storage of Waste Heat Arising from a Gas and Steam Cogeneration Plant - Concept and First Operating Experience. In: *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey.*
- Kallesøe, A.J. & Vangkilde-Pedersen, T. (eds) (2019): *Underground Thermal Energy Storage (UTES) – state-of-the-art, example cases and lessons learned.* HEATSTORE project report, GEOTHERMICA – ERA NET Cofund Geothermal. 130 pp + appendices.
- Keserovic, A., Bäßler, R., Kamah, Y. (2014): Suitability of Alloyed Steels in Highly Acidic Geothermal Environments. In: *TX: NACE.*
- Klapper, H.S., Stevens, J., Wiese, G. (2013): Pitting Corrosion Resistance of CrMn Austenitic Stainless Steel in Simulated Drilling Conditions - Role of pH, Temperature, and Chloride Concentration. *Corrosion Science* 69 (11), 1095-1102. <https://doi.org/10.5006/0947>
- Landesamt für Natur- und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (2001): *Geothermie, eine Perspektive für Schleswig-Holstein*, 55 S. ISBN 3-923339-67-4
- Landesamt für Natur- und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (2004): *Geothermie in Schleswig-Holstein – Ein Baustein für den Klimaschutz*, 110 S. ISBN 3-923339-96-8
- Landesamt für Natur- und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (2006): *Geothermie in Schleswig-Holstein – Leitfaden für überflächennahe Erdwärmelanlagen*, 42 S. ISBN 3-937937-12-9
- Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein (2023): *Digitaler Atlas Nord – Wärme*, <https://danord.gdi-sh.de/viewer/resources/apps/Waerme/> aufgerufen 23.10.2023.

- Lewin, I., Drefke, C., Piepenbrink, M., Schüth, C., Hoppe, A. (2014): Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von quartären Sedimenten mittels Siebanalysen und Pumpversuchen. *Grundwasser* 19(2), 127–135.
- Lüders, K., Firmbach, L., Ebert, M., Dahmke, A., Dietrich P., Köber, R. (2016): Gas-phase formation during thermal energy storage in near-surface aquifers: experimental and modelling results. *Environmental Earth Sciences* (75) 1404. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6181-5>
- Lüders, K., Dahmke, A., Fiedler, M., Köber, R. (2020): Temperature influence on mobilisation and (re)fixation of trace elements and heavy metals in column tests with aquifer sediments from 10 to 70 °C, *Water Research* 169. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115266>
- Lüders, K., Hornbruch, G., Zarrabi, N., Heldt, S., Dahmke, A., Köber, R. (2021): Predictability of initial hydrogeochemical effects induced by short-term infiltration of ~75 °C hot water into a shallow glaciogenic aquifer. *Water Research X* (13). <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2021.100121>
- Matthes, K., Nusche, H., Dietrich, P., Vienken, T. (2012): Auswirkungen von Messunsicherheiten bei der Korngrößenanalyse auf die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes. *Grundwasser* 17(2), 105–111.
- Matthies, D. (1996): Neuartige Verfahren zur Bestimmung der Gasleitfähigkeit von porösen Materialien, insbesondere von Böden. Schriftenreihe Forstw. Fakultät Universität München und Bay. Landesanstalt Wald und Forstwirtschaft Nr. 157.
- Meier zu Beerentrup, K., Dahmke, A. (in prep.): Alteration of chemical pore-water composition of North German glacial tills in the temperature range between 10 to 60°C – methodological aspects and temperature effects.
- Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur (2023): Umweltinformationen für Schleswig-Holstein, <https://umweltportal.schleswig-holstein.de/> aufgerufen 23.10.2023.
- Mundhenk, N., Huttenloch, P., Sanjuan, B., Kohl, T., Steger, H., Zorn, R. (2013): Corrosion and scaling as interrelated phenomena in an operating geothermal power plant. *Corrosion Science* 70 (1), S. 17–28. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.01.003
- Popp, S., Beyer, C., Dahmke, A., Bauer, S. (2015): Model Development and Numerical Simulation of a Seasonal Heat Storage in a Contaminated Shallow Aquifer. *Energy Procedia* 76, 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.842>
- Sauty, J.P., Gringarten, A.C., Menjöz, A., Landel, P.A. (1982a): Sensible energy storage in aquifers 1. Theoretical study. *Water Resour. Res.* 18 (2) 245-252.
- Sauty, J.P., Gringarten, A.C., Fabris, H., Thiery, D., Menjöz, A., Landel, P.A. (1982b): Sensible energy storage in aquifers - 2. Field experiments and comparison with theoretical results. *Water Resour. Res.* 18 (2) 253-265.
- Schäfer, W. (1999): Modellierung des reaktiven Transports organischer Schadstoffe im Grundwasser. Schriftenreihe der Angewandten Geologie Karlsruhe, Band 55.
- Siebenborn, G. (2011): Direkte Baugrundaufschlüsse im Boden. Deutsche Brunnenbauertage und BAW-Baugrundkolloquium, „Baugrundaufschlüsse: Planung, Ausschreibung, Durchführung, Überwachung und Interpretation“, 13. – 15. April 2011 im Bau-ABC Rostrup / Bad Zwischenahn.
- Schmidt, T., Müller-Steinhagen, H. (2005): Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher in Deutschland, OTTI Profiforum Oberflächennahe Geothermie, Gegenstau, 14.-15. April 2005.

- Sitzenfrei, R. (2007): Vereinfachtes numerisches Modell zur Beschreibung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser. Diplomarbeit, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für Bauingenieurwesen.
- Storz, K., Steger, H., Wagner, V., Bayer, P., Blum, P. (2017): Methodenvergleich zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 22: 103–111.
- Thomsen, C., Liebsch-Dörschner, T. (2014): Geologische Potenzialanalyse des tieferen Untergrundes Schleswig-Holstein, Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, 19 S.
- Tordrup, K.W., Poulsen, S.E., Bjørn, H. (2017): An improved method for upscaling borehole thermal energy storage using inverse finite element modelling. Renewable Energy 105: 13-21.
- Vallejo Vitaller, A., Angst, U., Elsener, B. (2019): Corrosion Behaviour of L80 Steel Grade in Geothermal Power Plants in Switzerland. In: Metals 9 (3), S. 331. DOI: 10.3390/met9030331.
- VDI4640 Blatt1 (2010): Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, 33 S.
- VDI4640 Blatt2 (2019): Thermische Nutzung des Untergrunds - Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, 139 S.