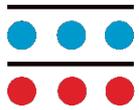




INNOVATIONSREGION  
MITTELDEUTSCHLAND



aquistore

Adaption von Technologien saisonaler geogener Wärmespeicher  
auf die Aquifere der Innovationsregion

Schlussbericht

BAND 1: Studie

NEUE WEGE FÜR  
**INNOVATION UND WERTSCHÖPFUNG**

Strukturwandel in der Innovationsregion Mitteldeutschland

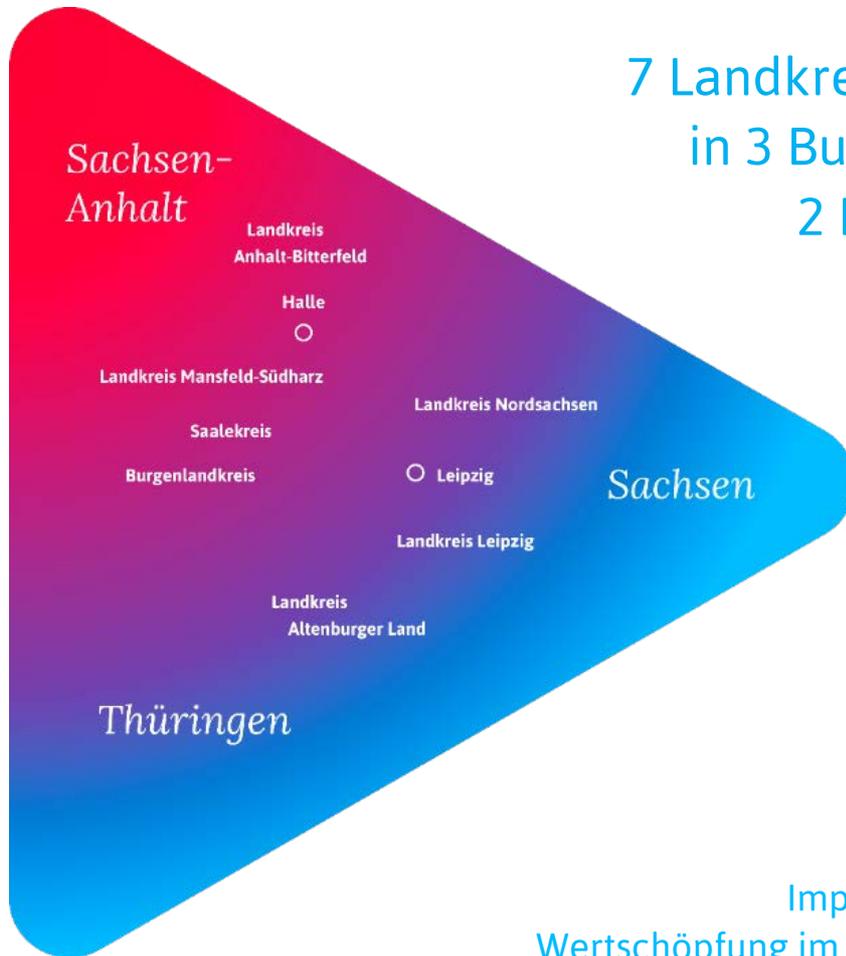
16.12.2021

Ein Projekt der



METROPOLREGION  
MITTELDEUTSCHLAND

## 7 Landkreise und 2 Städte in 3 Bundesländern mit 2 Mio. Einwohnern

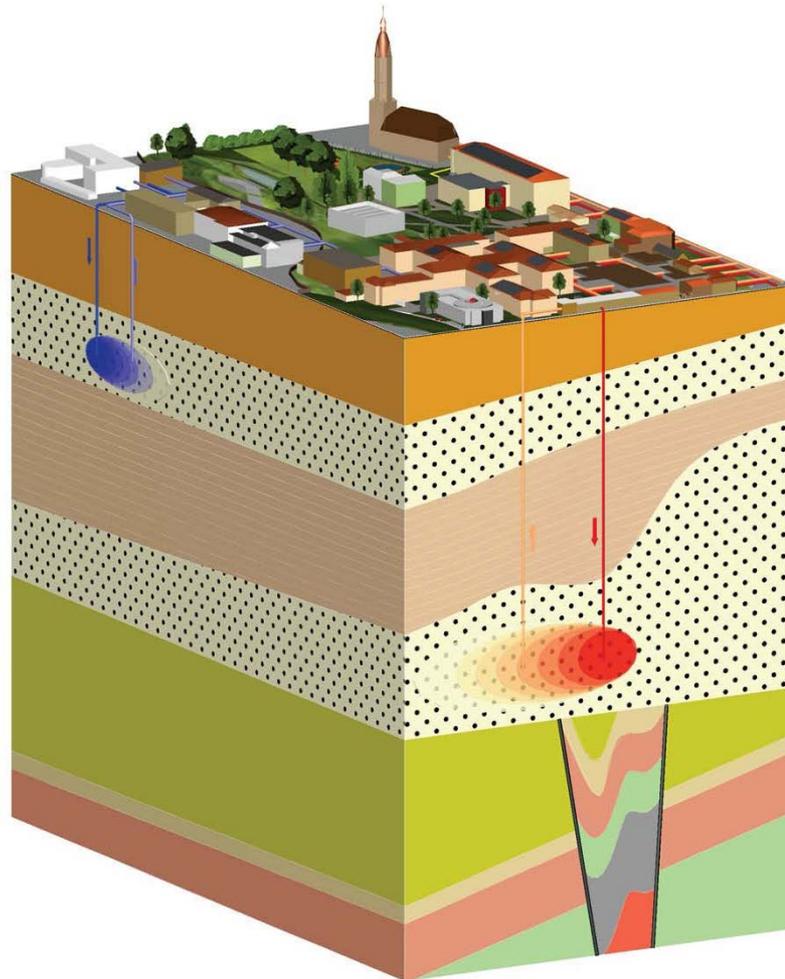


### Impulse für Innovation und Wertschöpfung im Mitteldeutschen Revier

Im Strukturwandelprojekt „Innovationsregion Mitteldeutschland“ entwickelt die Europäische Metropolregion Mitteldeutschland (EMMD) gemeinsam mit den Landkreisen Altenburger Land, Anhalt-Bitterfeld, Burgenlandkreis, Leipzig, Mansfeld-Südharz, Nordsachsen und Saalekreis und den Städten Halle und Leipzig neue Strategien und Projekte für Innovation und Wertschöpfung, um den Strukturwandel in der Region aktiv zu gestalten.

Gefördert aus Mitteln der Bundesrepublik Deutschland, des Freistaates Sachsen, des Landes Sachsen-Anhalt und des Freistaates Thüringen im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe: "Verbesserung der regionalen Wirtschaftsinfrastruktur".







---

**Bearbeitung:** Projektgruppe **aquistore**



JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für  
Mikrobiologie | e7 UG | Energieberatung Bernd Felgentreff

**Projektkoordination:** JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH

**Autoren:** Bernd Felgentreff, Julia Hopf, Prof. Erika Kothe, Daniel Landgraf,  
Marcus Meisel, Annelie Papsdorf, Dr. Kersten Roselt,  
Jörg Schmidt, Martin Voigt

**Redaktion:** Dr. Kersten Roselt / Annelie Papsdorf  
Jena & Leipzig, Dezember 2021

**Dateiversion:** 20211216\_Schlussbericht aquistore V2.0

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

### BAND 1: Studie

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Glossar</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Motivation</b> .....	<b>17</b>
<b>2 State of the Art</b> .....	<b>19</b>
2.1 Einleitung.....	19
2.2 Saisonale Speicherung thermischer Energie.....	19
2.2.1 Underground Thermal Energy Storage allgemein .....	20
2.2.2 Aquifer Thermal Energy Storage .....	22
2.2.2.1 Funktionsprinzipien.....	23
2.2.2.2 Tiefenlage des Speichers .....	25
2.2.3 Historischer Abriss.....	25
2.2.4 ATES-Anlagen in Deutschland .....	28
2.2.4.1 Geothermische Heizzentrale (GHZ) Neubrandenburg.....	29
2.2.4.2 Deutscher Bundestag / Reichstagsgebäude Berlin.....	29
2.2.4.3 Rostock.....	29
2.2.4.4 Bonner Bogen .....	30
2.3 Forschungs- und Handlungsbedarfe .....	30
2.4 Fazit.....	31
<b>3 Aquiferatlas – Verbreitung der Aquifere in der Innovationsregion</b> .....	<b>35</b>
3.1 Inhalt.....	35
3.2 Methodik.....	35
3.3 Raumwiderstände.....	38
3.4 Nomenklatur .....	39
3.5 Verbreitung der Grundwasserleiter .....	40
3.5.1 Geologischer Überblick.....	40
3.5.1.1 Prätertiäre Folgen.....	40
3.5.1.2 Tertiär.....	42
3.5.1.3 Quartär .....	42
3.5.1.4 Anthropozän .....	43
3.5.2 Tertiäre Grundwasserleiterkomplexe .....	44
3.5.2.1 Grundwasserleiterkomplex 6 (GWL 6.3, 6.2 und 6.1).....	44
3.5.2.2 Grundwasserleiterkomplex 4 / 5 .....	45



3.5.3	Quartäre Grundwasserleiterkomplexe .....	46
3.5.3.1	Grundwasserleiterkomplex C / 1.8 .....	46
3.5.3.2	Grundwasserleiterkomplex B / 1.5 .....	47
3.5.3.3	Grundwasserleiterkomplex A / 1.1 .....	48
3.6	Gesamtbewertung des Aquiferspeicherpotenzials .....	49
<b>4</b>	<b>Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Biozönosen .....</b>	<b>52</b>
4.1	Motivation .....	52
4.2	Grundlagen zu Umweltauswirkungen bei der Speicherung thermischer Energie im Untergrund .....	52
4.3	Probenahmen .....	54
4.3.1	Grundwasser .....	54
4.3.2	Braunkohle .....	55
4.4	Mikrobiologische Untersuchungen und Ergebnisse .....	58
4.4.1	Untersuchungen von Mikrobiomen und ihren Funktionen in Grundwasserleitern .....	58
4.4.2	Einfluss der Probenahme und umgebenden Geologie .....	58
4.4.3	Kultivierung auf unterschiedlichen Medien .....	59
4.4.4	Kultivierung bei erhöhter Temperatur .....	60
4.4.5	Vorkommen methanogener Archaeen .....	61
4.4.6	Mikrobiomanalysen nach der Inkubation bei erhöhter Temperatur .....	63
4.4.7	Zuordnung der Mikrobiome zu den Grundwasserleitern und Grundwasserleiterkomplexen .....	65
4.4.8	Vergleich der Grundwassermikrobiome mit solchen aus Proben des zugänglichen Kohleflözes .....	66
4.5	Bewertung .....	67
<b>5</b>	<b>Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Oberfläche .....</b>	<b>68</b>
5.1	Wärmehaushalt im Boden .....	68
5.2	Wärmetransport und Wärmeleitung im Boden an die Geländeoberfläche .....	70
5.3	Beeinflussung der Oberflächentemperatur in Folge thermischer Speichernutzung des Grundwassers .....	70
5.4	Auswirkungen der Temperaturerhöhung .....	72
<b>6</b>	<b>Anforderungen und Schnittstellen der TGA-Planung .....</b>	<b>74</b>
6.1	Grundlagen der energetischen Aquifernutzung und System-temperaturen in Fernwärmesystemen .....	74
6.2	Erzeugerstrukturen .....	76
6.3	Systemtemperaturen in Heizsystemen .....	77
6.4	Systemtemperaturen in Kühlsystemen .....	78
6.5	Relevanz der Systemtemperaturen .....	79
6.5.1	Heizung .....	79
6.5.2	Kühltechnik .....	80

6.6	Abwärmenutzung und Speicherung .....	81
6.7	Technische Nutzungsvarianten von Aquiferen und Anforderungen an die TGA Planung.....	83
6.7.1	Systemtemperaturen.....	83
6.7.2	Serielle Nutzung von Temperaturniveaus.....	84
6.7.3	Serielle Nutzung von Temperaturniveaus.....	85
6.7.4	Spitzenlastreduktion .....	85
6.7.5	Regelungstechnik .....	87
<b>7</b>	<b>Ermittlung der Gesteungskosten und Bewertung der Effizienz .....</b>	<b>89</b>
7.1	Grundlagen der Wirtschaftlichkeit .....	89
7.2	Berechnung von Wärmegestehungskosten und Amortisationszeit .....	90
<b>8</b>	<b>Genehmigungsfähigkeit .....</b>	<b>93</b>
8.1	Rechtsgrundlage in Deutschland und der EU .....	93
8.2	Raumwiderstände.....	95
8.3	Genehmigungsverfahren .....	95
<b>9</b>	<b>Vorschlag von Pilot- und Schlüsselprojekten .....</b>	<b>99</b>
9.1	Herangehensweise .....	99
9.2	Ergebnisse .....	99
9.3	Schlüsselprojekt St. Georg Klinikum .....	102
<b>10</b>	<b>Ergebnisse und Ausblick.....</b>	<b>105</b>
10.1	Ergebnisse .....	105
10.2	Defizite und Fortführungsbedarf.....	106
10.3	CHECKLISTE für die Entscheidungsfindung und Vorbereitung einer Nutzung von Aquiferen für die Einspeicherung von Wärme oder Kälte in der Innovationsregion .....	107
10.4	Ausblick .....	108
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>111</b>
	<b>ANHANG 1:    Verwendete Geodaten.....</b>	<b>119</b>
	<b>ANHANG 2:    Probenahmeprotokolle .....</b>	<b>122</b>
	<b>ANHANG 3:    Übersicht zu Wärmenetzen.....</b>	<b>129</b>

**BAND 2: Atlas der nutzbaren Aquifere**

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Speicherarten im Vergleich nach Speicherkapazität und Ausspeicherdauer (Ragone-Diagramm) .....	22
Abbildung 2:	Funktionsweise eines Aquifer Thermal Energy Storage Systems im Wechselprinzip .....	24
Abbildung 3:	Funktionsweise eines Aquifer Thermal Energy Storage Systems im Wechselprinzip unter Nutzung zweier übereinanderliegender Aquifere	25
Abbildung 4:	Chronologie und Meilensteine der weltweiten Entwicklung von ATEs mit Technologie-Reifegrad (Technical Readiness Level, TRL) gemäß DOI (U.S. Department of Energy) (Fleuchaus et al. 2018).....	26
Abbildung 5:	ATES-Potenzialräume.....	28
Abbildung 6:	Übersicht stillgelegter, in Betrieb und in Planung befindlicher Aquiferspeicher sowie Forschungsprojekte in Deutschland .....	28
Abbildung 7:	Vereinfachter Workflow der Erarbeitung des Aquiferatlas .....	37
Abbildung 8:	Kartierte Raumwiderstände .....	38
Abbildung 9:	Übersicht über die prätertiären Strukturen in der IRMD .....	41
Abbildung 10:	Stark vereinfachtes schematisches geologisches Leitprofil für die IRMD mit Clusterung der für eine Wärmespeicherung relevanten Aquifere .....	43
Abbildung 11:	Verbreitung des GWLK 6 mit Mächtigkeiten $\geq 5$ m in der IRMD (ohne Raumwiderstände).....	44
Abbildung 12:	Verbreitung des GWLK 4/5 mit Mächtigkeiten $\geq 5$ m in der IRMD (ohne Raumwiderstände).....	45
Abbildung 13:	Verbreitung des GWLK C/1.8 mit Mächtigkeiten $\geq 5$ m in der IRMD (ohne Raumwiderstände).....	47
Abbildung 14:	Verbreitung des GWLK B/1.5 mit Mächtigkeiten $\geq 5$ m in der IRMD (ohne Raumwiderstände).....	48
Abbildung 15:	Überblick über mögliche Auswirkungen von Temperaturveränderungen im Untergrund (Hähnlein et al. 2013).....	53
Abbildung 16:	Verortung der Grundwasser- und Flöz-Probenahmen innerhalb der jeweiligen Grundwasserleiterkomplexe in der IRMD.....	54
Abbildung 17:	Messung der Feldparameter und Grundwasserprobenahme (JENA-GEOS®).....	55
Abbildung 18:	Verortung der Braunkohle-Probenahmen mit Bezeichnung der Flöze im Tagebau Schwerzau .....	56
Abbildung 19:	Probenahme am Flöz 23 im Tagebau Schwerzau .....	56
Abbildung 20:	Probenahme am Flöz 1 im Tagebau Schwerzau .....	57
Abbildung 21:	Bei der Probenahme wurde vor allem darauf geachtet, frisches Material zu gewinnen und die Sterilität der Probe zu gewährleisten. ....	57
Abbildung 22:	Lebendzellzahlen (koloniebildende Einheiten/ml) von Wasserproben aus drei Grundwasserbrunnen. ....	59
Abbildung 23:	Lebendzellzahlen (koloniebildende Einheiten/ml) von Wasserproben aus drei Grundwasserbrunnen nach Inkubation für 14 Tage bei unterschiedlichen Temperaturen.....	61

Abbildung 24:	Mikrobiomanalyse jeweils zweier technischer (Proben A, B) und zweier biologischer (A1, A2, B1, B2) Replikate für den Anteil der Archaea .....	61
Abbildung 25:	Mikrobiomanalyse jeweils zweier technischer (Proben A, B) und zweier biologischer (A1, A2; B1, B2) Replikate für den Anteil der Bacteria .....	62
Abbildung 26:	Mikrobiomanalyse jeweils zweier technischer (Proben A, B) und zweier biologischer (A1, A2; B1, B2) Replikate für den Anteil der Pilze, die das Mycobiom bilden .....	63
Abbildung 27:	Mikrobiomanalysen der drei Messstellen 1/2020, 1/99 und 4/96.....	64
Abbildung 28:	Mikrobiomanalysen der Proben zweier weiterer Messtellen vor (NA) und nach der Inkubation bei verschiedenen Temperaturen .....	65
Abbildung 29:	Mikrobiomanalysen der Proben direkt aus dem angeschnittenen Kohleflöz an den beiden Probenahmestellen 1 und 23 in jeweils drei technischen und biologischen Replikaten für den Anteil der Bacteria.....	66
Abbildung 30:	Schematische Darstellung der Strahlungsbilanz an der Oberfläche (basierend auf Kürten 2015, S. 84).....	68
Abbildung 31:	Exemplarische Temperaturverteilung im Untergrund (Kürten 2015).....	69
Abbildung 32:	Beeinflussung der vertikalen Temperaturgradienten im Bodenprofil durch den Aquifer-Wärmespeicher in Rostock während der Be- und Entladungszyklen.....	71
Abbildung 33:	Generationen der Fernwärmenetze (Quelle: <a href="http://www.energiwendebauen.de">www.energiwendebauen.de</a> ) .....	74
Abbildung 34:	Jahresdauerlinie Heizlast im Wärmenetz (Quelle: e7 UG, 2021) .....	75
Abbildung 35:	Arbeitszahl Wärmepumpe bei verschiedenen Quelltemperaturen .....	77
Abbildung 36:	Trockene Rückkühlwerke .....	78
Abbildung 37:	Beispielhafter Zusammenhang zwischen Kühlleistung und Rückkühltemperatur (eigene Darstellung) .....	79
Abbildung 38:	Wandaufbau ohne Dämmung (links), Wandaufbau mit Außenwanddämmung (Mitte), Wandaufbau mit Außenwanddämmung und Außenwandtemperierung (rechts).....	79
Abbildung 39:	Beispielhafte Darstellung Rohrleitungsnetz Kälte in einem Gebäude .....	80
Abbildung 40:	Fotografie eines Anlagenschemas mit Kaltwassertemperaturen von der Quelle zur Senke .....	81
Abbildung 41:	Systemskizze Rückkühlung über Aquifer in Grund- und Spitzenlast .....	82
Abbildung 42:	Gekoppelte aktive und passive Grundwasserleiternutzung.....	84
Abbildung 43:	Gekoppelte Wärme- und Kältenutzung mit Aquifererweiterung .....	84
Abbildung 44:	Platz für Pufferspeicher leer (links), mit Bauteilen des Pufferspeichers (Mitte) und fertig montierter Pufferspeicher (rechts).....	85
Abbildung 45:	3D-Laserscan und 3D-Raum im CAD .....	86
Abbildung 46:	3D-Aufstellplanung .....	86
Abbildung 47:	Zentrales Management der Energieverteilung .....	87
Abbildung 48:	Räumliche Verteilung des Feedbacks zur Anfrage von Aquiferspeicherungen am Standort.....	100
Abbildung 49:	Ansicht des St. Georg Klinikums (Foto: D. Landgraf).....	103
Abbildung 50:	Geologische Situation im Bereich des St. Georg Krankenhauses mit einem gut ausgebildeten Grundwasserleiterkomplex (GWLK) B / 1.5 ...	103



---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1:	Überblick über wichtige Merkmale verschiedener Bauformen sensibler Wärmespeicher .....	21
Tabelle 2:	SWOT-Analyse zur Nutzung von ATEs .....	34
Tabelle 3:	Nomenklatur der quartären Grundwasserleiter .....	39
Tabelle 4:	Verbreitungsflächen der Grundwasserleiterkomplexe .....	50
Tabelle 5:	Zusammenstellung der von den GWLK in den Kreisen insgesamt eingenommenen Flächen mit und ohne Raumwiderstand .....	50
Tabelle 6:	Aufstellung der erfolgten Grundwasser-Probenahmen mit Angabe der gemessenen Feldparameter .....	55
Tabelle 7:	Zusammenfassung der derzeit ausschließenden und einschränkenden Einflussfaktoren für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zum Zwecke der Untergrundspeicherung; .....	95
Tabelle 8:	Überblick über die in den Bundesländern der IRMD anzuwendenden Rechtsvorschriften, zuständigen Stellen, Pflichten der Vorhabensträger:innen und die erforderlichen Genehmigungen für den Bau und Betrieb von Aquiferspeicher-Anlagen .....	96

---

## Glossar

---

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
abiotisch	alle Umweltfaktoren, an denen Lebewesen nicht erkennbar beteiligt sind
alpidisch	die bislang letzte globale Gebirgsbildungsphase der Erdgeschichte, in der auch die Alpen gebildet wurden
anoxisch	bezeichnet grundsätzlich einen sauerstofffreien Bereich
Anthropozän	Benennung einer neuen geochronologischen Epoche: Zeitalter, in dem der Mensch zu einem der wichtigsten Einflussfaktoren auf die biologischen, geologischen und atmosphärischen Prozesse auf der Erde geworden ist
äolisch	durch Windeinwirkung entstanden
Aquifer	Im engeren Sinne ist es der Teil eines Grundwasserleiters, der mit Wasser gefüllt ist. Der Begriff wird aber i. d. Praxis analog zum <i>Grundwasserleiter</i> (s.u.) verwendet.
Archaeen	kleine einzellige Mikroorganismen (Mikroben), die neben Bakterien und Eukaryoten eine der drei Domänen zellulärer Lebewesen bilden
ästuarin	Ablagerung im Übergangsbereich zum marinen Milieu
Bauteilaktivierung	Systeme, welche die Gebäudemassen zur Temperaturregulierung nutzen
Biofilm	Schleimschicht mit Mischpopulationen von Mikroorganismen
Chloroplaste	Organellen der Zellen von Grünalgen und Landpflanzen, die Photosynthese betreiben
Clogging	(ungewünschte) Partikelanreicherungen im Fluidfluss und geothermischer Anlagen
closed-loop-Systeme	innerhalb der Heizungstechnik geschlossene Regelkreise bei der Heizung, Kühlung und Belüftung (Ventilation)
Coefficient of performance - COP	thermischer Wirkungsgrad von Wärmepumpen, entspricht dem im deutschen Sprachraum verwendeten Begriff Leistungszahl
diluvial	Sedimente, die durch hochwasserähnliche Ereignisse von Wasser gebildet wurden
Dublette, Brunnendublette	Brunnenanlage mit einem Förder- und Infiltrationsbrunnen
eutroph	nährstoffreich
Fazies / faziell	Eigenschaften eines Gesteins, die aus seiner geologischen Geschichte herrühren
Genom	Erbgut eines Lebewesens oder eines Virus

Georeferenzierung	Zuweisung raumbezogener Informationen, der Georeferenz, zu einem Datensatz
glaziär	im Umfeld eines Gletschers oder des Inlandeises entstanden
Grundwasserleiter	Gesteinskörper mit Hohlräumen, der zur Leitung von Grundwasser geeignet ist
Hangend- grundwasserleiter	über einer bestimmten Schicht (z.B. einem Kohleflöz) befindlicher Grundwasserleiter
Heizlast	die zum Aufrechterhalt einer bestimmten Raumtemperatur notwendige Wärmezufuhr
herzynisch	wie der Nordrand des Harzes („herzyn) gerichtete („streichende“) WNW-OSO gerichtete tektonische Strukturen
Inkubation	Bebrüten von Bakterien- oder Zellkulturen in einem Brutschrank (Inkubator)
in-situ- Bioremediation	"vor Ort" durchgeführte Dekontamination verschmutzter Standorte durch Verwendung von endogenen oder externen Mikroorganismen
Kraft-Wärme- Kopplung	gleichzeitige Umwandlung von Energie in mechanische oder elektrische Energie und nutzbare Wärme innerhalb eines thermodynamischen Prozesses
latente Speicherung	Wärmespeicherung, die einen Großteil der zugeführten thermischen Energie in Form von latenter Wärme (z.B. für einen Phasenwechsel von fest zu flüssig) speichert
Liegend- grundwasserleiter	unter einer bestimmten Schicht (z.B. einem Kohleflöz) befindlicher Grundwasserleiter
Lyse/lysieren	Zerfall organischen Materials
Medium R2A	Nährstoff-reduziertes Agrarmedium für die Inkubation von Wasserproben
Methanogen/ Methanogenese	Methanbildner oder Methanogene sind Mikroorganismen, bei deren Energiestoffwechsel Methan gebildet wird (Methanogenese)
Methylo trope	aerobe Bakterien, die organische Substrate ohne Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung als Energie- und Kohlenstoffquelle nutzen können
Mikrobiom	Gesamtheit aller Mikroorganismen der Erde (als Teil des Bioms), welche die Erdkruste, die Gewässer und die Erdatmosphäre besiedeln
monolithisch	aus einer einheitlichen, nicht trennbaren Einheit bestehend
monomiktisch	Bezeichnung für ein Sedimentgestein, welches aus nur einer Mineralart besteht
Mono-Well-Systeme	ATES mit nur einem Brunnen, der 2 GWL in unterschiedlichen Tiefen erschließt

multivalent	in der Heiztechnik Anlagen, die zwei oder mehr verschiedene Brennstoffe nutzen können
Multi-Well-System	ATES mit 2 oder mehr Brunnen
Nahwärmenetz	Wärmenetz zur Übertragung von Wärme zwischen Gebäuden zu Heizzwecken, wenn sie im Vergleich zur Fernwärme nur über verhältnismäßig kurze Strecken erfolgt
oligotroph	nährstoffarm, Gewässer mit wenig Nährstoffen und daher geringer organischer Produktion.
open-loop-Systeme	während <i>Closed-Loop-Systeme</i> geschlossene Regelungskreise darstellen, bedeutet Open Loop, dass lediglich eine Steuerung stattfindet
Orogenese	Gebirgsbildung
oxisch	oxidierend, Sauerstoff enthaltend
periglaziär	im Permafrostbereich entstanden
Phase Change Materials	Phasenwechselmaterial für die <i>latente Speicherung</i>
Phototrophie	Nutzung von Licht als Energiequelle durch Lebewesen
Plattierung	Ausbringen von Mikroorganismen auf einer Agarplatte (Agar), meist durch gleichmäßiges Ausstreichen einer Bakteriensuspension
Prätertiär	Gesteine, die vor dem Tertiär entstanden sind
Quartär	jüngster Zeitabschnitt der Erdgeschichte einschließlich des Holozäns und damit der Gegenwart / Anthropozän
Quartier	Stadtviertel, Einteilung in der Regel unterhalb der Stadtteilgröße
Raumwiderstand	der rechtliche Schutzstatus oder vorhandene Nutzungen, die in einem betroffenen Gebiet einer Genehmigung und damit der Realisierung eines Projekts entgegenstehen können.
Rückkühlwerk	Anlage, die überschüssige oder technisch nicht mehr nutzbare Wärme aus Industrieprozessen mittels Wärmeaustausch an die Umgebung abgibt
saisonale Speicher	Saisonale Wärmespeicher speichern Wärme aus der warmen Jahreszeit und können damit Gebäude in der kalten Jahreszeit mit gespeicherter Energie beheizen oder eventuell auch kühlen
Scaling	(ungewünschte) Partikelanreicherungen im Fluidfluss und in geothermischen Anlagen
Scholle	in der Geologie ein Stück der Erdrinde, das durch tektonische Fugen, wie Störungen oder Spalten, von anderen Schollen getrennt ist
sensible Speicherung	Nutzung der sogenannten sensiblen oder fühlbaren Wärme von flüssigen oder festen Speichermedien, wie Wasser, Magnesit, Beton oder Erde

Sequenzierung	Bestimmung der Nukleotid-Abfolge in einem DNA-Molekül.
Solifluktion/ solifluidal	Bodenfließen an Hängen oder auf Ebenen im Auftaubereich des Dauerfrostbodens
Stratigraphie	zeitliche und räumliche Ordnung der Gesteine unter Berücksichtigung aller physikalischen und chemischen Grundmerkmale, sie ist Basis und Maßstab für die Klärung und Parallelisierung erdgeschichtlicher und regionalgeologischer Prozesse
Stygobionta	Lebewesen, die bevorzugt oder ausschließlich im Grundwasser leben, sich also auf den Biotop des Stygal spezialisiert und daran angepasst haben
Subrosion	unterirdische Verwitterung und Auslaugung leicht löslicher Gesteine durch zirkulierendes Grundwasser
Subsidenz	bezeichnet in der Geologie den Vorgang einer Absenkung.
Temperaturhub	Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle und der Vorlauftemperatur des Heizwassers, auf deren Niveau die Wärmepumpe die Temperatur anheben muss
Tertiär	Erdzeitalter, älterer und weitaus längerer Abschnitt des Känozoikums (Erdneuzeit)
Variszikum, variszisch	Gebirgsbildung in der jüngeren Zeit des Erdaltertums (Paläozoikum)
VRF-Systeme	Variable Refrigerant Flow. Mit dem System wird die Leistung einer Klimaanlage über einen variablen Kältemittelvolumenstrom geregelt und bietet so mehr Möglichkeiten.
Wärmegestehungskosten	Summe der Kosten, welche bei der Erzeugung einer Wärmeeinheit (z. B. 1 kWh) für den Betreiber der Anlage entstehen
Wärmekapazität	Menge an Wärme, die aufgenommen werden muss, damit die Temperatur um 1 K steigt
Wärmeleitfähigkeit	Menge an Wärme, die in einer bestimmten Zeit durch einen Stoff fließt
Wärmepumpe	Anlage, die unter Aufwendung von technischer Arbeit thermische Energie aus einem Reservoir mit niedrigerer Temperatur aufnimmt und als Nutzwärme auf ein zu beheizendes System mit höherer Temperatur (z.B. Raumheizung) überträgt
Wirkungsgrad	Hier: Maß für die Effizienz der Wärmepumpe

## verwendete Abkürzungen

ATES	Aquifer Thermal Energy Storage ist die Speicherung und Rückgewinnung von Wärmeenergie im Untergrund
BHKW	Blockheizkraftwerk ist eine modular aufgebaute Anlage zur Gewinnung elektrischer Energie und Wärme, die vorzugsweise am Ort des Wärmeverbrauchs betrieben wird
CAPEX	Capital Expenditures, Investitionsausgaben, umfassen alle längerfristigen Investitionen in die Vermögenswerte eines Unternehmens
DOI	Digital Object Identifier und ist ein eindeutiger und dauerhafter Identifikator für digitale Objekte, insbesondere für Artikel und Beiträge in wissenschaftlichen Veröffentlichungen
GHZ	Geothermische Heizzentrale Neubrandenburg
GuD	Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk
GWL	Grundwasserleiter
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
KUWEA	Komplexvorhaben Umbau Hochtemperatur-Wärmeversorgungsnetz zum multivalenten Energieverteilnetz und Adaption der peripheren Anlagen für ausgewählte Gebäude des Klinikums St. Georg in Leipzig
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LENA	Landesenergieagentur Sachsen-Anhalt GmbH
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH mit Hauptsitz in Senftenberg
MIBRAG	Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH
OPEX	steht für Operating Expenses und bezeichnet die laufenden Aufwendungen eines Unternehmens für Gehälter, Miete, Rohstoffverbrauch, Abschreibungen etc.
SAENA	Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH
SIAG	SIAG Industrie GmbH ist ein Unternehmen im Bereich Metallbau und Zulieferer der Energieindustrie mit Sitz in Leipzig
SWOT	Instrument der strategischen Planung, dient der Positionsbestimmung und der Strategieentwicklung von Unternehmen und anderen Organisationen
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
ThEGA	Thüringer Energie- und Greentech Agentur



---

## 1 Motivation

---

Die Abkehr von der fossilen Wärme und der Klimanotstand von Städten wie Leipzig befeuern die Entwicklung alternativer Energiesysteme sowie die Nutzung lokaler Ressourcen. Von großer Bedeutung für eine solche Transition wird sein, die in der Innovationsregion Mitteldeutschland (IRMD) ausgeprägten besonderen Potenziale für eine lokale und regionale energetische Wertschöpfung zu erschließen. Diese lokaltypischen Potenziale sind im Wesentlichen:

- ▶ der Bestandsschutz der Flächen der bisherigen fossilen Energieproduktion für eine künftige Nutzung postfossiler Energieerzeugung, -umwandlung und -speicherung,
- ▶ die weite Verbreitung von Tagebaurestseen zur Nutzung mit Seethermie und
- ▶ die weite Verbreitung tertiärer und quartärer Aquifere mit großen Mächtigkeiten für eine geogene saisonale Wärmespeicherung.

Bezüglich der Wärmeversorgung gilt als Langfristziel zur Energiewende die Anpassung der Heizsysteme an sogenannte „kalte“ Medien (verlustarme Bereitstellung der Wärmemengen durch große Volumina), die effizient aus regenerativen bzw. sekundären Quellen und Speichern gespeist werden.

Die Seen des Leipziger Neuseenlandes und andere geflutete Tagebaue besitzen erhebliche Potenziale zur Nutzung von Seethermie. Um diese Potenziale bedarfsgerecht zu erschließen, hat ebenfalls auf Initiative und im Auftrag der Innovationsregion Mitteldeutschland (IRMD) eine Projektgruppe ‚Seethermie‘ unter Koordination der JENA-GEOS® im Sommer 2021 eine Studie über Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Genehmigungsfähigkeit vorgelegt.

Mit dem Vorhaben **aquistore** wird das Ziel verfolgt, die einzigartigen Potenziale vorhandener Lockergesteins-Grundwasserleiter in der IRMD für eine nachhaltige geogene saisonale Wärme- und Kältespeicherung erschließen zu helfen. Die Nutzung der Aquifere des tertiären ‚Weißelsterbeckens‘ und des Quartärs in der IRMD stellt eine innovative Option dar und ist beispielhaft für die erforderliche Minderung der Treibhausgas-Emissionen durch künftige dezentrale Wärmeversorgungssysteme (Nahwärmenetze) auf der Basis dieser ‚kalten‘ Medien zu sehen.

Als ‚Umsetzungsstudie‘ angelegt, soll **aquistore** den nationalen/internationalen Kenntnisstand auswerten, für die IRMD anpassen und verfügbar machen (‚adaptieren‘). Zudem wird **aquistore** spezielle Fragestellungen zur generellen Machbarkeit beantworten, die für eine prinzipielle Herstellung der Wirksamkeit und Genehmigungsfähigkeit von Aquiferspeichern in der IRMD unabdingbar sind.

Hierzu gehören

- ▶ die Verbreitung geeigneter Aquifere in der IRMD,
- ▶ die Auswirkungen der Wärmespeicherung auf
  - die Mikrobiologie (Grundwasser, Aquifer),
  - eine mögliche Ausgasung von Kohleflözen,
  - mögliche oder vermeidbare Auswirkungen von Temperaturveränderungen auf die Geländeoberflächen,
- ▶ Fragen zur Auslegung der Schnittstellen zur Gebäudetechnik,
- ▶ die Methodik zur Ermittlung der Gesteungskosten zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit der Aquiferspeicher sowie
- ▶ die Grundsätze der Genehmigungsfähigkeit.

Als innovatives Speicherprojekt zur Sicherung der Wärmeversorgung deckt das Projekt wesentliche Inhalte des Handlungsfeldes 3 / Gestaltung der künftigen Energieregion ab:

- ▶ Sicherung der Wärmeversorgung nach dem Wegfall der Braunkohlekraftwerke durch alternative Ansätze (Nahwärmenetze, thermische Seewassernutzung), Erfassung und Bewertung der verfügbaren Flächenpotenziale für die Nutzung erneuerbarer Energien in der Region.

Diese Studie widmet sich der Kartierung und Darstellung der Verbreitung von Aquiferspeichern in der IRMD, den Auswirkungen der Aquiferspeicherung auf die Umwelt, der technischen Anbindung an Wärme-Versorgungslösungen in den Netzen bzw. Gebäuden, den Gesteungskosten sowie der Genehmigungsfähigkeit.

Schlussendlich werden durch umfangreiche Recherchen potenzielle Pilot- oder Schlüsselprojekte identifiziert, bei denen die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Umsetzung hoch ist: Dabei geht es um den Abgleich bestehender Bedarfe und einzuspeichernder Überschusswärme mit den Aquifer-Speicherpotenzialen.

Die Ergebnisse der Studie sollen Investor:innen und Gemeinden als Basis dienen, um Projekte zur Wärme- oder Kälteeinspeicherung zu initiieren.

- ▶ Hinweis zur Verwendung der Begriffe „Aquifer“ und „Grundwasserleiter“

Der Begriff ‚Aquifer‘, aus dem Englischen stammend, hat im Sprachumgang eine weite Verbreitung erlangt. Obwohl er in Deutschland oft als Synonym für einen Grundwasserleiter verwendet wird, umfasst er nach Definition nur die wassergesättigte Schicht, also einen Teil des Grundwasserleiters, wenn dieser nicht völlig gefüllt ist. Der Begriff ‚Grundwasserleiter‘ bezeichnet stattdessen einen Gesteinskörper, der geeignet ist, Grundwasser zu leiten, unabhängig davon, ob der Gesteinskörper wassergesättigt ist oder nicht. Aufgrund der offiziellen Bezeichnung der nachfolgend untersuchten Technologie als „Aquiferspeichertechnik“ wird auch der Aquifer, dem allgemeinen Sprachgebrauch folgend, als Begriff für den Grundwasserleiter verwendet.

---

## 2 State of the Art

---

### 2.1 Einleitung

Die Wichtigkeit und unbedingte Notwendigkeit der Transformation hin zu einer treibhausgasemissionsärmeren Gesellschaft rückt zunehmend in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Diese Transformation kann nur durch Beteiligung aller Energiesektoren erreicht werden. Seitens der Politik wurde unter dem Schlagwort ‚Energiewende‘ bereits eine Entwicklung hin zum vorrangigen Einsatz von erneuerbaren Energien - Technologien im Strom- und Mobilitätssektor - vorangetrieben (Vienken et al. 2016). Die Versorgung mit Wärme, Kälte und Warmwasser erfuhr dabei jedoch keine hinreichende Beachtung, obwohl sie für rund die Hälfte des Endenergiebedarfs und ca. ein Drittel der Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich ist. Der Anteil erneuerbarer Energien stagnierte in diesem Bereich in den letzten 10 Jahren bei knapp 15 % (Fleuchaus et al. 2021; Sandrock et al. 2020; Umweltbundesamt 2021).

Inzwischen ist auch die Bedeutung der Wärmewende in den Fokus von Politik und Öffentlichkeit gerückt. Die Nachfrage nach nachhaltigen Technologien und Verfahren im Wärmesektor nimmt stetig zu (BMW 2021; Bundesregierung 2021; Vienken et al. 2016). Er muss so umgestaltet werden, dass nicht nur mehr Energie aus erneuerbaren Quellen gewonnen wird, es bedarf auch passender Speicherlösungen, um saisonale Angebots- und Nachfrageunterschiede auszugleichen. Oberflächennahe Aquifere sind hervorragend dafür geeignet (Bloemendal et al. 2015; Fleuchaus et al. 2021; Lee 2010; Schüppler et al. 2019). Gleichzeitig zeigt sich ein steigender Trend zur Nutzung von sogenannten ‚kalten Nahwärmenetzen‘. In diese lässt sich Wärmeenergie aus erneuerbaren Quellen direkt einspeisen. Außerdem stellen sie das Bindeglied zu saisonalen Speichern dar (Buffa et al. 2019).

### 2.2 Saisonale Speicherung thermischer Energie

Unbestritten ist die Generierung geeigneter Speicherlösungen eine der wichtigsten Aufgaben, die im Rahmen der Wärmewende gelöst werden muss. Als besonders zweckmäßig hat sich die Speicherung von Wärme- und Kälteenergie in Grundwasserleitern, sogenannten Aquiferen, herausgestellt. Diese Technologie bietet viele Vorteile gegenüber anderen Formen der Speicherung von thermischer Energie (Fleuchaus et al. 2021; Hesaraki et al. 2015).

Grundlegend kann zwischen sensiblen, latenten und thermochemischen Wärmespeichern unterschieden werden. Verfahren zur sensiblen Speicherung thermischer Energie zeichnen sich im Gegensatz zur latenten Speicherung durch eine „fühlbare“ Temperaturänderung des Speichermediums aus. Bei Zweitem, den sogenannten Phase Change Materials (PCM), ermöglicht die Änderung des Aggregatzustands des Speichermediums die Wärmespeicherung. Thermochemische Wärmespeicher nutzen den Wärmeumsatz

umkehrbarer chemischer Reaktionen, also die Aufnahme und Abgabe von Enthalpie (Sternner und Stadler 2017b). Latente und thermochemische Speichertechniken sind hier nicht Gegenstand der Betrachtung.

Sensible Wärmespeicher sind zumeist Untergrundspeicher, sogenannte Underground Thermal Energy Storage (UTES) Systeme. Anzumerken ist, dass einige Anlagen (z. B. Speichertanks, Erdbecken) sowohl ober- als auch unterirdisch oder halbversenkt errichtet werden können. Einige Bauformen sensibler Wärmespeicher werden jedoch ausschließlich oberirdisch realisiert, wie z. B.:

- ▶ (Nacht)Speicherheizungen,
- ▶ Flüssigsalz- oder Ölspeicher und
- ▶ thermisch aktive Bauteile, wie beispielsweise Fußbodenheizungen (Sternner und Stadler 2017b).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über wichtige Merkmale verschiedener sensibler Wärmespeicher, wie z. B. Aquiferspeicher (auch *Aquifer Thermal Energy Storage*, kurz ATES).

### 2.2.1 Underground Thermal Energy Storage allgemein

Der Begriff ‚Underground Thermal Energy Storage‘ umfasst mehrere Methoden zur sensiblen Speicherung thermischer Energie im Untergrund und ist je nach Tiefenlage des Speichers der oberflächennahen, mitteltiefen oder tiefen Geothermie zuzuordnen. Die Anlagen zeichnen sich durch hohe Speichereffizienzen und Speicherkapazitäten aus. Dadurch sind sie sehr gut als Langzeit-Wärme- und Kältespeicher (Fleuchaus et al. 2018; Sternner und Stadler 2017b) geeignet. Dies verdeutlicht auch der Vergleich mit anderen Energiespeichertechnologien, wie Abbildung 1 zeigt.

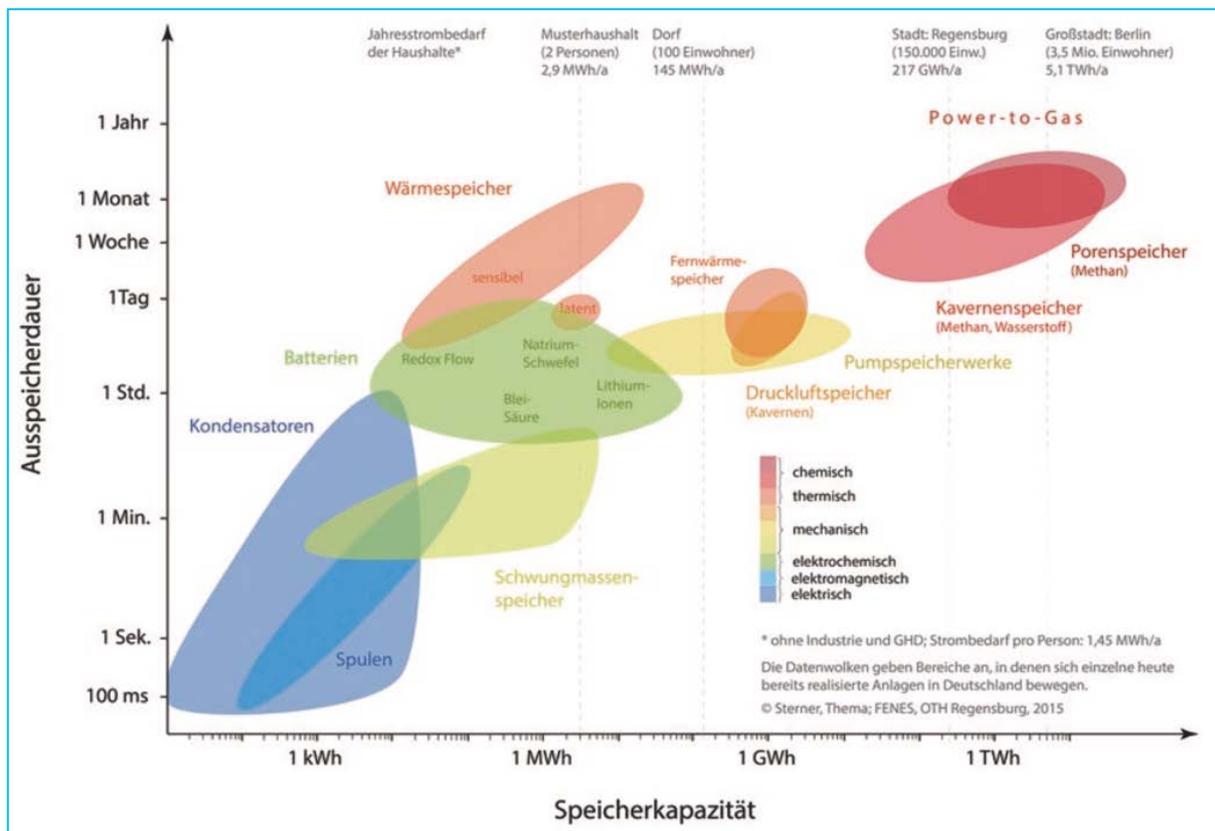
Die am weitesten verbreiteten UTES-Technologien sind neben Aquiferspeichern:

- ▶ Borehole Thermal Energy Storage (BTES),
- ▶ Tank Thermal Energy Storage (TTES),
- ▶ Pit Thermal Energy Storage (PTES) und
- ▶ Cavern Thermal Energy Storage (CTES).

Bei BTES, TTES und PTES handelt es sich ausschließlich um geschlossene, sogenannte closed-loop-Systeme, deren Speichereigenschaften bauartbedingt mehr oder weniger unabhängig von den hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrundes sind. ATES werden als open-loop-Systeme bezeichnet und CTES können je nach Art des genutzten Hohlraums ebenfalls offene (z. B. stillgelegte Bergwerke) oder geschlossene Systeme (z. B. Salzkavernen) sein (Fleuchaus et al. 2018; VDI 4640-2001).

**Tabelle 1: Überblick über wichtige Merkmale verschiedener Bauformen sensibler Wärmespeicher (Bauer et al. 2017; Sterner und Stadler 2017a; Stober und Bucher 2020; VDI 4640-2001).**

	Speicher- heizungen	Thermisch akti- vierte Bauteile	Fundament- speicher	Erdwärme- kollektoren	Erdsonden (Borehole Thermal En- ergy Storage)	Tank Thermal Energy Storage		Erdbecken (Pit Thermal Energy Storage)	Kavernen (Cavern Thermal Energy Storage)	Aquifer- speicher (Aquifer Thermal Energy Storage)	Flüssigsalz- oder Ölspeicher
<b>Aufbau</b>	direkte Konver- tierung von Elektrizität in Wärme über Heizwiderstände	Rohrschlangen in Beton integriert	Wärmetauscher- rohre in/an Gründungsbau- werk	horizontal verlegte Rohre	Rohre mit Wärmeüber- träger in senkrechten Bohrungen	Warm- und Heißwasser- speicherung in Beton-, Stahl- und Kunst- stoffbehältern	Kaltwas- serspei- cher in Stahlbe- hältern	künstlich herge- stellte, abgedich- tete Becken	künstl. hergestellt (z. B. Salzkaver- nen); natürlich entstandene Hohlräume; mit Wasser gefüllt	Grundwasserleiter über eine oder mehrere Bohrun- gen erschlossen	in Tanks
<b>Anwendungs- bereiche</b>	Heizen	Heizen & Kühlen	Heizen & Kühlen	Heizen & Kühlen	Heizen & Kühlen	Heizen	Kühlen	Heizen & Kühlen	Heizen & Kühlen	Heizen & Kühlen	Hochtemperatur- speicher
<b>Tiefe [m]</b>	oberirdisch	oberirdisch	Fundamenttiefe	1 - 5	20 - 150 (max. 400)	oberirdisch, unterirdisch, halbversenkt, in Gebäu- den stehend		unterirdisch, halbversenkt	wenige hundert bis > 1.000 Meter	100 - 500	oberirdisch
<b>Größe [m³]</b>	entsprechend Heizkörper	entsprechend Decken-, Wand oder Bodenflä- che	entsprechend Gründungsbau- werk	doppelte Wohnfläche wird benötigt	> 50.000 (Sondenfeld aus mehreren Bohrungen)	0,1 - 200 (klein-mittel- groß) bis ca. 50.000 (groß)		100 - 10.000	entsprechend unterirdischem Hohlraum	5.000 - 200.000	keine Angabe
<b>Speicher- temperatur [°C]</b>	bis zu 600	18 - 35	4 - 20	jahres- zeitliche Schwankun- gen	40 - 80	bis zu 95	0 - 20	< 0 bis max. 95 (in Abhängigkeit vom Abdicht- material)	Kavernen: 40 - 90; Berg- werke: nahe Um- gebungstempe- ratur	> 0 - 80	250 - 265
<b>Wärmepumpe/ Kältemaschine notwendig</b>	nein/nein	nein/nein	ja/ja	ja/ja	ja/ja	ja	nein	ja/nein	ja	ja/nicht unbe- dingt	nein
<b>Wärme- überträger</b>	keiner	Wasser	Energiepfähle, Fundament, Schlitzwand	Wasser- Frostschutz- mittel-Ge- misch	Wasser- Frostschutz- mittel- Gemisch	direkte Beladung: Speichermedium indirekte Beladung: andere Flüssigkeit		Wasser, Wasser- Frostschutzmit- tel-Gemisch	direkte Bela- dung: Wasser indirekte Belad.: anderes Medium	Wasser	Speicher- medium
<b>Speicher- medium</b>	Eisenoxid- stein	Betonbauteile (Decke, Wand, Boden)	Erdreich & Gründungsbau- werk	fest (Erdreich)	fest (Erdreich, Gestein)	Wasser		Wasser, Kies- Wasser, Erdreich, Sand- Wasser	Wasser	Wasser & Erdreich	Nitratsalze; Mi- neral-, Synthe- tik- oder Silikon- öle, flüss. Na
<b>Zeitraum</b>	Kurzzeitspeicher	Kurz- oder Lang- zeitspeicher	Kurz- oder Lang- zeitspeicher	Kurz- oder Langzeitspei- cher	Kurz- oder Langzeitspei- cher	Kurz- oder Langzeit- speicher	Kurz- zeit- speicher	Kurz- oder Lang- zeitspeicher	Kurz- oder Lang- zeitspeicher	Langzeitspeicher (saisonal)	keine Angabe



**Abbildung 1: Speicherarten im Vergleich nach Speicherkapazität und Ausspeicherdauer (Ragone-Diagramm)**  
 Die Datenwolken repräsentieren in Deutschland existierende Anlagen im Jahr 2016 (© FENES OTH Regensburg, 2016). Übernommen aus (Sterner und Stadler 2017b).

## 2.2.2 Aquifer Thermal Energy Storage

Von allen UTES haben Aquiferspeicher die größten Speicherkapazitäten aufgrund der quasi fehlenden Barrieren (Fleuchaus et al. 2018; Fleuchaus et al. 2021; Kranz und Frick 2013). Außerdem sind die Speicherkosten im Verhältnis zu anderen Speichertechnologien vergleichsweise gering (Fleuchaus et al. 2021). Damit eignen sie sich besonders für großskalige Anwendungen, wie etwa die Versorgung ganzer Quartiere mit Heiz- und Kühlenergie sowie Warmwasser (Fleuchaus et al. 2018). Am effizientesten genutzt werden können ATES bei Abnehmern mit hohem und konstantem Energieverbrauch über das ganze Jahr hinweg, wie z. B. Bürogebäuden, Flughäfen, Universitäten, Einkaufszentren und Krankenhäusern (Schüppler et al. 2019).

Damit Aquiferspeicher zum Einsatz kommen können, muss mindestens ein geeigneter Grundwasserleiter mit folgenden grundlegenden Eigenschaften vorhanden sein (Bloemendal et al. 2015; Fleuchaus et al. 2018; Nordell et al. 2015; VDI 4640-2001):

- ▶ ausreichende Mächtigkeit des Aquifers,
- ▶ mindestens nach oben eine Begrenzung durch gering bis nicht durchlässige Schichten,
- ▶ geringe Grundwasserströmungsgeschwindigkeit,

- ▶ weitestgehend homogene Struktur und Geometrie im Bereich des geplanten Speichers,
- ▶ hohe Permeabilität,
- ▶ geochemische Eigenschaften, die Beeinträchtigungen des Speichertriebes (z. B. Clogging, Korrosion, Verringerung der Permeabilität) nicht begünstigen.

Die genauen Voraussetzungen sind standort- und bedarfsspezifisch durch geeignete Explorationsmethoden zu bestimmen und zu prüfen.

Für (Bloemendal et al. 2015) sind auch bestimmte klimatische Bedingungen Voraussetzung für die Anwendbarkeit von Aquiferspeichern. In der gemäßigten Klimazone haben Gebäude einen Wärmeüberschuss im Sommer und ein Wärmedefizit im Winter. Diese saisonale Diskrepanz führt, wie eingangs erwähnt, überhaupt erst zur Notwendigkeit, thermische Energie über längere Zeiträume speichern zu wollen oder zu müssen.

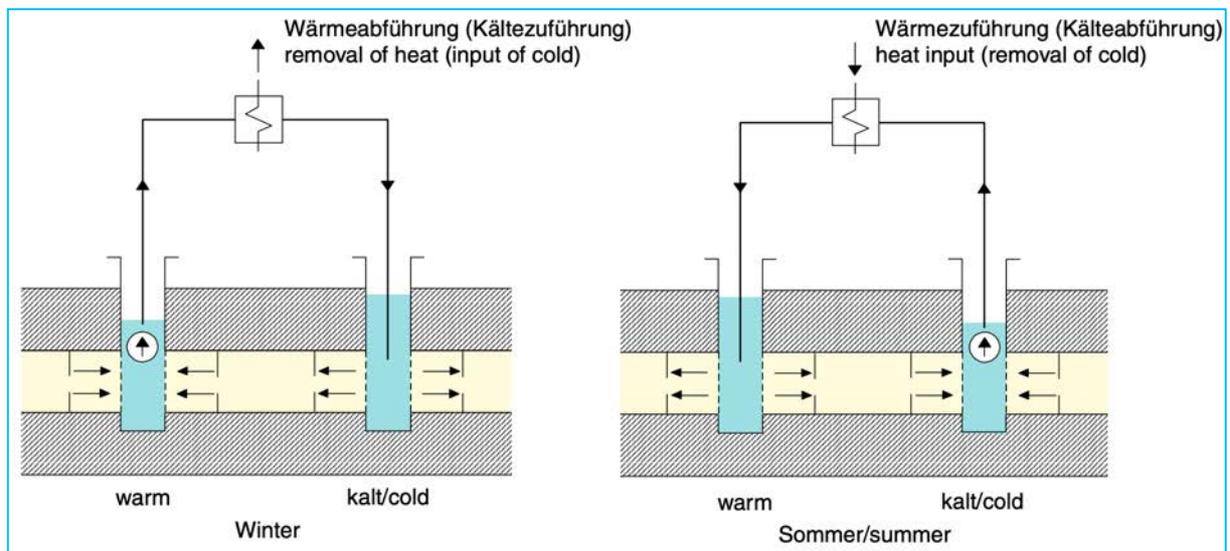
### 2.2.2.1 Funktionsprinzipien

Aquiferspeicher können nach (Fleuchaus et al. 2021) grundlegend anhand ihrer Speichertemperatur in folgende Systeme unterteilt werden:

- ▶ max. 25 °C      Niedrigtemperatur (NT)-Speicher
- ▶ mind. 50 °C      Hochtemperatur (HT)-Speicher

Andere Quellen unterscheiden bspw. zwischen Low Temperature (LT), Medium Temperature (MT) und High Temperature (HT) ATES mit Speichertemperaturen von 15-30 °C, 30-60 °C bzw. 60-90 °C (Fleuchaus et al. 2018). Eine international standardisierte Einteilung existiert zum jetzigen Zeitpunkt nicht (Tsagarakis et al. 2020). Alle folgenden Betrachtungen beziehen sich auf NT- bzw. LT-Systeme, da über 99 % der weltweit betriebenen Anlagen dieser Kategorie zuzuordnen sind (Fleuchaus et al. 2018).

Die Erschließung des Aquifers erfolgt typischerweise im Multi-Well-System über eine Brunnendublette oder mehrere Paare von Brunnen. Im Sommer wird das Grundwasser aus dem sogenannten kalten Brunnen gepumpt und zur Kühlung eines oder mehrerer Gebäude genutzt. Anschließend wird das um einige Kelvin erwärmte Grundwasser zur Beladung des Aquifers über den sogenannten warmen Brunnen vollständig reinjiziert. Beim Betrieb der Anlage im Wechselprinzip wird die Pumprichtung im Winter umgekehrt. Das Grundwasser wird aus dem warmen Brunnen entnommen und - nachdem es die gespeicherte Wärmeenergie an den Heizkreislauf übertragen hat - über den kalten Brunnen wieder eingespeist. Es bilden sich zwei voneinander getrennte thermische Reservoirs. Diese stellen das typische Merkmal von Aquiferspeichern dar und sind gleichzeitig das Unterscheidungsmerkmal zu anderen Nutzungsarten geothermischer Speicher (Fleuchaus et al. 2021; Lee 2010; Schüppler et al. 2019; VDI 4640-2001). Abbildung 2 verdeutlicht die Funktionsweise von ATES im Wechselprinzip.



**Abbildung 2: Funktionsweise eines Aquifer Thermal Energy Storage Systems im Wechselprinzip**

Links Winterbetrieb. Rechts Sommerbetrieb. Übernommen aus (VDI 4640-2001).

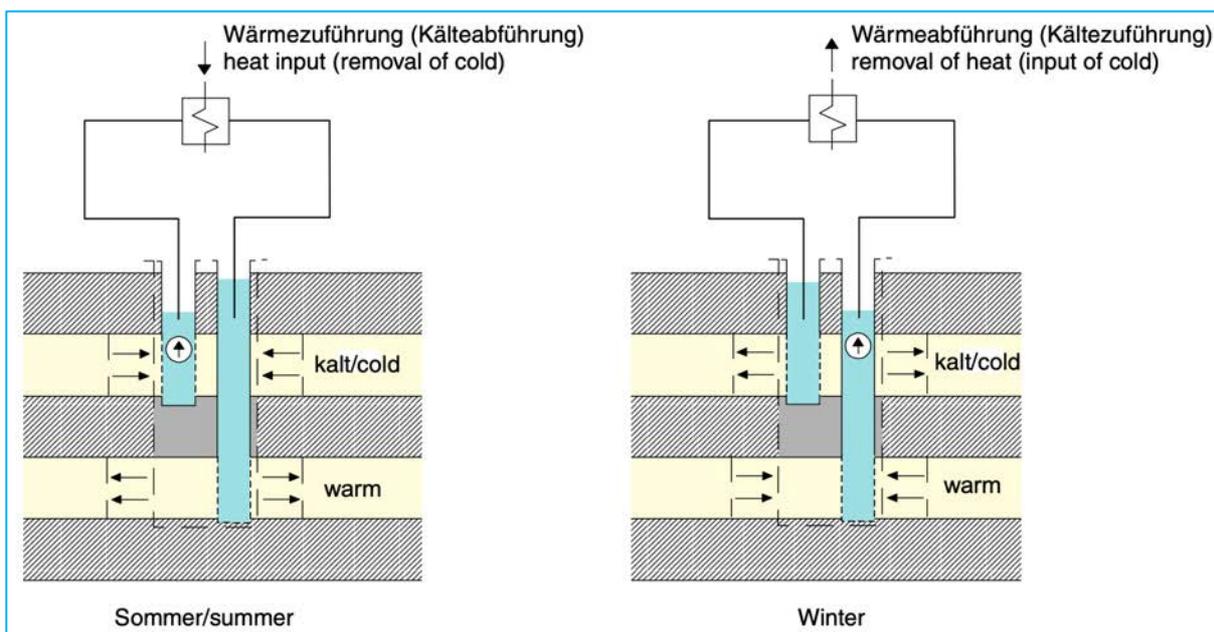
Gemäß VDI Richtlinie 4640 Blatt 3 muss durch die Anordnung der Brunnen(gruppen) gewährleistet sein, „dass eine gegenseitige thermische oder hydraulische Beeinflussung der warmen und der kalten Systemseite nicht zu negativen Effekten auf den Speicherprozess führt“ (VDI 4640-2001).

Die in Deutschland üblichen Grundwassertemperaturen von rund 10 °C reichen meist für eine direkte Kühlung im Sommer aus (Blum et al. 2021; Lee 2010; Nordell et al. 2015). Bei erhöhten Kältebedarfen kann die Anlage mit einem Kältekompressor oder einer Wärmepumpe kombiniert werden. Im Winter können die zur Deckung des Heizbedarfs erforderlichen Temperaturen nur mithilfe einer Wärmepumpe realisiert werden. Als Quelle für die einzuspeichernde thermische Energie dient im Regelfall der saisonale Wärme- bzw. Kälteüberschuss. Andere mögliche Quellen sind Überschusswärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), aus von erneuerbaren Energien, wie Solarthermie, oder von Trockenkühlern (Fleuchaus et al. 2018). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Überschusswärme aus der Verwendung von fossilen Energieträgern einzuspeichern, um deren Effizienz zu steigern.

Sofern mehrere Grundwasser-Stockwerke vorhanden sind, kann die Speicherung von Wärme und Kälte auch in getrennten Aquiferen erfolgen (s. Abbildung 3). Dies kann sowohl mit mehreren Bohrungen als auch mit einer einzigen Bohrung über ein Mono-Well-System realisiert werden (Fleuchaus et al. 2018; Lee 2010; VDI 4640-2001). Damit ist es auch möglich, dass Heiz- und Kühlbetrieb auf deutlich unterschiedlichen Temperaturniveaus operieren (Fleuchaus et al. 2021; Michalzik 2013).

### 2.2.2.2 Tiefenlage des Speichers

Aquiferspeicher können nach der Tiefenlage des zu erschließenden Aquifers unterschieden und somit der oberflächennahen, mitteltiefen und tiefen Geothermie zugeordnet werden. Oberflächennahe Geothermie umfasst alle Nutzungsformen geogener Energie bis in 400 m Tiefe. Da in diesem Bereich lediglich niedrige Temperaturen vorliegen, ist wie bereits erwähnt der Einsatz von Wärmepumpen für Heizzwecke zwingend notwendig. Nach offizieller Definition schließt sich ab 400 m Tiefe und Temperaturen von mind. 20 °C die tiefe Geothermie an. In der Praxis wird jedoch üblicherweise erst ab Bohrtiefen von 1.000 m und mind. 60 °C von tiefer Geothermie gesprochen (Bauer et al. 2018; Michalzik 2013). Daher beginnt sich seit einigen Jahren in der Fachwelt der Begriff „mitteltiefe Geothermie“ für den Bereich von 400 bis 1.000 m durchzusetzen (Michalzik 2013).



**Abbildung 3: Funktionsweise eines Aquifer Thermal Energy Storage Systems im Wechselprinzip unter Nutzung zweier übereinanderliegender Aquifere**  
**Links Sommerbetrieb. Rechts Winterbetrieb. Übernommen aus (VDI 4640-2001).**

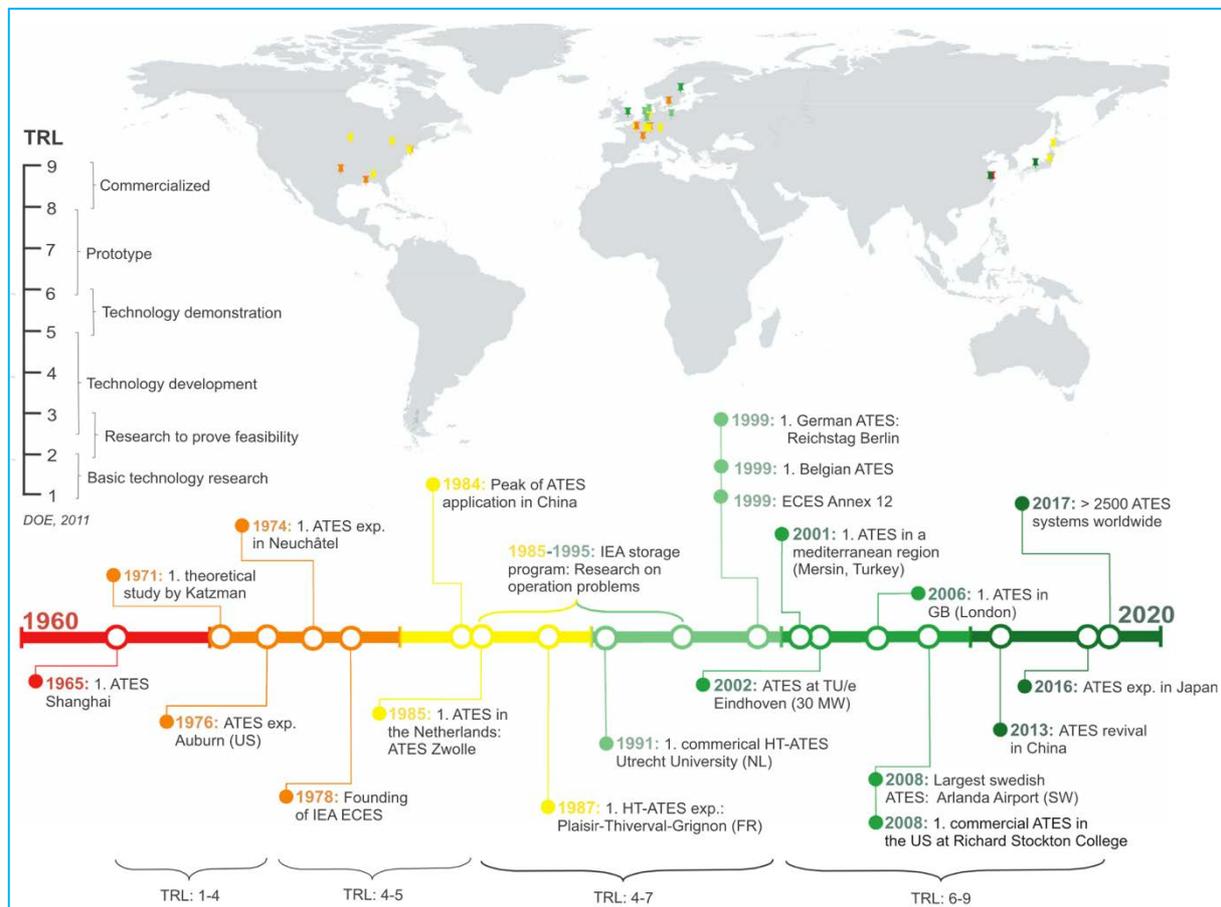
### 2.2.3 Historischer Abriss

Bereits in prähistorischen Zeiten nutzten die Menschen das Wärmedargebot aus dem Inneren der Erde. In vielen Regionen der Welt entstanden Siedlungen in der Nähe von Thermalquellen und Vulkanen, so z. B. in Japan und in Pamukkale in der Türkei. Das in Chaudes-Aigues (Cantal, Frankreich) ab rund 1330 verwendete Netz zur Verteilung von Geothermiewässern an Haushalte gilt als erste geothermische, kommunale Wärmeversorgung. Ebenfalls im 14. Jahrhundert wurde aus heißen Dämpfen in der Nähe der Stadt Volterra (Italien), Schwefel extrahiert. Doch erst im 20. Jahrhundert entstand die erste moderne Geothermieanlage zur Wärmeversorgung von Reykjavik auf Island (Bauer et al. 2018).

Die erstmalige Nutzung von Aquiferen zur Speicherung thermischer Energie wurde in den 1960ern in Shanghai aus künstlicher Grundwasseranreicherung entwickelt. Diese wurde

als Gegenmaßnahme eingesetzt, um Subsidenz, ausgelöst durch übernutzte Grundwasserleiter, entgegenzuwirken. Es zeigte sich, dass die Temperatur des injizierten Oberflächenwassers über mehrere Monate unverändert blieb. Daraus entwickelten die ansässigen Textilfabriken die Idee, Kälteenergie im Winter einzuspeichern und im Sommer zur Kühlung zu nutzen. Die Anzahl der ATES-Anlagen erhöhte sich allmählich, bis 1984 insgesamt 1.100 TJ Kühlenergie pro Jahr gespeichert wurden. Damit wurde Anfang der 1980er Jahre der Höchststand von Aquiferspeichern in China erreicht. Viele Projekte mussten jedoch aufgrund technischer Schwierigkeiten eingestellt werden (Fleuchaus et al. 2018).

Ausgelöst durch die Ölkrise in den 1970ern entwickelten sich auch in Europa und Nordamerika Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur Energiespeicherung. Entscheidend hierfür war die Verabschiedung des Durchführungsabkommens Energy Conservation through Energy Storage (ECES) der International Energy Agency (IEA). Abbildung 4 zeigt weitere Meilensteine der Entwicklung von ATES weltweit und ordnet den Anlagen den entsprechenden Technologie-Reifegraden (Technical Readiness Level, TRL) zu (Fleuchaus et al. 2018).



**Abbildung 4: Chronologie und Meilensteine der weltweiten Entwicklung von ATES mit Technologie-Reifegrad (Technical Readiness Level, TRL) gemäß DOI (U.S. Department of Energy) (Fleuchaus et al. 2018).**

Anfängliche Forschungsvorhaben konzentrierten sich auf HT (High-temperature)-ATES. Aufgrund der fehlenden Erfahrungen hatten sich diese Anlagen jedoch mit erheblichen Problemen auseinanderzusetzen, wie z. B.:

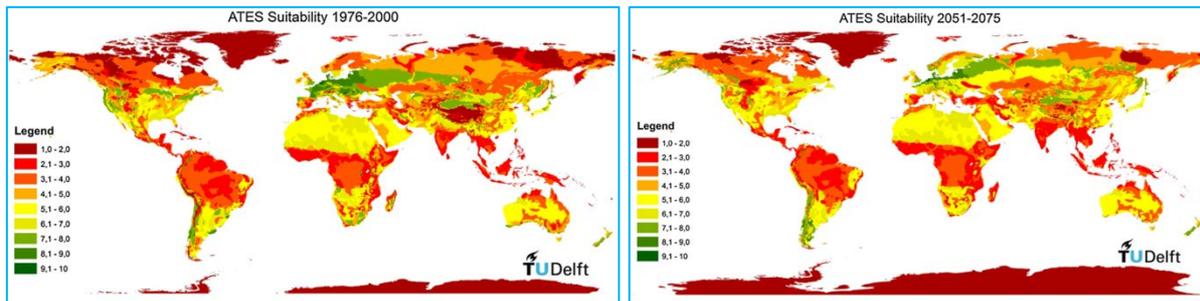
- ▶ Scaling und Clogging in Bohrungen und Wärmetauschern,
- ▶ Korrosion von Bauteilen sowie
- ▶ Ungleichgewicht zwischen gespeicherter Wärme und Kälte.

Einige dieser und weiterer Fragestellungen konnten im Rahmen von ECES gelöst werden. Dennoch verschob sich das Interesse in den folgenden Jahren zu LT-ATES (Fleuchaus et al. 2018; Nordell et al. 2015). Aufgrund der geringeren Speichertemperaturen nah der natürlichen Temperatur des jeweiligen Aquifers, sind LT-ATES grundsätzlich weniger stör anfällig. Zudem konnten sie immer wirtschaftlicher betrieben werden. Zum einen müssen geringere Bohrtiefen erschlossen werden, wodurch die Investitionskosten sinken. Und zum anderen trug die steigende Energieeffizienz von Gebäuden zur Entwicklung von Niedertemperaturnetzen und der fortschreitenden technischen Entwicklung von Wärmepumpen bei. Diese wurden von den Herstellern dahingehend angepasst, dass sie in der Lage sind, sowohl Quellen geringerer Temperatur effizienter zu nutzen, als auch niedrigere Vorlauftemperaturen bereitzustellen (Hartl et al. 2016).

Trotz intensiver Forschungstätigkeiten und der Errichtung von Demonstrationsanlagen in einigen Ländern (Schweiz, Frankreich, USA, Kanada, Deutschland u. a.) konzentriert sich gegenwärtig die weltweite Verteilung von Aquiferspeichern in einigen wenigen Staaten, vor allem in Mittel- und Nordeuropa. Insgesamt sind weltweit über 2.800 ATES-Projekte realisiert worden. Davon befinden sich über 85 % (> 2.500) allein in den Niederlanden und weitere 10 % in Schweden (220), Dänemark (55) und Belgien (30). Dennoch wird nicht nur für die genannten, sondern auch für andere Länder eine Zunahme der Implementierung von ATES-Systemen prognostiziert (Fleuchaus et al. 2018).

Diese Prognose kann mit der auch in Zukunft weiter steigenden Nachfrage nach Heiz- und vor allem Kühlenergie durch den fortschreitenden Klimawandel sowie der weiträumigen Verbreitung geeigneter Aquifere begründet werden. Einen Ansatz zur Visualisierung von weltweiten ATES-Potenzialräumen wurde von (Bloemendal et al. 2015) entwickelt. Die Autoren haben weltweit frei verfügbare Daten zu geohydrologischen Bedingungen und aktuelle bzw. projizierte Klimaklassifikationen zu Karten kombiniert (Abbildung 5). Je höher der Wert einer Region ist, desto besser sind die hydrogeologischen und klimatischen Bedingungen für den Einsatz von ATES geeignet.

In den Karten ist zu erkennen, dass sich die Potenzialräume momentan auf Mitteleuropa bis weit nach Russland hinein und auf das südliche Nordamerika erstrecken, aber auch auf einzelne Regionen Asiens sowie auf die Südhalbkugel. Mit dem Fortschreiten des Klimawandels werden sich die Potenzialräume Europas und Russlands weiter in den Norden ausdehnen und weitere Gebiete Chinas umfassen. Ebenso könnten in Zukunft einige Gebiete im Süden Südamerikas stärker für den Einsatz von Aquiferspeichern geeignet sein. Gleichzeitig kann es aber auch dazu kommen, dass sich die ungeeigneten Gebiete rund um den Äquator ausdehnen. Dennoch zeigen die Karten, dass Aquiferwärmespeicher schon heute und auch in Zukunft in weit mehr Regionen der Welt Anwendung finden können als bisher.



**Abbildung 5: ATEs-Potenzialräume**  
Links basierend auf Klimabeobachtungen von 1967–2000. Rechts für eine Klimaprojektion von 2051–2075.

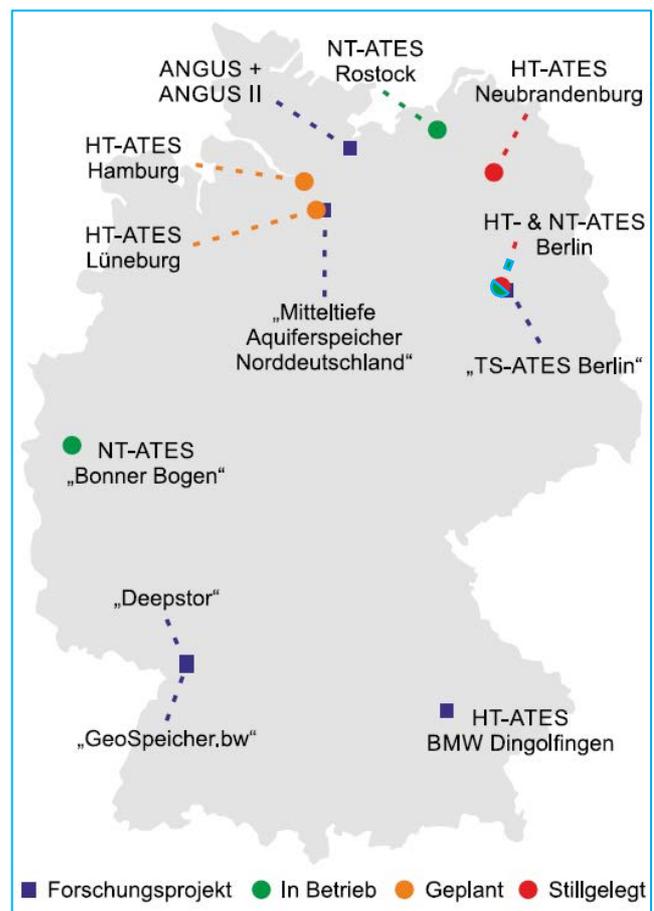
Legende: 1–3 = wenig geeignet, 4–6 = medium, 7–10 = gut geeignet für ATEs (Bloemendal et al. 2015).

Momentan werden ATEs-Anlagen in den führenden Nationen (Niederlande, Schweden, Dänemark) hauptsächlich zur Versorgung öffentlicher und gewerblicher Gebäude, wie Bürogebäude, Einkaufszentren, Krankenhäuser und Hotels eingesetzt. Die übrigen 30 % der Anlagen speichern thermische Energie für industrielle oder Wohngebäude. Von zunehmender Bedeutung ist auch die Klimatisierung von Treibhäusern und Rechenzentren (Fleuchaus et al. 2018).

## 2.2.4 ATEs-Anlagen in Deutschland

In Deutschland sind derzeit lediglich drei kommerziell genutzte ATEs-Anlagen in Betrieb, zwei weitere sind in Planung. Zusätzlich wurden in den vergangenen Jahren einige Anlagen zu Forschungszwecken betrieben. Abbildung 6 gibt einen Überblick über stillgelegte, in Betrieb und in Planung befindliche Aquiferspeicher sowie Forschungsprojekte in Deutschland (Fleuchaus et al. 2021). Im Folgenden werden die wichtigsten Charakteristika einiger ausgewählter Anlagen dargestellt.

**Abbildung 6: Übersicht stillgelegter, in Betrieb und in Planung befindlicher Aquiferspeicher sowie Forschungsprojekte in Deutschland**  
Angepasst nach (Fleuchaus et al. 2021).



#### 2.2.4.1 Geothermische Heizzentrale (GHZ) Neubrandenburg

Die GHZ Neubrandenburg wurde Ende der 1980er Jahre erstmals in Betrieb genommen und zur Fernwärmeversorgung genutzt. Aufgrund der Tiefe der Bohrungen von rund 1.200 m kann Wasser mit einer Temperatur von über 50 °C gefördert werden. Nach Renovierungsarbeiten wurde die Anlage 2004 zur Speicherung der Abwärme eines Gas- und Dampfturbinenkraftwerks (GuD) als HT-ATES erneut in Betrieb genommen. Trotz einzelner Probleme (Korrosion der Brunnenpumpen, Wachstum sulfatreduzierender Bakterien im Bereich des kalten Brunnens) wurde die Anlage insgesamt rund 15 Jahre zur Wärmeversorgung eines Stadtteils genutzt. Anfang 2019 wurde der Speicherbetrieb dennoch eingestellt, da aufgrund „starke[r] Schwankungen des Wärmebedarfs und Wärmeangebotes [...] keine effiziente Nutzung des Untergrundspeichers“ möglich war. Die Stadtwerke Neubrandenburg arbeiten seitdem mit einem Stahltank zur Kurzzeit-Wärmespeicherung (Bundesverband Geothermie 2020; Fleuchaus et al. 2021).

#### 2.2.4.2 Deutscher Bundestag / Reichstagsgebäude Berlin

Das wohl prominenteste Beispiel Deutschlands zur Speicherung thermischer Energie im Untergrund ist die Wärme- und Kälteversorgung des deutschen Bundestages in Berlin. In den 1990er Jahren wurde für die Parlamentsbauten ein dezentrales Energieversorgungssystem, basierend fast ausschließlich auf regenerativen Energiequellen, entworfen. Bestandteil dessen sind zwei Aquiferspeicher zur Beheizung und Klimatisierung des Reichstagsgebäudes, welche 1999 in Betrieb genommen wurden (Fleuchaus et al. 2021).

Als Kältereservoir dient ein Aquifer in ca. 60 m Tiefe. Die Grundwassertemperaturen von 10 bis 11 °C sind zur freien Kühlung geeignet. Lediglich für die Niedertemperaturkühlung werden zusätzlich Kompressions- und Absorptionskältemaschinen benötigt. Insgesamt kann der LT-ATES etwa 50 % des Bedarfs decken (Fleuchaus et al. 2021).

Zur Betrachtung der Effizienz des Kältespeichers führten (Kranz und Frick 2013) eine integrierte Systemanalyse basierend auf Monitoring-Daten zur Ermittlung des COP (Coefficient of Performance = Leistungszahl) für das Gesamtsystem (d. h. Aquiferspeicher und Nachfrage-Seite) durch. Im Vergleich zu herkömmlichen Kompressionskältemaschinen konnte in der betrachteten Speicherperiode eine deutlich höhere Leistungszahl (COP = 7,8) erreicht werden.

Ein HT-ATES in 320 m Tiefe fungierte als Wärmereservoir für die überschüssige Abwärme der Blockheizkraftwerke (BHKW). Da die entstandene Abwärme tatsächlich jedoch zum größten Teil anderweitig genutzt wurde, konnte der Speicher nur ungenügend beladen werden. Zusätzlich traten Probleme an den Pumpen und der Verrohrung auf. Aus diesen Gründen wurde der Betrieb des HT-ATES vorläufig eingestellt (Fleuchaus et al. 2021).

#### 2.2.4.3 Rostock

Im Stadtteil Rostock-Brinckmanshöhe ist seit dem Jahr 2000 ein MT-ATES Bestandteil der solar unterstützten Nahwärmeversorgung eines 108 Wohnungen bzw. 7.000 m<sup>2</sup> umfassenden Gebäudekomplexes. Das Grundwasser wird durch die Solaranlage auf

max. 50 °C erwärmt und lediglich zu Heizzwecken genutzt. Durch die Einbindung des saisonalen Speichers in das Wärmekonzept kann das Ziel erreicht werden, 50 % des Jahresbedarfs für Heizung und Warmwasser durch Solarenergie zu decken (Fleuchaus et al. 2021; Schmidt und Müller-Steinhagen 2004).

#### 2.2.4.4 Bonner Bogen

Im Quartier Bonner Bogen wurde 2009 ein LT-ATES zur Versorgung von 60.000 m<sup>2</sup> Büro-, Hotel- & Gastronomieflächen in Betrieb genommen. Der Aquifer ist über zwei Gruppen von je drei Brunnen erschlossen, die mit einer Förderrate von bis zu 216 m<sup>3</sup>/h arbeiten. Im Winter wird bei der Gebäudebeheizung ein Deckungsgrad von 60 bis 80 % erreicht und im Sommer ist auch bei dieser Anlage eine freie Kühlung möglich. Durch die Nutzung des Aquiferspeichers werden nach Angaben des Betreibers bis zu 400 t CO<sub>2</sub> pro Jahr gespart (Fleuchaus et al. 2021; Mands et al. 2010).

### 2.3 Forschungs- und Handlungsbedarfe

Wie bereits erwähnt, setzt die flächendeckende Verbreitung einer Technologie unter anderem voraus, dass erfolgreiche *Best-Practice*-Beispiele die Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Technik demonstrieren konnten. Ebenso rückt die Bewertung möglicher Risiken und Effekte auf die Umwelt immer mehr in den Fokus der Wissenschaft. Eine wichtige Rolle beim internationalen Austausch spielen auch einheitliche Definitionen und gesetzliche Rahmenregelungen.

In einigen Ländern, wie den Niederlanden und Schweden, werden seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich ATES-Anlagen betrieben, wobei deren Vorteile den behördlichen Entscheidungsträgern bekannt sind. Jedoch liegen keine umfassenden Berichte über Kosten, Leistungskennzahlen und Umweltauswirkungen vor. Die wenigen Aquiferspeicher in Deutschland wurden bzw. werden ebenfalls zufriedenstellend betrieben, konnten aber keine ausreichende Signalwirkung entfalten. Ausführliche techno-ökonomische und ökologische Evaluierungen von ATES-Systemen sind dringend notwendig, um Regierungen und anderen Entscheidungsträgern die positiven Effekte von Aquiferspeichern zu verdeutlichen. Dabei trägt eine transparente Darlegung aller Daten und Evaluierungsmethoden zur Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei (Schüppler et al. 2019).

Der größte Forschungsbedarf besteht jedoch im Bereich der möglichen Umweltauswirkungen von Aquiferspeichern. Welche Effekte, die durch die hervorgerufenen Temperaturanomalien auf Mikroorganismen, Ökosystemdienstleistungen, die hydrogeologischen Eigenschaften des Aquifers usw. haben, ist bisher noch nicht in ausreichendem Maße untersucht worden (Blum et al. 2021). Gleichzeitig bietet dieser Bereich beispielsweise auch Potenziale für mögliche Synergien mit der in-situ-Bioremediation kontaminierter Grundwasserleiter.

Handlungsbedarf besteht auch auf Seiten der Gesetzgeber. EU- sowie deutschlandweit einheitliche Gesetze, Richtlinien und technische Standards sowie Zertifizierungssysteme und freie Informationsverfügbarkeit für alle Beteiligten würden Rechtssicherheit schaffen

und den Wissensaustausch innerhalb der EU bzw. Deutschlands fördern (Somogyi et al. 2017; Tsagarakis et al. 2020).

## 2.4 Fazit

Trotz einiger offener Fragen und eindeutiger Handlungsbedarfe seitens der Politik werden *Aquifer Thermal Energy Storage* Systeme als unverzichtbar für das Voranbringen der Wärmewende angesehen:

- I. ATES schließen die Lücke zwischen saisonalem Angebot und Nachfrage von Wärme- und Kälteenergie (Bloemendal et al. 2015; Fleuchaus et al. 2021; Lee 2010; Schüppler et al. 2019).
- II. Der Einsatz von ATES bietet ein enormes CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial im Vergleich zur Gebäudebeheizung auf Basis fossiler Energieträger und ausschließlich strombasierter Gebäudeklimatisierung (Fleuchaus et al. 2018; Vienken et al. 2016).
- III. Eine Vielzahl von Regionen weltweit eignete sich bzw. wird sich auch in Zukunft für den Ausbau von ATES eignen (Bloemendal et al. 2015).
- IV. Die Vorreiter-Nationen Niederlande, Schweden, Dänemark und Belgien zeigen, dass eine Implementierung von ATES in den Wärmesektor möglich ist, dass vor allem LT-ATES bereits einen sehr hohen Technologie-Reifegrad aufweisen und dass der Betrieb wirtschaftlich ist (Fleuchaus et al. 2018; Schüppler et al. 2019).
- V. ATES können hervorragend mit kalten Nahwärmenetzen kombiniert werden (Buffa et al. 2019).

Die Nutzung der Aquiferspeicherung weist ein großes Potenzial für einen wirksamen Beitrag zur energetischen Transformation auf. Insbesondere vor dem Hintergrund der Erforderlichkeit des Umstiegs auf ‚Grüne Wärme‘ als eine gesellschaftliche Antwort auf den Klimawandel, aber auch in der Prognose einer wachsenden Konkurrenzfähigkeit angesichts der CO<sub>2</sub>-Bepreisung und der verbesserten Wirtschaftlichkeit beteiligter Technologien ist ATES gerade in Regionen mit großer Verbreitung von mächtigen Aquiferen - insbesondere auch mit mehreren Stockwerken - eine Zukunftsfähigkeit einzuräumen.

ATES wird in Regionen verbreiteter Aquifere in Verbindung mit geeigneten Wärmequellen nicht alleinig die künftige Versorgung übernehmen, zu einem zu optimierenden Mix jedoch spürbar beitragen können. Gerade in den unverritzten Teilen des Braunkohlenreviers Mitteldeutschlands ist durch den Strukturwandel mit dem Wegfall der KWK-Leistung für Fernwärmenetze nicht nur eine naheliegende Nutzungsoption für ATES, sondern auch ein symbolträchtiges Image für eine generell nachhaltige und regionale energetische Versorgung der Zukunft entstanden.

Angesichts der Diskussionen über andere erneuerbare Energieträger zeigt sich, wie wichtig ein solches positives Image ist und dessen Beeinträchtigung unbedingt zu vermeiden

ist. Aus diesem Grund kommt einem ersten Aquiferspeicher-Projekt und dessen erfolgreichen Abschluss eine große Bedeutung zu.

Das Potenzial der ATES wurde in den Niederlanden und anderen Staaten bereits früh erkannt. In Deutschland galten im Vergleich dazu sicherlich andere Voraussetzungen, da die für ein großes Industrieland erforderliche günstige Strom- und Wärmeversorgung bisher durch die Nutzung fossiler Energieträger - in diesem Falle aus bedeutenden Braunkohlenlagerstätten - gewährleistet werden konnte.

Aufgrund der beschriebenen Entwicklung fehlt es zunächst an der passfähigen Wärmeinfrastruktur. Hier bedarf es weiterer Forschung, Technologieentwicklung und Investitionen. Die Erfahrung zeigt, dass eine Installation niedrigtemperierter Wärmeinfrastruktur bei Neuinvestitionen deutlich einfacher umzusetzen ist als die Umrüstung des Bestands.

Ein Nachholbedarf Deutschlands bezüglich der ATES besteht vor allem in der Expertise aller Beteiligten (Wissenschaftler:innen, Ingenieur:innen, Behörden), da bisher erst relativ wenig Erfahrungen mit Anwendungen gemacht wurden. Eine (positive) Sensibilisierung der Umweltbehörden ist essenziell für künftige, möglichst schlanke Genehmigungsverfahren.

Abschließend zu diesem Kapitel werden die Ergebnisse des State of the Art in eine SWOT-Analyse überführt (Tabelle 2). Als ein Instrument der strategischen Planung dient die SWOT-Analyse der Positionsbestimmung und der Strategieentwicklung, in diesem Falle für die Nutzbarmachung der Aquiferspeicherung in der IRMD.

Zunächst werden in der externen Analyse Chancen (Opportunities) und Risiken (Threats) gegenübergestellt (linke Spalte in Tabelle 2). Vornehmliche Chancen für ATES bieten die zunehmende Nachfrage nach ‚Grüner Wärme‘, die Potenziale des tertiären Weißelsterbeckens und der quartären Abfolgen im Betrachtungsgebiet, eine zu erwartende verbesserte Wirtschaftlichkeit durch Technologieentwicklung und Förderung u. a.

Risiken werden neben der generellen Frage der Wirtschaftlichkeit vor allem in den noch wenig oder unerforschten Auswirkungen auf die Umwelt und die damit im Zusammenhang stehende Genehmigungsfähigkeit - auch angesichts einer gewissen Neuheit des Themas - gesehen.

Die interne Analyse wägt Stärken (Strengths) und Schwächen (Weakness) der beteiligten Akteur:innen ab. Zu den Stärken gehören Motivation und Innovationskraft von Wissenschaft und Ingenieurwesen sowie das Engagement weiterer Stakeholder in der Region gepaart mit einem wachsenden Bewusstsein nachhaltigkeitsorientierten Handelns. Schwächen offenbaren sich angesichts noch geringer fachlicher Expertise von Wissenschaft und Ingenieurwesen, fehlender Erfahrungen und Praxisanwendungen in der Region mit ATES und mit Unsicherheiten hinsichtlich künftiger Genehmigungsaufgaben.

In der Strategieabwägung werden nun die Analysefelder kombiniert: So werden die Chancen mit innovativer Stärke genutzt, indem zuvorderst die Expertise verschiedener Disziplinen zusammengeführt werden. Mit den Stärken wird zudem den Risiken begegnet, indem ein umsetzungsorientierter Kenntniszuwachs mit Mitteln laborativer Untersuchungen sowie mit Simulationen generiert wird. Die Schwächen werden abgebaut, indem mit prototypischen Anwendungen die Chancen der Aquiferspeicherung praxisnah ausgetestet werden.

Für den Abbau der Schwächen werden die Chancen genutzt, indem andere Praxisanwendungen adaptiert und mit der prototypischen Anwendung Erfahrungen gesammelt werden. Der Abbau eigener Schwächen und die Verringerung der Risiken erfolgt u. a. durch die Schließung weiterer Kenntnislücken durch Adaption und Datenakquise sowie der Antizipierung des Behördenermessens bzw. der Diskussion mit den Behörden hinsichtlich der Genehmigungsfähigkeit.

Mit der SWOT-Analyse zur Nutzbarmachung der Seethermie aus den Tagebaurestseen im Raum Leipzig wurde eine Strategie entwickelt, mit welchen Mitteln bestehende Risiken reduziert und Schwächen abgebaut werden können, um das enorme Potenzial einer künftigen alternativen Wärmeversorgung zuzuführen. Um Ergebnis der Defizitanalyse erwächst der Forschungsbedarf für die Schließung übriger Kenntnislücken.

Alle Details sind der Analyse in Tabelle 2 selbst zu entnehmen.

Tabelle 2: SWOT-Analyse zur Nutzung von ATES.		Interne Analyse (Akteure in der Region)	
<b>SWOT-Analyse</b> <b>zur Nutzbarmachung von Aquiferspeichern</b> <b>für eine grüne Wärmeversorgung</b> <b>in der Innovationsregion</b>		Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
Externe Analyse (Umfeld)		S-O-Strategien (mit welchen Stärken werden die Chancen des Umfeldes genutzt)	W-O-Strategien (wie können Schwächen abgebaut werden, um Chancen besser zu nutzen)
<b>Chancen (Opportunities)</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>genereller Umsetzungsdruck: grüne Wärmewende, Entwicklung alternativer Wärmeversorgungs-lösungen</li> <li>Leipzig: absehbares Ende der Versorgung durch KW Lippendorf, Klimanotstand</li> <li>enorme Potenziale in der Innovationsregion durch mehrere Grundwasserleiter in der Innovationsregion</li> <li>Verbesserung von Technologien in den letzten Jahren (kalte Netze, Wärmepumpen, Flüssigeis-Technologien)</li> <li>zunehmende Hinwendung zu systemischen Lösungen, Sektorenkopplung</li> <li>Senkung von Gesteungskosten</li> <li>zu erwartende bessere öffentliche Akzeptanz als andere erneuerbare Energien</li> <li>Impulsgebung für andere Regionen (Übertragbarkeit)</li> <li>Förderung des Strukturwandels</li> </ol>	<b>mit fachlicher und innovativer Stärke Chancen nutzen</b> Zusammenführung der fachlichen Expertise verschiedener Disziplinen zur Nutzung von Aquiferspeichern (= Projektkinhalt) Innovationsbereitschaft: Einbindung neuartiger Technologien klare Aufgabenverteilung und Zielorientierung (Strukturierung von Arbeitspaketen) Entwicklungsschwerpunkte: Wirtschaftlichkeit und Genehmigungsfähigkeit Nutzung von Fördermitteln Untersuchung der Übertragbarkeit für Technologieexport	<b>mit prototypischen Anwendungen Chancen der Aquiferpeicherung nutzen und Schwächen abbauen</b> Erfahrungen sammeln mit Erfolg versprechenden Aquifer-Speicherprojekten (Planung, Umsetzung, Fahr-Regime, Monitoring) Erfahrungsaustausch mit Kennnisträgern (z. B. Niederlande, Nordeuropa, Deutschland) andere Praxisanwendungen mit Nahwärmenetzen für Aquifer-Speicher adaptieren / simulieren Unsicherheiten mit Messungen begegnen öffentliche Akzeptanz erzeugen und für die Überwindung behördlicher Unsicherheiten nutzen Strukturwandel als Chance und Wachstumstreiber begreifen	
<b>Risiken (Threats)</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>sensible Behandlung des Schutzgutes Grundwasser</li> <li>daraus folgend Fragen der Genehmigungsfähigkeit, Unsicherheit von Behörden im Rahmen von Genehmigungen, keine speziellen Richtlinien</li> <li>Temperatureinfluss auf die Oberfläche</li> <li>Aktivierung von Altlasten / Grundwasserkontaminationen durch die Temperaturänderung</li> <li>Beeinflussung der Mikrofauna/-flora im Grundwasserleiter</li> <li>Ausgasungserscheinung von Kohleflözen durch die Temperaturerhöhung</li> <li>(noch) kein durchgängig erreichter Endzustand der Grundwasserspiegelhöhen im Bereich der ehemaligen Grundwasserabsenkung im Umfeld der Braunkohletagebaue (Auswirkungen auf Fließdynamik)</li> <li>Wirtschaftlichkeit von Aquiferspeicheranlagen, daraus erwachsende Unsicherheit von Investor:innen und Stakeholdern</li> <li>„Alterung“ der Speicher durch chemisch-biologische Beeinträchtigung der Speicherkapazität, Reaktivierungskosten</li> </ol>	<b>Erarbeitung eines umsetzungsorientierten Kenntniszuwachses mit Mitteln laborativer Untersuchungen sowie mit Simulationen</b> laborative Untersuchung von Grundwasser- und Flözproben hinsichtlich der Auswirkungen von Temperaturerhöhungen Wirtschaftlichkeit mit Sensitivitätsanalysen und ggf. mit Varianten optimieren Wärmeflussmodellierung für eine Betrachtung der Auswirkungen auf die Oberfläche Potenziale mit Bedarfen abgleichen, potenzielle Investor:innen einbeziehen	<b>Schließung von Kenntnislücken durch Adaption, Antizipierung und Datenakquise</b> State of Art /Auswertung von Aquiferspeicher-Projekten national / international Datenakquise bei Dritten (z. B. Ergebnisse von Pumpversuchen bei LMBV, MIBRAG, Kommunen etc.) Adaption von wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren auf Aquiferspeicherung, Diskussion mit Genehmigungsbehörden, Antizipierung des Behördenermessens eingeschränkte Repräsentanz der Laborversuche (Temperaturspreizung) durch Extrapolation abbauen, besser: zur statistischen Sicherheit Grundgesamtheit der Laborversuche erhöhen Defizitanalyse, Detektion FuE-Bedarf, Fortführung in weiteren Projekten	

---

## 3 Aquiferatlas – Verbreitung der Aquifere in der Innovationsregion

---

### 3.1 Inhalt

Die Innovationsregion Mitteldeutschland (IRMD) birgt ein großes Potenzial einer geothermischen Speichernutzung im Untergrund. Die Ermittlung und grafische Darstellung der Potenzialräume innerhalb des Untersuchungsgebietes soll künftigen Investoren und Nutzern sowie Planern und Behörden einen ersten Überblick zu vorhandenen Grundwasserleiterkomplexen verschaffen. Darauf aufbauend können gezielte und detaillierte Untersuchungen hinsichtlich der Eignung des Grundwasserleiters für Speicherzwecke initiiert werden.

Ein GIS-Projekt mit umfangreichen Informationen zu den nutzbaren Grundwasserleitern und restriktiv wirkenden Raumwiderständen innerhalb der IRMD wurde im Rahmen dieser Studie aufgebaut (Abbildung 7). Ein detailliertes Kartenwerk im Maßstab 1:375.000 befindet sich im BAND 2 (Aquiferatlas). Dieser Aquiferatlas zeigt die Verbreitungsgebiete der fünf wichtigsten Grundwasserleiterkomplexe des Quartärs und des Tertiärs.

### 3.2 Methodik

Die Erstellung des Aquiferatlas beruht auf einer umfassenden Datenrecherche zu Grundwasserleitern im Untergrund der IRMD. Neben bereits digital vorliegenden Geodaten, wie der Hydrogeologischen Übersichtskarte 1:250.000 (HÜK250), wurden vor allem analoge Kartenwerke und Ergebnisse aus abgeschlossenen Projekten der früheren Braunkohlerkundung sowie stratigraphische Verzeichnisse und Bohrpunkte zur Validierung verwendet. Alle verwendeten Ausgangsdaten sind im ANHANG 1 aufgeführt.

Analog vorliegende Karten und Informationen mit Lagebezug wurden zunächst im Quantum GIS georeferenziert und digitalisiert. Für die Georeferenzierung wurden die analogen Karten eingescannt und mit dem QGIS-Rastertool „Georeferenzierung“ über das Setzen geeigneter Punkte in ein rasterbasiertes Format (.tiff) mit Geoverortung umgewandelt. Die Digitalisierung/Kartierung der Aquifere erfolgte mithilfe der Digitalisierungstoolbox.

Als erstes Zwischenergebnis sind Verbreitungskarten mit zahlreichen Teilflächen (Polygone), unterteilt nach quartären und tertiären Grundwasserleitern, entstanden.

Die Arbeitsschritte des zweiten Verarbeitungsblockes wurden für alle bis dato unterteilten Grundwasserleiter gleichermaßen und getrennt durchgeführt. Über die Implementierung einiger Arbeitsschritte in die Programmierschnittstelle (Python) von QGIS erfolgte die Verarbeitung teilautomatisiert.

Für die Vereinigung einzelner Polygon-Teilstücke und Polygone zu zusammenhängenden Verbreitungsgebieten wurden die künstlichen, digitalisierungsbedingten Verbreitungsgrenzen entlang von Blattschnittübergängen oder allgemeinen Kartengrenzen manuell

bereinigt. Dazu mussten im Vorfeld alle Geometriefehler behoben und fehlende gemeinsame Grenzen von benachbarten Polygonen hinzugefügt werden. Im nächsten Schritt wurden alle geometriebereinigten Grundwasserleiter auf den Umriss der IRMD zugeschnitten. Das folgende Verarbeitungspaket dient der Bereinigung der Daten hinsichtlich verschiedener Merkmale, wie Mindestfläche und Mindestmächtigkeit. Als Hauptausschlusskriterium wurde eine Mindestmächtigkeit von 5 m festgelegt. Alle Bereiche, in denen Grundwasserleiter eine geringere Mächtigkeit aufweisen, sind für eine Nutzung als Wärme- oder Kältespeicher ökonomisch nicht sinnvoll nutzbar.

Die nächsten zwei Schritte dienen der Identifikation von Inselfolygonen (Polygone ohne direkte Nachbarpolygone) mit einer Fläche  $< 0,5 \text{ km}^2$ , deren Grundwasserleitervorkommen für eine thermische Speichernutzung zu kleinteilig sind. Dafür wurde ein „spatial join“ durchgeführt, wodurch räumliche Beziehungen der Polygone untereinander analysiert werden. Das Ergebnis des Schrittes sind Distanzinformationen der Flächen zueinander (0 = keine unmittelbaren Nachbarpolygone). Kombiniert mit der Berechnung der Flächengröße können so gezielt kleine Inselfpolygone entfernt werden. Alle verbliebenen Polygone  $> 0,5 \text{ km}^2$  mit gemeinsamen Grenzen wurden verbunden, sodass zusammenhängende Verbreitungsflächen resultieren. Der letzte Schritt dieses Verarbeitungsschrittes beinhaltet das automatisierte Löschen von entstandenen Löchern.

Das zweite Zwischenergebnis sind großflächige Verbreitungskarten von fünf quartären und drei tertiären Grundwasserleiterkomplexen. Basierend auf der stratigraphischen Verschlüsselung der Erkundungsmethodik Braunkohle DDR (1985) und der Einteilung der Grundwasserleiter der Hydrogeologischen Karte 1:50.000 wurden die Grundwasserleiterkomplexe weiter zusammengefasst (Kapitel 3.4).

Die gesetzlich festgelegten Raumwiderstände (Kapitel 3.3) in Form von Wasserschutz- und Naturschutzgebieten liegen für Deutschland als Geodaten vor. Diese wurden auf die Abgrenzung der IRMD zugeschnitten. Die bergbaulich genutzten Gebiete wurden über verschiedene Karten der jeweiligen Abbauregionen digitalisiert. Die digitalen Geodaten wurden von den Verbreitungsgebieten der Grundwasserleiter über einen Differenzierungsalgorithmus subtrahiert.

Das Ergebnis sind Verbreitungskarten von drei quartären und zwei tertiären Grundwasserleiterkomplexen sowie Verbreitungskarten dieser Komplexe in Kombination mit den kartierten Raumwiderständen. Zusätzlich zu den Einzel-Verbreitungskarten der Grundwasserleiterkomplexe wurden über gezielte Abfragen Flächen mit mehreren Grundwasserleitern übereinander identifiziert.

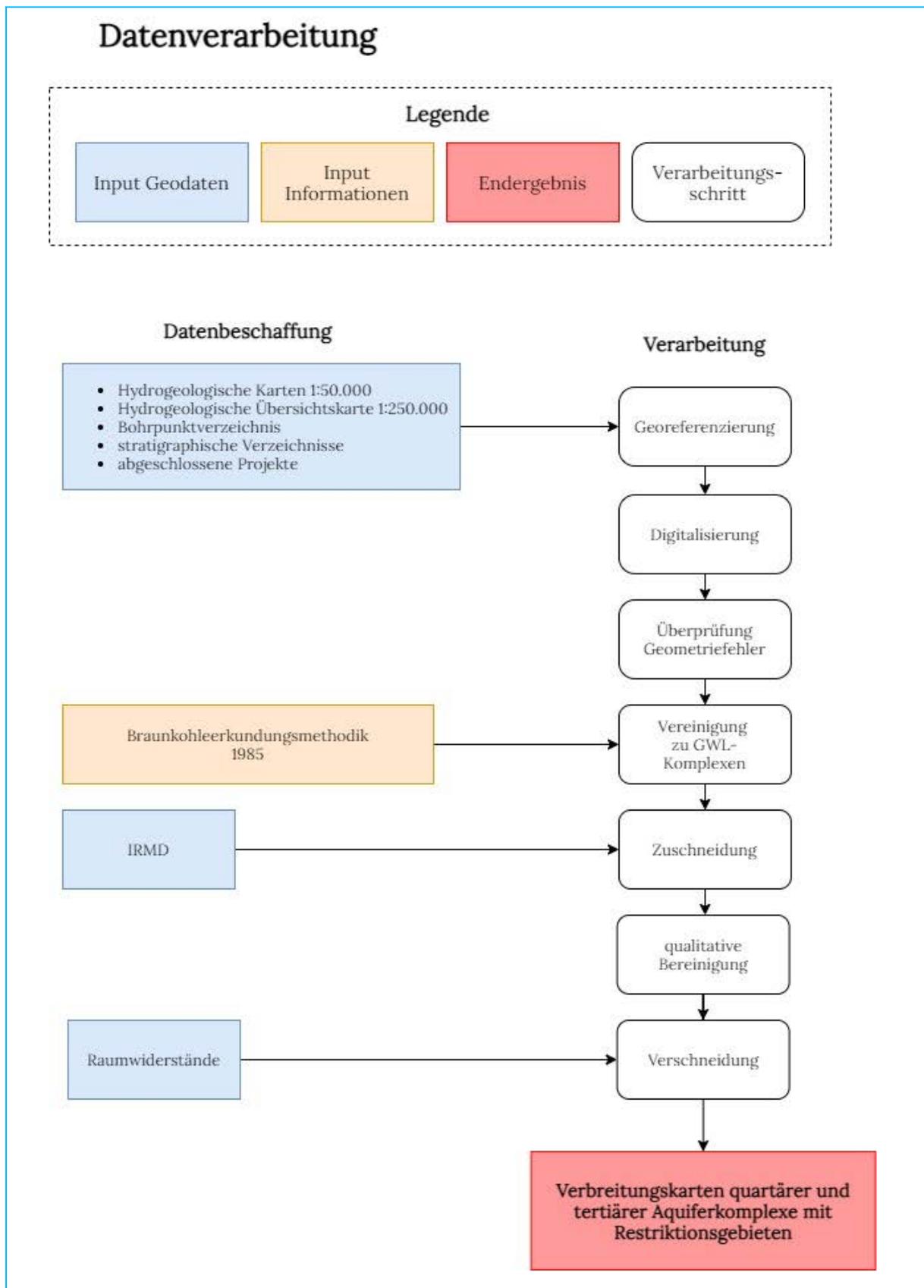


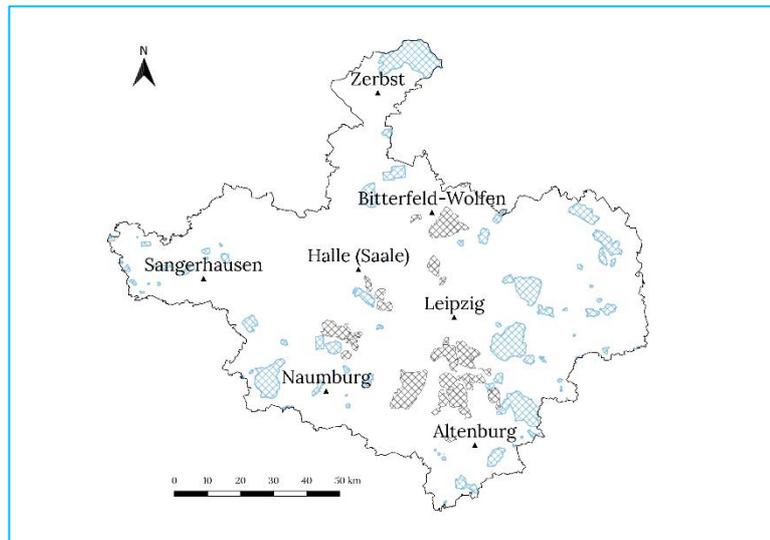
Abbildung 7: Vereinfachter Workflow der Erarbeitung des Aquiferatlas

### 3.3 Raumwiderstände

Die Verschneidung mit Raumwiderständen, wie Bergbau- und Wasserschutzgebieten, ermöglicht den Ausschluss von Restriktionsflächen, auf denen die thermische Nutzung von Grundwasserleitern nicht möglich oder nicht gestattet ist (Abbildung 8).

Aus der Nutzung des thermischen Grundwasserpotenzials mithilfe geothermischer Anlagen können physikalische, biologische und chemische Veränderungen des Grundwassers resultieren (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) 2008). Zur Minimierung möglicher Auswirkungen wird die Nutzung des Grundwassers durch gesetzlich festgelegte Restriktionen begrenzt. Diese Restriktionen resultieren im Nutzungsausschluss bzw. in Nutzungseinschränkungen verschiedener Areale. Aufgrund der bislang vergleichsweise geringfügigen Nutzung von Aquiferen für eine thermische Speicherung ist die Gesetzeslage in Deutschland noch nicht umfassend auf derartige Anlagen vorbereitet bzw. spezifiziert. Die Gesetze regeln meist nur allgemein verschiedene Verbote. Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) regelt den Schutz und die Nutzungsausschlüsse von Trinkwasserschutzgebieten (§ 51 und § 52 WHG) sowie Heilquellen (§ 53 WHG). Grundsätzlich bedarf die Nutzung des Grundwassers einer behördlichen Bewilligung. Flächen, die im hier erarbeiteten Atlas als theoretisch nutzbar ausgewiesen wurden, können so behördlicherseits ausgeschlossen werden.

Neben den gesetzlichen Restriktionen wird die Nutzung des Grundwassers stark eingeschränkt, wo die natürlichen geologischen Strukturen bereits gestört, Grundwasserleiter durch Bergbau entfernt, durch Abraum ersetzt oder durch Grundwasserabsenkung trockengelegt wurden. Sowohl Gebiete mit bereits abgeschlossener als auch mit aktiver bergbaulicher Nutzung wurden als Restriktionsflächen eingestuft. Dies betrifft vor allem die Gebiete südlich von Leipzig und Halle sowie die Region Bitterfeld-Wolfen.



**Abbildung 8: Kartierte Raumwiderstände ehemalige/aktive Abbaugelände (schwarz schraffiert) und Trinkwasserschutzgebiete/Heilquellen (blau schraffiert)**

### 3.4 Nomenklatur

Aufgrund der teils starken hydraulischen Verbindungen der Aquifere untereinander und der damit verbundenen schwierigen Abgrenzbarkeit der einzelnen Aquiferhorizonte, weicht die Nomenklatur in der vorliegenden Studie von den in Fachkreisen üblichen Bezeichnungen teilweise ab. Ausgehend von den komplexen Verbreitungen der Grundwasserleiter im Quartär und Tertiär wurden nicht alle Grundwasserleiter stratigraphisch aufgeschlüsselt, sondern die Darstellung auf Hauptgrundwasserleiter beschränkt. Zur vereinfachten Darstellung der Verbreitungsflächen wurden Grundwasserleiter, bei denen eine differenzierte Auskartierung einzelner Aufspaltungen oder kleinerer Aquifere unterschiedlicher stratigraphischer Schichten nicht umfassend genug möglich war, zu ungliederten Komplexen zusammengefasst. Die Flächen dieser Komplexe entsprechen dabei der jeweiligen maximalen Verbreitung. Im Nachfolgenden wird daher die Bezeichnung Grundwasserleiterkomplex oder Aquiferkomplex verwendet.

Die Darstellung des Quartärs orientiert sich an der Hydrogeologischen Karte 1:50.000 (HK50). Hier wurden entsprechend der Zuordnung zu Vereisungsstadien acht regionale Grundwasserleiter ausgegliedert, die für diese Studie inklusive des Atlas stratigraphisch zu Komplexen zusammengefasst wurden. Dabei orientiert sich die Zusammenfassung an der Verbreitung der quartären Hauptgrundwasserleiter 1.1, 1.5 und 1.8 (Tabelle 3), wobei auch hier die Trennung nicht absolut gesehen werden kann. Alle weiteren Grundwasserleiter (z. B. GWL 1.3 oder 1.4) sind aufgrund ihrer faziellen Ausbildung bzw. der geringen Mächtigkeit für die Nutzung als Aquiferspeicher nicht relevant. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass neben den Hauptgrundwasserleitern auch Teile anderer Grundwasserleiter anzutreffen sind. Daraus ergeben sich drei Grundwasserleiterkomplexe für das Quartär, die mittels Buchstaben A bis C unterschieden werden:

**Tabelle 3: Nomenklatur der quartären Grundwasserleiter**

Quelle	Bezeichnung
<b>Grundwasserleiterkomplex A / Hauptgrundwasserleiter 1.1:</b>	
Bez. HK50	Holozän bis Saale-II-Nachschüttsande
Braunkohleerkundungsmethodik 1985	Untere Niederterrasse
<b>Grundwasserleiterkomplex B / Hauptgrundwasserleiter 1.5:</b>	
Bez. HK50	Saale-I-Vorschüttsande bis Elster-II-Nachschüttsande
Braunkohleerkundungsmethodik 1985	Saale-Hauptterrasse
<b>Grundwasserleiterkomplex C / Hauptgrundwasserleiter 1.8:</b>	
Bez. HK50	Elster-II-Vorschüttsande bis Elster-I-Vorschüttsande
Braunkohleerkundungsmethodik 1985	Terrassenschotter

Die tertiären Grundwasserstrukturen sind aufgrund der flächigeren und mächtigeren Verbreitung besser voneinander trennbar. Die hier auskartierten Grundwasserleiter entsprechen den Hauptgrundwasserleiterkomplexen 4, 5 und 6, welche sich laut „Erkundungsmethodik Braunkohle“ (1985) theoretisch näher unterteilen lassen (41, 42, 43 / 51, 52 / 61, 62, 63). Die Verbreitungsflächen der Komplexe 4 und 5 wurden zusammengefasst.

## 3.5 Verbreitung der Grundwasserleiter

### 3.5.1 Geologischer Überblick

#### 3.5.1.1 Prätertiäre Folgen

Der heutige Aufbau des Untergrundes und dessen Bedeutung für die Herausbildung von Grundwasserleitern, die für künftige Einspeicherung von Wärme bzw. Kälte in der IRMD genutzt werden können, ist das Ergebnis einer langanhaltenden geologischen Entwicklung, die nachfolgend zusammengefasst beschrieben wird.

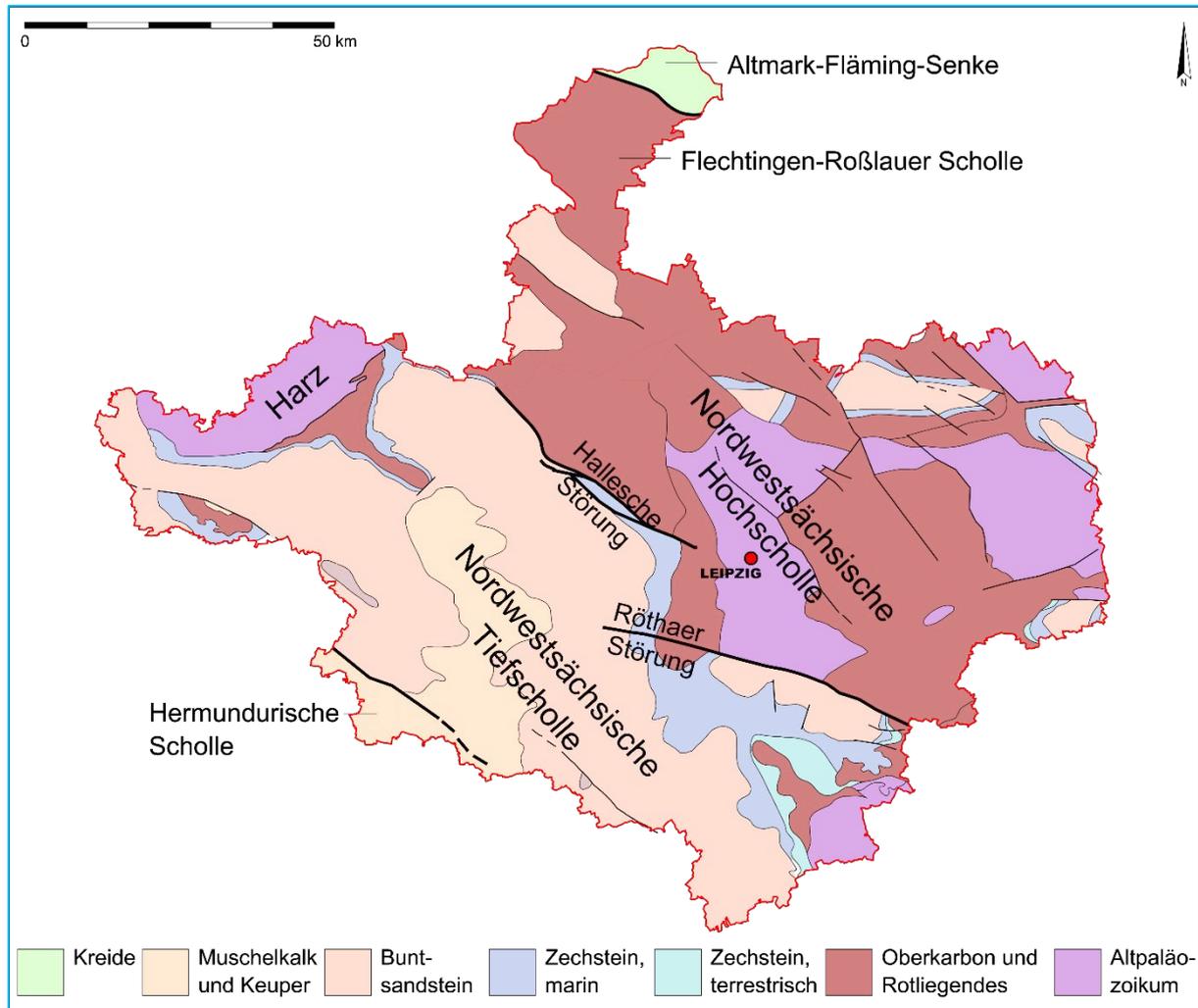
Der aus Festgesteinen zusammengesetzte ältere Untergrund, der bereits vor der Ablagerung der tertiären Sande, Kiese, Tone und Braunkohlen bestand, wird in drei zeitlich aufeinanderfolgende Haupt-Stockwerke unterteilt: das alte Grundgebirge (auch Variszisches Gebirge genannt), das Übergangsstockwerk (auch Permokarbon) und das Tafelstockwerk, in dem hier Gesteine aus dem Zeitalter vom Buntsandstein über Muschelkalk und Keuper bis zur Kreide vertreten sind.

Das Grundgebirge quert die IRMD von Südwest nach Nordost als ‚Nordsächsischer Sattel‘, der auch morphologisch ein Hochgebiet bildet (sog. Jena-Leipziger-Schwelle), das jedoch von den späteren Schichten überdeckt wurde. Der Zentralbereich des Nordsächsischen Sattels ist von Überdeckungen des Übergangsstockwerkes weitgehend frei, während im Südosten (Raum Altenburg) mit der Ostthüringischen Mulde und im Nordwesten solche Ablagerungen auftreten (Roselt et al. 1991). Für die Aufgabenstellung dieser Studie sind diese älteren Strukturen nur von geringfügigem Belang.

Das Tafelstockwerk beginnt mit einer Transgression, das heißt einer Überflutung durch das Zechsteinmeer in Senken, die NW-SE-gerichtet sind (‚herzynisch‘). In der IRMD werden Sedimentgesteine vom Zechstein bis zum Keuper, ganz im Norden sogar der Kreide, abgelagert. Die marinen Ablagerungen des Zechsteins enthalten Salze und Anhydrite, die im weiteren Verlauf unterirdisch ausgelaugt wurden und Senken entstehen ließen, in denen sich später die tertiären Sedimente zuerst abgelagerten.

Der tektonische Bau des Tafelstockwerkes und damit weitgehend des Untergrundes unter dem Tertiär im Betrachtungsgebiet ist das Ergebnis der sogenannten ‚alpidischen Orogenese‘. Darunter verstehen die Geowissenschaftler die letzte große Gebirgsbildung der Erdgeschichte, in der z. B. die Alpen aufgefaltet und viele deutsche Mittelgebirge (wie der Thüringer Wald) emporgehoben wurden. Ergebnis ist hier eine Zerstückelung der Erdkruste, die als Schollenmosaik bezeichnet wird.

Bekannt sind die ‚Hallesche Marktplatzverwerfung‘<sup>1</sup> und die Rötthaer Störung. Sie trennen die Nordwestsächsische Hochscholle von der Nordwestsächsischen Tiefscholle (bzw. die Teile Halle-Wittenberger Scholle von der Merseburger Scholle). Auf der Nordwestsächsischen Tiefscholle sind vor allem Zechstein und Unterer Buntsandstein über große Flächen erhalten.



**Abbildung 9: Übersicht über die prätertiären Strukturen in der IRMD (nach Engert 1957; Eißmann 1970; Roselt et al. 1991)**

<sup>1</sup> Als ‚Hallesche Marktplatzverwerfung‘ (auch ‚Hallesche Störung‘) wird diese tektonische Hauptstörung in Mitteldeutschland bezeichnet, die die Merseburger Scholle im Südwesten von der Halle-Wittenberger Scholle im Nordosten trennt und dabei unter anderem den Marktplatz von Halle quert. Dort verläuft sie zwischen Rathaus, Händeldenkmal und Marktkirche.

### 3.5.1.2 Tertiär

Hinweis: Die Folgen ab dem Tertiär bis zur Gegenwart sind im schematischen geologischen Leitprofil für die IRMD in Abbildung 10 (S. 43) enthalten.

Die Verbreitung und Primärmächtigkeit von Anhydriten des Zechsteins und der Grad ihrer Ablaugung, die vermutlich im höheren Erdmittelalter (Mesozoikum) beginnt, sind im Zusammenhang mit dem beschriebenen Schollenmosaik wichtige Faktoren für die Anlage einer ‚embryonalen Weißelstersenke‘ nach (Mühlmann 1981) und der Ausbildung des geologischen Baus während des Tertiärs und Quartärs.

Nach der vorwiegend fluviatilen Auffüllung dieser Senke mit den frühen mitteleozänen Grundwasserleitern 6.2 und 6.3 (auch als ‚Subrosionskomplex‘ bezeichnet) wurde die gesamte, heute als Weißelsterbecken bezeichnete Struktur in die tertiäre Akkumulation einbezogen. Dabei sind in der weiteren Entwicklung des Tertiärs besonders die sehr mächtigen Kohleflöze ausgezeichnete Indikatoren für subrosive Prozesse, d. h. für gleichzeitig ablaufende Auslaugungen im Untergrund (Roselt et al. 1991).

Insgesamt sind die tertiären Grundwasserleiter zumeist gespannt grundwasserführend, d. h. die Grundwasserdruckfläche liegt über der Grundwasseroberfläche.

### 3.5.1.3 Quartär

Im Quartär setzen sich einige im Tertiär begonnenen Tendenzen, wie die Subrosion (Auslaugung) und die Zertalung sowie die Akkumulation von Schotterterrassen, fort. In der Elster- und Saalekaltzeit des Pleistozäns erreichte und überzog das nordische Inlandeis das gesamte Gebiet der IRMD und hinterließ die Vielfalt der Ablagerungen der glaziären Fazies: mächtige Geschiebemergel der Grundmoränen, Bändertone u. a. Zur periglaziären Fazies gehören in erster Linie die im Verlaufe des gesamten Quartärs gebildeten Flussschotterzüge der Weißen Elster. In der Weichsel-Kaltzeit erreichte das Inlandeis nicht das Betrachtungsgebiet, hier kam es zur Bildung der Niederterrassenkiese in den Tälern sowie zu Ablagerungen von Lössen und Löss-ähnlichen Sedimenten abseits der Täler.

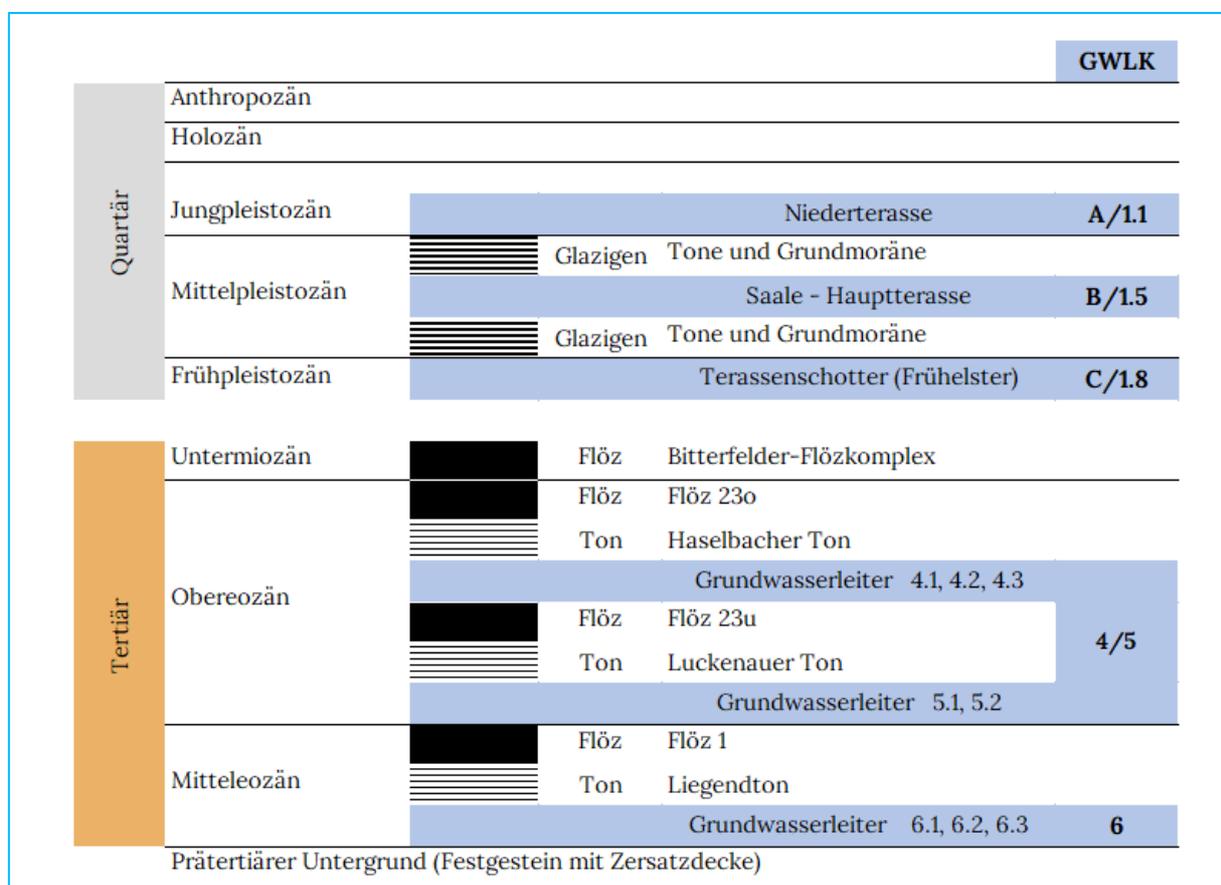
Im Holozän schließlich werden vornehmlich die heutigen Talfüllungen mit Auekiesen, Auelehmen und Mudden sowie natürlich die heutigen Böden gebildet.

Generell sind die quartären Grundwasserleiter nicht gespannt, eher zumeist etwa mehr als zur Hälfte mit Grundwasser gefüllt. Einflussgrößen sind vor allem die hydraulischen Kopplungen der Grundwasserleiter mit den Vorflutern sowie klimatische Bedingungen, die Schwankungen bei der Grundwasserneubildung gerade angesichts des Klimawandels durch zunehmende Trockenperioden und stärkere Niederschlagsereignisse bewirken.

Hinsichtlich ihrer geochemischen Eigenschaften sind die quartären Grundwasserleiter oft anthropogen durch Direkteintrag von Schadstoffen, Lösungs- und Umwandlungsvorgänge aus Tagebaukippen oder ein generelles ‚anthropogenes Grundrauschen‘ beeinflusst.

### 3.5.1.4 Anthropozän

Die zunehmende Überprägung der natürlichen Landschaft durch den Menschen fand im Gebiet der IRMD mit dem vermehrten Abbau der Braunkohle und der Herausbildung einer karbochemischen Industrie im 19. Jahrhundert ihren Beginn und mit einem signifikanten Wachstum dieses Industriezweiges in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts eine nochmalige Steigerung. Der Mensch wurde damit zu einem wichtigen Einflussfaktor auf die geologischen, biologischen und atmosphärischen Prozesse in der Region. Tagebaue mit großflächiger Grundwasserabsenkung und der Verlegung von Gewässern, Deponien und Kippen mit ungenügender Sicherung und Renaturierung, großflächige Schadstoffeinträge in Boden, Grundwasser und über den Luftweg führten zu langanhaltenden Schäden aller Umweltkompartimente.



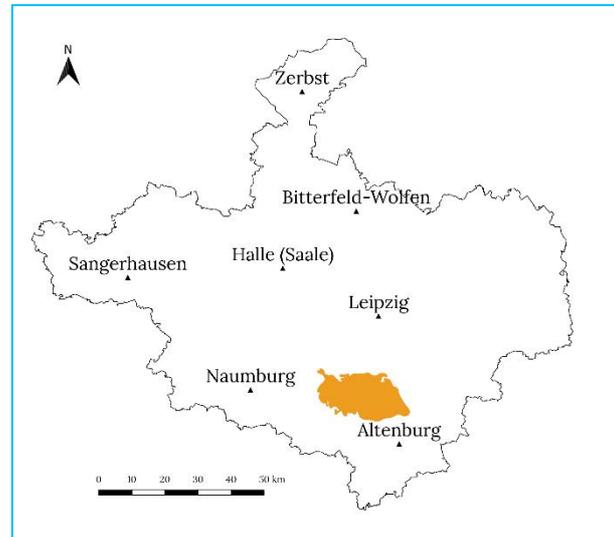
**Abbildung 10: Stark vereinfachtes schematisches geologisches Leitprofil für die IRMD mit Clusterung der für eine Wärmespeicherung relevanten Aquifere**

Mit dem gesellschaftlichen Umbruch begann auch in der IRMD die Reparatur an Natur und Umwelt sowie der Aufbruch zu einer nachhaltigeren Gesellschaft. Klimawandel und Energiewende beschleunigen diesen Trend. Die Etablierung der Leipziger Seenlandschaft, der Wiederanstieg des Grundwassers, die signifikante Verbesserung aller Messwerte im Umwelt-Monitoring sind Beispiele für diese Entwicklung. Die Nutzung der natürlichen Potenziale von Grundwasserleitern zur Einspeicherung von Wärme und Kälte sind ein weiterer Schritt in diese Richtung. Auch können die weit verbreiteten, oft wassererfüllten Tagebaukippen in Zukunft auf ihre Eignung zur thermischen Speicherung (mit Risiko-Berücksichtigung bzgl. der Standfestigkeit) geprüft werden.

## 3.5.2 Tertiäre Grundwasserleiterkomplexe

### 3.5.2.1 Grundwasserleiterkomplex 6 (GWL 6.3, 6.2 und 6.1)

**Abbildung 11: Verbreitung des GWLK 6 mit Mächtigkeiten  $\geq 5$  m in der IRMD (ohne Raumwiderstände) (Detaillierte Darstellung in BAND 2)**



Die zumeist einem prätertiären Zersatzhorizont aufliegenden Grundwasserleiter 6.2 und 6.3 werden von grobklastischen Sedimenten (Kiese und Sande) dominiert. Die Mächtigkeiten schwanken im Mittel zwischen ca. 10 und 25 m. Lokale Verbreitungen weisen bis zu 40 m mächtige Schichten auf. Über weite Teile der Verbreitung sind bindige Einlagerungen oder Linsen vorhanden; diese sind jedoch in den seltensten Fällen über größere Flächen parallelisierbar. Meist handelt es sich bei diesen Einlagerungen um Schluffe und schluffige Tone. Der Anteil dieser Einlagerungen liegt im Durchschnitt bei 10 %. Die variierenden Sedimenttypen verzahnen und überlagern sich faziell, was zu einem insgesamt heterogenen stofflichen Aufbau mit lokal schwankenden Durchlässigkeiten führt (Roselt et al. 1991).

In den Bereichen seines geringmächtigeren Auftretens (meist Hochlagen zwischen Subrosionsstrukturen) ist der Grundwasserleiter homogener ausgebildet, meist als Mittelsand bis Mittelkies. Auch erkennbar ist der Trend einer Materialverfeinerung von der Basis bis zur Hangendpartie. Dies zeigt auch das Auftreten von basalen Grobkiesen und hangenden Mittel- bis Feinsanden. Durch die Ablagerungen von Sanden in den obersten Teilen des GWL 6.2 kam es im gesamten Sedimentationsraum zu einem Wandel von fluviatilen zum limnischen Milieu. Im limnischen Milieu hat sich ein Tonhorizont ausgebildet, in dessen oberen Teilen zuweilen geringmächtige Kohleflöze auftreten („Flöz X“). Oft wird der Tonhorizont von Verschluffungen, klastischen Einschaltungen und Linsen begleitet, wie auch von einer Zunahme des Pyrit-Gehaltes (Roselt et al. 1991).

Der Grundwasserleiter 6.1 ist durch basale Kiessande und Sande gekennzeichnet. Am Südrand seiner Verbreitung weist dieser Aquifer stärkere Mächtigkeitsschwankungen auf; die Werte schwanken – bedingt durch syngenetische Subrosionsprozesse – zwischen wenigen Metern und einigen Dekametern. Bindige Einlagerungen sind vertikal und lateral unregelmäßig im GWL verteilt. Sie bilden somit keine großen zusammenhängenden Ver-

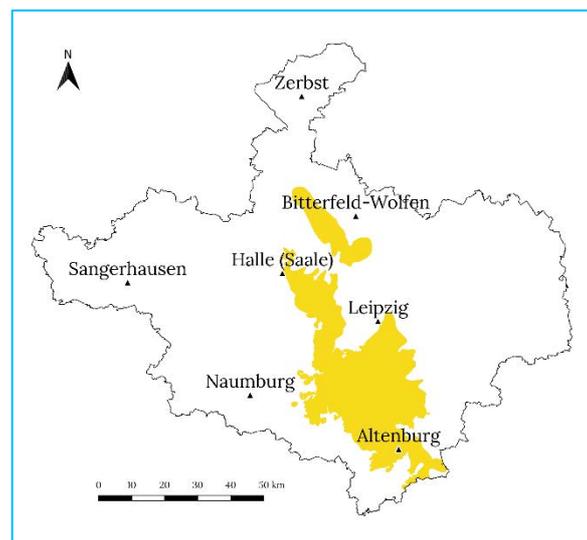
breitungsgebiete. Der Anteil des bindigen Materials schwankt im gesamten Horizont zwischen 0 und 50 %, im Normalfall liegt der Anteil unter 10 %. Der Grundwasserleiter 6.1 erscheint wesentlich homogener als der ältere GWL 6.2. Er weist ein relativ enges Spektrum an klastischem Material auf, im Wesentlichen Mittelsand bis Feinkies, untergeordnet Mittel- und sehr selten Grobkies. Lokal kommen insbesondere an der Basis und im Hangenden reine Sand- und Kiesbänke vor (Roselt et al. 1991).

Der Grundwasserleiterkomplex 6 ist in seiner Verbreitung auf den Raum südwestlich von Leipzig beschränkt (Abbildung 11) und verdankt seine Existenz der syngenetischen Auffüllung während der Auslaugung im Untergrund („embryonale Weißelstersenke“). Er weist generell starke Mächtigkeitsschwankungen auf und kann bis zu mehreren Dekametern mächtig werden. In einigen Bereichen erreicht er eine Mächtigkeit von bis zu 40 m (Rascher et al. 2013). In diesem fluviatilen Sediment überwiegt die sandig-kiesige Ausbildung. Der  $k_f$ -Wert liegt im Bereich um  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s und kann somit als gut bis sehr gut durchlässig eingeschätzt werden (Weber et al. 1983).

Innerhalb seiner Verbreitung mit einer Mindestmächtigkeit von 5 m nimmt der GWLK 6 in der IRMD eine Fläche von rund 200 km<sup>2</sup> ein (mit Berücksichtigung der Raumwiderstände).

### 3.5.2.2 Grundwasserleiterkomplex 4 / 5

Der Grundwasserleiterkomplex 4/5 gilt als Liegendgrundwasserleiter der Hauptflözgruppe II/III. Die Grundwasserleiterkomplexe 4 und 5 stehen großräumig in hydraulischer Verbindung.



**Abbildung 12: Verbreitung des GWLK 4/5 mit Mächtigkeiten  $\geq 5$  m in der IRMD (ohne Raumwiderstände) (Detaillierte Darstellung in BAND 2)**

Der Grundwasserleiterkomplex 5 besteht vorwiegend aus Kiessanden und Sanden. Die Kiessande führen meist nur Kiesgehalte bis zu 40 Masse-%. In einzelnen Lagen kann der Anteil auch höher sein. Die Sande und Kiessande können schwach schluffig bis schluffig ausgebildet sein. Bei den Kieskörnungen überwiegen feine und mittlere Fraktionen bis 20 mm. Bindige Einlagerungen treten wesentlich weniger häufig auf, als dies z. B. bei GWL 6.2 oder GWLK C/1.8 der Fall ist (Roselt et al. 1991).

Der Grundwasserleiter 5 kann lokal bis 30 m mächtig werden (Weber et al. 1983), im Mittel sind es in der IRMD 10–15 m (Rascher et al. 2013). Die Versickerungsfähigkeit der Schichten liegt im Bereich von Fein- und Mittelsanden bei  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s (Weber et al. 1983).

Wenn es zu keiner Erosion kam, ist eine deutliche Zweiteilung des Aquifers erkennbar. Der obere Teil erscheint dann wesentlich feiner mit überwiegenderen Sandanteilen, während der untere (ältere) Teil als Kiessand ausgebildet ist. Der Kiessand erscheint meist weiß, enthält Hellglimmer und kann auch höhere Schluffanteile aufweisen (Roselt et al. 1991).

Der GWLK 4 besteht als Liegendgrundwasserleiter des Thüringer Hauptflözes (III) überwiegend aus ästuarin geprägtem Flusssand (Weber et al. 1983). In den oberen Partien zeugen marin-brackische Ausbildungen von der beginnenden Meeres-Transgression. Die Mächtigkeit des GWL 4 schwankt nach eigenen Schätzungen zwischen 5 (festgelegte Mindestmächtigkeit) und 30 m (Rascher et al. 2013).

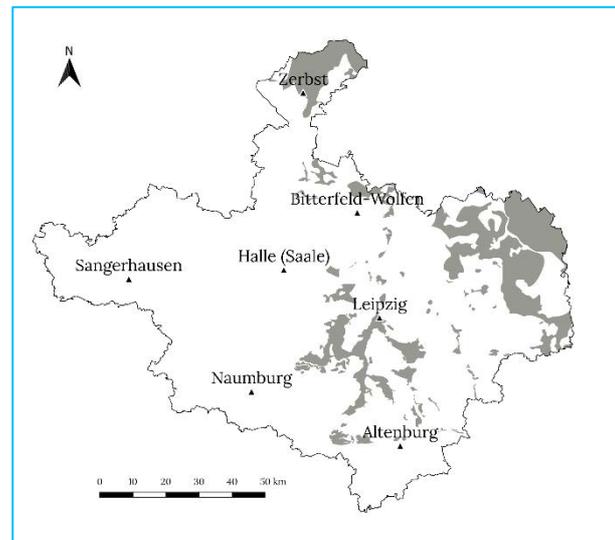
Der Grundwasserleiterkomplex 4/5 weist ebenfalls starke Mächtigkeitsschwankungen auf, die neben syngenetischen Subrosionsprozessen noch stärker als bei GWLK 6 der quartären Erosion zuzuschreiben sind. Als fluviatiles Sediment überwiegt auch hier die sandig-kiesige Ausbildung, wenngleich zum Hangenden hin brackisch-marine Einflüsse mit feinerem Material dominieren. Die Mächtigkeit kann lokal bis zu 30 m betragen (Rascher et al. 2013). Der  $k_f$ -Wert liegt im Mittel bei ca.  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s (Weber et al. 1983).

Innerhalb seiner Verbreitung mit einer Mindestmächtigkeit von 5 m nimmt der GWLK 4/5 in der IRMD eine Fläche von rund 1.200 km<sup>2</sup> ein (mit Berücksichtigung der Raumwiderstände) (Abbildung 12).

### 3.5.3 Quartäre Grundwasserleiterkomplexe

#### 3.5.3.1 Grundwasserleiterkomplex C / 1.8

Der weit verbreitete Grundwasserleiterkomplex C / 1.8 besteht aus frühlsterkaltzeitlichen Terrassenkiesen und -schottern. Die Mächtigkeit dieser Frühlster-Terrassen differiert stark. In schmalen Rinnen kann die Mächtigkeit auch bis zu 50 m betragen. Es treten starke horizontale und vertikale Fazieswechsel von grob- und feinklastischen Sedimenten auf. Sedimentologisch ist der Terrassenkörper daher in verschiedenen faziellen Ausbildungen anzutreffen: als relativ einheitliche Kiessandfolge mit nur sehr untergeordnet geringmächtigen schluffig-tonigen Lagen oder aber mit deutlich häufigeren und mächtigeren derartigen Einlagerungen. Auch kommen eingeschaltete feinsandige Sedimentpakete mit mehreren Metern Mächtigkeit vor.



**Abbildung 13: Verbreitung des GWLK C/1.8 mit Mächtigkeiten  $\geq 5\text{m}$  in der IRMD (ohne Raumwiderstände) (Detaillierte Darstellung in BAND 2)**

Die Kiessande sind in der Gesamtheit vereinzelt durch feinklastische Bildungen vertreten und führen teilweise auch Schollen von Ton und Kohle. Diese sind wahrscheinlich besonders an den basalen Teil gebunden und weisen ziemlich hohe Anteile tonig-schluffiger Zwischenmittel auf. Die Kiese der Frühelsterterrasse unterscheiden sich in der petrographischen Zusammensetzung von den monomikten Tertiärkiesen durch Anteile von Quarziten, Grauwacken und Tonschiefern (betragen ca. 10 %). Die Kiese sind vorwiegend mittel- bis grobkörnig entwickelt und enthalten auch zahlreiche Gerölle der Schottergröße (6,3 cm) und vereinzelt (besonders in basalen Lagen) auch Gerölle von der Blockgröße (20 cm) (Roselt et al. 1991).

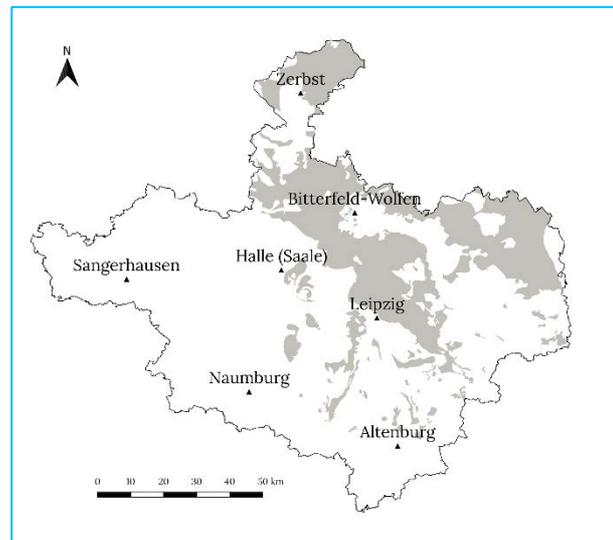
Der GWLK C / 1.8 hat in der IRMD eine große Verbreitung (Abbildung 13) und repräsentiert die frühelsterkaltzeitliche Flussterrasse mit grob- und feinklastischen Sedimenten aus den Mittelgebirgen sowie aus aufgearbeitetem tertiärem Material. Lokale Mächtigkeiten können bis zu 50 m betragen, wobei die großflächigeren Verbreitungsgebiete gering-mächtiger sind. Der  $k_f$ -Wert liegt im Durchschnitt bei  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  (HK50).

Innerhalb seiner Verbreitung mit einer Mindestmächtigkeit von 5 m nimmt der GWLK C / 1.8 in der IRMD eine Fläche von ca.  $1.250 \text{ km}^2$  ein (mit Berücksichtigung der Raumwiderstände).

### 3.5.3.2 Grundwasserleiterkomplex B / 1.5

Die als Grundwasserleiterkomplex B bezeichnete Hauptterrasse wurde im Frühglazial der Saale-Kaltzeit akkumuliert. Der GWLK besteht vorwiegend aus Kiesen und nur untergeordnet aus Sanden. Die Kiese unterscheiden sich in ihrer Korngröße und der petrographischen Zusammensetzung nur wenig von der Frühelster-Terrasse. (Roselt et al. 1991; Weber et al. 1983).

**Abbildung 14: Verbreitung des GWLK B/1.5 mit Mächtigkeiten  $\geq 5$  m in der IRMD (ohne Raumwiderstände) (Detaillierte Darstellung in BAND 2)**



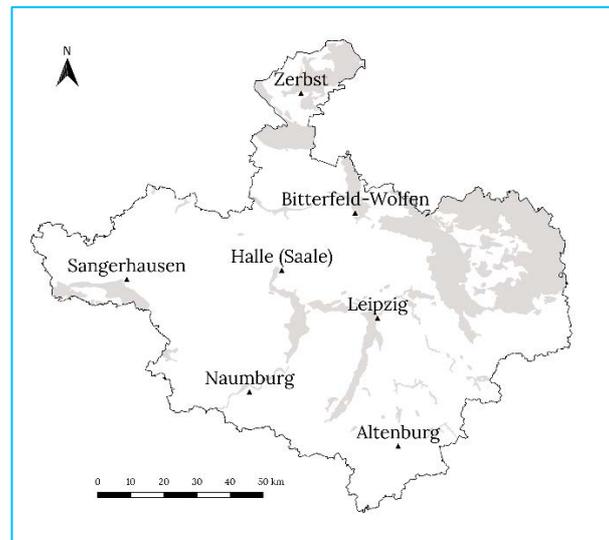
Der GWLK B / 1.5 ist der Saalekaltzeit zuzuordnen und hat in der IRMD eine größere Verbreitung als der frühesterkaltzeitliche GWLK C / 1.8. Die durchschnittliche Mächtigkeit wird von den Autoren auf 20 m geschätzt. Während sie im Köthener Gebiet bis auf 50 m anwachsen kann, beträgt sie beispielsweise im Raum Grimma nur ca. 10 m. Der  $k_f$ -Wert liegt im Durchschnitt bei ca.  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s (HK50).

Der GWLK B / 1.5 nimmt hier – bezogen auf 5 m Mindestmächtigkeit – eine Fläche von rund 2.300 km<sup>2</sup> ein (mit Berücksichtigung der Raumwiderstände) und ist damit der Bedeutendste in der IRMD (Abbildung 14).

### 3.5.3.3 Grundwasserleiterkomplex A / 1.1

In der Weichselkaltzeit war das geologische Geschehen vor allem durch periglaziäre solifluidale, diluviale und äolische Prozesse bestimmt. Dadurch kam es zur Bildung einer insgesamt flachwelligen Landoberfläche. Der weichselkaltzeitliche Grundwasserleiterkomplex A wird auch als Niederterrasse bezeichnet und besteht überwiegend aus Kiesen. Abseits der rezenten Tallagen wird er von Lössen und Löss-Derivaten vertreten. Die Mächtigkeit des Grundwasserleiterkomplexes schwankt laut HK50 insgesamt enorm. Während sie im Raum Bitterfeld, Bad Dübener Heide, Eilenburg meist 10 bis 20 m beträgt, erreicht sie in Torgau lokal bis zu 50 m und in der Region Zerbst lokal gar 100 m. Die petrographische Zusammensetzung der Niederterrasse unterscheidet sich oft nur geringfügig von der Hauptterrasse und erfordert detaillierte Kenntnisse bei der Gesteinsansprache.

Der Schotterkörper besteht zu einem bis zwei Dritteln aus einer Kiesfolge und oberen Sandfolgen. Die Niederterrasse kann bis in die Sedimente der Frühesterterrasse eingesenkt sein und lagert zuweilen gar direkt dem tertiären GWL 5.2 auf.



**Abbildung 15: Verbreitung des GWLK A/1.1 mit Mächtigkeiten  $\geq 5$  m in der IRMD (ohne Raumwiderstände) (Detaillierte Darstellung in BAND 2)**

Der weichselkaltzeitliche GWLK A / 1.1 („Niederterrasse“) ist in der IRMD vor allem in den rezenten Talauen verbreitet (Abbildung 15). Die durchschnittliche Mächtigkeit wird von den Autoren auf 10 m bis 20 m geschätzt (HK50). Der  $k_f$ -Wert liegt im Durchschnitt bei ca.  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s (HK50).

Innerhalb seiner Verbreitung mit einer Mindestmächtigkeit von 5 m nimmt der GWLK A / 1.1 in der IRMD eine Fläche von knapp 1.600 km<sup>2</sup> ein (mit Berücksichtigung der Raumwiderstände).

### 3.6 Gesamtbewertung des Aquiferspeicherpotenzials

Die Fläche der IRMD beträgt 10.500 km<sup>2</sup>. Auf ca. 40 % der Fläche konnte eine Verbreitung von mindestens einem Grundwasserleiterkomplex in unterschiedlichen Tiefen identifiziert werden (Tabelle 4). Die quartären Komplexe erstrecken sich über eine Fläche von knapp 3.700 km<sup>2</sup> und die tertiären Komplexe auf ca. 1.200 km<sup>2</sup> (mit Berücksichtigung der Raumwiderstände). Der flächenmäßig bedeutendste Grundwasserleiterkomplex ist der quartäre GWLK A/1.5, dessen Vorkommen sich auf eine Fläche von ca. 2.300 km<sup>2</sup> (entspricht ca. 25 % der IRMD) verteilt (Tabelle 4).

Auf ca. 1.800 km<sup>2</sup> befinden sich mindestens zwei Grundwasserleiterkomplexe übereinander und ermöglichen prinzipiell die Einspeicherung verschiedener Temperaturen in unterschiedlichen Stockwerken (Tabelle 4). Die Fläche entspricht ca. 40 % der mit grundwasserleitenden Schichten eingenommenen Verbreitung. Großflächige Verbreitungsgebiete mit dieser Eigenschaft finden sich im Landkreis Nordsachsen, im Großraum Bitterfeld sowie in der Region Zerbst. Mindestens drei Komplexe konnten für ca. 10 % des Verbreitungsgebietes identifiziert werden und mindestens vier Komplexe nehmen auf 0,3 % der Gesamtverbreitungsfläche der Grundwasserleiterkomplexe ein. Verbreitungsflächen mit mindestens vier Grundwasserleiterkomplexen finden sich hauptsächlich im Süden von Leipzig. Die Synopsis verschiedener Grundwasserleiterkomplexe ist im Aquiferatlas dargestellt (BAND 2, Seite 10).

Betrachtet man die Verbreitungsgebiete der Grundwasserleiterkomplexe auf der Ebene der Bundesländer- bzw. Landkreise, wird deutlich, dass vor allem im sächsischen Anteil der IRMD eine großflächige Verbreitung der Grundwasserleiterkomplexe im Untergrund zu finden ist (Tabelle 5). Ein großes Potenzial findet sich im Großraum Leipzig (Stadt) und im Landkreis Nordsachsen. In beiden Gebieten können auf über 75 % der Fläche Grundwasserleiterkomplexe für die thermische Speicherung genutzt werden. Auf ca. 30 % des Anteiles von Sachsen-Anhalt innerhalb der IRMD sind Grundwasserleiterkomplexe verbreitet. Hierbei ist vor allem der Landkreis Anhalt-Bitterfeld zu nennen, wo 66 % der Landkreisfläche Grundwasserleiterkomplexe aufweisen. Das Bundesland Thüringen besitzt mit dem Landkreis Altenburger Land den flächenmäßig geringsten Anteil an der IRMD und demnach auch das geringste Gesamt-Verbreitungsgebiet von Grundwasserleitern. Dennoch ist der Anteil des Grundwasserleiterverbreitungsgebietes, verglichen mit anderen Landkreisen, hoch (45 %).

**Tabelle 4: Verbreitungsflächen der Grundwasserleiterkomplexe**

	Fläche in km <sup>2</sup>	Anteil an IRMD
<b>GWLK - Gesamt</b>	<b>4.315</b>	<b>41,3</b>
min. 2 GWLK	1.727	16,5
min. 3 GWLK	432	4,1
min. 4 GWLK	11	0,1
<b>GWLK A / 1.1</b>	1.606	18,1
<b>GWLK B / 1.5</b>	2.312	25,5
<b>GWLK C / 1.8</b>	1.244	14,2
<b>GWLK 4/5</b>	1.173	14,3
<b>GWLK 6</b>	154	2,7

**Tabelle 5: Zusammenstellung der von den GWLK in den Kreisen insgesamt eingenommenen Flächen mit und ohne Raumwiderstand**

Landkreis	Fläche LK* [km <sup>2</sup> ]	GWLK- ohne Raum-Widerstand		GWLK- mit Raum-Widerstand	
		Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil von LK-Fläche [%]	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil von LK-Fläche [%]
<b>SACHSEN</b>					
Leipzig (Stadt)	299,0	270,5	90,5	264,8	88,6
Leipzig	1.651,6	924,0	56,0	604,9	36,6
Nordsachsen	2.027,5	1.667,5	82,3	1.532,4	75,6
<b>Σ</b>	<b>3.978,1</b>	<b>2.862</b>	<b>76,27</b>	<b>2.402,1</b>	<b>66,93</b>

Landkreis	Fläche LK* [km <sup>2</sup> ]	GWLK- ohne Raum-Widerstand		GWLK- mit Raum-Widerstand	
		Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil von LK-Fläche [%]	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil von LK-Fläche [%]
<b>SACHSEN-ANHALT</b>					
Anhalt-Bitterfeld	1.460,6	1.151,1	78,8	967,1	66,2
Burgenlandkreis	1.419,0	325,8	23,0	260,0	18,3
Halle (Saale)	135,7	55,4	40,8	44,4	32,7
Mansfeld-Südharz	1.456,2	104,8	7,2	102,6	7,0
Saalekreis	1.440,3	306,6	21,3	281,9	19,6
<b>Σ</b>	<b>5.911,8</b>	<b>1.943,7</b>	<b>34,22</b>	<b>1656</b>	<b>28,76</b>
<b>Thüringen</b>					
Altenburger Land	569,5	282,6	49,6	257,1	45,2
<b>Σ</b>	<b>569,5</b>	<b>282,6</b>	<b>49,6</b>	<b>257,1</b>	<b>45,2</b>

\* Flächenangaben der Landkreise entstammt den Verwaltungsgrenzen Deutschlands des BKG  
© GeoBasis-DE / BKG 2021

Für die IRMD konnte erstmals ein länderübergreifendes Kartenwerk zur Verbreitung von Aquiferspeichern („Aquiferatlas“) erstellt werden. Dieser Aquiferatlas zeigt die Verbreitungsgebiete der fünf wichtigsten Grundwasserleiterkomplexe des Quartärs und Tertiärs ab einer für die Speicherung geeigneten Mindestmächtigkeit von 5 m.

Die Bündelung vorhandener Aquifere zu Grundwasserleiterkomplexen folgt einem Kompromiss aus verschiedenen Nomenklaturen (Erkundungsmethodik Braunkohle, HK 50 etc.) aus Gründen der pragmatischen Anwendbarkeit für die hier in Rede stehende Aufgabenstellung. Zudem wurden in diesem GIS-Projekt die vorhandenen Wasserschutzgebiete sowie der ehemalige und aktive Bergbau als die wichtigsten restriktiv wirkenden Raumwiderstände innerhalb der IRMD kartiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass über 40 % der Fläche der IRMD mindestens einen für die saisonale Einspeicherung von Wärme oder Kälte geeigneten Grundwasserleiterkomplex aufweist. Unter den fünf kartierten Komplexen nimmt der GWLK B/ 1.5 (Saale-Hauptterrasse) mit ca. 25 % der IRMD die größte Fläche ein. Es muss jedoch damit gerechnet werden, dass dieser und die anderen quartären Grundwasserleiterkomplexe nicht vollständig wassererfüllt sind.

In Teilgebieten existieren mehrere Grundwasserleiterkomplexe übereinander, was eine Einspeicherung unterschiedlicher Temperaturen in verschiedenen Stockwerken erlaubt.

---

## 4 Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Biozöosen

---

### 4.1 Motivation

Mit diesem Projektteil soll in einer ersten Annäherung die Frage beantwortet werden, ob oder inwieweit sich Temperaturänderungen als abiotische Einflussfaktoren auf die Zusammensetzung und Aktivität mikrobieller Konsortien in der IRMD auswirken. Dies gilt für Grundwasserleiter ebenso wie für Braunkohleflöze. So könnten gegebenenfalls Methanogene unter strikt anoxischen Bedingungen eine unerwünschte Methanbildung verursachen.

Andererseits könnte der Verbrauch von Methan durch methylorophe (Methan verbrauchende) Bakterien und Archaeen einer Ausgasung von Methan entgegenwirken, wie es beispielsweise bei Süßwassersedimenten der Fall ist. Besonders an Grenzflächen zwischen anoxischen und oxischen Bereichen sind solche Aktivitäten sehr gut bekannt. Daher besteht hier Forschungsbedarf zur Analyse mikrobieller Gemeinschaften und zur Wirkung der Temperaturänderungen.

### 4.2 Grundlagen zu Umweltauswirkungen bei der Speicherung thermischer Energie im Untergrund

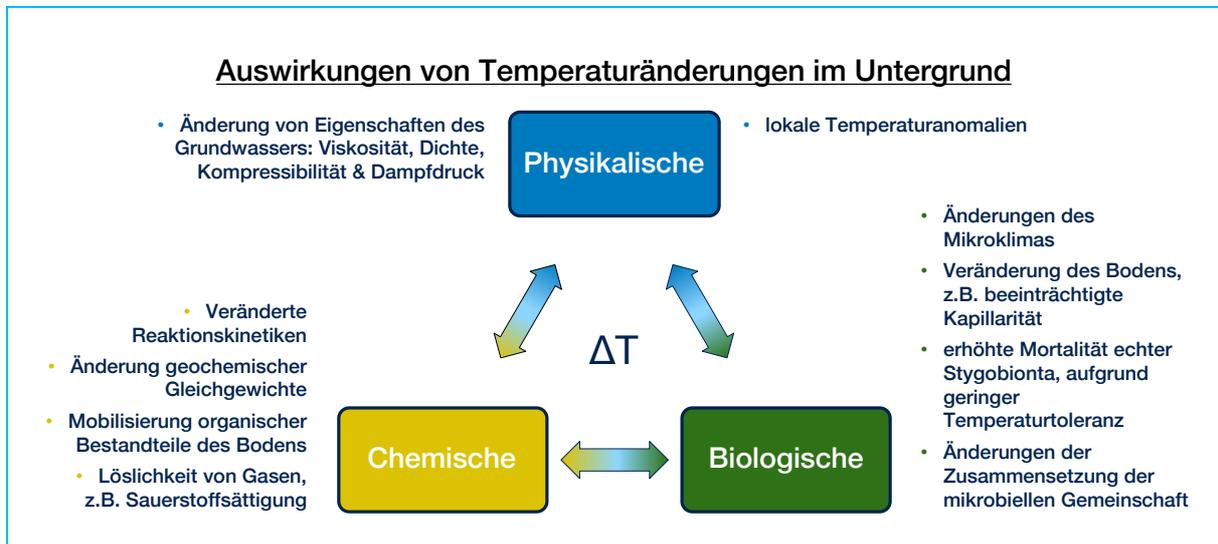
Grundwasser ist eine der wichtigsten Ressourcen für Trinkwasser, Lebensraum einer vielfältigen mikrobiellen Gemeinschaft sowie anderer hochspezialisierter Grundwasserorganismen (sog. Stygobionta) und Basis essenzieller Ökosystemdienstleistungen. Damit handelt es sich um ein hohes Schutzgut; und die möglichen Auswirkungen sämtlicher Nutzungsansprüche sind zu untersuchen (Blum et al. 2021; Brielmann et al. 2009; Brielmann et al. 2011; Hähnlein et al. 2013).

Bei ATES handelt es sich um einen Eingriff in ein Grundwasser-Ökosystem, der mit mehr oder weniger großen und lokal begrenzten, aber reversiblen Temperaturveränderungen einhergeht (Keller et al. 2021; Lüders K, Hornbruch G, Zarrabi N, Heldt S, Dahmke A, Köber R. 2021). Abbildung 15 gibt einen Überblick über mögliche Auswirkungen dieser auf physikalischer, chemischer und biologischer Ebene.

Einige Studien haben sich genauer mit den Auswirkungen von Temperaturerhöhungen auf geochemische Gleichgewichte und Grundwasserorganismen beschäftigt (z. B. (Bonte 2013; Brielmann et al. 2009; Brielmann et al. 2011; Griebler et al. 2016)). Es gibt jedoch nur wenig Literatur über die Effekte verringerter Grundwassertemperaturen (z. B. (Bonte 2013; Brielmann et al. 2011)). In den beiden letztgenannten konnte jeweils kein signifikanter Effekt auf die Wasserqualität festgestellt werden.

Im Falle einer moderaten Erhöhung der Grundwassertemperatur um 5 bis 10 K sind gem. (Blum et al. 2021) nach Auswertung zahlreicher Studien nur geringe Veränderungen der

Wasserchemie, der mikrobiellen Diversität und von Ökosystemfunktionen in naturbelas-  
senen und energiearmen (oligotrophen) Aquiferen zu erwarten. Für energiereiche (eutro-  
phe) Bedingungen stehen entsprechende Untersuchungen noch aus.



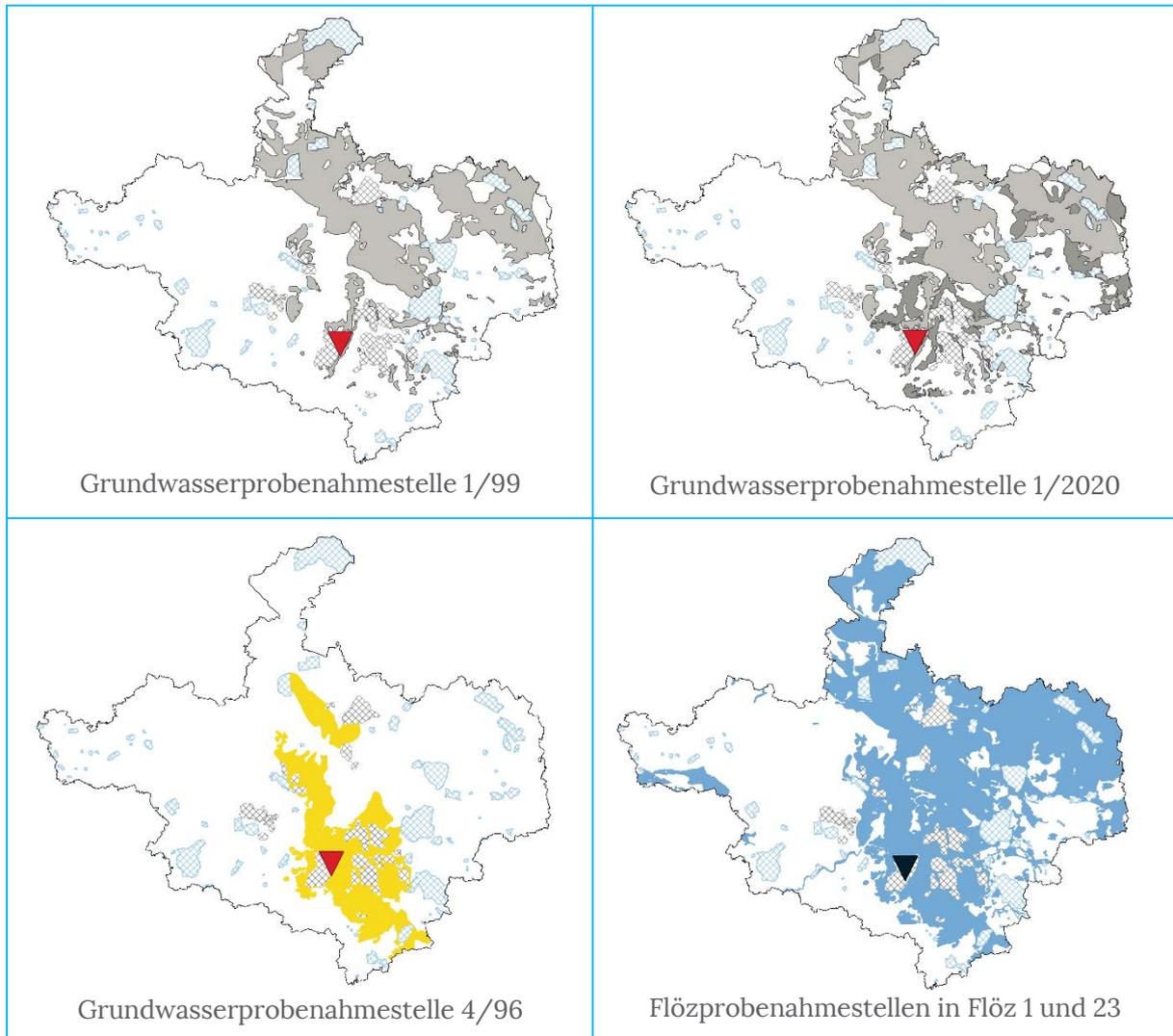
**Abbildung 15: Überblick über mögliche Auswirkungen von Temperaturveränderungen im Untergrund (Hähnlein et al. 2013).**

Im Gegensatz dazu können Temperaturen von mehr als 40 °C, wie bei HT-ATES-Systemen üblich, signifikante Auswirkungen auf den Untergrund haben. So zeigte sich in Laborexperimenten, dass bei einer Temperatur von 60 °C die Mobilität von teilweise schädlichen Stoffen, wie Arsen, Dissolved Organic Carbon (DOC), Phosphor, Kalium, Silicium, Molybdän, Vanadium, Bor und Fluor, deutlich gesteigert war. Aus diesem Grund sollten bei der Planung eines HT-ATES standortspezifische Untersuchungen durchgeführt werden. Die eintretenden Effekte hängen jedoch nicht nur von der (Höhe der) Temperaturveränderung ab, sondern auch von den natürlichen Gegebenheiten im Aquifer, wie z. B. der Wasserchemie. Diese lokalen Unterschiede sollten ebenfalls in der Planung von Aquiferspeichern, egal welchen Temperaturniveaus, Berücksichtigung finden (Blum et al. 2021).

Die mit dem Temperaturanstieg einhergehende Veränderung der mikrobiellen Gemeinschaft sowie die Steigerung der mikrobiellen Aktivität können in speziellen Fällen auch als nutzbringend bewertet werden. Dies beweist eine Vielzahl von Publikationen aus den letzten Jahren, die sich mit dem Thema der Kombination von ATES und *in situ*-Bioremediation beschäftigt (z. B. (Hofman-Caris et al. 2017; Ni et al. 2015, 2016; Ni et al. 2018; Zurbier et al. 2013). Jedoch sind auf diesem Gebiet noch weitere Forschungsarbeiten notwendig, bevor eine abschließende Bewertung der Machbarkeit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren erfolgen kann.

### 4.3 Probenahmen

Es waren Beprobungen sowohl von Grundwässern aus relevanten Aquiferen (Abbildung 16) wie auch der Substrate der wichtigsten Flöze vorgesehen. Die Wahl der Probenahmestellen erfolgte aus Repräsentanzerwägungen für Stichproben und nach der Verfügbarkeit / Zugänglichkeit der Lokalitäten.



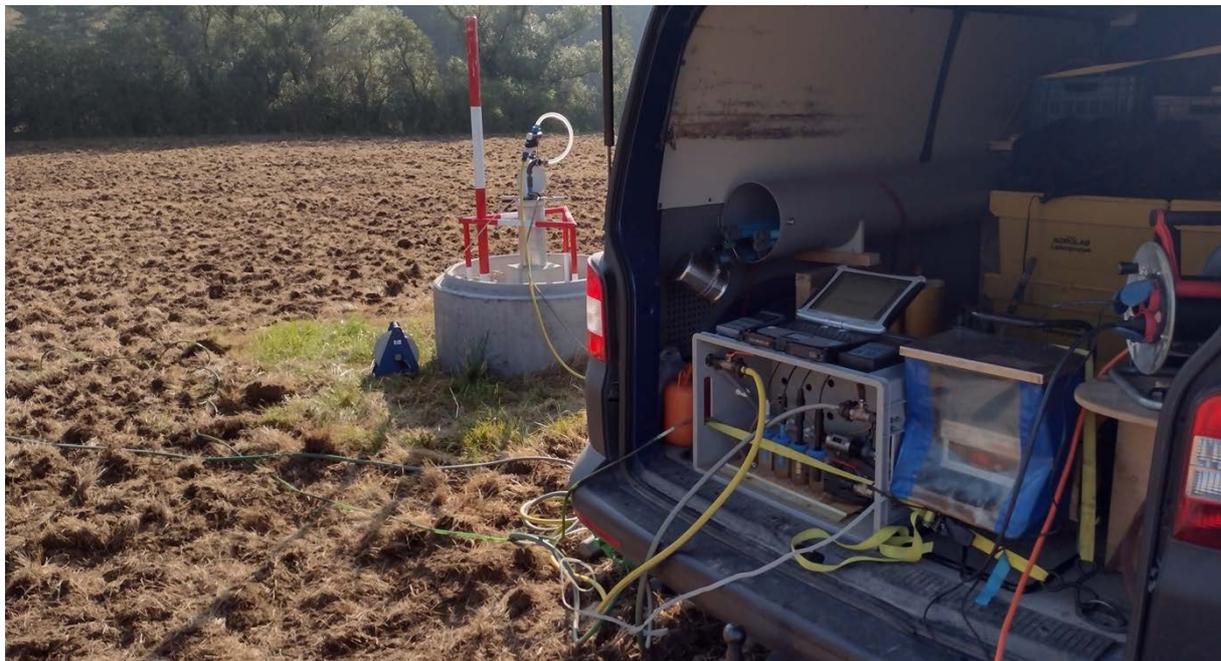
**Abbildung 16: Verortung der Grundwasser- und Flöz-Probenahmen innerhalb der jeweiligen Grundwasserleiterkomplexe in der IRMD**  
 (Grautöne = quartäre GWLK; gelb = GWLK 4/5; blau = Gesamtverbreitungsgebiet)

#### 4.3.1 Grundwasser

Für die Beprobungen des Grundwassers bot sich die Verwendung von Messstellen im Raum Profen an, da die JENA-GEOS® hier an Monitoringaufgaben beteiligt ist und auf relativ engem Raum Proben aus verschiedenen Grundwasserleitern gewonnen werden können. In Tabelle 6 sind die beprobten Grundwasserleiter mit den wichtigsten Eigenschaften aufgeführt.

**Tabelle 6: Aufstellung der erfolgten Grundwasser-Probenahmen mit Angabe der gemessenen Feldparameter**

GWL / GWLK	Mess-stelle	Datum	gemessene Feldparameter					Bemerkung
			Entnah-meteufe [m]	pH	LF [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	O <sub>2</sub> [mg O <sub>2</sub> /l]	
1.5	1/99	14.04.	12,8	6,8	1.593	11,5	6,6	direkt über einem Kohleflöz
1.5/1.8	1/20	14.04.	17,5	6,9	1.607	13,5	8,1	


**Abbildung 17: Messung der Feldparameter und Grundwasserprobenahme (JENA-GEOS®)**

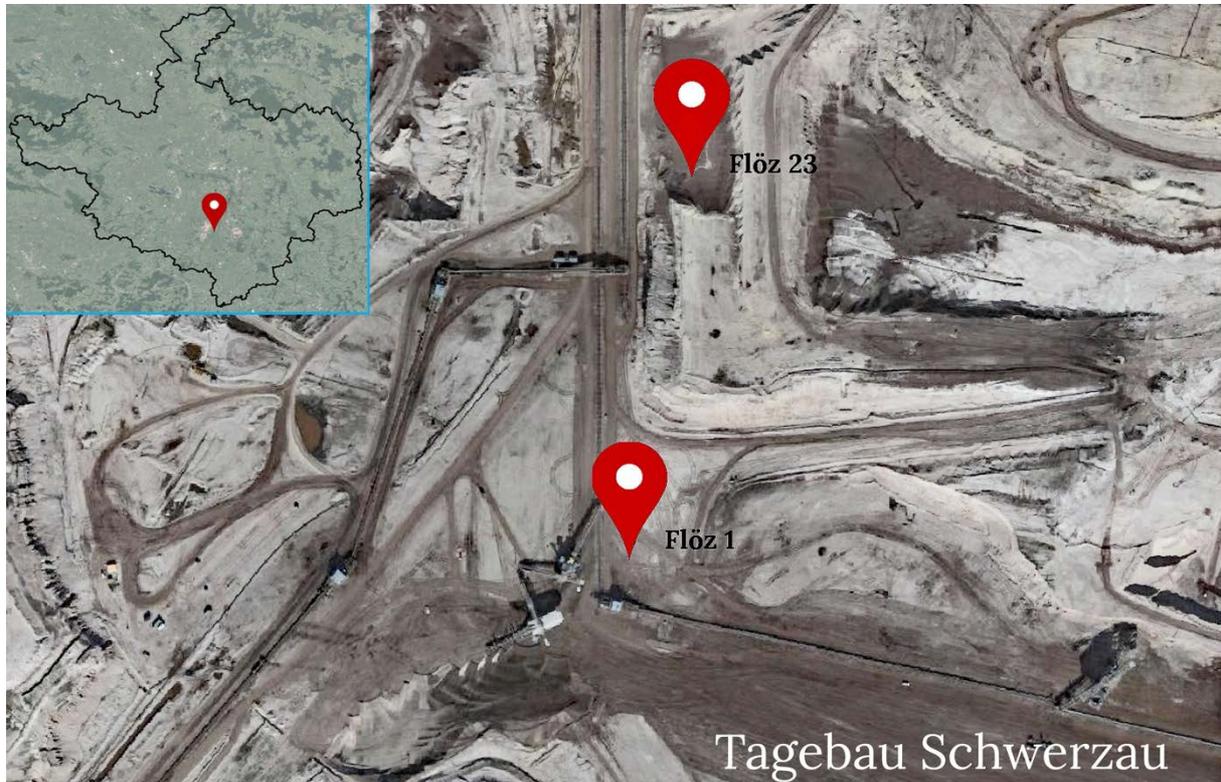
Die Proben wurden entsprechend der Qualitätsvorgaben für akkreditierte Prüflaboratorien und -messstellen (Abbildung 17) entnommen sowie gekühlt noch am gleichen Tage dem Labor des Institutes für Mikrobiologie der Friedrich-Schiller-Universität in Jena übergeben.

### 4.3.2 Braunkohle

Für die Beprobung ‚frischer‘, d. h. dem mikrobiologischem in-situ-Milieu entsprechender, Braunkohle sind Tagebau- und Bohraufschlüsse in Betracht zu ziehen. Die Autoren danken ausdrücklich der MIBRAG (Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH), Herrn Dr. Peter Jolas (Leiter Umweltschutz und Geotechnik), für die Ermöglichung einer Probenahme im Tagebau Schwerzau (Abbildung 18). Im Tagebau selbst führte Dipl.-Geol. Carsten Heinrich mit ausgezeichneter Sachkenntnis.

Herr Heinrich sorgte neben der Sicherheit für die Personen dafür, dass den Probenehmern frische Aufschlüsse zugänglich gemacht wurden. An den im Tagebau aufgeschlossenen (und aktuell abgebauten) Flözen 23 und 1 wurde zunächst an den vorgesehenen

Probenahmestellen die oberste Substratschicht entfernt. Danach wurden jeweils drei punktuelle Einzelproben zu je 50 g bis 100 g (gestörte Probe) aus dem Kohlestoß in jeweils 1 m Entfernung voneinander entnommen (Abbildung 19 bis 22).



**Abbildung 18: Verortung der Braunkohle-Probenahmen mit Bezeichnung der Flöze im Tagebau Scherzau**



**Abbildung 19: Probenahme am Flöz 23 im Tagebau Scherzau  
Frau Julia Hopf (JENA-GEOS®), im Hintergrund Tagebaugeologe Carsten Heinrich (MI-  
BRAG), Blickrichtung Süd. Foto: K. Roselt**



**Abbildung 20: Probenahme am Flöz 1 im Tagebau Scherwau**  
 Frau Julia Hopf (JENA-GEOS®), vor aktuellem Flözabbau. Foto: K. Roselt



Die Probenahme erfolgte mit sterilisierten Löffelspateln in sterilisierte Falcon-Röhrchen. Es erfolgten keine weiteren Vorbehandlungen.

Der Transport erfolgte gekühlt (auf Eis) nach Jena; über Nacht Lagerung im Kühlschrank (rund 5 °C bis 7 °C) und am Folgetag die Übergabe an das Institut für Mikrobiologie der Friedrich-Schiller-Universität.

Die komplette Dokumentation der Probenahme inkl. Koordinaten, Gesteinsansprache usw. ist in den Protokollen im [ANHANG 2](#) zu finden.

**Abbildung 21: Bei der Probenahme wurde vor allem darauf geachtet, frisches Material zu gewinnen und die Sterilität der Probe zu gewährleisten.**  
 Frau Julia Hopf (JENA-GEOS®) am Flöz 23

## 4.4 Mikrobiologische Untersuchungen und Ergebnisse

### 4.4.1 Untersuchungen von Mikrobiomen und ihren Funktionen in Grundwasserleitern

Die Auswirkungen der Temperaturspeicherung auf die Mikrobiome im Grundwasser sollten untersucht werden, auch um mögliche Gefährdungen durch verstärkte oder initiierte Methanbildung einschätzen zu können. Für Mikrobiomanalysen sind heute viele Sequenzierungsmethoden des "next generation sequencing" verfügbar, die die vorhandene Population abbilden können. Sie alle beruhen auf der Isolierung der DNA, die in einem Lebensraum vorliegt, nachdem die vorhandenen Mikroorganismen lysiert und damit ihre DNA freigesetzt wurden. Die in dieser DNA enthaltenen Gene für die konservierte rRNA werden anschließend sequenziert, sodass mehrfach vorkommende identische Sequenzen auf das jeweilige Vorkommen schließen lassen ("read numbers"). Aus allen Sequenzen, die in der Regel pro Probe 10 bis 100 Mio. Organismen erfasst, werden durch Sequenzvergleiche Zuordnungen zu bekannten Vertretern erreicht. Damit sind zwei Limitierungen des Vorgehens ersichtlich: Erstens könnten Mikroben vorkommen, deren Zellwand so stabil ist, dass die Lyse nicht funktioniert (diese Sequenzen wären dann in der Auswertung unterrepräsentiert) oder es könnten zweitens in den Datenbanken keine verwandten Organismen identifiziert werden (diese Sequenzen würden dann als nicht zuordenbar erscheinen). Um dem ersten Problem zu begegnen, werden jeweils technische und biologische Replikate unabhängig untersucht. Das zweite Problem würde bei der Analyse der Daten auffallen und müsste ggf. dann durch tiefergehende Sequenzierungen weiterer Gene oder Genome ("Metagenomics") adressiert werden. Die Methode der Mikrobiomanalyse erscheint daher besonders gut geeignet festzustellen, welche Organismen in einem Lebensraum vorkommen.

Die mögliche Stoffwechselleistung kann dann nur dadurch ermittelt werden, dass die Stoffwechselwege eng verwandter, aber bekannter Organismen betrachtet werden. Innerhalb einzelner Gruppen von Mikroorganismen kann so eine Zuordnung zu wahrscheinlichen Stoffwechselprozessen getroffen werden. Diese Analyse ist sinnvoll für die Organismen, welche in großer Zahl in der Probe vorkommen, da hier der Beitrag zum Gesamtumsatz im Mikrobiom am größten ist.

Zusätzlich zu den Mikrobiomanalysen bieten sich aber kultivierungs-abhängige Techniken an, die eine direkte Untersuchung von Stoffwechselwegen oder von Interaktionen zwischen verschiedenen Mikroorganismen erlauben. Damit lässt sich insgesamt ein genaueres Bild der vorliegenden Bedingungen erzielen. Allerdings sind nur ca. 1 % aller Bakterien unter Standardbedingungen kultivierbar, sodass sich beide Methoden ergänzen müssen.

### 4.4.2 Einfluss der Probenahme und umgebenden Geologie

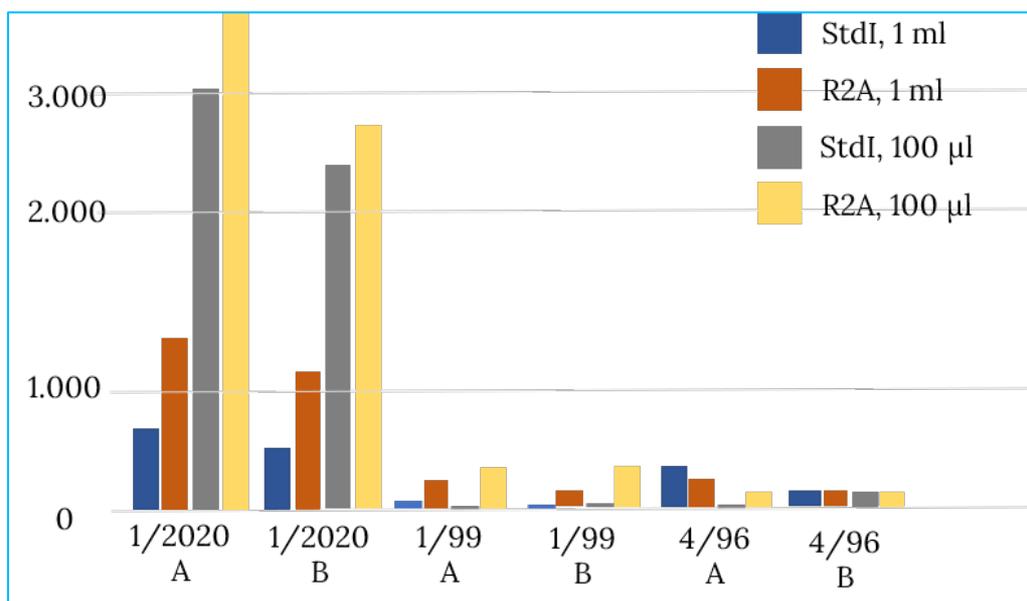
Eine Besonderheit von Aquifer-Mikrobiomen besteht in ihrer schlechten Zugänglichkeit. So ist es möglich, unter annähernd sterilen Bedingungen Proben aus Brunnen zu gewinnen. Die sessile Fraktion von Mikroorganismen, die ebenfalls eigene Stoffwechselwege besitzen können, wird damit nicht beprobt. Es erscheint also sinnvoll, neben den Wasser-

proben, auch Gesteinsproben zu erhalten, welche die Biofilme auf den Gesteinsoberflächen enthalten. So konnte in einer Studie gezeigt werden, dass die Mikrobiome des Grundwasserleiters unter Muschelkalk, das Gestein sowie der Boden auf dieser Formation zwar überlappende, aber doch unterschiedliche Mikrobiome beherbergt (Meier et al. 2017).

Grundwasser-Mikrobiome werden häufig mit Bezug zum Abbau organischer Kohlenstoffquellen untersucht (Abiriga et al. 2021). Da im Projekt Braunkohle-beeinflusste Aquifere untersucht wurden, liegen damit Vergleichsdaten vor, die in die Auswertung auch einer ATES-bezogenen Störung des Systems einbezogen werden können. Mikrobiome bilden auch die umgebenden geologischen Bedingungen ab, wozu allerdings weniger Literatur verfügbar ist (Beyer et al. 2015).

#### 4.4.3 Kultivierung auf unterschiedlichen Medien

Zunächst wurden drei Wasserproben aus den Probenahmestellen bei Profen auf das Vorkommen von Mikroorganismen durch Plattierung untersucht, um die Lebendzellzahl zu ermitteln. Dabei wurden Proben aus den Grundwasserbrunnen 1/2020, 4/96 und 1/99 verwendet. Dabei zeigte die Probenahmestelle 1/2020 deutlich höhere Koloniezahlen (Abbildung 22). Eine höhere Dichte der vorkommenden Bakterien würde darauf hindeuten, dass hier mehr Nährstoffe vorliegen als in den anderen beiden Brunnen.



**Abbildung 22: Lebendzellzahlen (koloniebildende Einheiten/ml) von Wasserproben aus drei Grundwasserbrunnen.**

**Es wurden zwei Medien verwendet und zwei Volumina ausgebracht. Zur statistischen Absicherung wurden jeweils zwei verschiedenen Proben entnommen und charakterisiert.**

Um die Anpassung der Mikroben an unterschiedliche Nährstoffgehalte zu untersuchen, wurden zwei unterschiedliche Medien verwendet. Während das nährstoffreiche Vollmedium "StdI" vielen Bakterienarten das Wachstum erlaubt, ist es für an oligotrophe Bedingungen angepasste Bakterien weniger geeignet. Dagegen stellt das Medium R2A eine

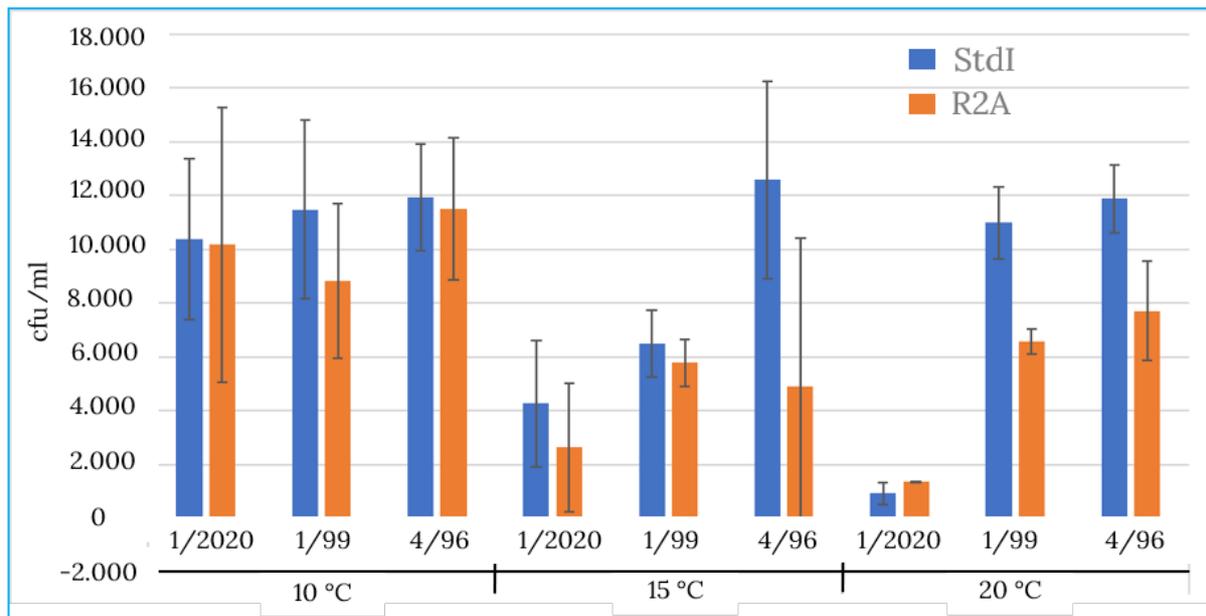
nährstoffarme Variante dar, die als typisches Nährmedium für Grundwasser-Bakterien gilt. Wachsen auf dem Vollmedium ebenso viele wie oder mehr Bakterien als auf dem Grundwasser-Medium, müsste man daraus schließen, dass eine Anpassung an hohe Nährstoffgehalte vorliegt. Mit Bezug auf Grundwasser-Ökosysteme würde dies als Zeichen einer Belastung des Aquifers mit organischem Kohlenstoff interpretiert. Wie sich zeigt, ist die Anzahl jeweils auf dem R2A-Medium etwas höher. Es ist aber mit 50 bis 90 % der Lebendzellzahl immerhin ein hoher Anteil auch fähig, mit erhöhten Nährstoffkonzentrationen umzugehen. Es besteht also bei der Probenahmestelle 1/2020 der Verdacht, dass der Aquifer ein erhöhtes Kohlenstoffangebot durch Eintrag oberflächennaher Belastungen enthält. Für diese Messstelle ist bekannt, dass sich darüber eine Verschwelungsanlage und damit Teerabfälle befanden, die heute nicht mehr sichtbar sind. Die Kontamination des Aquifers lässt sich aber deutlich nachweisen. Dies sollte sich in unterschiedlichen Mikrobiomen widerspiegeln. Die geringen erhaltenen Zellzahlen der anderen beiden Probenahmestellen erschweren eine Auswertung, jedoch könnte auch für 1/96 eine gewisse Nährstoffverfügbarkeit vorliegen.

Eine weitere Aussage lässt sich treffen, wenn unterschiedliche Zelldichten plattiert werden. Sind viele Bakterien vorhanden, können sie sich gegenseitig die Nährstoffe entziehen. Diese Konkurrenz ist gut bekannt und deutlich sichtbar für 1/2020. Wurden nur 100 µl plattiert, wachsen mehr Kolonien und führen zu einer höheren ermittelten Gesamtzellzahl. Dies ist eine erwartbare Aussage, die auch in 1/99 für das Medium R2A zutrifft. Interessant ist es zu sehen, dass 4/96 sowie 1/99 auf dem Vollmedium den umgekehrten Trend zeigen. Hier wird sichtbar, dass sich benachbarte Kolonien gegenseitig unterstützen können. Für Grundwasser-Mikrobiome heißt das in aller Regel, dass ein Organismus auf die Stoffwechselprodukte des anderen zurückgreift. Dieser Mechanismus ist bekannt, belegt aber wiederum, dass sich die vorhandenen Konsortien zwischen dem Brunnen 1/2020 und den beiden 4/96 und 1/99 in ihren Funktionen deutlich unterscheiden.

#### 4.4.4 Kultivierung bei erhöhter Temperatur

Um Auswirkungen einer Temperaturerhöhung durch ATES zu simulieren, wurden die Wässer bei unterschiedlicher Temperatur inkubiert und anschließend wieder plattiert. Für die Proben aus dem Brunnen 1/2020 ist eine deutliche Abnahme der Koloniezahlen von 10 °C über 15 °C auf 20 °C erkennbar (Abbildung 23). Für die beiden anderen Mikrobiome ist das nicht so deutlich, zumindest auf dem Grundwasser-Medium R2A ist der Trend aber ebenfalls erkennbar.

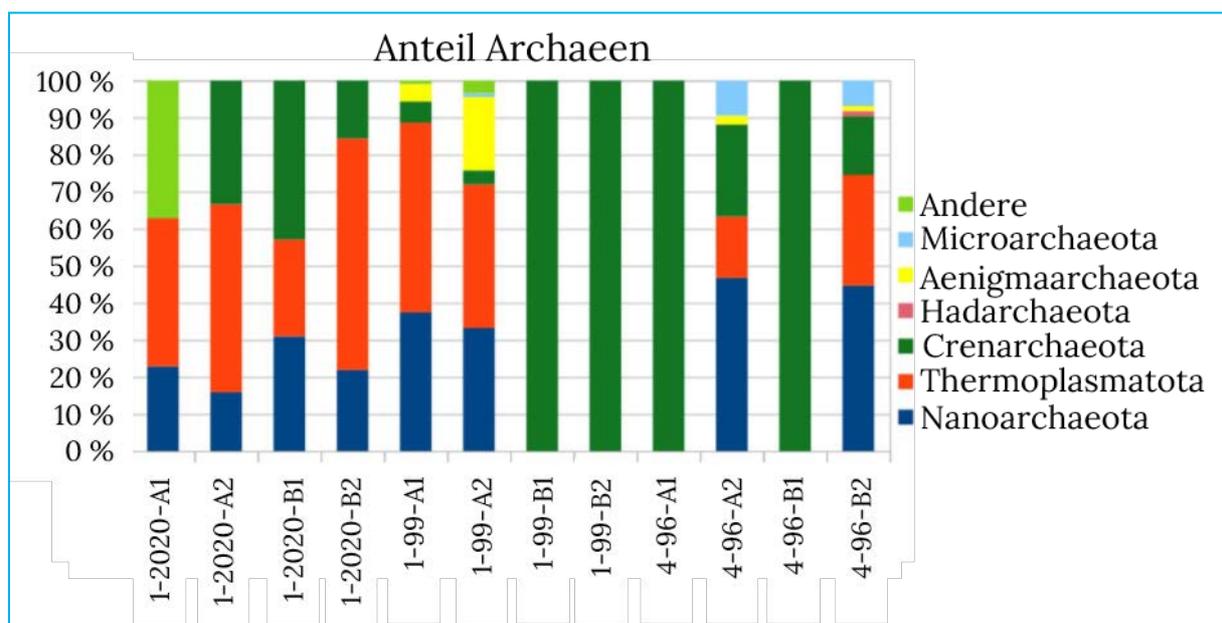
Sicher ist, dass eine Temperaturerhöhung in keinem Fall zu einer Förderung des Wachstums geführt hat. Vielmehr ist mehr oder weniger deutlich ein Absterben zu beobachten. Eine Zunahme physiologischer Prozesse (wie beispielsweise in der Methanbildung) wäre damit nicht zu erwarten. Bei der Auswertung der Plattierung war auffällig, dass sich schon nach wenigen Tagen ein deutlicher Biofilm gebildet hatte. Diese verstärkte Biofilmbildung könnte auch innerhalb der technischen Anlagen eines Aquiferspeichersystems auftreten, sodass hier Vorkehrungen, wie Filterung, zu empfehlen sind.



**Abbildung 23: Lebendzellzahlen (koloniebildende Einheiten/ml) von Wasserproben aus drei Grundwasserbrunnen nach Inkubation für 14 Tage bei unterschiedlichen Temperaturen**

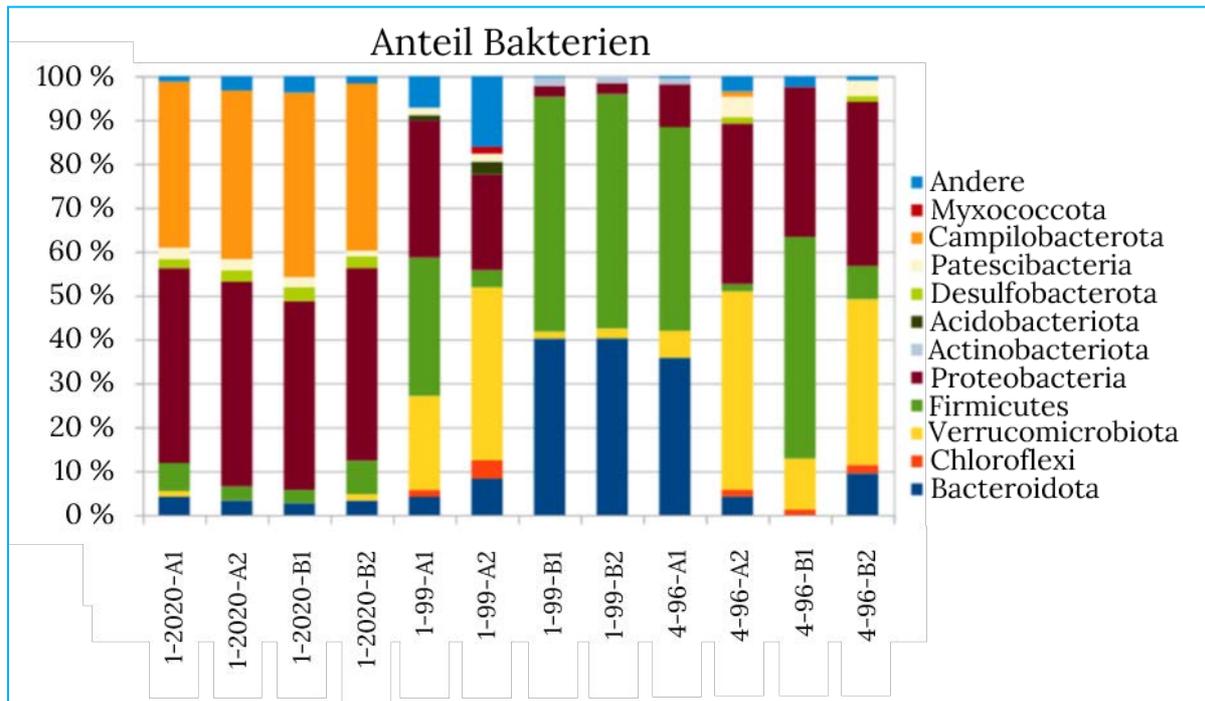
#### 4.4.5 Vorkommen methanogener Archaeen

In der Mikrobiomanalyse der Proben direkt nach der Probenahme war der Anteil an Archaea an der Gesamtpopulation niedrig. Innerhalb dieser Domäne wären Methanogene als "Euryarchaeota" gekennzeichnet. Dieses gesamte Reich innerhalb der Domäne der Archaea ist nicht abbildbar (Abbildung 24), was bedeutet, dass weniger als 0,2 % der Sequenzen zu dieser Gruppe gehörte. Eine Methanogenese ist damit nicht zu erwarten.



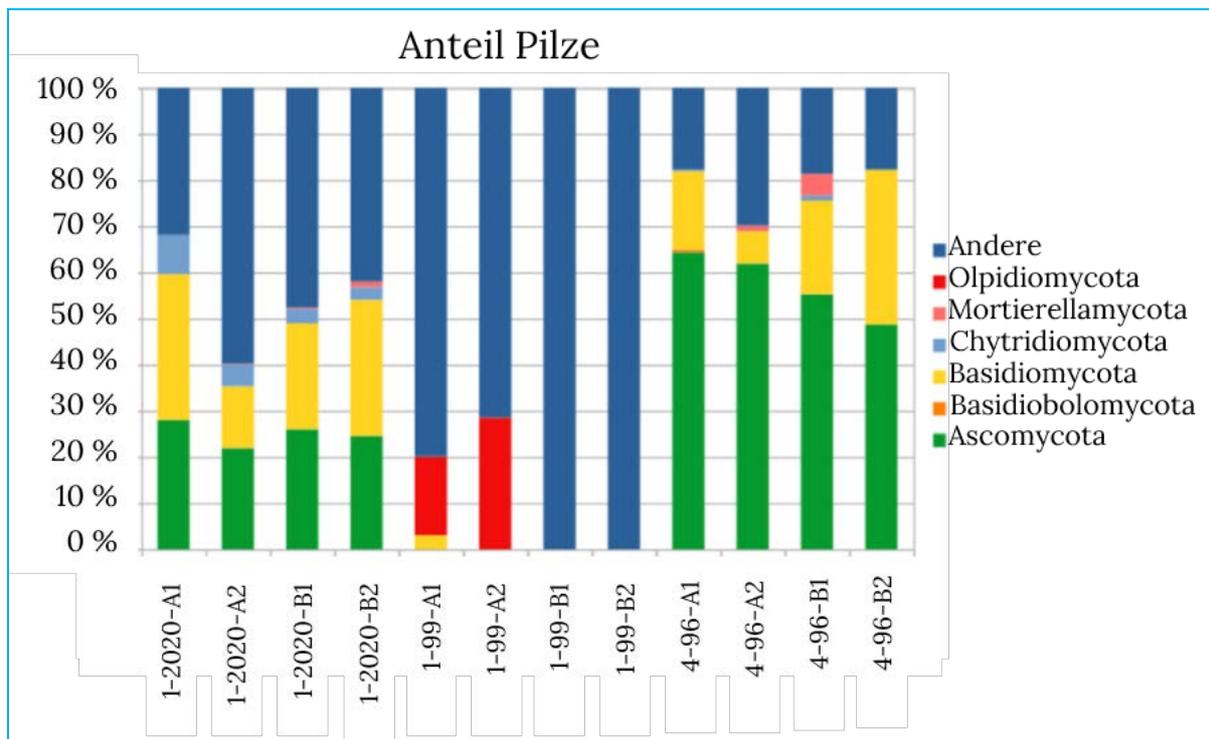
**Abbildung 24: Mikrobiomanalyse jeweils zweier technischer (Proben A, B) und zweier biologischer (A1, A2, B1, B2) Replikate für den Anteil der Archaea**

Hier zeigt sich, dass die anfangs geringen Zellzahlen zu einer hohen Abweichung zwischen den Proben führte. Dies ist bei den Bacteria nicht der Fall, die statistische Auswertung ist also repräsentativ. Für die Bacteria zeigten sich drei Gruppen: Die Replikate der Probe 1/2020 unterscheidet sich deutlich von allen anderen Mikrobiomen. Die beiden anderen Probenahmestellen ähneln sich mehr; es ist aber bei drei Analysen eine deutliche Dominanz von Firmicutes und Bacteroidetes erkennbar (). Eine ähnliche Variation konnte auch für andere Wässer aus beprobten Aquiferen beobachtet werden (Griebler und Lüders 2009).



**Abbildung 25: Mikrobiomanalyse jeweils zweier technischer (Proben A, B) und zweier biologischer (A1, A2; B1, B2) Replikate für den Anteil der Bacteria**

Für die ebenfalls untersuchten Pilze lassen sich die drei Messstellen deutlich unterscheiden (Abbildung 26). Hier ähneln sich 1/2020 und 4/96 etwas mehr als sie 1/99 ähneln. Insgesamt lässt sich aber sagen, dass für Grundwassermikrobiome unerwartet die Mortierellamyceten und Chytridiomyceten stark unterrepräsentiert sind. Dafür sind offensichtlich nicht bekannte Arten vorhanden, die unter "Andere" zusammengefasst wurden und für die keine bekannten Organismen mit Einträgen in die Datenbanken vorliegen. Da Grundwasser-Mycobiome (das Mikrobiom der Pilze) schlecht untersucht sind, könnten hier angepasste Formen enthalten sein, die aus biologischer Sicht interessant und nicht erforscht sind (Abbildung 26).

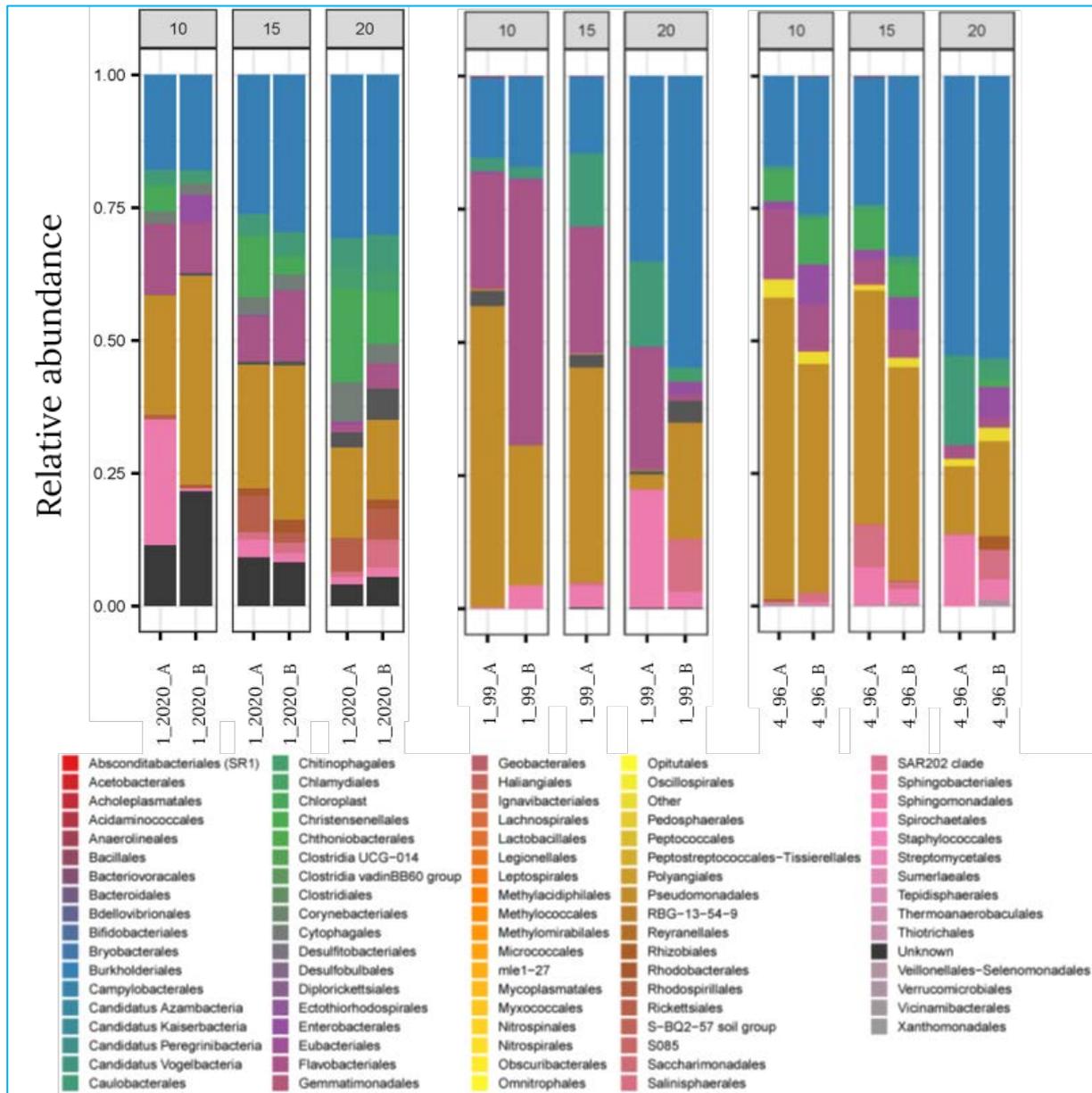


**Abbildung 26: Mikrobiomanalyse jeweils zweier technischer (Proben A, B) und zweier biologischer (A1, A2; B1, B2) Replikate für den Anteil der Pilze, die das Mycobiom bilden**

#### 4.4.6 Mikrobiomanalysen nach der Inkubation bei erhöhter Temperatur

Nach Inkubation bei Grundwassertemperatur von 10 °C bzw. um 5 und 10 °C erhöhter Temperatur wurde eine weitere Mikrobiomanalyse durchgeführt. Dazu wurden frische Proben direkt bei der gemittelten Aquifertemperatur von ca. 10 °C inkubiert und mit Parallelen verglichen, die bei 15 bzw. 20 °C inkubiert wurden (Abbildung 27).

Die Auswertung der Häufigkeit von Sequenzen ist dabei nicht standardisiert möglich, sodass hier nur die Überlebenden relativ zueinander analysiert werden können. Daher müssten für die Interpretation hier auch die bereits durch Plattieren der Grundwasserproben nach Inkubation ermittelten Zellzahlen (s. Abbildung 23) für eine Auswertung herangezogen werden. Das bereits dort beobachtete Absterben lässt sich in der Tat aber auch hier verifizieren. Dazu dienen insbesondere die in den Proben der Messstelle 1/2020 gefundenen Chloroplasten-Sequenzen (in Mittelgrün dargestellt). Hier handelt es sich um die Chloroplasten in Algen, die nicht notwendigerweise zu phototroph leben müssen. Vielmehr ist es wahrscheinlicher, dass es sich hier um Goldalgen handelt, von denen Vertreter mit heterotropher Lebensweise bekannt sind (also solche, die ohne Licht und Photosynthese von den besonders in dieser Grundwassermessstelle vorhandenen organischen Kohlenstoffen leben). Die relative Abundanz dieser Sequenzen nimmt bei erhöhter Temperatur zu, sodass sich hier die erhöhte Absterberate der anderen Ordnungen innerhalb der Bakterien wiederfinden lässt. Damit zeigt sich erneut eine starke Verfügbarkeit abbaubarer Kohlenwasserstoffe in der Messstelle 2020.



**Abbildung 27: Mikrobiomanalysen der drei Messstellen 1/2020, 1/99 und 4/96 nach Inkubation bei drei unterschiedlichen Temperaturen in jeweils zwei technischen (Proben A, B) Replikaten für den Anteil der Bacteria**

Im Vergleich zur ersten Probenahme fällt auf, dass diesmal die Mikrobiome der drei Messstellen sich mehr ähneln und insbesondere die beiden Proben A und B nicht so stark divergieren wie in dieser ersten Analyse.

Darüber hinaus nimmt in allen drei Proben bei erhöhter Temperatur die Anzahl der Burkholderiales (blau) relativ zu, und zwar im Wesentlichen auf Kosten der Pseudomonaden (beige). Viele andere Bakterienordnungen zeigen kaum veränderte relative Abundanzen. Da sowohl Burkholderia als auch Pseudomonas als typische Bodenbakterien bezeichnet werden können, erscheint diese Änderung der mikrobiologischen Zusammensetzung für die Funktion im Aquifer wenig relevant – im Gegensatz zum mikrobiologisch kartierten Eintrag organischer Kohlenwasserstoffe in der Messstelle 1/2020.

Für die beiden anderen Messstellen ist der beobachtete Unterschied der Mikrobiome zwischen der ersten und zweiten Messkampagne deutlicher. Hier finden sich im Mikrobiom Hinweise auf eine Veränderung der Salinität – möglicherweise durch Grundwasserneubildung nach den vorangehenden Trockenjahren im Probenahmejahr 2021. Wie bereits vorher beobachtet, zeigen Methan-verbrauchende Bakterienordnungen keine über die normalen Vorkommen in Grundwässern hinausgehende Häufigkeit, was fehlende Methanogene Archaeen aus der vorangegangenen Mikrobiomanalyse (s. Abbildung 24) bestätigt. Tatsächlich waren die Sequenzen von Archaea nach den Inkubationen nur in so geringer Zahl vorhanden, dass eine statistisch haltbare Aussage nicht möglich ist.

#### 4.4.7 Zuordnung der Mikrobiome zu den Grundwasserleitern und Grundwasserleiterkomplexen

Da sich zwischen den verschiedenen Grundwasserleitern, aber auch den verschiedenen Probenahmestellen in den vorhandenen Mikrobiomen deutliche Unterschiede ergaben, wurden zwei weitere Messstellen beprobt, 4/03 und 38190. Diese wurden zudem vor und nach der Inkubation (bei Grundwassertemperatur sowie bei 15 und 20 °C) analysiert. Es zeigt sich eine Ähnlichkeit zwischen 4/03 und 4/96, während die Proben aus dem Grundwasserleiter 1 sowie die Probe aus einem weiteren Aquifer 38190 untereinander stärker verschieden sind. Damit lassen sich auch mikrobiologisch die Grundwasserstockwerke aushalten (Abbildung 28).

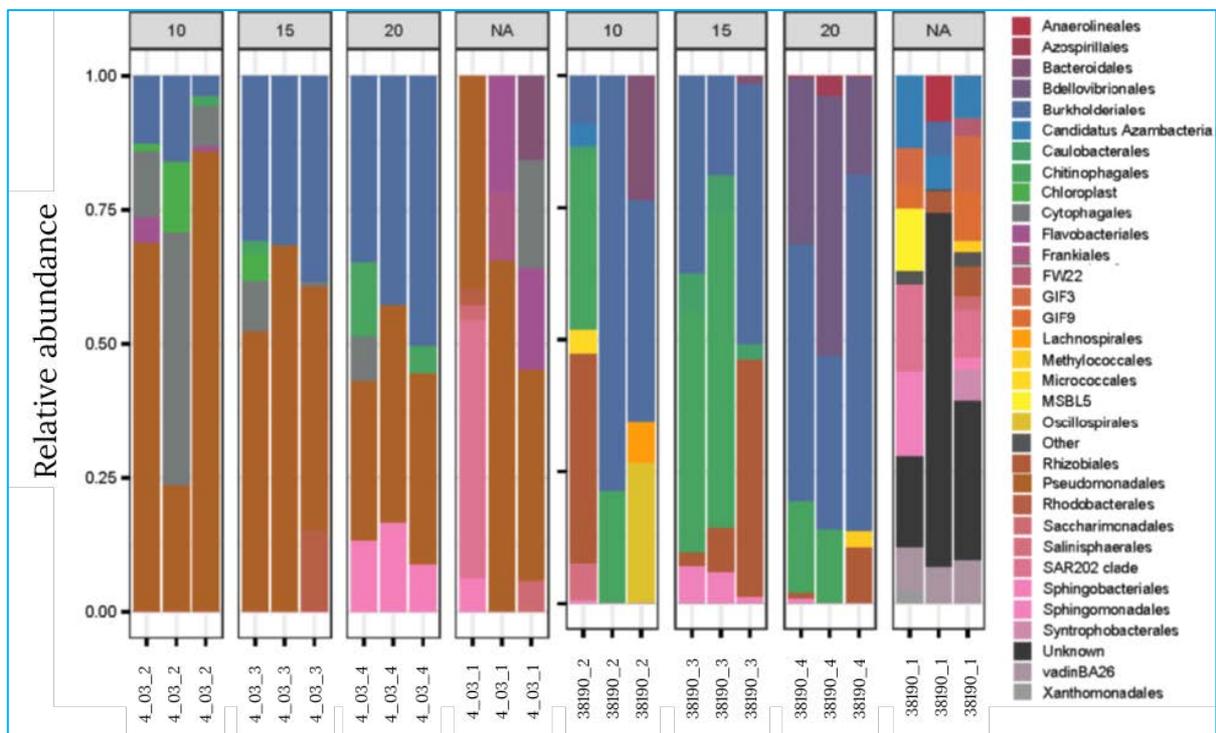
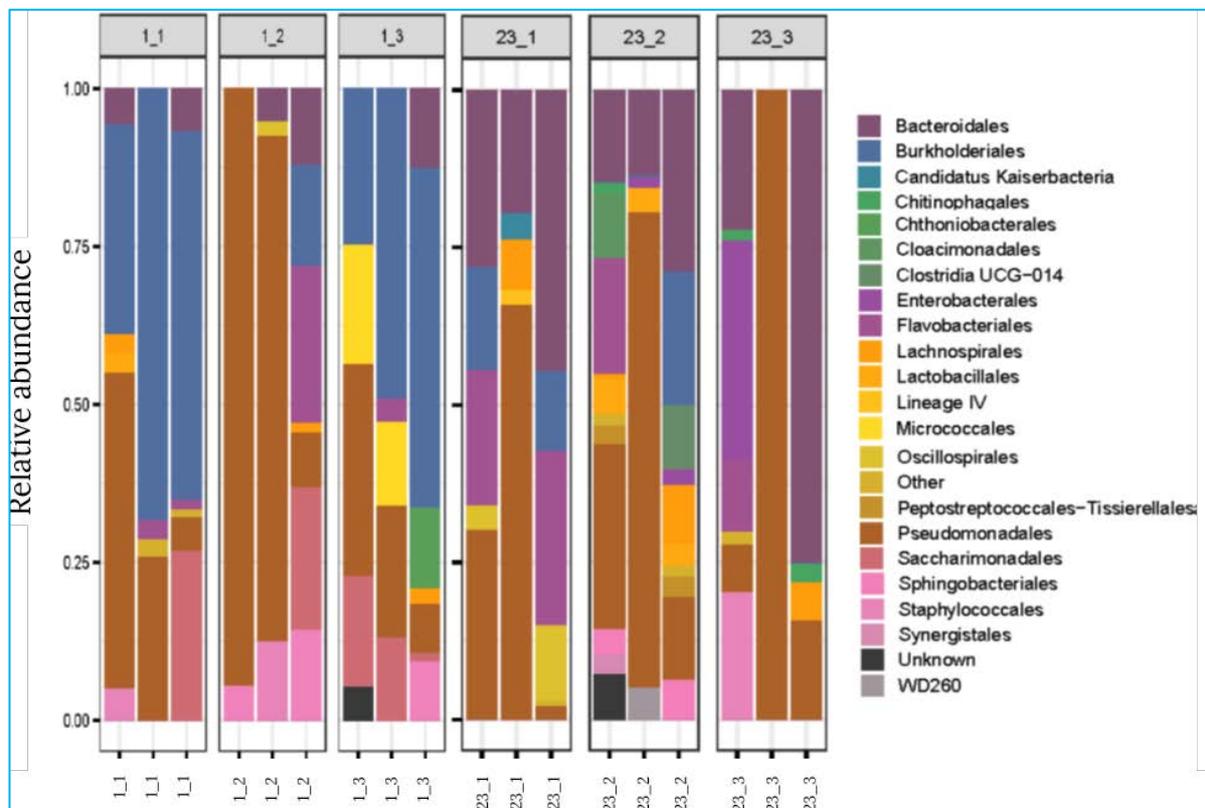


Abbildung 28: Mikrobiomanalysen der Proben zweier weiterer Messstellen vor (NA) und nach der Inkubation bei verschiedenen Temperaturen

Die Inkubation der beiden neuen Grundwasserproben ergab, wie bereits zuvor, zunehmende Dominanz der Pseudomonaden bzw. Burkholderiales. Für die Wärmespeicherung kann also ebenfalls mit diesen weiteren Probenahmestellen eine Nutzung befürwortet werden, ohne dass – im Gegensatz zur Kontamination durch organische Kohlenwasserstoffe – eine bedenkliche Veränderung der mikrobiellen Funktion der Grundwässer zu erwarten wäre.

Die neu hinzugekommene Probe der Messstelle 38190 zeichnet sich durch ein bei der Probenahme sehr eigenständiges Mikrobiom aus. Neben einigen Vertretern, die auf eine wichtige Funktion im Stickstoffkreislauf hindeuten, sind hier insbesondere unbekannte (unknown, other) und kaum bekannte (candidatus - oder mit Kürzeln bezeichnete Abstammungslinien) in relativ großer Zahl vertreten. Diese haben die Probenahme, den Transport bzw. die Inkubation bei Grundwassertemperatur nicht überlebt. Vielmehr ist auch in den Proben, die bei 10 °C inkubiert wurden, eine deutliche Angleichung an das in allen anderen Proben vorhandene mikrobiologische Inventar zu beobachten. Die Besonderheiten dieser Messstelle bzw. dieses Aquifers würden sich daher eignen, um auch eine Übertragbarkeit der Ergebnisse einer Temperatur auf andere Aquifere in weiteren, hier nicht beprobten Regionen Mitteldeutschlands, zu erlauben.

#### 4.4.8 Vergleich der Grundwassermikrobiome mit solchen aus Proben des zugänglichen Kohleflözes



**Abbildung 29: Mikrobiomanalysen der Proben direkt aus dem angeschnittenen Kohleflöz an den beiden Probenahmestellen 1 und 23 in jeweils drei technischen und biologischen Replikaten für den Anteil der Bacteria**

Die Untersuchung der Kohleproben, die unter möglichst sterilen Bedingungen entnommen worden waren, erfolgte, um einen Abgleich mit den Bakterien vornehmen zu können, die aus den inkohlten Horizonten in das Grundwasser eingetragen werden. Hierzu wurden jeweils drei Proben an Flöz 23 und 1 entnommen (Abschnitt 4.3.2). Die Mikrobiome wurden hier wie für die Wasserproben analysiert. Während die bereits im Grundwasser bei der Inkubation gezeigten *Pseudomonas* und *Burkholderia* auch hier auftraten, sind – wie erwartet – die generellen Muster der Bakterienpopulationszusammensetzung deutlich von den oben analysierten Wasserproben verschieden. Gleichzeitig zeigt sich, dass jede Probenahmestelle eigenständige Mikrobengemeinschaften aufweist (Abbildung 29).

## 4.5 Bewertung

Die mikrobiologischen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Aquifere durch Temperaturerhöhung in ihrer Mikrobiom-Zusammensetzung zwar verändern, hier aber keine relevanten Verschiebungen der Funktionen der mikrobiellen Stoffumsätze und damit ihrer Ökosystemfunktion zu erwarten sind.

Methanogene Archaea konnten in extrem geringem Umfang in den Sequenzanalysen beobachtet werden; eine relevante Methanogenese ist aber nicht zu erwarten. Die von Methan lebenden methylotrophen Bacteria und Archaea sind ebenfalls nachweisbar, liegen aber in ebenso geringen Abundanzen vor, was das Fehlen einer Methanproduktion in einem für diese Bakterien notwendigen Umfang bestätigt.

Gleichzeitig können mikrobiologisch gegebenenfalls Kontaminationen durch oberflächennahe Einträge von Schadstoffen (wie hier Teerölkontamination) kartiert werden. Auch konnten Hinweise auf einen erhöhten Stickstoffeintrag (Messstelle 38190) gewonnen werden, die aber weiterer vergleichender Untersuchungen bedürfen.

Forschungsansätze bestehen in zweierlei Hinsicht. Die Unterschiede der Mikrobiome deuten auf weniger hohe Stabilität des Grundwassermikrobioms hin, als das bisher gemeinhin angenommen wurde. Dies könnte mit der veränderten Grundwasserfließgeschwindigkeit in Trockenjahren und damit einhergehend einer veränderten Salinität zusammenhängen. Dies könnte im zukünftig erwarteten Klimawandel durchaus an Bedeutung gewinnen. Gleichzeitig zeigt es aber, dass auch unter veränderten Bedingungen die Temperaturerhöhung eher zu einer Verringerung der Mikrobenzahl führt und damit keine schädliche Wirkung einer Nutzung als Wärme-/Kältespeicher zu erwarten ist.

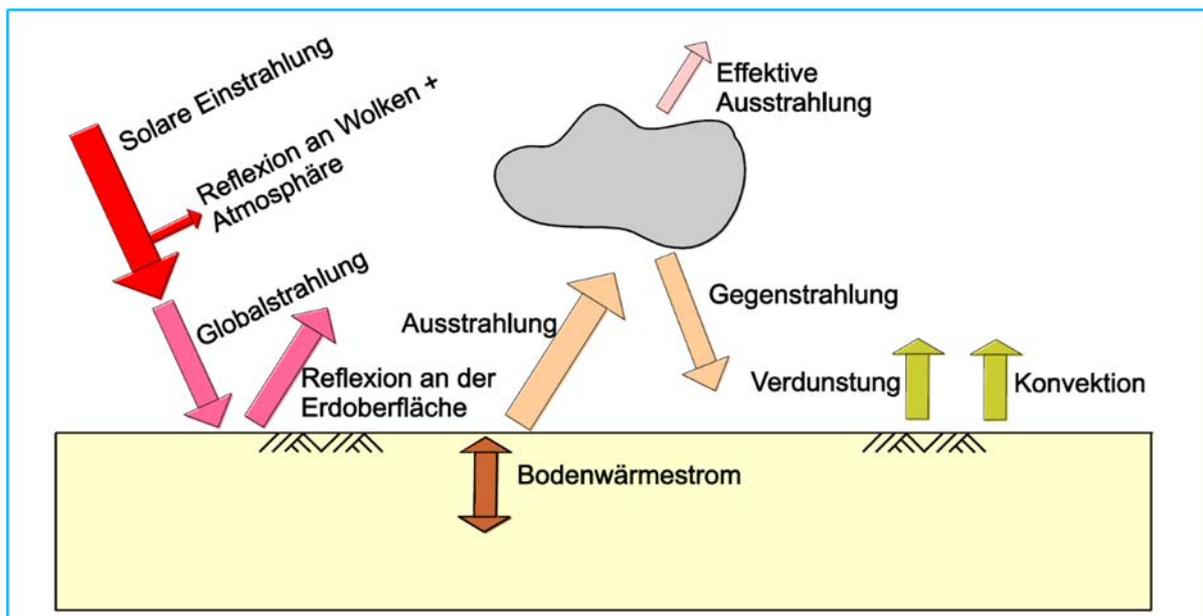
Im Rahmen dieser Arbeiten konnten keine Analysen von Viren und Phagen durchgeführt werden, die möglicherweise die beobachteten Unterschiede zwischen den mikrobiologischen Gemeinschaften erklären könnten. Hier besteht für die Grundlagenforschung weiterhin erhöhter Forschungsbedarf.

## 5 Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Oberfläche

### 5.1 Wärmehaushalt im Boden

Die Bodentemperatur beschreibt die im Boden gespeicherte Wärmeenergie als Funktion von Wärmeströmen und Wärmeaustauschen (Onwuka 2018). Ein Großteil des Energiegewinns an der Oberfläche und im Boden entsteht durch diffuse und gerichtete kurzwellige Sonneneinstrahlung sowie der langwelligen Gegenstrahlung (Abbildung 30). Von der Erdoberfläche hinweg gerichtete Strahlung, wie Reflexionen und kontinuierliche Wärmestrahlung sorgen für Wärmeverluste (Blume et al. 1996).

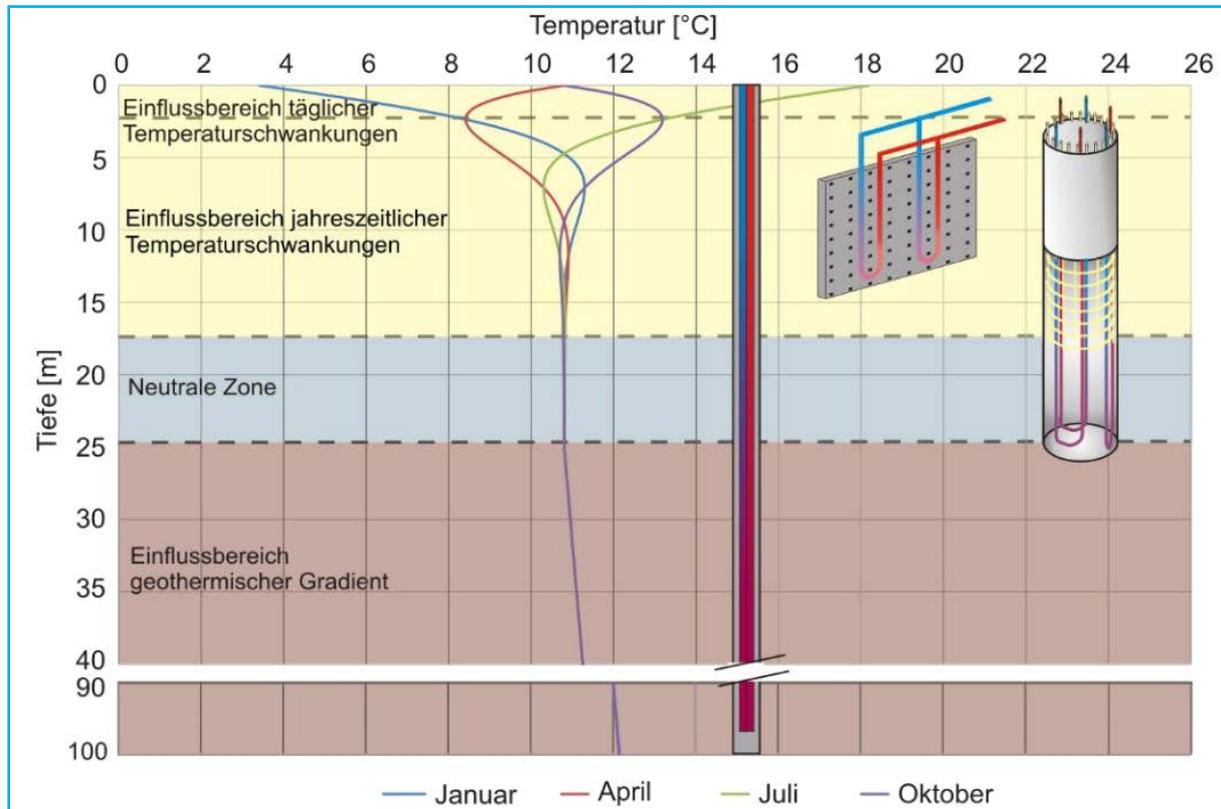
Die Temperaturverhältnisse im Boden und an der Oberfläche unterliegen natürlichen Schwankungen, die sowohl durch Tagesgänge als auch durch Jahresgänge der Lufttemperaturen verursacht werden. Diese natürlichen Schwankungen werden primär durch Energiezufuhr und -verlust an der Geländeoberfläche (Sonneneinstrahlung und Abstrahlung) hervorgerufen (Söll und Kobus 1992; Blume et al. 1996).



**Abbildung 30: Schematische Darstellung der Strahlungsbilanz an der Oberfläche (basierend auf Kürten 2015, S. 84)**

Der direkte Einfluss der natürlichen Schwankungen beschränkt sich auf den oberflächennahen Bereich des Untergrundes (Abbildung 31), wobei sich die täglichen Schwankungen der Temperaturen bis maximal 50 cm Tiefe auswirken. Jahreszeitliche Schwankungen hingegen können Auswirkungen in tiefere Bodenschichten haben. Darunter folgt die „neutrale Zone“, deren relativ konstante Temperatur im Jahresverlauf einem „Gleichgewichtszustand zwischen mittlerer Jahresaußen- und Erdinnentemperatur“ ähnelt (Kürten 2015). Dieser Bereich liegt in den mittleren Breiten vermutlich in einer Tiefe von 15 bis 20 m (Blume et al. 1996). Alle darunter liegenden Bodenschichten liegen im Einflussbereich von geothermischen Gradienten (Abbildung 31), deren Wärmefluss verglichen mit

denen an der Oberfläche wesentlich geringer ist (Blume et al. 1996). Die natürliche Temperaturzunahme in Abhängigkeit von der Tiefe verläuft mit 3 bis 4 °C pro 100 m annähernd linear.



**Abbildung 31: Exemplarische Temperaturverteilung im Untergrund (Kürten 2015)**

Wesentliche Faktoren, welche den Wärmehaushalt des Bodens beeinflussen können, sind - neben den beschriebenen Schwankungen der Lufttemperaturen - regionale und lokale Faktoren wie Relief, Vegetation, Hydrologie und anthropogene Einflüsse sowie physikalische Eigenschaften der Böden (Blume et al. 1996).

Der Wärmehaushalt des Bodens wird hauptsächlich durch Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität bestimmt, welche wiederum den Schwankungen der variablen Bodenwassergehalte unterliegen (Blume et al. 1996). Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  beschreibt die Wärmemenge, welche bezogen auf „einen Querschnitt von 1 cm<sup>2</sup> unter einem Gradienten von 1 K cm<sup>-1</sup> in einer Sekunde fließt“ (Scheffer und Schachtschabel 2016). Die Wärmekapazität ist die Wärmemenge, die nötig ist, „um 1 Volumeneinheit Boden um 1 Wärmeeinheit zu erwärmen“ (Scheffer und Schachtschabel 2016).

Die starke Abhängigkeit beider Parameter vom Wassergehalt des Bodens kann auf den spezifischen Molekulaufbau zurückgeführt werden. Ein hoher Bodenwassergehalt bedingt eine hohe Wärmekapazität aufgrund der natürlich hohen Wärmekapazität von Wasser allgemein (Blume et al. 1996).

## 5.2 Wärmetransport und Wärmeleitung im Boden an die Geländeoberfläche

Der Wärmetransport wird hauptsächlich entlang der vertikalen z-Achsen (Tiefe des Bodens) betrachtet und resultiert aus einer Temperaturdifferenz zweier Schichten. Die Temperatursausbreitung im Boden hängt von der Geschwindigkeit der Änderung und spezifischer thermischer Bodeneigenschaften, wie Wassergehalt, stoffliche Zusammensetzung und Bodengefüge ab (Blume et al. 1996). Kennzeichnend für den Wärmetransport sind neben Wärmestrahlung zwischen Oberfläche und Atmosphäre, Wärmeleitung und Wärmeströmung.

Die Wärmeleitung im Boden kann aufgrund von gewissen Regelmäßigkeiten hinsichtlich Reaktionen auf Veränderungen der Bodeneigenschaften über eine nichtlineare partielle Differentialgleichung beschrieben werden (Blume et al. 1996):

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} q_h = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

$C$  = differentielle volumenbezogene Wärmekapazität des Bodens [ $\text{J}/\text{m}^3/^\circ\text{C}$ ]

$q_h$  = Wärmeflussdichte im Boden [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\partial t$  = Änderung der Zeit

$\partial z$  = Änderung der Ortskoordinate

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit

Dabei gilt, dass der Wärmefluss linear zum Temperaturunterschied steigt, keine Wärme erzeugt oder verbraucht wird, kein konvektiver Wärmetransport stattfindet und Wärmestrahlung nicht berücksichtigt wird.

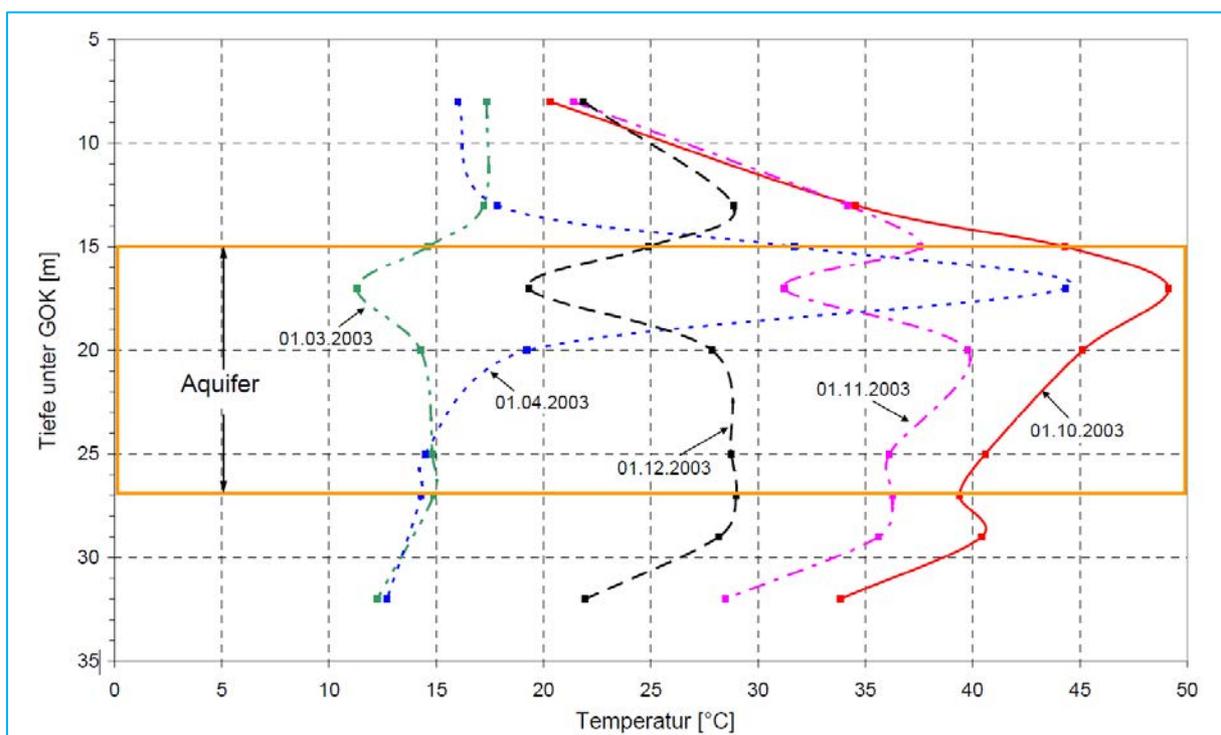
## 5.3 Beeinflussung der Oberflächentemperatur in Folge thermischer Speichernutzung des Grundwassers

Die thermische Nutzung des Grundwassers als Speichermedium kann in anthropogen verursachten Temperaturanomalien resultieren (Söll und Kobus 1992). Für alle Prozesse im Untergrund und der bodennahen Luftschicht ist die Bodentemperatur ein äußerst wichtiger Parameter, da sowohl Entwicklungs- und Lebensbedingungen von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen als auch abiotische Prozesse maßgeblich von dieser Größe abhängig sind (Hartge et al. 2014). Die Bodentemperatur wirkt dabei limitierend und stimulierend auf chemische Reaktionen und biologische Systeme (Blume et al. 1996).

Abhängig von der Tiefe des gewählten Grundwasserleiters kann die thermische Veränderung der Umgebung in unterschiedlichen Zonen (Abbildung 31) stattfinden. Generell muss darauf geachtet werden, dass kein thermischer Kurzschluss zwischen verschiedenen Schichten im Untergrund stattfindet.

Studien zufolge ist der zu erwartende Wärmeverlust und die damit einhergehende Temperaturerhöhung der Aquiferspeicher-Umgebung im Untergrund, bei Einhaltung technischer Standards, durchaus gering (Collignon et al. 2020). (Zuurbier et al. 2013) gehen von einer größtenteils nur geringen Temperaturveränderung  $< 15$  K aus und schließen daher größere Temperatureffekte aus. Diese Aussage bezieht sich hauptsächlich auf oberflächennahe Aquifere (Zuurbier et al. 2013). (Griebler et al. 2014) halten eine Größenordnung von 10 K ebenfalls für unkritisch. Außerdem sinkt der Einfluss von Temperaturerhöhungen durch die Aquifernutzung auf die Oberfläche mit zunehmender Tiefe des Aquifers (Adinolfi et al. 1994). Direkte Einflüsse oberflächennaher Systeme sind zwar vorhanden, aber äußerst gering.

Die Auswertungen der vertikalen Temperaturgradienten im Gebiet des Rostocker-Aquifers (Abbildung 32) zeigt, dass Temperaturveränderungen hauptsächlich im Aquifer (orangefarbener Kasten) selbst auftreten (Schmidt und Müller-Steinhagen 2004). Die Temperaturentwicklung ist in 5 m Entfernung von der warmen Brunnenbohrung dargestellt. Zum Ende der Beladephase (01.10.2003) erreichte der Aquifer in einer Tiefe von 17 m eine Spitzenlast von fast 50 °C. Der verstärkte Wärmeaustausch im oberen Bereich des Aquifers deutet auf stärker durchlässige Schichten hin. Außerhalb des Aquifers nehmen diese Temperaturen deutlich ab. Die direkte Weitergabe an umliegende Schichten ist demnach nicht erkennbar. Besonders in den oberflächennahen Bodenschichten ist die Temperaturänderung nur gering.



**Abbildung 32: Beeinflussung der vertikalen Temperaturgradienten im Bodenprofil durch den Aquifer-Wärmespeicher in Rostock während der Be- und Entladungszyklen (GOK = Geländeoberkante). Schmidt und Müller-Steinhagen (2004)**

Potenzielle Schwachstellen können an den Verbindungen der Standrohre auftreten, wodurch Wasseraustritt an der Oberfläche möglich ist. Außerdem treten besonders an hydraulischen Verbindungen der Bodenschichten Durchlässigkeiten auf, die den Transport von Wärme (und auch Kälte) begünstigen. Weitere Untersuchungen zeigen, dass Ausbreitung der Wärmeblase nicht gleichmäßig in alle Richtungen stattfindet. Dies ist auf Bodeneigenschaften wie die Porengröße zurückzuführen (Schmidt und Müller-Steinhagen 2004).

Generell spielt das Thema in der Praxis keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Beispielsweise werden in der Praxis bei der Errichtung einer bodengeführten Fernwärmetrasse keine Auflagen erteilt, die ihren Grund in einer Temperaturerhöhung im Boden, eher in der wirtschaftlich bedingten Vermeidung von Wärmeverlusten haben. Dennoch sollten im Vorfeld umfangreiche Untersuchungen zur Bodenbeschaffenheit durchgeführt werden.

## 5.4 Auswirkungen der Temperaturerhöhung

Der Einfluss der Bodentemperatur auf Bodenorganismen wird durch Vertikalbewegungen in Abhängigkeit von der Jahreszeit deutlich (Blume et al. 1996). Innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs können Bodenorganismen ihre Aktivitäten bei einer Temperaturerhöhung steigern. Der ideale Temperaturbereich für erhöhte Stoffwechselraten für Makro-Organismen liegt bei 10 bis 24 °C (Conant et al. 2008) und für Mikro-Organismen bei 10 bis 35 °C (Davidson und Janssens 2006). Nach (Christen 1988) wird die Geschwindigkeit biochemischer Prozesse bei einem Temperaturanstieg von 10 °C ungefähr verdoppelt (RGT-Regel). Steigt die Temperatur jedoch auf über 30 °C, so nimmt die Leistung der Bodenorganismen ab (Koch 2010). Daher sollte der Toleranzbereich für Bodenorganismen zwingend erhalten bleiben. Bei einem Anstieg über 32 °C fällt die Nitrifikation und „[...] bei über 40 bis 45 °C lassen Mineralisierung und Bodenatmung nach.“ ((Koch 2010), S. 3). Tropische Böden zeigen aufgrund einer größeren Wärmezufuhr höhere Umsatz- und Abbauraten als Böden in höheren Breitenkreisen. Ein Anstieg der Bodentemperatur kann, über die Steigerung der mikrobiellen Aktivität, den Abbau organischer Substanz beschleunigen (Onwuka 2018) und zu einer gesteigerten CO<sub>2</sub>-Freisetzung führen (Conant et al. 2008). Wobei Davidson und Janssens (2006) gezeigt haben, dass nicht der komplette Teil der organischen Masse des Bodens temperaturabhängigen Abbaumechanismen unterliegt.

Die Bodentemperatur hat, aufgrund von Einflüssen auf Nährstoffkreisläufe, Bodenwasserhaushalt und Wurzelwachstum, einen großen Effekt auf das Pflanzenwachstum (Onwuka 2018). Besonders die Phänologie von Pflanzen ist temperaturabhängig (Piao et al. 2019). Außerdem könnte ein drastischer Anstieg der Bodentemperatur, besonders an der Oberfläche, zu einer Verschiebung der Vegetationsperiode führen. Allerdings zeigen Studien, dass das Pflanzenwachstum hauptsächlich durch eine atmosphärische Erwärmung beeinflusst wird und weniger durch eine Bodenerwärmung (Farnsworth et al. 1995; Piao et al. 2019). So konnten (Farnsworth et al. 1995) bei einem Experiment mit künstlicher Bodenerwärmung (5 °C) keine signifikanten Veränderungen hinsichtlich Photosyntheserate, Existenz bestimmter Arten oder Phänologie von Blättern und Blütenproduktion feststellen.

Die Ausbreitung der Wärme im Untergrund ist von zahlreichen Bodeneigenschaften (Porengröße, Wassergehalt) abhängig. Die Veränderung der Bodentemperatur kann sich durch hydraulische Verbindungen und Durchlässigkeiten zwischen den Schichten bis in die oberflächennahen Bodenschichten ausbreiten und einen gewissen Einfluss auf das Pflanzenwachstum und die Bodenorganismen haben. Allerdings ist der Einfluss atmosphärischer Strahlung auf die Oberfläche deutlich größer als die Wärmeausbreitung aus tieferen Schichten.

Der Einfluss einer potenziellen Temperaturerhöhung bei einer thermischen Speichernutzung des Untergrundes kann durch Isolierung, tiefere Lage der Wärmeeinspeicherung und Überwachung der Temperaturdifferenz minimiert werden. Die Einhaltung technischer Standards sorgt neben der Minimierung von Temperaturerhöhungen des Bodens auch für eine höhere Speichereffizienz durch geringere Wärme- oder Kälteverluste.

Neben einer Temperaturerhöhung sollten auch die potenziellen Auswirkungen einer Temperaturverringerung auf den Boden und die Oberfläche berücksichtigt werden.

## 6 Anforderungen und Schnittstellen der TGA-Planung

Mit der Optimierung von Anlagentechnik zum Heizen, Lüften, Kühlen (HLK) hat die am Projekt beteiligte Ingenieurgesellschaft e7 UG eine Vielzahl von Anlagen in allen Regionen Deutschlands analysiert. Kapitel 6 ist das Ergebnis derer langjährigen Arbeit im Fachgebiet HLK und beschreibt den Zustand der meisten HLK-Anlagen in Deutschland.

### 6.1 Grundlagen der energetischen Aquifernutzung und Systemtemperaturen in Fernwärmesystemen

Für die Umsetzung der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln sind technische Parameter zur thermischen Nutzung von Aquiferen zu entwickeln. Die mittels energetischer Nutzung resultierenden Temperaturveränderungen gelten mit bis zu 10 K als unkritisch für Wasserbiologie und -chemie (Griebler et al. 2014; Griebler und Avramov 2017).

Dieser Parameter stellt eine Herausforderung zur energetischen Nutzung in den meisten Bestandsanlagen dar – insbesondere, wenn deren Energiequelle ein Verbrennungsprozess ist. Die bei einer Verbrennung entstehenden hohen Temperaturen liegen weit über dem Nutztemperaturbereich und bedingen einen verschwenderischen Umgang mit den Temperaturniveaus im System:

- ▶ Verbrennungsprozess ca. 1.000 °C
- ▶ Nutztemperatur im Wärmeerzeuger (z. B. Gaskessel) ca. 80 bis 120 °C – in Abhängigkeit des Wärmetransportmediums (Wasser, Öl, Dampf)
- ▶ Temperatur an Wärmeüberträgerflächen ca. 50 bis 75 °C
- ▶ Raumtemperatur ca. 21 bis 24 °C

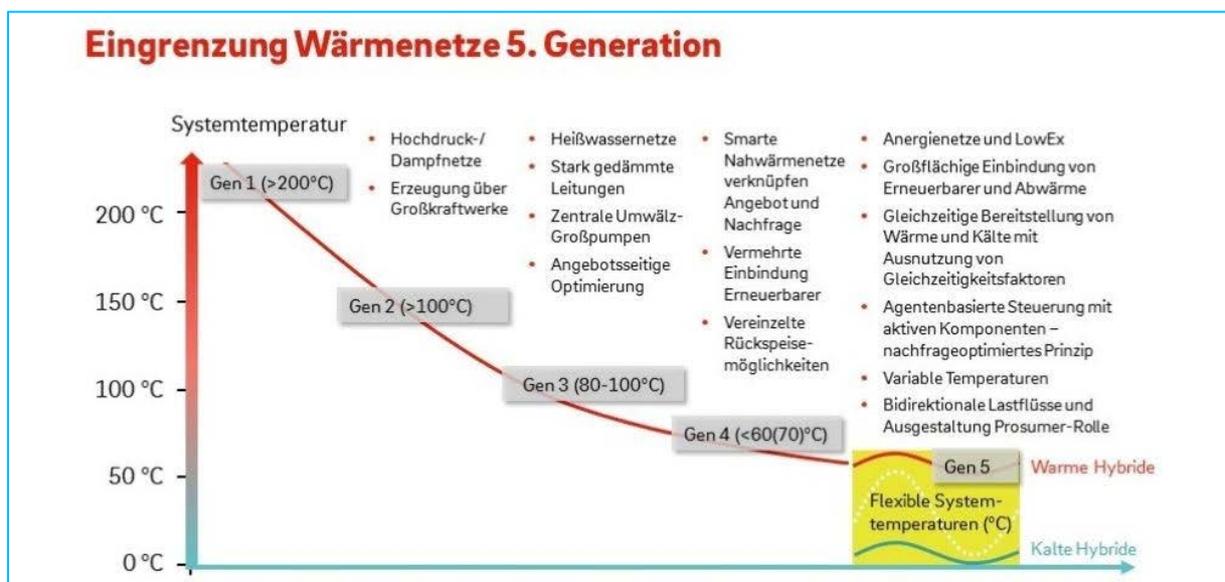


Abbildung 33: Generationen der Fernwärmernetze (Quelle: [www.energiewendebauen.de](http://www.energiewendebauen.de))

Die historisch gewachsenen Anlagenarten zur Temperierung von Gebäuden prägen die Versorgungsstrukturen und verfügbaren Technologien. So arbeiten etablierte Fernwärmesysteme mit 80 bis 120 °C und Heizkörperheizungen mit Systemtemperaturen bis 80 °C. Die folgende Darstellung (Abbildung 33) gibt einen Überblick über die aktuellen Typen von Fernwärmenetzen bis zur 5. Generation als warmes hybrides Netz mit Netztemperaturen von 35 °C oder als „kaltes“ Fernwärmenetz mit Netztemperaturen zwischen 10 und 0 °C.

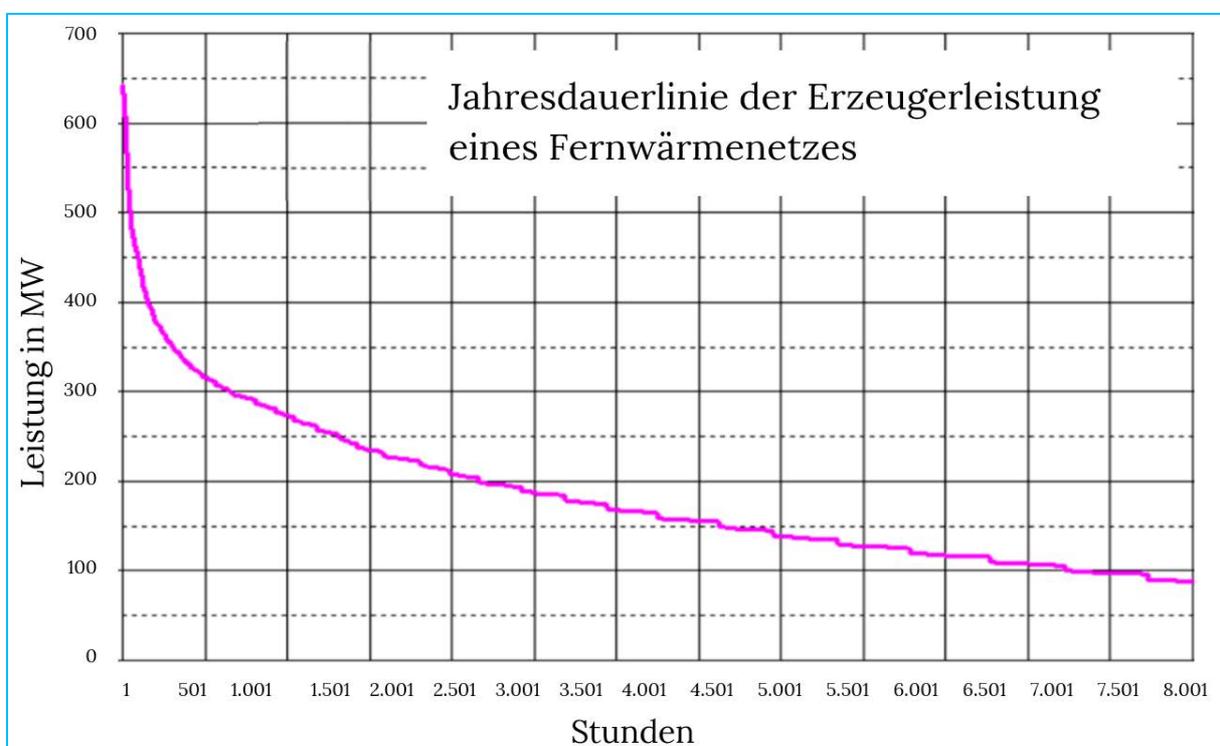
Die klassischen Fernwärmenetze sind für hohe Spreizungen ausgelegt, da hohe Systemtemperaturen einfach zu erzeugen sind. Mit hohen Spreizungen zwischen Vorlauf (VL) und Rücklauf (RL) lassen sich hohe Leistungen über kleine Rohrnetze übertragen.

- ▶ 10 MW:  
VL 110 °C / RL 50 °C fließen 147 m<sup>3</sup>/h mit 2,3 m/s durch ein DN 150 Rohr.

Um die gleiche Energiemenge mit geringerer Spreizung zu übertragen, sind größere Rohrquerschnitte notwendig.

- ▶ 10 MW:  
VL 20 °C / RL 10 °C fließen 860 m<sup>3</sup>/h mit 15 m/s durch ein DN150 Rohr,  
bzw. mit 3,3 m/s durch ein DN 300 Rohr.

Eine einfache Umnutzung der vorhandenen Fernwärmenetze für niedrigere Temperaturniveaus ist nicht möglich. Es müssen neue Rohrleitungsnetze gebaut werden bzw. bestehende Infrastrukturen um weitere Rohrleitungen ergänzt werden.



**Abbildung 34: Jahresdauerlinie Heizlast im Wärmenetz (Quelle: e7 UG, 2021)**

Die technisch geprägte hierarchische Struktur von der Quelle bis zum Verbraucher entspricht heute nicht mehr den aktuellen technischen Möglichkeiten. Eine dezentrale Netzarchitektur bzw. Mischformen mit multivalenten Senken-Quellen-Kombinationen, auch mit zentralen Spitzenlast-Wärmeerzeugern, lassen sich oft auch im Bestand realisieren.

Dabei richtet sich der Fokus auf die Jahreszeiten mit geringer Heizlast und geringer Systemtemperatur. Die Abbildung 34 zeigt einen typischen Jahresverlauf der Heizlasttage bezogen auf die Heizlast. Erkennbar ist, dass ein sehr großer Teil des Jahresbedarfs an Heizlast unter 25 % der maximal benötigten Heizlast liegen (650 MW). Wenn der Fokus zunächst auf diesen Teil des Jahresbedarfs gelegt wird, lassen sich Wärmenetze mit niedrigeren Netztemperaturen und unter Einsatz von Wärmepumpen realisieren.

Die Grundlagen zu den genutzten Systemtemperaturen in Heizungsanlagen zeigen, dass erst mit niedrigen System- und daraus resultierenden niedrigen Netztemperaturen (vgl. Wärmenetz der 5. Generation) die Möglichkeit zur energetisch sinnvollen Aquifernutzung gegeben ist. Bei Raumtemperaturen von 21 °C ist die Differenz bis zur empfohlenen möglichen Aquifertemperatur gering:

- ▶ Natürliche Aquifertemperatur ~ 10 bis 15 °C
- ▶ Raumtemperatur ~ 21 bis 24 °C
- ▶ Temperaturdifferenz ~10 K

## 6.2 Erzeugerstrukturen

Heizungsanlagen sind oft nicht am realen Bedarf ausgelegt und enthalten Reserveleistungen von bis zu 50 %. Besonders bei verbrennungsbasierten Heizungsanlagen ist die Vorhaltung von Wiederaufheizleistung gem. DIN EN 12831:2017 üblich. Über die nationale Ergänzung DIN/TS 12831-1:2020-04 wurde auf die klimatischen Verhältnisse in Deutschland Bezug genommen und die seit 2017 viel zu hohen Ergebnisse bei der Heizlastrechnung gesenkt.

Zusätzlich wurden die regionalen Normaußentemperaturen um +1 bis +2 K angehoben, um der Klimaveränderung zu folgen.

Reserveleistung bei verbrennungsbasierten Heizungsanlagen ist meist kostengünstig, weil deren Installationskosten nicht linear mit der Heizleistung steigen – anders als bei Wärmepumpen, wo der Zusammenhang von Installationskosten zur Erzeugerleistung eher linear verläuft.

Die Erzeugerstrukturen sind meist einfach aufgebaut. So wird ein Rohrleitungsnetz für Wärme anhand der höchsten notwendigen Systemtemperatur errichtet, denn niedrigere Systemtemperaturen können durch das Zumischen von kaltem Rücklaufwasser leicht gesenkt werden. Beispielhaft hierfür ist die Kombination von Radiator- mit Fußbodenheizungen.

Genauso verhält es sich bei Rohrleitungsnetzen für Kälte. Dort ist die niedrigste notwendige Systemtemperatur entscheidend für die zu erzeugende Vorlauftemperatur im Kälteerzeuger. Weniger kalte Systemtemperaturen lassen sich leicht durch das Zumischen

vom warmen Rücklauf anheben. Beispielhaft ist die Zuluftkühlung mit 6 °C und die Kühlung von Medizintechnik mit 20 °C.

### 6.3 Systemtemperaturen in Heizsystemen

Für die thermische Nutzung von Aquiferen ist die benötigte Systemtemperatur zur Temperierung der Heizflächen entscheidend. Der Einsatz von Wärmepumpen zur Anhebung der Quelltemperatur auf die Systemtemperatur der Heizflächen ist mit geringem Temperaturhub effizienter als bei hohem Temperaturhub. Diesen Zusammenhang stellt die Abbildung 35 grafisch dar. Der COP (Coefficient of Performance) gibt an, wie viel Energie eine Wärmepumpe für den Temperaturhub benötigt. Ein hoher COP bedeutet eine geringere Energieaufnahme als ein kleiner COP.

So benötigt ein Heizsystem mit 55 °C Systemtemperatur gut doppelt so viel Antriebsenergie wie eines mit 35 °C. Dadurch wird die Sinnhaftigkeit niedriger Systemtemperaturen in Heizsystemen verdeutlicht.

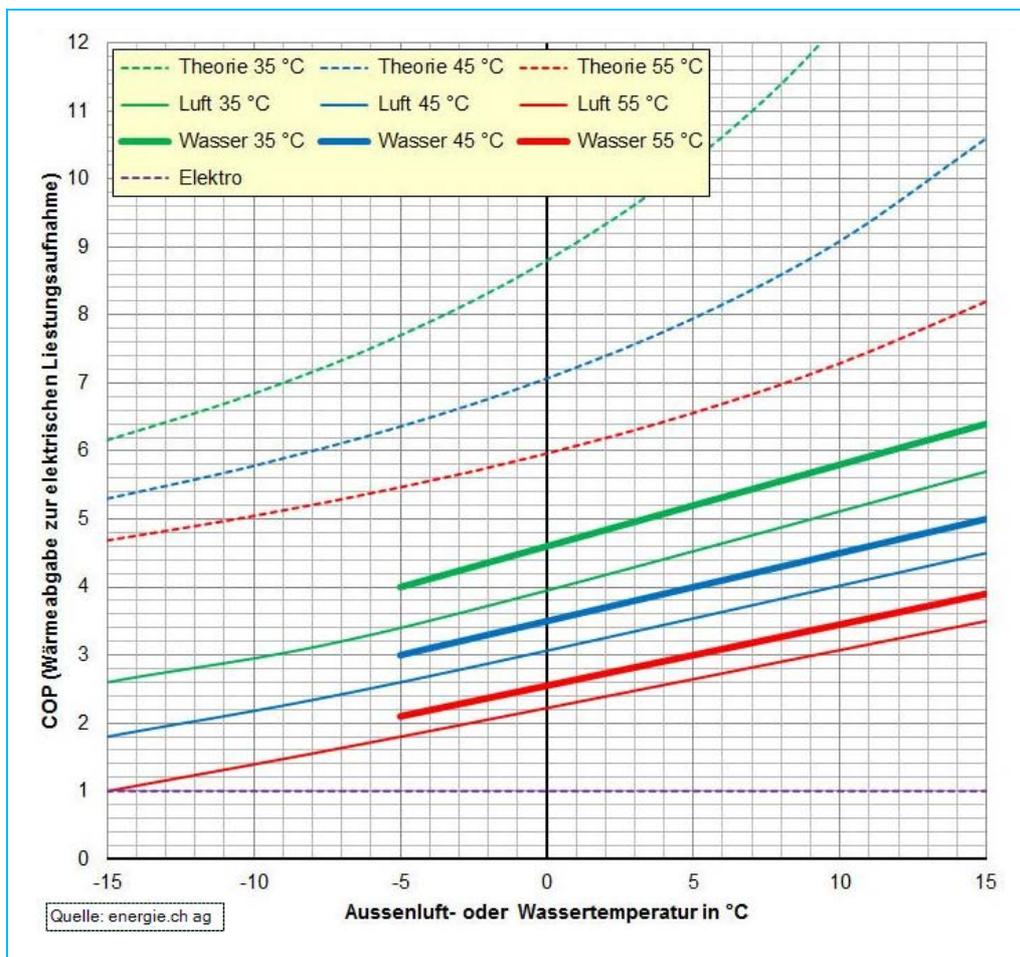


Abbildung 35: Arbeitszahl Wärmepumpe bei verschiedenen Quelltemperaturen

## 6.4 Systemtemperaturen in Kühlsystemen

In Kühlsystemen mit Verdichtern wird die Kälte ähnlich wie bei einem Wärmepumpen-Prozess erzeugt. Das Nutzsystm wird gekühlt und Abwärme abgeführt. Übliche Systemtemperaturen sind:

- ▶ Kältemaschine ca. 5 °C
- ▶ Kühlregister oder Klimagerät ca. 8 bis 12 °C
- ▶ Raumtemperatur ca. 22 °C
- ▶ Temperaturunterschied Kältemaschine zu Raumtemperatur: 17 K

Tiefe Kühltemperaturen um 8 °C sind nur zur Trocknung feuchter Luft mittels Kondensation erforderlich. Die Abwärme aus Kältemaschinen muss abgeführt werden, um die Kälteerzeugung zu ermöglichen. Üblicherweise wird die Abwärme mittels Rückkühlwerken an die Außenluft abgegeben und damit dem System entzogen. Häufig sind in Nord-europa kostengünstige Rückkühlwerke als reine Luftkühler im Einsatz (Abbildung 36).



**Abbildung 36: Trockene Rückkühlwerke**  
(Quellen: links [www.midcarolinaserviceco.com](http://www.midcarolinaserviceco.com), rechts [www.deutsche-thermo.de](http://www.deutsche-thermo.de))

Trockene Rückkühlwerke sind einfache Luftwärmetauscher, die ein flüssiges Medium mit Hilfe von leistungsstarken Ventilatoren abkühlen. Diese funktionieren in der Regel bis 40 °C Lufttemperatur. Bei höheren Lufttemperaturen kann die Abwärme nicht mehr ausreichend abgeführt werden und die Kälteanlage fällt aus.

Die Abbildung 37 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der möglichen Kälteleistung bezogen auf die Rückkühltemperatur. Simultan zu hohen Rückkühltemperaturen wegen hoher Außentemperaturen besteht ein hoher Kühlbedarf, der von der Kältemaschine nicht ausreichend gedeckt werden kann. Erschwerend kommt hinzu, dass Wirkungsgrad und maximal mögliche Kühlleistung mit dem Anlagenalter abnehmen.

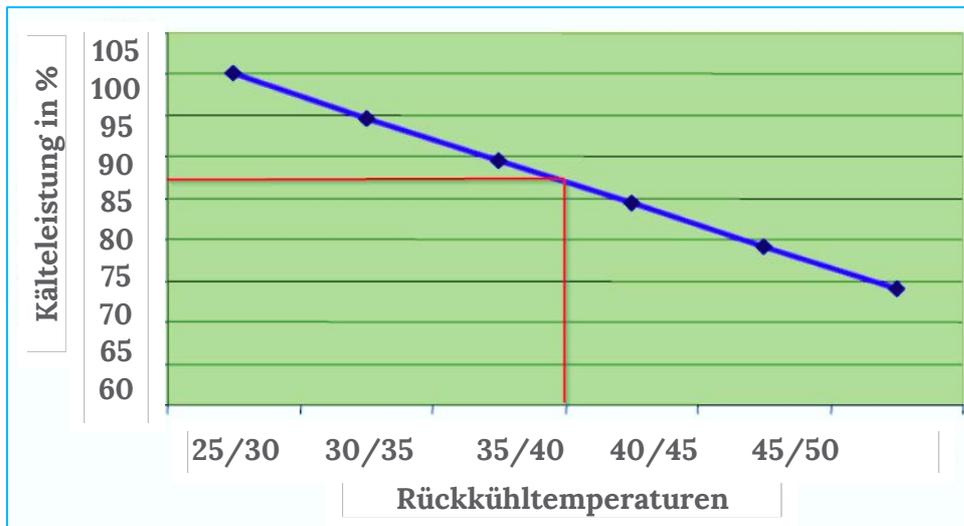


Abbildung 37: Beispielhafter Zusammenhang zwischen Kühlleistung und Rückkühltemperatur (eigene Darstellung)

## 6.5 Relevanz der Systemtemperaturen

### 6.5.1 Heizung

Die Beschreibung der System- und Nutztemperaturen – verallgemeinert für Zwecke zum Aufenthalt von Personen in Gebäuden – zeigt auf, dass möglichst niedrige Systemtemperaturen in Heizsystemen und möglichst hohe Systemtemperaturen in Kühlsystemen die beste Energieeffizienz ermöglichen.

Mittels thermischer Bauteilaktivierung oder Flächentemperierung und einer hohen Dichte an Heizleitungen sind Systemtemperaturen von 28 °C für das Heizen und 16 °C für das Kühlen möglich. Bei schlecht gedämmter Gebäudehülle sind bis zu 10 K höhere Systemtemperaturen notwendig.

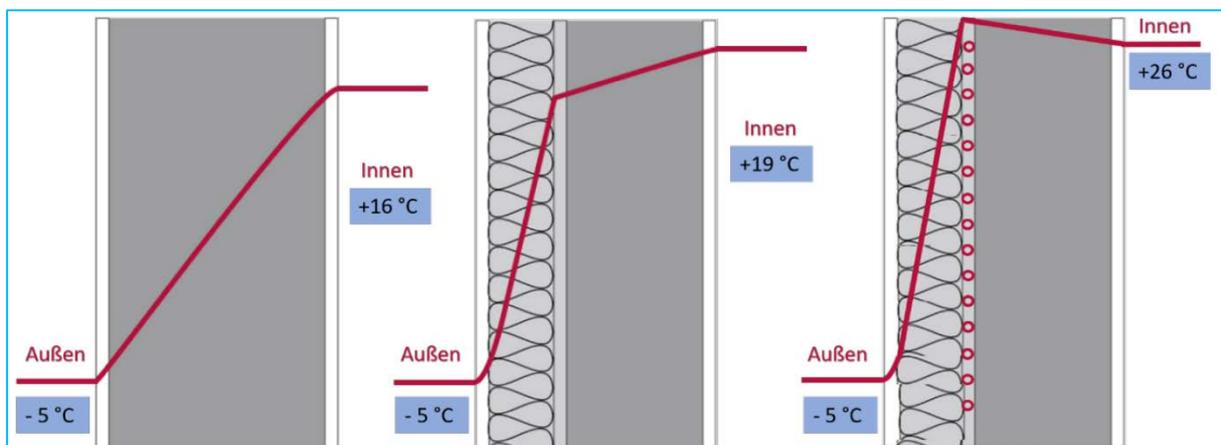
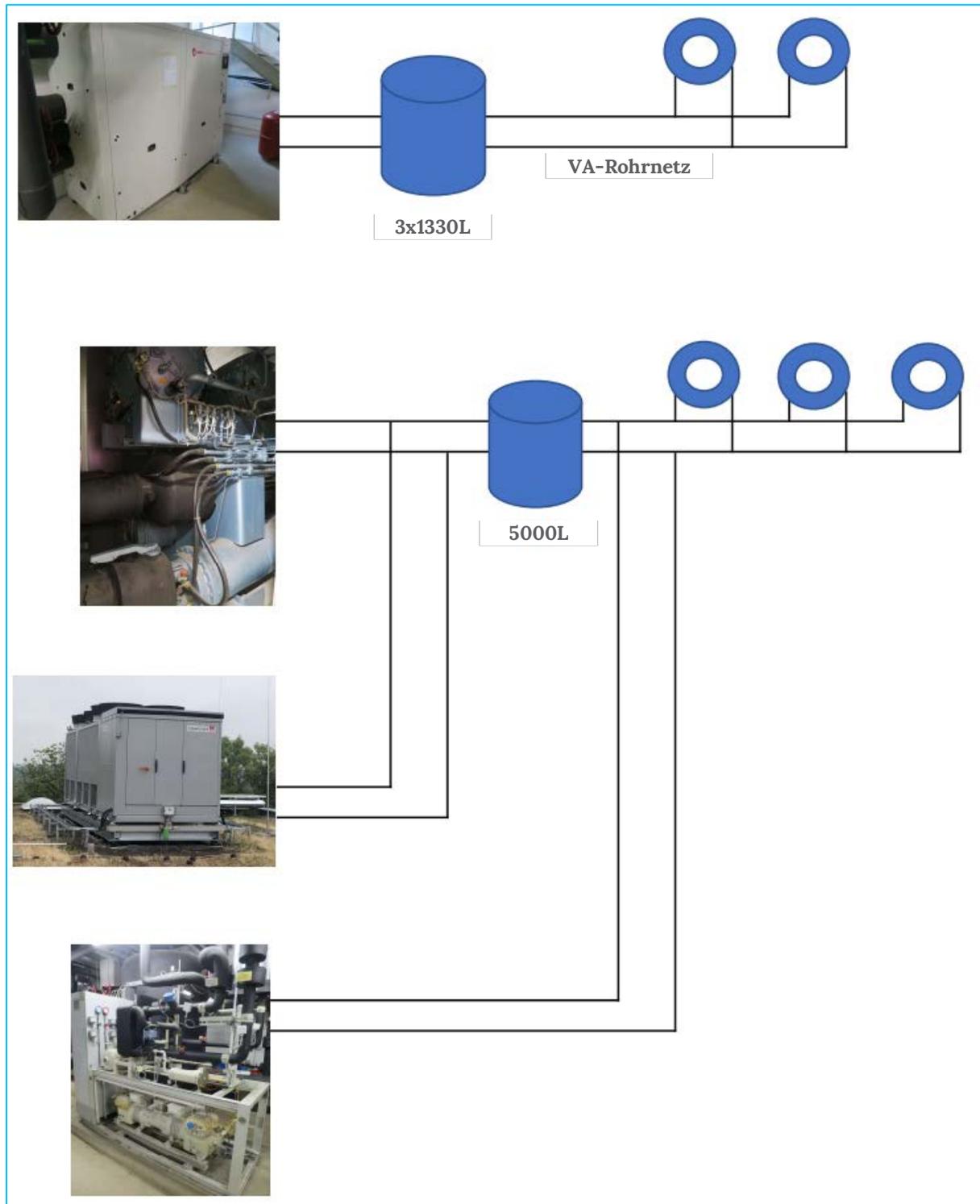


Abbildung 38: Wandaufbau ohne Dämmung (links), Wandaufbau mit Außenwanddämmung (Mitte), Wandaufbau mit Außenwanddämmung und Außenwandtemperierung (rechts)

In einigen Anwendungen ist sogar eine passive thermische Nutzung von Aquiferen möglich. Etwa im Betriebsfall des auf 10 °C ausgekühlten Aquifers und einer Bauteilaktivierung zur Kühlung mit 18 °C. In diesem Anwendungsfall muss nur das Aquiferwasser gepumpt werden. Eine aktive Temperatursenkung ist dafür nicht erforderlich.

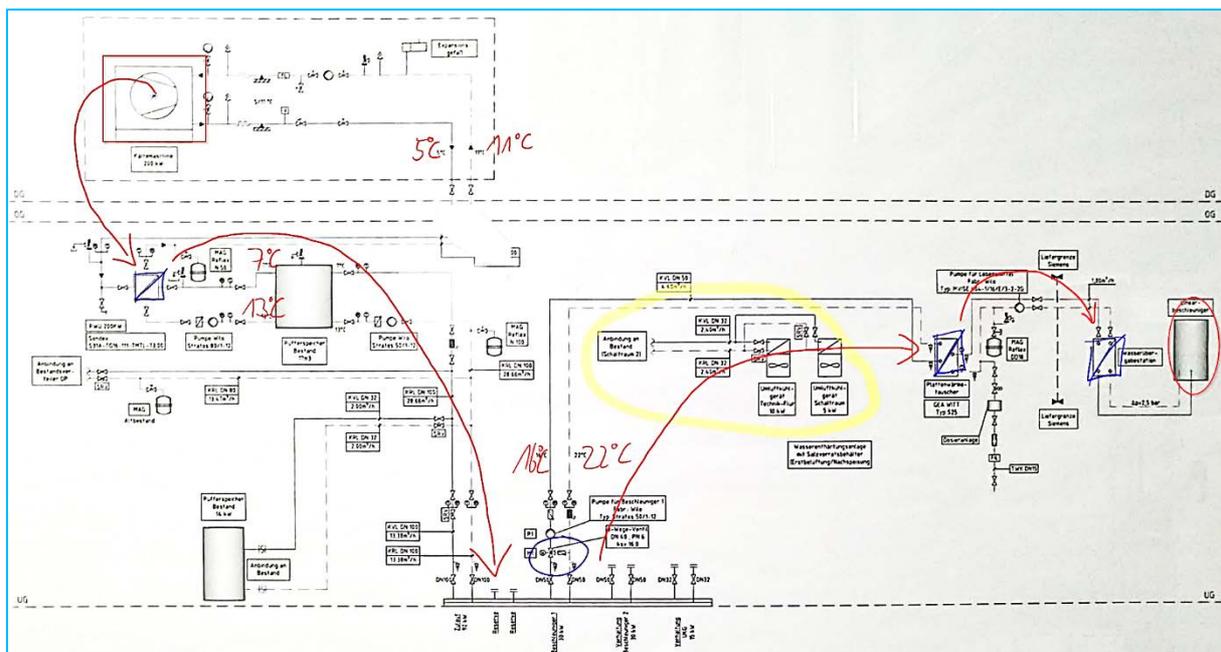
## 6.5.2 Kühltechnik



**Abbildung 39: Beispielhafte Darstellung Rohrleitungsnetz Kälte in einem Gebäude**  
(Quelle: Thomas Büttner, e7 Gruppe, 2021)

Was im Wärme- und Kältenetz gilt, trifft meist auch für die Rohrleitungsnetze im Inneren der Gebäude zu. Es gibt ein Rohrleitungsnetz vom Kälteerzeuger zu den Kälteabnehmern (Abbildung 39).

Temperaturniveaus spielen dort meist keine Rolle für die Verteilnetze meist keine Rolle, da niedrige Systemtemperaturen leicht auf höhere zu mischen sind. In Abbildung 40 ist der Verlauf der Systemtemperaturen über einige Systemabschnitte innerhalb eines Gebäudes einer Bestandsanlage zu sehen. Die erzeugte Kaltwassertemperatur von 5 °C ist „notwendig“, um die geforderte Kühlmitteltemperatur von 24 °C an der Senke einzuhalten. Das Systemdesign mit drei Wärmeüberträgern und einem Mischer schränken die Betriebszeit per freier Kühlung ohne Kältemaschine – rein über kalte Außenluft – sehr stark ein. Eine freie Kühlung ist mit diesem Anlagendesign erst bei Außentemperaturen < 0 °C möglich. Das Beispiel zeigt, dass Systemtemperaturen an der Senke mit > 10 K Temperaturunterschied als getrennte Rohrleitungsnetz auszuführen sind, um die Quelltemperaturen nicht unnötig niedrig zu erzeugen und möglichst passive Quellen, wie Außenluft oder Aquiferwasser nutzen zu können.

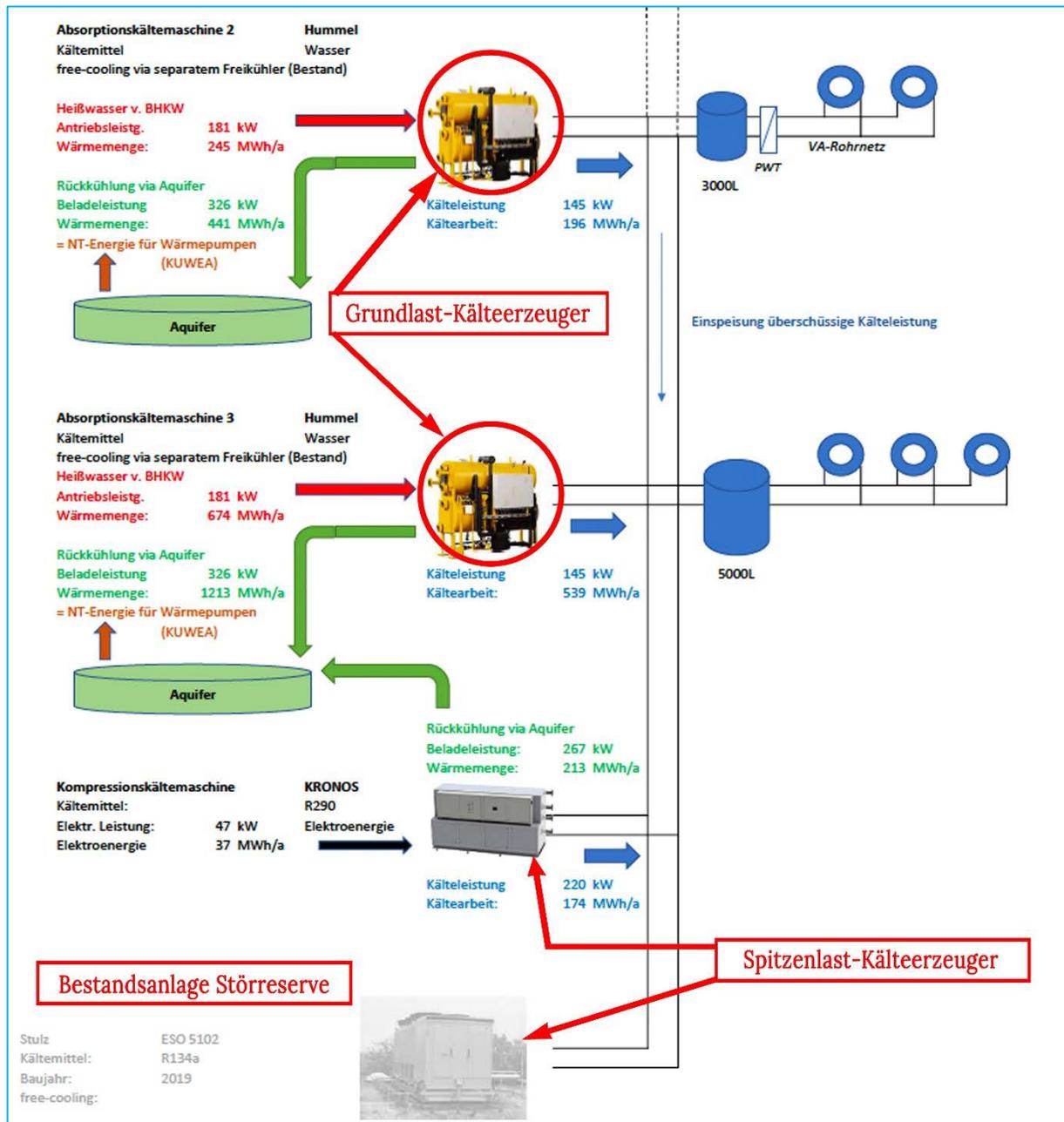


**Abbildung 40: Fotografie eines Anlagenschemas mit Kaltwassertemperaturen von der Quelle zur Senke**  
(Aufnahme: D. Landgraf, im Heizkeller des St. Georg-Klinikums)

## 6.6 Abwärmenutzung und Speicherung

Mit Systemtemperaturen von 10 bis 25 °C kann ein Aquifer Abwärme aufnehmen. Statt eine Kälteanlage mittels Rückkühler zu betreiben und die Abwärme dem System ungenutzt zu entziehen, kann die Abwärme im Aquifer saisonal gespeichert werden. Zusätzlich zur gewonnenen Energie aus der Abwärme arbeitet eine Kältemaschine mit konstanter Rückkühltemperatur von 10 bis 25 °C deutlich effizienter als mit einem Luftrückkühler.

Die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der Kälteanlage wegen zu hoher Außentemperatur sinkt gegen 0 %.



**Abbildung 41: Systemskizze Rückkühlung über Aquifer in Grund- und Spitzenlast (Thomas Büttner e7 Gruppe, 2020)**

Im dargestellten Systemaufbau erfolgt der Antrieb der Absorptionskältemaschinen mit BHKW-Wärme als Grundlastkälte (Abbildung 41). Die Rückkühlung erfolgt über einen Aquifer auf max. 15 °C mit der Arbeitszahl<sup>2</sup> von 7 und eine freie Kühlung im Winter über die vorhandenen trockenen Rückkühler.

<sup>2</sup> Wirkungsgrad einer Kältemaschine, Verhältnis der Kühlenergiemenge zur eingesetzten Energiemenge

Die saisonal eingespeicherte Energie der Abwärme beträgt ca. 5 GWh/a und soll über eine Matrix von Brunnendoubletten gezielt nach den nutzbaren Aquifer-Temperaturen eingespeichert werden. Die Rückgewinnung der saisonal gespeicherten Wärme erfolgt über Wärmepumpen, die als weitere Quelle auf ein wechselwarmes Nahwärmenetz zugreifen können.

## 6.7 Technische Nutzungsvarianten von Aquiferen und Anforderungen an die TGA Planung

Die energetische Nutzung von Aquiferen durch Entnahme und Einleitung des Aquiferwassers kann in zwei Grundvarianten und deren Mischform erfolgen. Die Wassermengen sind dabei ausgeglichen, sodass keine reine Entnahme und/oder Einleitung erfolgt.

1. Energieentzug durch die thermische Nutzung des Aquiferwassers.
2. Energieeintrag durch die thermische Nutzung des Aquiferwassers.
3. Mischform aus 1. und 2.

Um eine langfristige Veränderung des Aquifers zu vermeiden, muss dessen thermische Nutzung im Jahresverlauf ausgeglichen sein.

- ▶ Energiemenge Entnahme = Energiemenge Aufladung!

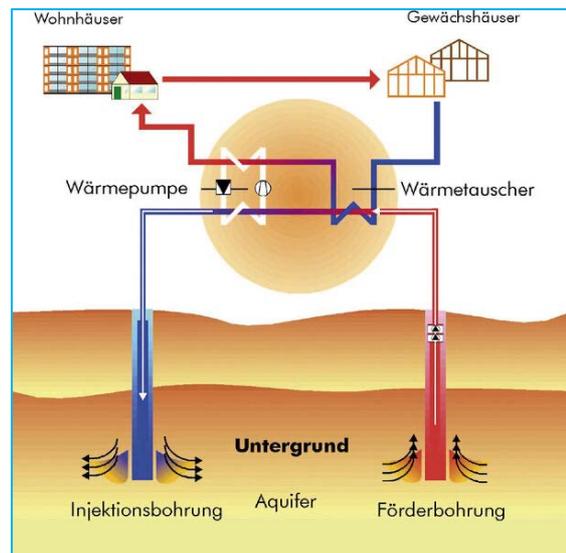
Bei der energetischen Nutzung von Aquiferen ist eine genaue Planung der gesamten Anlage entscheidend für deren Wirtschaftlichkeit. Der Aufwand zur Erhöhung der Nutzwärmetemperatur des Aquiferwassers ist gering zu halten. Für jede aktive Temperaturänderung mittels Wärmepumpe oder Kältemaschine wird Energie benötigt und das senkt den Gesamtwirkungsgrad des Systems Aquifer + Anlagentechnik. Folgende Grundsätze zur Planung sind anzuwenden:

### 6.7.1 Systemtemperaturen

- ▶ Systemtemperaturen möglichst niedrig wählen
- ▶ Abwärmequellen einbeziehen
- ▶ passive Nutzung ohne Wärmepumpe vor aktiver Nutzung mit Wärmepumpe
- ▶ ausgeglichenen Energiehaushalt sicherstellen
- ▶ Energiemengen im System sind zu bilanzieren (z. B. DIN 18599)

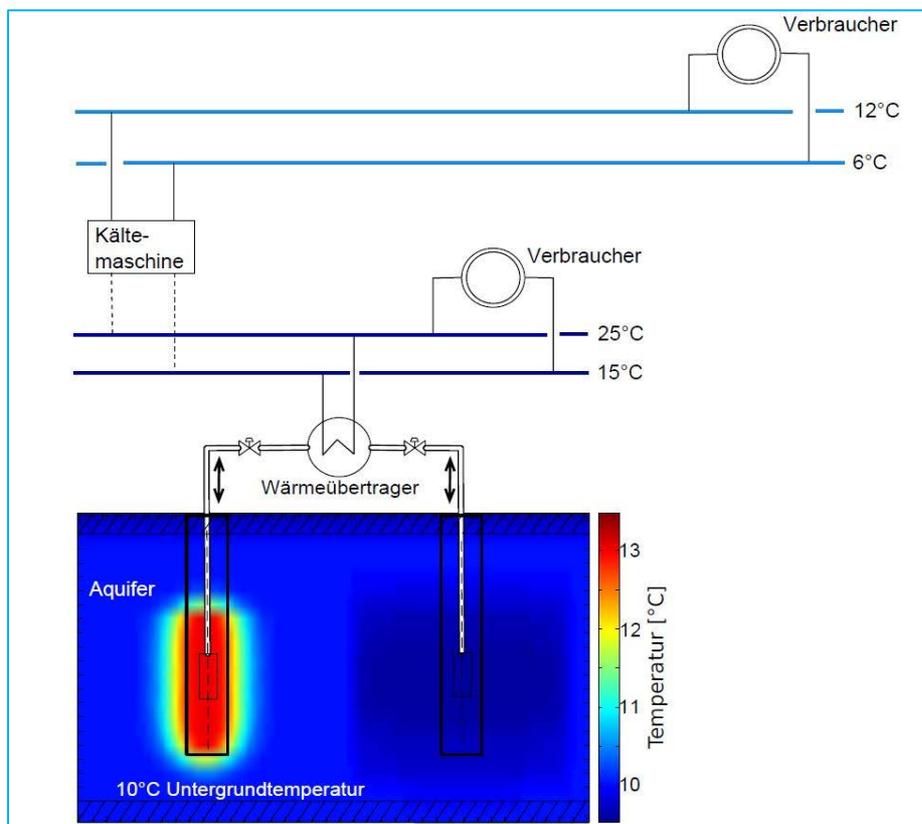
Der einfachste Weg der passiven thermischen Nutzung von Aquiferen ist die passive Vorwärmung – allein mit Wärmetauschern – und einer nachgelagerten aktiven Aquifernutzung mittels Wärmepumpe. Mit dieser Anlagenkonfiguration kann mit dem kleinst-möglichen Energieeinsatz die thermische Aquifernutzung maximiert werden. Diese Anlagenkonstellation setzt aber eine genaue Kenntnis der Wärme- und Kälteabnehmer voraus sowie eine sorgfältige und passgenaue Anlagenplanung ohne große Leistungsreserven.

In Abbildung 42 ist eine mögliche Anlagenkonstellation dargestellt. Dort sind zunächst thermische Nutzungseinheiten seriell anhand der Nutzungstemperaturniveaus verbunden. Diese Konstellation bewirkt, dass besonders niedrige Rücklauftemperaturen im Wärmenetz erzielt werden, die wiederum eine passive thermische Nutzung des Aquifers zur Vortemperierung ermöglicht. Erst nachfolgend wird das Temperaturniveau aktiv mittels Wärmepumpe auf das primäre Nutzniveau angehoben.



**Abbildung 42: Gekoppelte aktive und passive Grundwasserleiternutzung**  
 ([www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/a/aquifer-waermespeicher.html](http://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/a/aquifer-waermespeicher.html))

## 6.7.2 Serielle Nutzung von Temperaturniveaus



**Abbildung 43: Gekoppelte Wärme- und Kältenutzung mit Aquifererweiterung**  
 (Quelle: [www.energienetz-berlin-adlershof.de/wp-content/uploads/2015/11/Grafik\\_Aquifer.jpg](http://www.energienetz-berlin-adlershof.de/wp-content/uploads/2015/11/Grafik_Aquifer.jpg))

### 6.7.3 Serielle Nutzung von Temperaturniveaus

Eine weitere Möglichkeit zur effizienten Aquifernutzung ist die Kopplung zwischen Wärme- und Kältenutzung. Bei der schon weit verbreiteten Anlagenkopplung – z. B. in VRF-Systemen (Variable Refrigerant Flow) – wird der Rückkühler für ungenutzte Abwärme durch einen Aquiferspeicher ersetzt und somit die Anlageneffizienz verbessert und eine Rückgewinnung der Wärme ermöglicht (Abbildung 43).

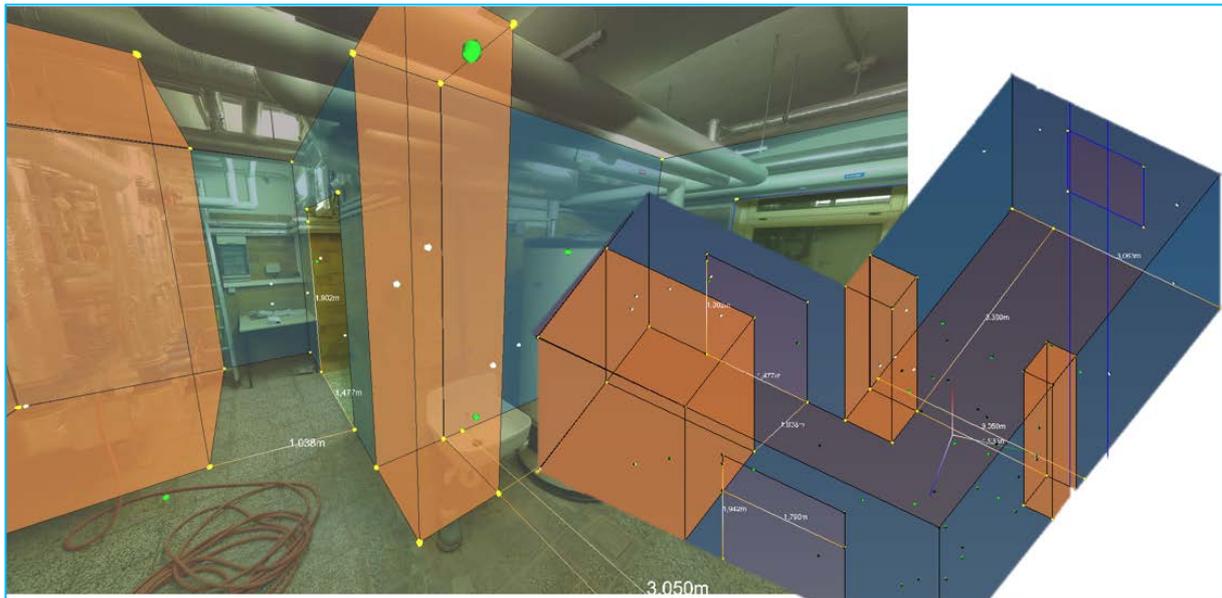
### 6.7.4 Spitzenlastreduktion

Thermische Speicher sind ausreichend groß zu dimensionieren, um Spitzenlasten lokal zu puffern (Abbildung 44). Es gilt, durch angepasste und sinnvolle Planung lokale und nachgelagert zentrale Spitzenlasten bei den Erzeugern zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Eine monolithische Bauweise der thermischen Speicher ist anzustreben, um Speicherverluste gering und die Hydraulik des Systems einfach zu halten. Dabei kommen Bauweisen, wie Kellerschweißung, zum Einsatz.

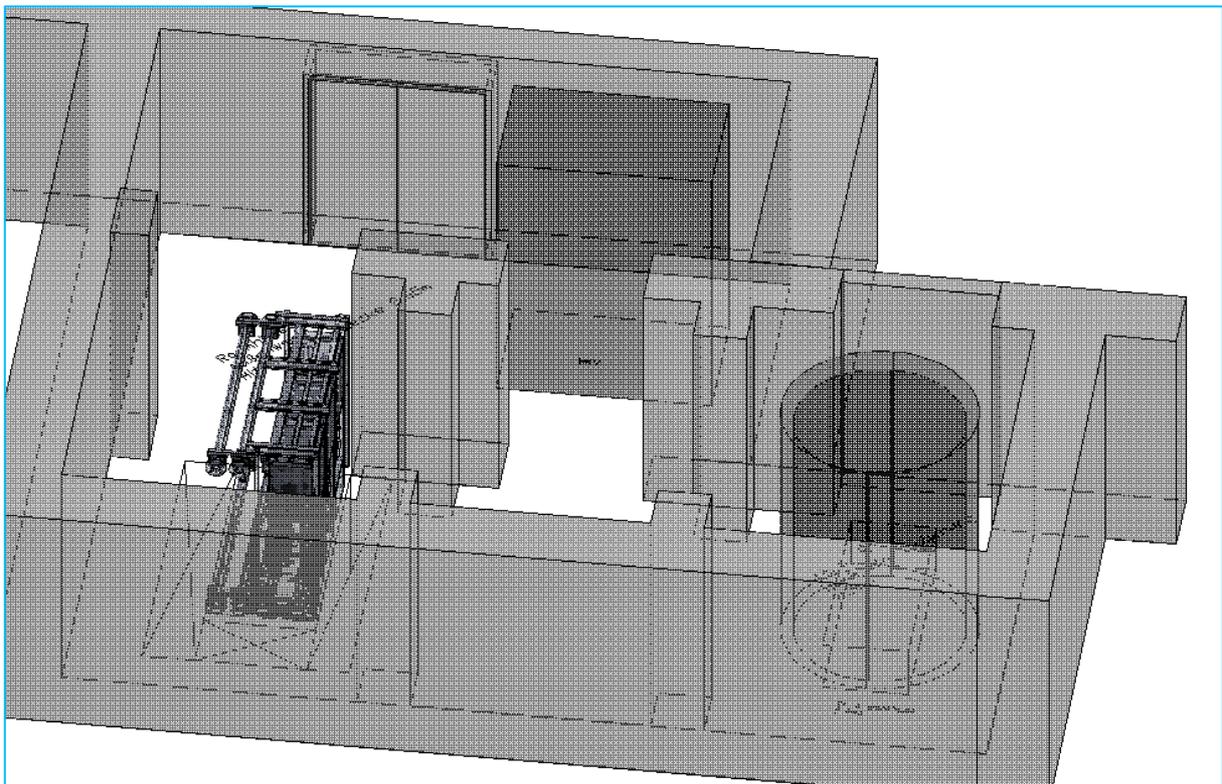


**Abbildung 44: Platz für Pufferspeicher leer (links), mit Bauteilen des Pufferspeichers (Mitte) und fertig montierter Pufferspeicher (rechts)**  
**Fotos: Daniel Landgraf, Klinikum St. Georg**

Diese Bauweise stellt erhöhte Anforderungen an die Planung. Eine Grundlage dafür ist ein genaues Raumaufmaß und die Vermessung der Einbringwege sowie Einbringöffnungen. Mittels 3D-Laserscann können auch komplexe Räume einfach aufgemessen und für die weitere Planung im CAD bereitgestellt werden (Abbildung 45 und Abbildung 46).

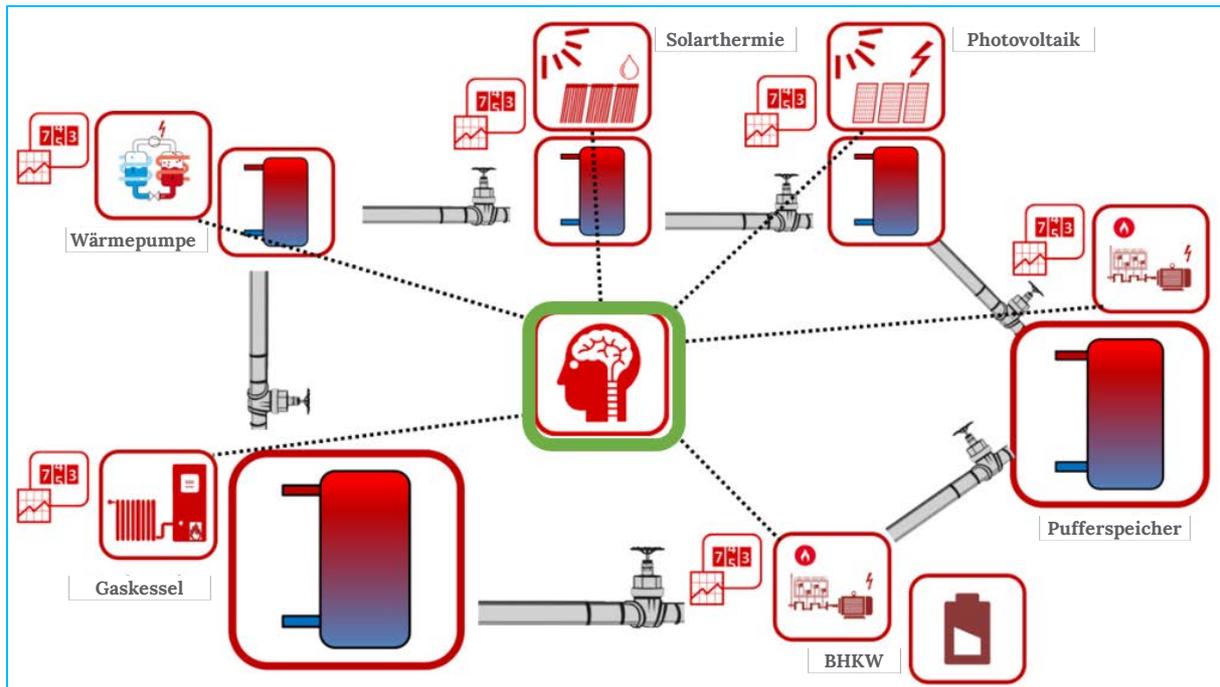


**Abbildung 45: 3D-Laserscan und 3D-Raum im CAD**  
(Foto: D. Landgraf - I pro K Ingenieurgesellschaft mbH / Klinikum St. Georg)



**Abbildung 46: 3D-Aufstellplanung**  
(Quelle: eigene Planung e7 Gruppe / Klinikum St. Georg, 2021)

## 6.7.5 Regelungstechnik



**Abbildung 47: Zentrales Management der Energieverteilung**  
(Grafik: Daniel Landgraf)

An die Regelungstechnik werden erhöhte Anforderungen gestellt. Die Anforderungen ergeben sich aus der gewerkeübergreifenden Regelung durch eine zentrale intelligente Regelung mit einer geplanten Struktur und langen Wirkketten. Häufig werden einfache Regelstrecken eingesetzt, die keine Verkettung mit nachfolgenden oder vorausgehenden Regelstrecken kennen. Folgendes Beispiel zeigt ein einfaches Heizsystem mit einem Raum und einem Wärmeerzeuger:

- a) einfache Regelstrecken:
  1. Raumregler schließt Raumventil des Heizkreises
  2. Druckverlust im Heizkreis steigt an
  3. druckgeregelte Pumpe regelt sich herunter
  4. keine Wärmeabnahme im System, Systemtemperatur erhöht sich
  5. Regler des Wärmeerzeugers schaltet Wärmeerzeuger mangels Wärmeabnahme aus
- b) verkettete Regelstrecken:
  1. Raumregler schließt Raumventil des Heizkreises + Anforderung Heizung ist aus + Pumpe ist aus

Schon in diesem einfachen Beispiel ist zu erkennen, dass die Regelung im Ganzen bei a) funktioniert, aber die Trägheit der beteiligten Massen (Heizungswasser, Rohre, Ventile etc.) die Reaktionsgeschwindigkeit im System reduziert. Der Wärmeerzeuger wird unnötig lang betrieben. Bei komplexeren hydraulischen Netzen wirkt sich dieser Umstand

noch wesentlich stärker aus als im Beispiel a). Im Beispiel b) ist zu erkennen, wie schnell die Wirkung am Wärmeerzeuger einsetzt.

Darum kann eine Regelungstechnik auf Basis von Anforderungssignalen der Verbraucher, zusammen mit vorausschauenden und selbstlernenden Algorithmen – wie zum Beispiel MeteoViva Climate – helfen, die dezentrale Struktur aus Pufferspeichern, Wärmepumpen, Abwärmequellen und erneuerbaren Energiequellen effizient zu managen. Darauf aufbauend erfolgt der Einsatz der zentralen Versorgungstechnik mit Grund- und Spitzenlastzeugern (Abbildung 47).

Ganz entscheidend für eine gut abgestimmte Regelungstechnik ist das angewandte Inbetriebnahme-Management nach VDI 6039. Schon vor der Vergabe der Gewerke muss die Anforderung an eine Gewerkeübergreifende Regelung und deren gemeinsame Inbetriebnahme definiert sein – und konsequent betrieben werden.

Viele der technischen Strukturen bei der Wärme- und Kälteerzeugung entsprechen nicht den aktuell realisierbaren Möglichkeiten. Die Umsetzung dezentraler und energieeffizienter Anlagentechnik von Heiz- und Kühlsystemen ist, sowohl bei Neubauprojekten als auch im Bestandsumbau, durchführbar. Dabei entfalten möglichst niedrige Systemtemperaturen in Heizsystemen und möglichst hohe Systemtemperaturen in Kühlsystemen die beste Energieeffizienz.

Die saisonal ausgeglichene thermische Nutzung von Grundwasserleitern durch Entnahme oder Einleitung des Grundwassers zielt auf einen verlustreduzierten Umgang mit Wärme- und Kältebedarfen sowie einer Reduktion der Spitzenlasten hin.

Die effiziente Grundwasserleiternutzung kann über eine kombinierte passive und aktive Nutzung mit Wärmetauscher und Wärmepumpe oder einer Anlagenkopplung zwischen Wärme- und Kältenutzung realisiert werden.

Zusätzlich kann durch den Einsatz von vorausschauenden und selbstlernenden Algorithmen innerhalb der Regelungstechnik die Wärme- und Kältebereitstellung auf verbraucher-angepasste Bedarfe optimiert werden.

---

## 7 Ermittlung der Gesteungskosten und Bewertung der Effizienz

---

### 7.1 Grundlagen der Wirtschaftlichkeit

Die großflächige Anwendung einer Technologie setzt zum einen ihre Machbarkeit und zum anderen ihre Wirtschaftlichkeit voraus. Im Fall von ATES bedeutet das für Investor:innen, wie z. B. Energieversorger:innen, Kommunen oder Bürgerenergieinitiativen, dass sich die Anlagen in möglichst kurzer Zeit amortisieren sollten und dass die Wärmegestehungskosten möglichst gering sein sollten. Letzteres bedeutet momentan, dass die Gesteungskosten gleich dem oder besser niedriger als der Gaspreis sein sollten.

Leider gibt es bisher sehr wenig Literatur zu Planung und Kosten sowie zur Wirtschaftlichkeit und einheitlichen ökonomischen und ökologischen Leistungskennzahlen von ATES-Anlagen (Schüppler et al. 2019). Aus den bestehenden Praxisbeispielen lassen sich jedoch einige Aussagen ableiten. Typischerweise haben kleinere ATES eine Kapazität von 0,1 bis 0,3 MW und große Anlagen zwischen 5 und 30 MW. Die Anzahl der benötigten Bohrungen und die Pumprate sind ungefähr proportional zur Heiz- und Kühlkapazität und damit zur Größe des Speichers. Grundsätzlich können größere Anlagen jedoch effizienter geplant werden; aus diesem Grund nehmen die spezifischen Kapitalkosten (€/kWh) mit zunehmender Anlagengröße ab. Die Speichereffizienzen zur indirekten Gebäudebeheizung und -kühlung weisen eine große Streuung von 40 bis 85 % auf. Bei der direkten Kühlung dagegen sind Effizienzen von 90 % keine Seltenheit (Fleuchaus et al. 2018). Außerdem zeigte sich, dass Aquiferspeicher am nutzbringendsten für Gebäude mit hohem, konstantem Energiebedarf über das ganze Jahr eingesetzt werden können, wie Bürogebäude, Flughäfen, Universitäten, Einkaufszentren und v. a. Krankenhäuser (Schüppler et al. 2019).

Je nach Quelle werden unterschiedliche Anlagen-Laufzeiten von 25 Jahren bzw. 30 bis 50 Jahren angegeben. Als typische Amortisationszeit gelten 2 bis 10 Jahre, je nach Anlagendesign. Die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Einsparung niederländischer ATES-Systeme liegt bei 0,46 kg / m<sup>3</sup> genutztem Grundwasser. Für kleine Anlagen bedeutet das eine Reduktion des Treibhausgases um ca. 150 t/a, für große Anlagen von bis zu 1.500 t/a. Der weltgrößte Aquiferspeicher in Eindhoven (NL) ermöglicht die Einsparung von über 13.000 t CO<sub>2</sub> im Jahr. Das entspricht dem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von rund 1.300 Einwohnern Deutschlands (Fleuchaus et al. 2018).

Die Vielzahl an erfolgreich implementierten Projekten, v. a. in den Niederlanden und Schweden zeigt, dass Aquiferspeicher wirtschaftlich betrieben werden können. Sie stellen somit eine hervorragende Lösung zum Ausgleich der saisonalen Angebots- und Nachfrageunterschiede in der Wärme- und/oder Kälteversorgung von Gebäuden dar. Dennoch sind ausführliche techno-ökonomische und ökologische Evaluierungen von ATES-Systemen dringend notwendig, um Regierungen und anderen Entscheidungsträgern die posi-

tiven Effekte von Aquiferspeichern zu verdeutlichen. Dabei sollte Wert darauf gelegt werden, die Daten(-Herkunft) transparent zu machen und die angewandten Evaluierungsmethoden ausführlich darzulegen (Schüppler et al. 2019).

An dieser Stelle knüpft das Bündnis smood® - *smart neighborhood* - an. Der Zusammenschluss aus 16 Unternehmen, vier Forschungseinrichtungen und einem Verein in der Region Zentral-Thüringen hat das Ziel, „lebenswerte, effiziente und umweltfreundliche Wohnquartiere“ zu schaffen. Ein Baustein zur Verwirklichung dieses Zieles ist das Verbundprojekt *GeoHeatStorage*. Dabei handelt es sich um einen baulich speziellen, großskaligen, kostengünstigen Aquifer-Wärmespeicher. Ziel des Projektes ist die ganzjährige Wärmeversorgung eines Quartiers aus erneuerbaren Energien bei niedrigsten Wärmegegestehungskosten von weniger als 10 ct/kWh, um wirtschaftlich konkurrenzfähig gegenüber dem Erdgaspreis zu sein (smood 2021).

## 7.2 Berechnung von Wärmegegestehungskosten und Amortisationszeit

Als Maß für die Vorteilhaftigkeit einer Wärmespeicheranlage sind neben der Speichereffizienz die Kosten der entscheidende Faktor. Eine etablierte Kennzahl zum Kostenvergleich verschiedener Technologien zur Wärmeversorgung sind die sogenannten Wärmegegestehungskosten. Diese geben die spezifischen Kosten einer Mega- bzw. Kilowattstunde Wärme an (in €/MWh oder ct/kWh). Dabei wird das Projekt mit den niedrigsten Kosten als das wirtschaftlichste angesehen (sog. Least Cost Ansatz). Im Folgenden werden zwei Varianten der Investitionsrechnung genannt, die bei Projekten im Strom- und Wärmesektor genutzt werden (Konstantin 2017).

Die Berechnung der Wärmegegestehungskosten (WGK) mit der Kapitalwertmethode erfolgt nach folgender Formel (Konstantin 2017):

$$WGK = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^{t=n} \frac{A_t}{q^t}}{\sum_{t=1}^{t=n} \frac{W_h}{q^t}} \quad (2)$$

WGK = Wärmegegestehungskosten in €/MWh

$I_0$  = Investitionsausgaben in €

$A_t$  = Betriebsausgaben des jeweiligen Jahres in €/a

$W_h$  = produzierte Wärmemenge des jeweiligen Jahres

$q$  = Diskontierungsfaktor ( $q = 1+i/100$ )

$i$  = Kalkulatorischer Zinssatz in %/a

$t$  = jeweiliges Betriebsjahr

$n$  = Nutzungsdauer des Projekts

Dabei wird der sogenannte Barwert aller Ausgaben zu den Investitionskosten addiert und die resultierende Summe durch den Barwert der jährlich produzierten Energiemenge geteilt. Das Ergebnis sind die diskontierten durchschnittlichen Wärmegestehungskosten als Mittel über die Lebensdauer der Anlage (Konstantin 2017).

Am häufigsten wird die Annuitätenmethode zur Berechnung von Energiegestehungskosten angewandt. Hierbei werden entweder direkt die durchschnittlichen Jahreskosten (Annuitäten) oder die spezifischen Kosten pro Produkteinheit (ähnlich wie bei der Kapitalwertmethode) verglichen (Konstantin 2017).

Zur Berechnung der Annuität ( $K_{AN}$  in €/a) werden die als konstant angenommenen Betriebsausgaben  $A_0$  (OPEX in €/a) und die mit dem Annuitätsfaktor multiplizierten Investitionsausgaben  $I_0$  (CAPEX in €) addiert (Konstantin 2017):

$$K_{AN} = a_n \cdot I_0 + A_0 = a_n \cdot CAPEX + OPEX \quad (3)$$

„Der Annuitätsfaktor ist der reziproke Wert des Barwertfaktors“ und kann nach folgender Formel berechnet werden (Konstantin 2017).

$$a_n = \frac{1}{\sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{q^t}} = \frac{q^n \cdot (q - 1)}{q^n - 1} \quad (4)$$

Wird anschließend die Annuität  $K_{AN}$  (in €/a) durch die ebenfalls als konstant angenommene Wärmeerzeugung  $W_0$  (in MWh/a) dividiert, ergeben sich die Wärmegestehungskosten in €/MWh (Konstantin 2017):

$$WGK = \frac{a_n \cdot CAPEX + OPEX_0}{W_0} \quad (5)$$

Der Vorteil der Annuitätenmethode ist, dass sie den direkten Vergleich von Projekten mit unterschiedlichen Betriebsdauern ermöglicht (Konstantin 2017).

Eine weitere Möglichkeit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist die Berechnung der Amortisationszeit bzw. Payback time ( $t_{\text{payback}}$ ) als Quotient aus der Differenzinvestition  $I_D$  und der Kosteneinsparung der Anlage gegenüber einer Referenzvariante:

$$t_{\text{payback}} = \frac{I_D}{A_R - A_0} \quad (6)$$

Die Amortisationszeit gibt demnach an, nach welcher Zeit sich das Investitionskapital refinanzieren wird. Zudem kann ein Projekt nur als wirtschaftlich angesehen werden, wenn seine Nutzungsdauer die Amortisationszeit überschreitet, da es sich um eine statische Berechnungsmethode ohne Berücksichtigung der Verzinsung handelt.

Die große Anzahl der ATES-Anlagen in den Vorreiter-Nationen weist darauf hin, dass der Betrieb dieser Anlagen wirtschaftlich ist. Dabei sinken die spezifischen Kapitalkosten einer Kilowattstunde Wärme mit zunehmender Anlagengröße. Besonders effizient ist der Einsatz von Aquiferspeichern für Gebäude mit hohem, konstantem Energiebedarf über das ganze Jahr, wie Bürogebäude, Flughäfen, Universitäten, Einkaufszentren und v. a. Krankenhäuser. Dabei können bis zu 1.500 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr durch den Bau eines ATES gespart werden.

---

## 8 Genehmigungsfähigkeit

---

### 8.1 Rechtsgrundlage in Deutschland und der EU

Zur Unterstützung der verstärkten Implementierung von Aquifer-Wärmespeichern in die Wärmenetze ist nicht nur eine wohlwollende Förderpolitik ausschlaggebend. Es bedarf auch einheitlicher, gesetzlicher Regelungen, um Rechtssicherheit für Anlagenbetreiber und andere Interessengruppen zu gewährleisten. Im Folgenden wird ein Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen der Europäischen Union (EU) gegeben und die Rechtslage in Deutschland näher betrachtet. Alle Angaben beziehen sich auf geothermische Energie und Anlagen im Allgemeinen, da die bisherigen Regelungen keine Unterscheidung verschiedener geothermischer Nutzungsformen vornehmen (Somogyi et al. 2017; Tsagarakis et al. 2020).

Auf Ebene der EU gibt es kein Rechtsdokument, das speziell geothermische Energie zum Gegenstand hat. Die Richtlinie (EU) 2018/2001 (Renewable Energy Directive, RED II) zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen schließt jedoch alle Formen von erneuerbaren Energien mit ein. Dadurch sind die Mitgliedsstaaten der EU aufgefordert, ihre Verwaltungsverfahren bzgl. Genehmigung, Zertifizierung und Zulassung Erneuerbarer-Energien-Technologien zu überarbeiten. Zudem gibt Artikel 23 RED II erstmals explizite Zielvorgaben zur Erhöhung des Beitrags erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteversorgung vor. Artikel 24 RED II verfügt, dass Fernwärme und -kälte zu dieser beitragen sollen und welche Möglichkeiten zur Umsetzung die Mitgliedsstaaten haben. RED II legt außerdem fest, dass allen Involvierten sämtliche relevanten Informationen zugänglich gemacht werden müssen (RICHTLINIE (EU) 2018/2001 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen 2018).

Weitere Richtlinien der EU, die für die Nutzung oberflächennaher geothermischer Energie als relevant betrachtet werden können, sind gemäß (Tsagarakis et al. 2020):

- ▶ Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden,
- ▶ Richtlinie 2012/27/EU zur Energieeffizienz und
- ▶ Richtlinie 2006/118/EG zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung.

Aufgrund eines fehlenden übergeordneten Rechtsrahmens der EU haben einzelne europäische Länder selbst Gesetze, Beschlüsse, Standards und/oder technische Vorschriften erlassen. Dies führt dazu, dass zum jetzigen Zeitpunkt keine EU-einheitliche Definition für die Einteilung geothermischer Systeme existiert (Tsagarakis et al. 2020). Wie bereits in Kapitel 2.2.2.2 ausgeführt, ist in Deutschland die Einteilung geothermischer Systeme nach der Tiefe üblich. Eine Klassifizierung anhand der Temperatur des geothermischen Reservoirs in Hoch- und Niedrig-Enthalpie-Lagerstätten ist jedoch ebenso möglich und üblich (Bauer et al. 2018).

Rechtlich fallen in Deutschland alle geothermischen Anlagen mit Tiefen von bis zu 100 m unter das Wasserhaushaltsgesetz (WHG). Alle tieferen Anlagen unterliegen dem Anwendungsbereich des Bergrechts (Bundesberggesetzes - BBergG) sowie des Geologiedatengesetzes (GeolDG), und müssen beim jeweiligen geologischen Landesamt angemeldet werden (Somogyi et al. 2017). Mit der Umsetzung von RED II in nationales Recht zum 30.06.2021 erfolgte eine Novellierung BBergG. Die Forderung des Bundesverbandes Geothermie (BVG), dass oberflächennahe Geothermie bis 400 m nur dem WHG unterliegen soll, wurde dabei nicht realisiert (Bundesverband Geothermie 2021). Es wurde jedoch ein neuer Paragraph eingefügt, der allgemeine Regelungen zum Verfahren für „Vorhaben im Zusammenhang mit der Gewinnung von Erdwärme“ trifft (Bundesanzeiger Verlag GmbH 2021).

Momentan können sich die Genehmigungsverfahren für geothermische Anlagen von Bundesland zu Bundesland unterscheiden, da jede Landesregierung diesbezüglich eigene Vorschriften erlassen kann. Technische Aspekte sind in der VDI Richtlinie 4640 zusammengestellt. Außerdem sind Regelungen und Empfehlungen zu Temperaturspreizungen und Mindestabständen zu Gebäuden und anderen Geothermieanlagen enthalten (Somogyi et al. 2017). Blatt 3 befasst sich spezifisch mit dem Thema *Thermische Nutzung des Untergrunds / Unterirdische thermische Energiespeicher* und soll im Februar 2022 neu erscheinen. Inhaltlich beschäftigt sich Blatt 3 mit „der Materialauswahl, der Umweltauswirkungen, erforderlicher Genehmigungen und der Systemeinbindung“ (VDI 2021).

Eine Besonderheit des deutschen Rechts im Vergleich zu anderen europäischen Staaten ist, dass bei Anlagen mit einer Größe von über 30 kW Kapazität im Voraus Berechnungen und/oder numerische Simulationen zur Verifizierung des Anlagendesigns erforderlich sind (Somogyi et al. 2017).

Zur Vereinheitlichung des Prozesses und der Voraussetzungen über die nationale Ebene hinaus, braucht es einen Gesetzesrahmen auf EU-Ebene, der folgende Aspekte beinhaltet:

- ▶ eine Definition geothermischer Systeme bzw. Nutzungsformen,
- ▶ ein grundlegendes, unkompliziertes Genehmigungsverfahren,
- ▶ Kriterien für die Genehmigungsfähigkeit von Anlagen,
- ▶ einheitliche technische Standards und Monitoringgrundlagen.

Diese Festlegungen sollten anhand von Forschungsergebnissen und wissenschaftlichen Kriterien getroffen werden. Gleichzeitig sollten die Regelungen Handlungsspielraum zur Adaption der Anlagen an die lokalen (hydro-)geologischen Gegebenheiten lassen (Somogyi et al. 2017; Tsagarakis et al. 2020).

Weitere wichtige Aspekte zur Förderung der Verbreitung von Geothermieanlagen sind neben Informationen und Ausbildung vor allem positive Kommunikationsstrategien. Alle notwendigen Informationen sollten für alle Beteiligten (Investoren, Ingenieurbüros, Kommunen, Wissenschaft usw.) frei zur Verfügung stehen. Darüber hinaus wäre ein einheitliches Trainings- und vor allem Zertifizierungsverfahren für Fachkräfte wünschenswert. Damit könnte die Etablierung EU-weiter, homogener Qualitätsstandards vorangebracht

werden (Tsagarakis et al. 2020). Aktive und frühzeitige Einbeziehung aller Interessengruppen und Aufzeigen ihrer jeweiligen Vorteile kennzeichnet eine positive Kommunikationsstrategie.

## 8.2 Raumwiderstände

Der Betrieb von Aquiferspeichern erfordert die Einrichtung über- und untertägiger Infrastruktureinrichtungen. Hierbei sind einerseits Raumwiderstände zu beachten, die in Form konkurrierender Nutzungsansprüche aus dem Baugesetzbuch (BauGB) und aus dem BBergG hervorgehen. Des Weiteren sind Raumwiderstände infolge gesetzlich privilegierter Schutzgüter zu berücksichtigen, welche im Fall der Grundwassernutzung hauptsächlich durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) geregelt sind. Weitere Bestimmungen bezüglich naturschutzfachlicher Regelungen und Sonderbestimmungen, wie jene des Fischereirechts oder des Strahlenschutzrechts, können hinzutreten (Hesse et al. 2014).

Die Summe aller ausschließenden und einschränkenden Einflussfaktoren, vor allem der Natur- und Wasserschutzzonen, können die Nutzungspotenziale des Untergrunds einschränken. Eine Untergliederung dieser Faktoren in Bereiche, für die eine Nutzung als Untergrundspeicher ‚nicht möglich‘ ist und in solche, für die eine Einzelfallprüfung erforderlich wird, erlaubt jedoch eine differenziertere Betrachtung und Relativierung (Tabelle 7).

**Tabelle 7: Zusammenfassung der derzeit ausschließenden und einschränkenden Einflussfaktoren für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zum Zwecke der Untergrundspeicherung; verändert nach (Hesse et al. 2014).**

Einstufung	Einflussfaktoren
‚nicht möglich‘ (Ausschlüsse)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Heilquellenschutzgebiete</li> <li>▶ Wasserschutzzone I</li> </ul>
‚nur mit Einzelfallprüfung möglich‘ (Restriktion)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Naturschutzgebiete</li> <li>▶ Nationalparke/Nationale Naturmonumente</li> <li>▶ Wasserschutzzonen II und III</li> <li>▶ Überschwemmungsschutzgebiete</li> <li>▶ Biosphärenreservate</li> <li>▶ Landschaftsschutzgebiete</li> <li>▶ Naturparke</li> <li>▶ geschützte Landschaftsbestandteile und Biotope</li> <li>▶ Netz „Natura 2000“</li> <li>▶ bergbauliche Restriktionen</li> </ul>

## 8.3 Genehmigungsverfahren

Da Geothermieanlagen im Allgemeinen unter das WHG und/oder das BBergG fallen, sind die Wasserbehörden und Bergämter der Bundesländer für die Prüfungs- und Genehmigungsverfahren zuständig. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die in den Bundesländern

der IRMD anzuwendenden Rechtsvorschriften, zuständigen Stellen, Pflichten der Vorhabensträger:innen und die erforderlichen Genehmigungen.

**Tabelle 8: Überblick über die in den Bundesländern der IRMD anzuwendenden Rechtsvorschriften, zuständigen Stellen, Pflichten der Vorhabensträger:innen und die erforderlichen Genehmigungen für den Bau und Betrieb von Aquiferspeicher-Anlagen.**

	<b>Sachsen</b>	<b>Sachsen-Anhalt</b>	<b>Thüringen</b>
<b>Rechtsvorschriften unabhängig von der Bohrtiefe</b>	Wasserhaushaltsgesetz (WHG), Sächsisches Wassergesetz (SächsWG), Geologiedatengesetz (GeolDG)	Wasserhaushaltsgesetz (WHG), Wassergesetz für das Land Sachsen-Anhalt (WG LSA), Geologiedatengesetz (GeolDG)	Wasserhaushaltsgesetz (WHG), Thüringer Wassergesetz (ThürWG), Geologiedatengesetz (GeolDG), Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG), Thüringer UVP-Gesetz (ThürUVPG)
<b>Bohrtiefe &gt; 100 m</b>	zusätzlich Bundesberggesetz (BBergG)	zusätzlich Bundesberggesetz (BBergG)	zusätzlich Bundesberggesetz (BBergG), Thüringer Tiefbohrverordnung (ThürBVOT)
<b>zuständige Stelle(n) unabhängig von der Bohrtiefe</b>	untere Wasserbehörde (uWB); Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)	Untere Wasserbehörde (UWB); Landesamt für Geologie und Bergwesen (LAGB)	Untere Wasserbehörde (UWB) ggf. in Beteiligung Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN)
<b>Bohrtiefe &gt; 100 m</b>	zusätzlich Sächsisches Oberbergamt (SOBA)		zusätzlich TLUBN Referat 84 (vormals Landesbergamt)

	Sachsen	Sachsen-Anhalt	Thüringen
<b>Pflichten</b>	Antrag auf Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis (bei uWB);  Bohranzeige (je bei UWB, LfULG und ggf. bei SOBA) und Abschlussdokumentation (je bei UWB und LfULG)	Antrag zur Bohrung/ Erdwärmeanlage: Anzeige der Bohrung (bei UWB); Dokumentation der Bohrung (bei UWB und LAGB)	Anzeige / Antrag zur Errichtung einer Anlage zur Nutzung oberflächennaher Geothermie (bei UWB);  Anzeige des Bohrbeginns und Baufertigstellungsanzeige (je bei UWB und TLUBN)
<b>erforderliche Genehmigung(en)</b>	wasserrechtliche Erlaubnis	wasserrechtliche Erlaubnis	wasserrechtliche Erlaubnis nach Einzelfallentscheidung;  UVP nach Einzelfallentscheidung
<b>Quelle</b>	Grundwasserwärmepumpen: Merkblatt zum Bau und Betrieb (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie 2015)	Leitlinien Qualitätssicherung Bohrungen/ Erdwärmesonden, Anlage 1: Leitlinien Qualitätssicherung Bohrungen/ Erdwärmesonden (Landesamt für Geologie und Bergwesen 2016)	Nutzung oberflächennaher Geothermie - Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung (Thüringer Landesverwaltungsamt 2013)

In allen drei Bundesländern der IRMD existieren Leitfäden, die mehr oder weniger ausführlich die Genehmigungspraxis für geothermische Anlagen im Allgemeinen bzw. speziell Grundwasserwärmepumpen zum Inhalt haben. Aus Tabelle 8 geht hervor, dass sich auch die Abläufe und zuständigen Behörden grundlegend ähneln. Lediglich in der Arbeitshilfe des Thüringer Landesverwaltungsamtes wird darauf hingewiesen, dass bei ‚Erlaubnisverfahren für Grundwasserentnahmen‘ unter bestimmten Voraussetzungen eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchzuführen ist (Thüringer Landesverwaltungsamt 2013). Die UVP-Pflicht ergibt sich aus § 7 i. V. m. Anlage 1 Liste ‚UVP-pflichtige Vorhaben‘ UVPG. Da es sich um ein Bundesgesetz handelt, ist davon auszugehen, dass auch in Sachsen und Sachsen-Anhalt unter bestimmten Voraussetzungen eine UVP-Pflicht besteht.

Die Erarbeitung eines anwender:innenfreundlichen, gemeinschaftlichen Leitfadens mit vereinheitlichter Genehmigungspraxis ist anzustreben und scheint aufgrund der großen Ähnlichkeit der bestehenden Verfahrenswege gut umsetzbar zu sein.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen der Europäischen Union und in Deutschland beziehen sich auf geothermische Energie und Anlagen im Allgemeinen ohne Unterscheidung verschiedener geothermischer Nutzungsformen. Da nicht zwischen unterschiedlichen Formen der Grundwasserbenutzung unterschieden wird, existieren keine speziell auf Aquiferspeicher zugeschnittenen Rechtsvorschriften.

In Deutschland ist bislang die Einteilung geothermischer Systeme nach der Tiefe üblich. Rechtlich fallen in Deutschland alle geothermischen Anlagen mit Tiefen von bis zu 100 m - somit die weitaus meisten Aquiferspeicher - unter das Wasserhaushaltsgesetz (WHG). Technische Aspekte sind in der VDI Richtlinie 4640 zusammengestellt. Bei Anlagen mit einer Kapazität von über 30 kW sind in Deutschland im Voraus Berechnungen und/oder numerische Simulationen erforderlich.

In allen drei Bundesländern der IRMD existieren Leitfäden, die die Genehmigungspraxis für geothermische Anlagen im Allgemeinen bzw. speziell Grundwasserwärmepumpen zum Inhalt haben. Genehmigungsabläufe und zuständige Behörden ähneln sich. In bestimmten Fällen können UVP gefordert werden.

Für die Zukunft bedarf es einheitlicher gesetzlicher Regelungen, um Rechtssicherheit für Anlagenbetreiber und andere Interessengruppen zu gewährleisten.

---

## 9 Vorschlag von Pilot- und Schlüsselprojekten

---

### 9.1 Herangehensweise

Intention dieses Projektteiles ist es, Standorte zu detektieren, an denen zeitnah Aquiferspeicher erfolgreich installiert werden können. Die Wahrscheinlichkeit des Umsetzungserfolges soll dabei groß sein, damit von der Umsetzung eine Signalwirkung ausgehen kann. Dies ist der Fall, wenn eine günstige Gesamtkonstellation zwischen

- ▶ bestehenden Bedarfen,
- ▶ einzuspeichernder Überschusswärme,
- ▶ vorhandenen Aquifer-Speicherpotenzialen und
- ▶ interessierten Akteuren / Investoren

besteht.

Hierfür wurde ein Interessentenfragebogen entwickelt, der die Abfrage wesentlicher Parameter wie

1. allgemeine Angaben, Kontaktdaten usw.
2. Wärmesenke (Verbraucher): Speicherung von Wärme-/Kältemengen, Flächen des Heiz- bzw. Kühlbedarfs, Heiz- bzw. Kühlleistung (kW), Heiz- bzw. Kühlperiode (h), Vorlauftemperatur Heiz- bzw. Kühlvorlauf (°C) etc.
3. Wärmequelle (Erzeuger); Industrieabwärme, saisonale Überschüsse, Standortkoordinaten, Wärmemenge etc.

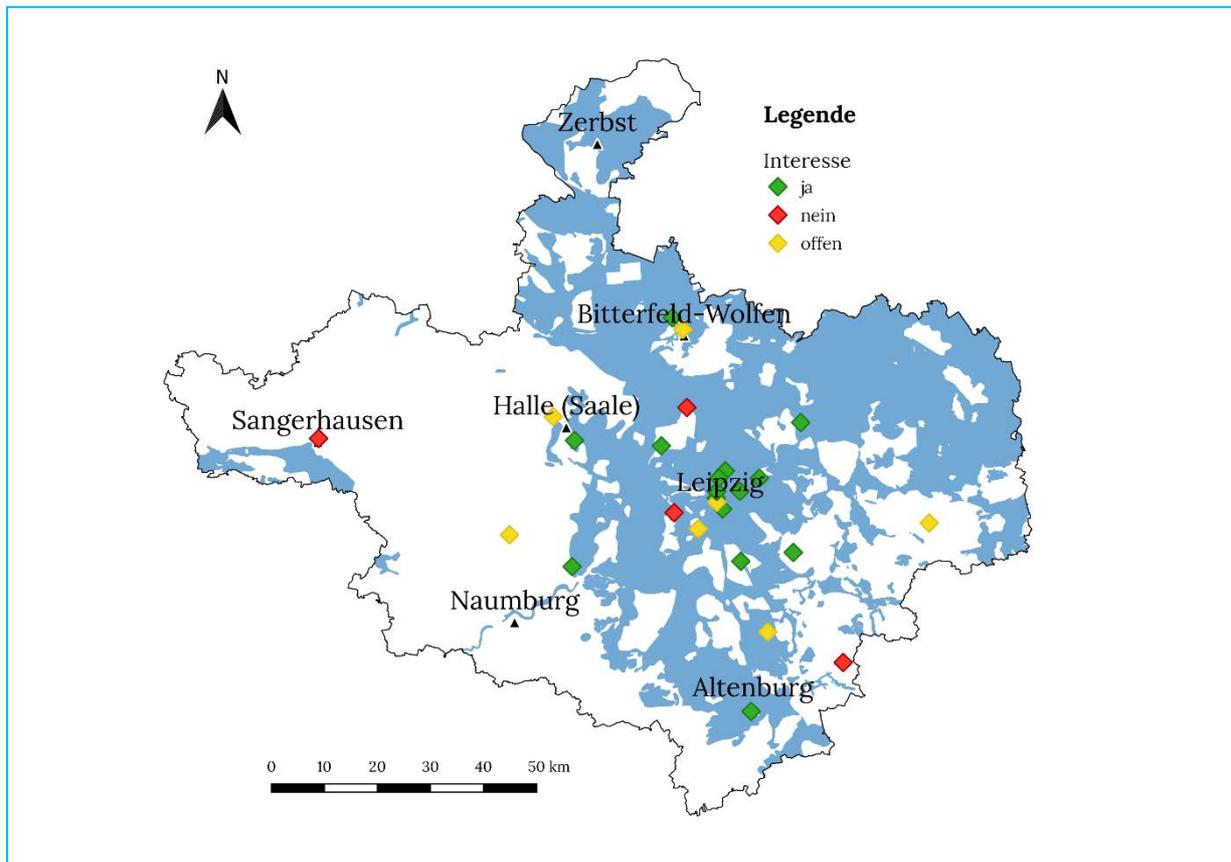
enthält.

Über die Ansprechpartner der Landkreise und Städte der IRMD sowie über eigene Netzwerke des Autorenkollektivs führte eine intensive Recherche zur Findung einer Reihe potenzieller Interessenten, mit denen Interviews geführt wurden. Die Ergebnisse waren dann mit der Verbreitung der Aquifere abzugleichen.

### 9.2 Ergebnisse

Nach der Recherche interessierter Ansprechpartner in ggf. geeigneten Betrieben und Einrichtungen erfolgte die Auswahl vor allem nach der größtmöglichen Vielfalt und Verschiedenheit energetischer Systeme. Ein zweites Kriterium war der Bedarf an einer möglichen Doppelnutzung der Aquifere. Darunter wird verstanden, dass der Aquifer im Sommer Wärme aufnimmt und gleichzeitig Kühlung bereitstellt, die eingelagerte Energie dann im Winter als deutlich bessere Wärmequelle (gegenüber Erde oder Luft) den Wärmepumpen-Heizsystemen zur Verfügung gestellt wird.

Es konnte für diese erste stichprobenartige Erhebung ein beachtliches Ergebnis erzielt werden. Von 26 recherchierten Standorten bekundeten 15 Interesse, bei 4 stieß ein Aquiferspeichervorhaben auf Ablehnung und bei weiteren 7 steht eine Entscheidung noch aus. Abbildung 48 zeigt die räumliche Verbreitung.



**Abbildung 48: Räumliche Verteilung des Feedbacks zur Anfrage von Aquiferspeicherungen am Standort**

Positive Rückmeldungen erfolgten von Standorten aus den Gemeinden

- |                             |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| ▶ Weißenfels                | ▶ Großpörsna OT Störmtal (2x) |
| ▶ Altenburg                 | ▶ Taucha                      |
| ▶ Bitterfeld OT Wolfen (2x) | ▶ Köhra                       |
| ▶ Schkeuditz                | ▶ Halle                       |
| ▶ Eilenburg                 | ▶ Leipzig (5x)                |

Aus Gründen des Datenschutzes werden die Inhalte der Interessentenfragebögen hier nicht veröffentlicht. Nachfolgend aufgeführte Beschreibungen unterstreichen jedoch die Interessenslage und die jeweiligen Nutzbarkeitspotenziale der Aquiferspeicherung für eine Reihe von Pilotprojekten:

- ▶ Der prominente Leipziger Zoologische Garten ist für eine Aquiferspeicherung sehr gut geeignet, da die weitgehend abgeschlossenen Welten im Sommer massiv gekühlt und im Winter niedertemperaturig geheizt werden müssen. Der Doppelnutzen dürfte wesentliche Kostenvorteile bewirken, die im Anschluss an die Studie dringend tiefer betrachtet werden sollten. Hier können die drei quartären Grundwasserleiterkomplexe 1.1, 1.5 und 1.8 genutzt werden.
- ▶ Die Stadtwerke Halle interessieren sich für die Optimierung Ihrer Wärmeversorgung zur Sicherung der Zukunftsfähigkeit im Sinne einer guten Versorgung

ihrer Kundschaft. Hierfür könnte der quartäre Grundwasserleiterkomplex B/1.5 zur Speicherung thermischer Energie genutzt werden.

- ▶ Die Abwärmenutzung aus der Verstromung von Deponiegasen und die Entkopplung von Wärmeangebot und Wärmebedarf von Nutzern im Umfeld ist das Untersuchungsfeld in der Altdeponie Seehausen und der aktiven Zentraldeponie in Cröbern. Hier stehen GWLK 4/5 und 6 im Untergrund an; aufgrund der Nähe zum Abbaugbiet ist eine Detailbetrachtung („Lupe“) erforderlich.
- ▶ Ein sehr interessantes Projekt könnte in der Stadt Taucha ermöglicht werden, wo Abwärme aus dem Kaufland-Supermarkt in einem Neubauquartier für Wohnungsbau und Kindergarten genutzt würde. Hier wird die saisonale Speicherung von sommerlicher Abwärme aus bisher nicht nutzbarer Abwärme zur zukunftssicheren Versorgung der Abnehmer deutlich. Im Untergrund kann hier der quartäre Grundwasserleiterkomplex B/1.5 erschlossen werden.
- ▶ Wasserstoff gilt heute als der Energieträger der Zukunft schlechthin für hoch exergetische Anwendungen. Die Herstellung von Wasserstoff geht mit einem erheblichen Anteil von Abwärme einher. Ein typischer Elektrolyseur arbeitet mit 70 % Wirkungsgrad und die nötige Druckerhöhung benötigt noch einmal 10 %, was 40 % Abwärme bei der Wasserstoffproduktion bedeutet – und das aus heutiger Sicht in weite Zeiten. Der neu geplante Wind- und Solarpark zwischen Weißenfels, Merseburg und Bad Lauchstädt bietet dafür beeindruckendes Potenzial, mit dieser Lösung aus der fossilen Wärmeversorgung auszustei-gen. Die Grundwasserleiterkomplexe 1.1 und 1.5 befinden sich in unmittelbarer Nähe des Standortes. Eine detaillierte Prüfung ist hier erforderlich.
- ▶ Der Industriebetrieb SIAG stellt in Leipzig Segmente für Türme von Windkraftanlagen her. Hier ist nicht nur die wirtschaftliche Verbesserung in der Energieversorgung, sondern auch die umweltfreundlichere Produktion ein Grund, sich der Aquiferspeicherpotenziale zu bedienen. Vor allem Abwärme aus den Lackierkabinen kann genutzt werden und mithilfe des quartären GWLK B/1.5 und des tertiären GWLK 4/5 gespeichert werden.
- ▶ Ein aus verschiedener Hinsicht besonderes Objekt ist die Universitätsklinik Leipzig. Neben der Tatsache, dass für größere Pufferspeicher in der sehr dichten Bebauung kein Platz ist und die unterirdischen Aquifere schon deshalb besondere Chancen bieten, haben sich in den Gesprächen auch die deutlich effektivere Kühlung anstelle der bisherigen Luftkühlsysteme herausgestellt. Der Extremfall zeigt den Unterschied: Wenn im Hochsommer die Luftkühlsysteme auch bei 30 °C Außentemperatur ihre Arbeit verrichten müssen, kann der 10-grädige Aquifer um den Faktor 14 verschiedene Kühlprozesse effektiver erledigen. Zur Systemrelevanz gehört hier auch die Besorgnis, dass es durch die Klimaschwankungen zu höheren sommerlichen Außentemperaturen kommen kann. Die meisten Luftkühlsysteme können bei über 40 °C nicht mehr arbeiten. Die angeschlossenen Kühlmaschinen fallen aufgrund der Hochtemperaturstörung aus, was systemrelevante Komponenten des Klinikums wie die Server oder die OP-Klimatisierung in Gefahr bringt. Die Speicherkapazitäten der

Aquifere unter Leipzig sind in der Regel 500 bis 1000mal größer als die größten künstlich hergestellten Pufferspeicher in Deutschland. Das Platzproblem dürfte in vielen Innenstädten eine Chance für die Aquifernutzung bieten. Dabei kann Leipzig das Potenzial von großflächigen Grundwasserleiterkomplexen des Quartärs sowie des Tertiärs im südlichen Teil der Stadt sinnvoll nutzen.

- ▶ Die Ergebnisse der Nutzung eines saisonalen Speichers in einem Obst- und Gemüse-verarbeitenden Betrieb in Köhra kann modellhaft in vielen ähnlichen Betrieben Aufmerksamkeit erwecken, da hier interessante wirtschaftliche Wettbewerbsvorteile entstehen. Für die Nutzung des GWLK 1.5 ist hier ein Abgleich erforderlich, ob hier im Trinkwasserschutzgebiet saisonal gespeichert werden kann, wenn zur Trinkwassergewinnung ein anderer Aquifer genutzt wird.
- ▶ Auch der denkmalgeschützte Gebäudekomplex des berühmten Lindenau-Museums Altenburg könnte möglicherweise mit geogenen Wärme- und Kältespeichern wirtschaftlich versorgt werden. Ob der tertiäre Grundwasserleiterkomplex 4/5 vor Ort tatsächlich genügende Ausprägung aufweist, ist im Rahmen der Machbarkeitsstudie zu prüfen. Alternativ können andere innovative Lösungen, wie beispielsweise Geothermiefelder auf Basis neuartiger Ring-Rohr-Sonden hier genutzt werden.
- ▶ Die sehr großen Schwankungen der Wärmeversorgung sind in der Geschäftstätigkeit der Leipziger Messe eine Besonderheit. Bei winterlichen Veranstaltungen werden 15 MW gebraucht, um ohne Veranstaltung nur die Grundlasten zu bedienen. Zu prüfen, ob Aquifer-Speicherpotenziale besonders in der betriebsarmen Zeit die Spitzenlasten unterstützen können und damit die Effektivität des Gesamtsystems zu verbessern helfen, ist auch hier eine spannende wirtschaftliche Option auf dem Weg zu einer CO<sub>2</sub>-freien Bewirtschaftung.

Weitere, generell interessierte potenzielle Interessenten wollen das Ergebnis der Studie und Informationen über konkrete Förderbedingungen abwarten. Insgesamt kann für ein bislang weitgehend wenig bekanntes Verfahren ein steigendes Interesse registriert werden.

### 9.3 Schlüsselprojekt St. Georg Klinikum

Unter ‚Schlüsselprojekt‘ wird hier ein Projekt verstanden, von dem aufgrund besonderer Eignung, einer Dringlichkeit und einem zu erwartenden Nutzen ein besonderes Signal ausgehen könnte und der Nutzung der Aquiferspeicherpotenziale in der IRMD insgesamt einen Schub verleihen könnte.

Von den Autoren wurde dafür das Klinikum St. Georg, das älteste und nach dem Universitätsklinikum das zweitgrößte Krankenhaus Leipzigs ausgewählt.



Abbildung 49: Ansicht des St. Georg Klinikums (Foto: D. Landgraf)

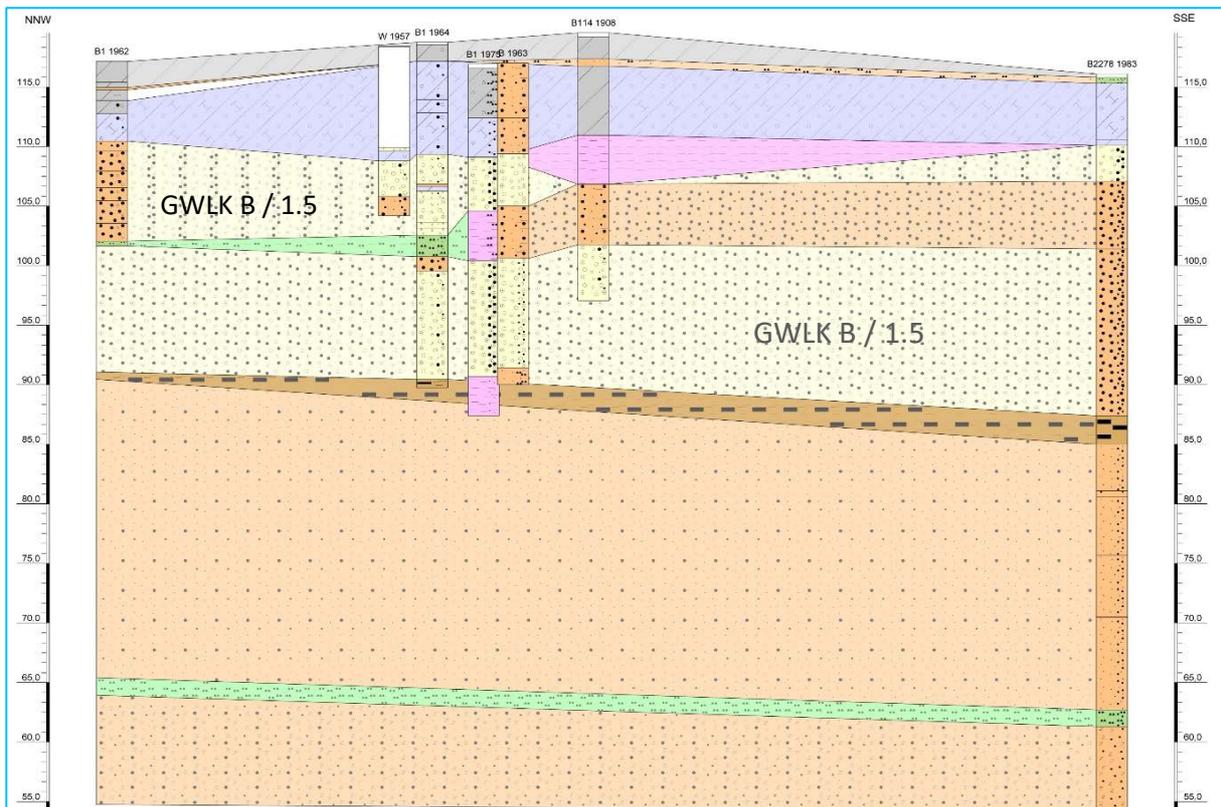


Abbildung 50: Geologische Situation im Bereich des St. Georg Krankenhauses mit einem gut ausgebildeten Grundwasserleiterkomplex (GWLK) B / 1.5

Dieser weist in seinem unteren Teil bis zu 15 m Mächtigkeit auf; der obere Teil erscheint abgespalten. Nähere Untersuchungen im Rahmen der Machbarkeitsstudie könnten klären, ob es sich um eine Aufspaltung handelt oder ob nur eine bindige Linse (grüne Darstellung) in einem insgesamt homogener ausgebildeten GWLK eingelagert ist.

Die Wärmeversorgungsanlage und das Wärmeverteilnetz des Klinikums St. Georg Leipzig werden aktuell und künftig zu einem multivalentem Energieverteilnetz umgebaut. Damit sollen jährlich über 3.000 t CO<sub>2</sub> eingespart werden.

Die Behandlungsschwerpunkte in den Häusern 8 und 4 sowie 20 und 21 sind mit Kältetechnik ausgerüstet. Diese Kältetechnik dient der Kühlung von Medizintechnik und zur Raumklimatisierung von Operationssälen, Intensivstationen, dem Brandverletztenzentrum und Patientenzimmern.

Dem Stand der Technik entsprechend, werden die Kältemaschinen über Luftkühler rückgekühlt und elektrisch angetrieben. Eine Abwärme von ca. 5 GWh geht dabei systembedingt verloren.

Die Nutzung des gut ausgebildeten Grundwasserleiterkomplexes GWLK B/1.5 als Aquiferspeicher (Abbildung 50) stellt eine innovative Option dar und ist hier beispielhaft für die erforderliche Minderung der Treibhausgasemissionen durch künftige dezentrale Wärmeversorgungssysteme.

Der technologische Lösungsansatz sieht vor, in einem ersten Schritt die Kältemaschinen nicht mehr von den Luftkühlern rückkühlen zu lassen, sondern über mehrere Brunnen-doubletten des GWLK unter dem Klinikum. Die Rückkühler dienen nur noch zur freien Kühlung. Der Wirkungsgrad der Kältemaschinen erhöht sich auf bis zu 7. Die Ausfallwahrscheinlichkeit wegen zu hoher Außentemperaturen sinkt damit gegen null.

Die im Aquifer gespeicherte sommerliche Abwärme wird passiv zur Luftvorwärmung der raumlufttechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) im Winter genutzt. Damit sinkt der Energiebedarf für die Erwärmung der RLT-Außenluft.

In einem zweiten Schritt werden die Rohrleitungsnetze in den Gebäuden entsprechend der Systemtemperaturen getrennt. Zusätzlich zu Schritt 1 kann die Medizintechnik nun passiv über das Aquifer gekühlt werden.

Eine im Rahmen dieser Studie erstmalig stichprobenhaft durchgeführte Bedarfs- und Interessentenerhebung führt zu einem zahlenmäßig beachtlichen Ergebnis und dokumentiert ein gestiegenes Bewusstsein der Akteure in Betrieben und Einrichtungen hinsichtlich einer grünen Wärmeversorgung und der Nutzung eigener Potenziale. Die weite Verbreitung der Grundwasserkomplexe ermöglicht im Abgleich mit diesen Standorten eine reale Umsetzungsmöglichkeit für ATES.

Neben den kurz vorgestellten möglichen Pilotprojekten, deren Zahl sich vergrößern wird, wurde das Klinikum St. Georg als ein mögliches ‚Schlüsselprojekt‘ ausgewählt. Die Rückkühlung der Kältemaschinen kann über den hier ausgebildeten GWLK B/1.5 erfolgen. Von einer Aquiferspeicherung am Standort St. Georg versprechen sich die Autoren eine Signalwirkung hinsichtlich einer künftigen weiten Verbreitung dieser Technologie.

---

## 10 Ergebnisse und Ausblick

---

### 10.1 Ergebnisse

Hervorzuheben ist als das wesentliche Ergebnis dieser Studie ein enorm großes, auch im deutschlandweiten Vergleich bedeutendes, Potenzial an verfügbaren, für die Einspeicherung von Wärme oder Kälte geeigneten, Grundwasserleiterkomplexen mit Mächtigkeiten > 5 m. Dieses Potenzial konnte mit dem Kartenwerk (siehe BAND 2) erstmals in seiner Gesamtheit konstruiert und sichtbar gemacht werden.

Die weite Verbreitung mit einem Flächenanteil von etwa 40 % und eine teilweise Überdeckung mit mehreren Grundwasserleiterkomplexen eröffnen die Möglichkeiten weitflächiger Anwendung saisonaler geogener Wärmespeicherung in der IRMD wie auch lokal in mehreren übereinanderliegenden Stockwerken.

Angesichts einer intensiven geologischen Prospektion auf Braunkohle in der DDR kann die Region des tertiären Weißelsterbeckens als eine der am besten erkundeten im Weltmaßstab gezählt werden. Mit dieser Datengrundlage können die Ergebnisse – unter Berücksichtigung der Defizite in Abschnitt 10.2 – als belastbar für eine erste Bewertung dahingehend genutzt werden, ob an einem beliebigen Standort der IRMD nutzbare Aquifere vorliegen oder nicht.

Die Ergebnisse der Studie zeigen zudem, dass die Einspeicherung von Wärme oder Kälte einen wichtigen Beitrag zum Versorgungsmix einer dekarbonisierten Wärmeversorgung in der IRMD leisten muss.

Angesichts

- ▶ der beschriebenen Potenziale erschließbarer Grundwasserleiter,
- ▶ eines zunehmenden Bedarfes alternativer Wärme- und Kälteversorgungen,
- ▶ der technischen und ökologischen Realisierbarkeit und
- ▶ einer grundsätzlichen Genehmigungsfähigkeit

empfehlen die Autoren eine beschleunigte Überführung in die Praxis.

Die Ergebnisse der Studie sollen Investoren und Gemeinden wie auch Genehmigungsbehörden an als geeignet identifizierten Standorten zur Grundlage dienen, um Projekte der saisonalen geogenen Wärme- bzw. Kältespeicherung zu initiieren. In Kapitel 10.3 wird hierfür eine Checkliste zur Verfügung gestellt.

Gegenwärtig existiert noch keine Genehmigungspraxis für Aquiferspeichernutzungen in der IRMD. Für die zuständigen Behörden stehen noch keine Handlungsanleitungen und deshalb keine verbindlichen Bewertungsmaßstäbe zur Verfügung.

## 10.2 Defizite und Fortführungsbedarf

### Defizite und Einschränkungen

- ▶ Deutliche Defizite treten im Zusammenhang mit der differenzierten Verbreitung der einzelnen Grundwasserleiter bei der Konstruktion für den Atlas auf. Die Zuordnung der kartierten Flächen zu einem Grundwasserleiter ist aufgrund von teils starken hydraulischen Verbindungen, Aufspaltungen und lokalen inselartigen Vorkommen untereinander nicht immer exakt möglich. Die Darstellung einzelner Grundwasserleiter deutet auf eine Trennbarkeit der verschiedenen Schichten hin, die in der Realität einer komplizierteren geologischen Architektur oft so nicht gegeben ist. Allein durch die Verbindung von Schichten zwischen zwei Bohrungen können schon Fehlinterpretationen in Primärdokumenten entstanden sein, die zu Fehlern in der stratigraphischen Zuordnung zu Verbreitungsflächen geführt haben könnten.
- ▶ Ebenso können hier nicht dargestellte Grundwasserleiter lokale Bedeutungen durch nicht flächendeckende Mächtigkeiten > 5 m haben.
- ▶ Während die tertiären Grundwasserleiterkomplexe überwiegend wassererfüllt sind, meist gespannte Grundwasserverhältnisse aufweisen, sind die quartären Komplexe nur teilerfüllt; nach Einschätzung der Autoren meist zu mehr als der Hälfte ihrer Mächtigkeit. Auch unterliegen die quartären Komplexe einer stärkeren anthropogenen Beeinflussung hinsichtlich ihres Chemismus. Dies muss im Rahmen von Standortexperten berücksichtigt werden.
- ▶ Die mikrobiologischen Untersuchungen sind zunächst nur punktueller Natur und liefern erste Hinweise auf die in dieser Hinsicht noch belastbarer zu gestaltende Aussage, dass eine Wärmeeinspeicherung wahrscheinlich keine signifikanten ökologischen Schädigungen hinsichtlich der Biozöosen oder des Grundwasserleiters eintreten lassen werden.
- ▶ Nicht behandelt wurden Fragen des Grundwasserchemismus und der damit verbundenen Beeinflussung durch Temperaturveränderungen. Im Falle lokal vorliegender Altlasten mit Schadstoffen in der Bodenmatrix des Aquifers oder mit einer Beeinträchtigung der Grundwassergüte müssen für den jeweiligen Standort entsprechende Untersuchungen angestellt werden. Einen ersten Hinweis können dabei die Altlasten-Verdachtsflächendateien der Bundesländer liefern.

Generell ersetzen der Atlas und die im Rahmen der Studie durchgeführten Untersuchungen nicht die Schritte der Vorplanung und Planung für die Realisierung eines konkreten Aquiferspeichers in der IRMD.

Die beschriebenen Defizite/Einschränkungen sind bei Aquiferspeicherprojekten zu berücksichtigen.

## 10.3 CHECKLISTE

### für die Entscheidungsfindung und Vorbereitung einer Nutzung von Aquifern für die Einspeicherung von Wärme oder Kälte in der Innovationsregion

Nachfolgend legen die Autoren eine Checkliste vor, die künftigen Nutzer:innen von Aquiferspeichern Handreichung für die Schritte auf dem Wege bis zur Umsetzung gibt. Sie beschränkt sich auf den Teil ‚alternative Wärme- bzw. Kältespeicherung‘ mit Anbindung an die TGA eines möglicherweise komplexeren Bauvorhabens (Neubau / Sanierung / energetische Ertüchtigung, Nahwärmenetz usw.). Dazu gehören folgende Arbeitsschritte und Meilensteine:

1. Ermittlung des Gesamtwärme-/Kältebedarfes
2. Ermittlung der Abwärmemenge und -temperatur
3. Temperaturniveau der Verbraucher und der Anlagentechnik
- ▶ 4. **Verfügbarkeit / Potenziale von Aquiferspeichern und Raumwiderständen anhand des Atlas (BAND 2)**
5. Prüfung weiterer lokaler Ausschlusskriterien/Raumwiderstände (Raumplanung, Altlasten etc.)
6. Möglichkeiten der Förderung einer Machbarkeitsstudie, ggf. deren Beantragung
- ▶ 7. **Machbarkeitsstudie** mit folgenden Inhalten:
  - a) Jahresgang und räumlicher Verteilung von Heizlast/Nutzenergiebedarf
  - b) lokale geologische und hydrogeologische Situation am Standort („Lupe“).  
Nachweis der Machbarkeit mit Probebohrung/Messstelle(n) mit Pumpversuch
  - c) technisches Konzept mit saisonalem Speicherbetrieb und TGA-Anbindung (hydrogeologische & thermo-dynamische Modellierungen)
  - d) Kosten/Wirtschaftlichkeit/Sensitivität
  - e) Optionen von Förderung(en)
  - f) Antizipierung des Behördenermessens/Voranfrage
8. Beantragung der wasserrechtlichen Genehmigung und wasserrechtlichen Erlaubnis
9. Förderbeantragung für Planung und Umsetzung des Aquiferspeichers
10. Eingang der wasserrechtlichen Genehmigung/ Erlaubnis, ggf. Erfüllung weiterer Auflagen
- ▶ 11. **Projektplanung gem. den Inhalten der Leistungsphasen 1-9 der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI)**

## 10.4 Ausblick

Die beschlossene Novellierung des Klimaschutzgesetzes (BMU 2021) durch die Bundesregierung mit den noch anspruchsvolleren Emissionsreduktionszielen der Treibhausgasneutralität bis 2045 und der Qualifizierung der Zwischenziele für 2030 und 2040 bedeutet eine weitere Forcierung der Abkehr von fossiler Wärme und führt zur Beschleunigung der Entwicklung alternativer Energiesysteme und der verstärkten Nutzung lokaler Potenziale.

Weitere Entwicklungen sind hinzuzuzählen, die von erheblichem Einfluss auf die Implementierung von Aquiferspeicherprojekten in der Praxis sein können:

- ▶ die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Bepreisung
- ▶ die Taxonomieverordnung der EU, die Unternehmen zur verstärkten Erfüllung von ESG-Nachhaltigkeitskriterien verpflichtet
- ▶ die Förderlandschaft des Bundes und der Länder der IRMD
- ▶ die Ergebnisse der ATES-Initiative des BMBF<sup>3</sup>.

Die lokaltypischen Potenziale der Grundwasserleiterkomplexe in der IRMD können bei der energetischen Transition eine gewichtige Rolle spielen, wenn es gelingt, die Ergebnisse dieser Studie in einen Roll-out zu überführen und dafür alle relevanten Stakeholder zu aktivieren. Dabei sind insbesondere die bereits interessierten Investoren zu unterstützen.

Aus diesem Grund ist geboten, mit kürzeren Fristen als in Deutschland gewohnt, dieser in anderen Ländern in Routine befindlichen Technologie (Beispiel Niederlande) in die Praxis zu überführen. Da die Grundmechanismen der Technologie bekannt sind, muss mit der Anwendung als ein wichtiger Baustein bei der Dekarbonisierung nicht auf die Schließung aller Wissenslücken bis in das letzte Detail gewartet werden.

Für einen solchen transdisziplinären Ansatz wird von den Autoren folgende Vorgehensweise empfohlen:

### I. Umsetzungsprojekte angehen

Die im Rahmen der Studie aufgenommenen Gespräche mit potenziellen Investoren sind zu vertiefen und Machbarkeitsstudien einzuleiten (dafür Förderungen zugänglich machen). Weitere Interessenten sind zu detektieren und motivieren.

Bei Vorplanungen zu Aquiferspeichern sind die Fachbehörden frühzeitig einzubeziehen. Umsetzungsprojekte sind zu monitoren (Technik/Fahrweise, Wirtschaftlichkeit etc.).

<sup>3</sup> Aufruf des BMBF Geoforschung für Nachhaltigkeit (GEO:N): „Möglichkeiten und Grenzen thermischer Energiespeicherung in Aquiferen“ vom 8. Juli 2021. Start der ausgewählten Forschungsprojekte in der Mitte des Jahres 2022

Als außerordentlich wichtig erachten die Autoren darüber hinaus die frühzeitige und fortlaufende Einbindung aller Interessengruppen und eine positive Kommunikation über die Nutzung dieser natürlichen Potenziale als einen Schatz der Region. Auf diesem Weg kann einer breiten Öffentlichkeit sowohl der gesamtgesellschaftliche Nutzen einer klimafreundlichen Wärmeproduktion als auch der individuelle Nutzen einer regionalen Wertschöpfung verdeutlicht werden.

## II. Positive Kommunikation der Ergebnisse

Aus der Erfahrung weniger gelungener Kommunikationen bei Technologien anderer Energieträger sollte die Aquiferspeicherung kommuniziert werden als das, was sie ist:

Ein enormes, umweltfreundliches, energetisches Speicherpotenzial, das mithilfe der in Mitteldeutschland ansässigen Ingenieurskompetenz und der an der Transformation beteiligten Stakeholdern als Chance und Beitrag für einen erfolgreichen Strukturwandel genutzt wird.

Hierbei sind gerade die ersten Schritte wichtig, um dieses Potenzial nicht durch Bedenken bereits in der Anfangsphase in Misskredit bringen zu lassen. Dafür sollte eine Kommunikationsstrategie erarbeitet und gezielte Öffentlichkeitsarbeit betrieben werden.

Wichtig ist auch, Fachpersonal zu schulen und mit der Technologie vertraut zu machen. Dies betrifft TGA-Planer, Anlagenbauer sowie das gesamte beteiligte Handwerk. Informationen und Schulungen können über die Kammern und Ausschüsse sowie die Energieagenturen der SAENA, LENA und ThEGA erfolgen.

## III. Bereitstellung des Atlas als interaktive Karte

Die öffentliche Bereitstellung des Atlas als interaktive Karte über ein Web-GIS, in dem der User über triviale GIS-Funktionen Standorte bezüglich des Vorhandenseins von zu seiner Wärme-/Kälteeinspeicherung geeigneten Grundwasserleiterkomplexen genauer abfragen kann, ist ein wichtiger Schritt für einen Roll-out der Technologie.

Eine weitere Detaillierung des Atlas kann zudem die Aussagekraft vertiefen und Entscheidungsfindungen – auch im Rahmen erster Wirtschaftlichkeitserwägungen – erleichtern. Hierzu gehören

- ▶ Basis- und Mächtigkeitkarten
- ▶ Auskartierung hydraulischer Korrespondenzen (d. h. Verbindungen zwischen den Grundwasserleiterkomplexen)
- ▶ Grundwasserspiegelhöhen (und deren Schwankungen)
- ▶ kf-Wert-Verbreitung

Eine noch höhere Nutzerfreundlichkeit kann man durch eine Skalierung der Aquifer-Eignung und deren Darstellung im Atlas erzielen.

#### IV. Gezielte transdisziplinäre Forschung und Entwicklung

Zeitnah sollten mit den Forschungsinstitutionen der Region (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig, HTWK Leipzig, Uni Leipzig etc.) und den Treibern der Energiewende, wie der IRMD, als Strukturwandelprojekt der Europäischen Metropolregion Mitteldeutschland, dem Neu e.V. und weiteren Partnern umsetzungsorientierte Forschungsfragen für die Aquiferspeicherung detektiert werden.

Hierzu gehören Themenkreise aus Geothermie, Mikrobiologie, Geo-/Hydrochemie und Ingenieurtechnik. Auch sollte die Eignung von Kippengrundwasserleitern für die Wärmeeinspeicherung untersucht werden.

Für die Region empfehlen die Autoren zudem eine progressive FuE-Akquise zur Einwerbung von Mitteln der EU wie auch von Bundesmitteln (BMBF, BMWi, Strukturwandelfonds etc.). Nicht an Calls gebundene Aufrufe; wie ‚region.innovativ‘ u. a.; sollten genutzt werden. Zudem bieten auch die Regionalen Innovationsstrategien der Bundesländer Möglichkeiten der Nutzung. Auch können Teilthemen in die im Aufbau befindliche Initiative zu einem ZIM-Netzwerk URMIT (Umweltwärme Mitteldeutschland) implementiert werden.

#### Zusatz:

Die regionalen Geopotenziale ‚Tagebaurestseen‘ für die Seethermie und die Aquifere des tertiären und quartären Untergrundes sind herausragende Inhalte und Gedankenanstoß zur Etablierung eines Kompetenzzentrums in der Region.

Mit diesen Potenzialen steht die Region deutschlandweit einmalig da und kann die zusammenzuführende Expertise ihrer Ingenieure und Wissenschaftler nicht nur als Beitrag zur originären Lösung ihres eigenen Strukturwandels, sondern mithilfe eines solchen Kompetenzzentrums auch zum Export von Know-how nutzen.

Die Europäische Metropolregion Mitteldeutschland kann im Rahmen des Strukturwandelprojektes „Innovationsregion Mitteldeutschland“ als Treiber der Energiewende hier eine Schlüsselfunktion einnehmen. Neben den wirtschaftlichen Effekten hat die Entwicklung zukunftsfähiger energetischer Wertschöpfung, die an gleicher Stelle die fossile Energieerzeugung ablöst bzw. sich bei den Tagebaurestseen der Wunden früherer extensiver Wertschöpfung auf umweltfreundliche Weise bedient, symbolische Strahlkraft.

---

## Literaturverzeichnis

---

### Literaturverzeichnis

- Abiriga, Daniel; Jenkins, Andrew; Alfsnes, Kristian; Vestgarden, Live Semb; Klempe, Harald (2021): Spatiotemporal and seasonal dynamics in the microbial communities of a landfill-leachate contaminated aquifer. In: *FEMS Microbiology Ecology* 97 (7). DOI: 10.1093/femsec/fiab086.
- Adinolfi, Maurizio; Koch, Michael; Ruck, W. (1994): Ecological and microbial consequences of aquifer thermal energy storage; Oekologische und mikrobielle Folgen der Waermespeicherung im Aquifer. Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/32447>.
- Bauer, Mathias Jürgen; Freeden, Willi; Jacobi, Hans; Neu, Thomas (Hg.) (2018): Handbuch oberflächennahe Geothermie. Berlin: Springer Spektrum.
- Bauer, Sebastian; Dahmke, Andreas; Kolditz, Olaf (2017): Subsurface energy storage. Geological storage of renewable energy–capacities, induced effects and implications: Springer.
- Beyer, Andrea; Rzanny, Michael; Weist, Aileen; Möller, Silke; Burow, Katja; Gutmann, Falko et al. (2015): Aquifer community structure in dependence of lithostratigraphy in groundwater reservoirs. In: *Environmental science and pollution research international* 22 (24), S. 19342–19351. DOI: 10.1007/s11356-015-4682-5.
- Bloemendal, Martin; Olsthoorn, Theo; van de Ven, Frans (2015): Combining climatic and geo-hydrological preconditions as a method to determine world potential for aquifer thermal energy storage. In: *Science of the Total Environment* 538, S. 621–633. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.084.
- Blum, Philipp; Menberg, Kathrin; Koch, Fabien; Benz, Susanne A.; Tissen, Carolin; Hemmerle, Hannes; Bayer, Peter (2021): Is thermal use of groundwater a pollution? In: *Journal of contaminant hydrology* 239, S. 103791. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2021.103791.
- Blume, Hans-Peter(Hrsg.); Felix-Henningsen, Peter (Hrsg.); Fischer, Walter; Frede, Hans-Georg; Horn, Rainer; Stahr, Karl (1996): Handbuch der Bodenkunde. Landsberg/Lech: Ecomed-Verl.
- BMU (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushaltes - Wasserhaushaltsgesetz. WHG, vom 2020. Fundstelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- BMU (2021): Gesetzentwurf der Bundesregierung, Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes, vom 11.05.2021. Fundstelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- BMWi (2021): Dialog Klimaneutrale Wärme - Zielbild, Bausteine und Weichenstellungen 2030/2050. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/Waermewende/waermewende-2030-2050.html>, zuletzt geprüft am 06.05.2021.
- Bonte, Matthijs (2013): Impacts of Shallow Geothermal Energy on Groundwater Quality. Vrije Universiteit, Amsterdam.

- Brielmann, Heike; Griebler, Christian; Schmidt, Susanne I.; Michel, Rainer; Lueders, Tillmann (2009): Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems: Ecosystem impacts of groundwater heat discharge. In: *FEMS Microbiology Ecology* 68 (3), S. 273–286. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2009.00674.x.
- Brielmann, Heike; Lueders, Tillmann; Schreglmann, Kathrin; Ferraro, Francesco; Avramov, Maria; Hammerl, Verena et al. (2011): Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. In: *Grundwasser* 16 (2), S. 77–91. DOI: 10.1007/s00767-011-0166-9.
- Buffa, Simone; Cozzini, Marco; D'Antoni, Matteo; Baratieri, Marco; Fedrizzi, Roberto (2019): 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104, S. 504–522. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.059.
- Bundesanzeiger Verlag GmbH (2021): Gesetz zur Änderung des Bundesberggesetzes und zur Änderung der Verwaltungsgerichtsordnung. In: *Bundesanzeiger Verlag*. Online verfügbar unter [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#\\_\\_bgbl\\_\\_%2F%2F%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl121s1760.pdf%27%5D\\_\\_1634909597983](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s1760.pdf%27%5D__1634909597983), zuletzt geprüft am 22.10.2021.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2008): Grundwasser in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3642.pdf>.
- Bundesregierung (2021): Großes Einsparpotenzial beim Heizen. In: *bundesregierung.de*. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energie/waermewende-1794724>, zuletzt geprüft am 19.04.2021.
- Bundesverband Geothermie (2020): NEUBRANDENBURG - GEOTHERMIEANLAGE. In: *geothermie.de*. Online verfügbar unter <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/n/neubrandenburg-geothermieanlage.html>, zuletzt geprüft am 26.04.2021.
- Bundesverband Geothermie (2021): DER BUNDESRAT EMPFIEHLT EINE ÄNDERUNG DES BUNDESBERGGESETZES ZUGUNSTEN DER NUTZUNG VON GEOTHERMIE. In: *geothermie.de*. Online verfügbar unter [https://www.geothermie.de/aktuelles/nachrichten/news-anzeigen/news/der-bundesrat-empfeHLT-eine-aenderung-des-bundesberggesetzes-zugunsten-der-nutzung-von-geothermie.html?tx\\_news\\_pi1%5BactbackPid%5D=10&tx\\_news\\_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx\\_news\\_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=ebd09cd67b754d46602189166d716d73](https://www.geothermie.de/aktuelles/nachrichten/news-anzeigen/news/der-bundesrat-empfeHLT-eine-aenderung-des-bundesberggesetzes-zugunsten-der-nutzung-von-geothermie.html?tx_news_pi1%5BactbackPid%5D=10&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=ebd09cd67b754d46602189166d716d73), zuletzt geprüft am 05.05.2021.
- Christen, Hans R. (1988): Einführung in die Chemie. 4., durchges. Aufl. d. Neubearb., Nachdr. Frankfurt am Main: Diesterweg.
- Collignon, Marine; Klemetsdal, Øystein Strengehagen; Møyner, Olav; Alcanié, Marion; Rinaldi, Antonio Pio; Nilsen, Halvor; Lupi, Matteo (2020): Evaluating thermal losses and storage capacity in high-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) systems with well operating limits: insights from a study-case in the Greater Geneva Basin, Switzerland. In: *Geothermics* 85, S. 101773. DOI: 10.1016/j.geothermics.2019.101773.

- Conant, Richard T.; Drijber, Rhae A.; Haddix, Michelle L.; Parton, William J.; Paul, Eldor A.; Plante, Alain F. et al. (2008): Sensitivity of organic matter decomposition to warming varies with its quality. In: *Global Change Biology* 14 (4), S. 868–877. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01541.x.
- Davidson, Eric A.; Janssens, Ivan A. (2006): Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. In: *Nature* (440), S. 165–173.
- Farnsworth, E. J.; Nunez-Farfan, J.; Careaga, S. A.; Bazzaz, F. A. (1995): Phenology and Growth of Three Temperate Forest Life Forms in Response to Artificial Soil Warming. In: *The Journal of Ecology* 83 (6), S. 967. DOI: 10.2307/2261178.
- Fleuchaus, Paul; Godschalk, Bas; Stober, Ingrid; Blum, Philipp (2018): Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94, S. 861–876. DOI: 10.1016/j.rser.2018.06.057.
- Fleuchaus, Paul; Schüppler, Simon; Stemmler, Ruben; Menberg, Kathrin; Blum, Philipp (2021): Aquiferspeicher in Deutschland. In: *Grundwasser*. DOI: 10.1007/s00767-021-00478-y.
- Griebler, Christian; Avramov, Maria (2017): Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Grundwasserqualität und unterirdische Ökosysteme. Vortrag Kolloquium Grundwassererwärmung in urbanen Gebieten – kein Problem? Dresden, 07.11.2017.
- Griebler, Christian; Brielmann, Heike; Haberer, Christina M.; Kaschuba, Sigrid; Kellermann, Claudia; Stumpp, Christine et al. (2016): Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. In: *Environ Earth Sci* 75 (20), S. 1391. DOI: 10.1007/s12665-016-6207-z.
- Griebler, Christian; Kellermann, Claudia; Kuntz, David; Walker-Hertkorn, Simone; Stumpp, Christine; Hegler, Florian (2014): Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften. Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung.
- Griebler, Christian; Lüders, Klas (2009): Microbial biodiversity in groundwater ecosystems. In: *Freshwater Biology* 54 (4), S. 649–677. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2008.02013.x.
- Hähnlein, Stefanie; Bayer, Peter; Ferguson, Grant; Blum, Philipp (2013): Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. In: *Energy Policy* 59, S. 914–925. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.04.040.
- Hartge, Karl-Heinrich; Horn, Rainer; Bachmann, Jörg; Peth, Stephan (Hg.) (2014): Einführung in die Bodenphysik. 4. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Nägele und Obermiller. 4. Auflage. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers. Online verfügbar unter [https://www.schweizerbart.de/publications/detail/artno/181201433/Hartge\\_Horn\\_Essential\\_Soil\\_Physics\\_br](https://www.schweizerbart.de/publications/detail/artno/181201433/Hartge_Horn_Essential_Soil_Physics_br).
- Hartl, M.; Biermayr, P.; Schneeberger, A.; Schöfmann, P. (2016): Österreichische Technologie-Roadmap für Wärmepumpen. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreich. Wien. Online verfügbar unter <https://www.enfos.at/download/rest/lit-02-waermepumpenroadmap-2016.pdf>, zuletzt geprüft am 06.05.2021.
- Hesaraki, Arefeh; Holmberg, Sture; Haghghat, Fariborz (2015): Seasonal thermal energy storage with heat pumps and low temperatures in building projects—A comparative

- review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43, S. 1199–1213. DOI: 10.1016/j.rser.2014.12.002.
- Hesse, Gerold; Horlbeck, Jeanette; Richling, Sebastian; Schaub, Andreas; Seher, Marlies; Kleinickel, Cindy et al. (2014): Potenzialstudie Unterspeicherung in Thüringen. Systemkomponenten zur Verbesserung der Grundlastfähigkeit Erneuerbarer Energien. Unter Mitarbeit von Paul Brosin, Klaus Erhardt, Volker Schlegelmilch und Gerd Seidel.
- Hofman-Caris, C.H.M.; Harmsen, D.J.H.; Hartog, N.; Nicolaes, T.; Janssen, L.J.J.M.; Winters-Breur, E.; Keijzer, T.J.S. (2017): The potential of using UV photolysis in an aquifer thermal energy storage system to remediate groundwater contaminated with chloroethenes. In: *Journal of Environmental Chemical Engineering* 5 (3), S. 2921–2929. DOI: 10.1016/j.jece.2017.05.035.
- Keller, Nina-Sophie; Hornbruch, Götz; Lüders, Klas; Werban, Ulrike; Vogt, Carsten; Kallies, René et al. (2021): Monitoring of the effects of a temporally limited heat stress on microbial communities in a shallow aquifer. In: *Science of the Total Environment* 781, S. 146377. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146377.
- Klisch, W.; Gräber, M. (1984): Ergebnisbericht Suche Elsterfelder. hydrogeologischer Teil: VEB GFE Freiberg.
- Koch, Daniel (2010): Langzeit-Entwicklung der Bodentemperaturen. Universität zu Köln, Köln. Geographisches Institut. Online verfügbar unter [https://www.lanuv.nrw.de/kfm-indikatoren/dokumente/Diplomarbeit-Bodentemperaturen\\_sec.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/kfm-indikatoren/dokumente/Diplomarbeit-Bodentemperaturen_sec.pdf), zuletzt geprüft am 25.10.2021.
- Konstantin, Panos (2017): Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung, Übertragungsnetzausbau und Kernenergieausstieg. 4., aktualisierte Auflage. Berlin [Heidelberg]: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Kranz, Stefan; Frick, Stephanie (2013): Efficient cooling energy supply with aquifer thermal energy storages. In: *Applied Energy* 109, S. 321–327.
- Kürten, Sylvia (2015): Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermoaktiven Bauteilen. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, Aachen. Online verfügbar unter <https://core.ac.uk/download/pdf/36622804.pdf>, zuletzt geprüft am 27.10.2021.
- Landesamt für Geologie und Bergwesen (2016): Anlage 1: Erläuterungen zu den Leitlinien Qualitätssicherung Bohrungen/ Erdwärmesonden. Online verfügbar unter <https://www.geodaten.lagb.sachsen-anhalt.de/wilma.aspx?pgId=5>, zuletzt geprüft am 22.10.2021.
- Lee, Kun Sang (2010): A Review on Concepts, Applications, and Models of Aquifer Thermal Energy Storage Systems. In: *Energies* 3 (6). DOI: 10.3390/en3061320.
- 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. Institute of Geosciences - Kiel University. Kiel.
- Mands, Erich; Sanner, Burkhard; Sauer, Marc; Grundmann, Edgar; Brehm, Dirk (2010): Grundwassergekoppelte Wärmepumpeanlage am Bonner Bogen. In: *bbr- Sonderheft 2010*, S. 74–80. Online verfügbar unter [http://ubeg.de/Lit/bbr\\_Geo2010\\_74-80\\_Mands-Sanner.pdf](http://ubeg.de/Lit/bbr_Geo2010_74-80_Mands-Sanner.pdf), zuletzt geprüft am 25.03.2021.

- Meier, Aileen; Singh, Manu K.; Kastner, Anne; Merten, Dirk; Büchel, Georg; Kothe, Erika (2017): Microbial communities in carbonate rocks—from soil via groundwater to rocks. In: *Journal of basic microbiology* 57 (9), S. 752–761. DOI: 10.1002/jobm.201600643.
- Michalzik, Dieter (2013): Mitteltiefe Geothermie – was ist das? In: *Geothermische Energie* (76/2), S. 30–31.
- Ministerium für Kohle und Energie, Ministerium für Geologie (1985): Erkundungsmethodik Braunkohle.
- Mühlmann, R. (1981): Zu Problemen der paläogeographischen Entwicklung des Prätertiärs und Tertiärs im Südwesten des Weißelsterbeckens (Mtbl. Pegau und Hohenmölsen) und zu den Beziehungen zwischen Prätertiär und Tertiär. K.-Marx-Univ. Leipzig.
- Ni, Zhuobiao; van Gaans, Pauline; Rijnaarts, Huub; Grotenhuis, Tim (2018): Combination of aquifer thermal energy storage and enhanced bioremediation: Biological and chemical clogging. In: *Science of the Total Environment* 613, S. 707–713.
- Ni, Zhuobiao; van Gaans, Pauline; Smit, Martijn; Rijnaarts, Huub; Grotenhuis, Tim (2015): Biodegradation of cis -1,2-Dichloroethene in Simulated Underground Thermal Energy Storage Systems. In: *Environmental science & technology* 49 (22), S. 13519–13527. DOI: 10.1021/acs.est.5b03068.
- Ni, Zhuobiao; van Gaans, Pauline; Smit, Martijn; Rijnaarts, Huub; Grotenhuis, Tim (2016): Combination of aquifer thermal energy storage and enhanced bioremediation: resilience of reductive dechlorination to redox changes. In: *Applied Microbiology and Biotechnology* 100 (8), S. 3767–3780. DOI: 10.1007/s00253-015-7241-6.
- Nordell, B.; Snijders, A.; Stiles, L. (2015): The use of aquifers as thermal energy storage (TES) systems. In: Luisa F. Cabeza (Hg.): *Advances in Thermal Energy Storage Systems*: Woodhead Publishing, S. 87–115. Online verfügbar unter <https://www.science-direct.com/science/article/pii/B9781782420880500055>.
- Onwuka, Brown Mang (2018): Effects of Soil Temperature on Some Soil Properties and Plant Growth. In: *APAR* 8 (1). DOI: 10.15406/apar.2018.08.00288.
- Piao, Shilong; Liu, Qiang; Chen, Anping; Janssens, Ivan A.; Fu, Yongshuo; Dai, Junhu et al. (2019): Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. In: *Global Change Biology* 25 (6), S. 1922–1940. DOI: 10.1111/gcb.14619.
- Rascher, Jochen; Escher, Dieter; Fischer, Joachim; Rascher, Matthias; Darbinjan, Friederike; Hoth, Nils et al. (2013): *Fazies und Geochemie im Tertiär südlich von Leipzig*. Hg. v. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Leipzig (18).
- RICHTLINIE (EU) 2018/2001 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (2018). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32018L2001>, zuletzt geprüft am 01.10.2021.
- Roselt, K.; Steinmüller, A.; Kühn, W. (1988): *Vorratsberechnung Lagerstätten erkundung Braunkohle Schwarzwau. Detailerkundung*. Freiberg, BT Jena: VEB Geologische Forschung u. Erkundung.
- Roselt, K.; Steinmüller, A.; Rößler, A.; Blumenstengel, H.; Kühn, W.; Wucher, K. et al. (1991): *Ergebnisbericht Detailerkundung Braunkohle Feld Döbitzschen*. VEB Geol. Forsch. und Erkundung. Jena.

- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2015): Grundwasserwärmepumpen: Merkblatt zum Bau und Betrieb. Online verfügbar unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/22373>, zuletzt geprüft am 23.10.2021.
- Sandrock, Matthias; Maaß, Christian; Weisleder, Simona; Baisch, Christina; Löschan, Geraldine; Kreuter, Horst et al. (2020): Ein neuer Weg zu effizienten Wärmenetzen mit Niedertemperaturwärmeströmen - Ein Leitfaden für Kommunen. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/sandrock\\_et\\_al.\\_2020\\_niedertemperaturwaerme-kommunenleitfaden\\_barrierefrei.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/sandrock_et_al._2020_niedertemperaturwaerme-kommunenleitfaden_barrierefrei.pdf), zuletzt geprüft am 29.03.2021.
- Scheffer, Fritz; Schachtschabel, Paul (2016): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, (Nachdruck). Berlin Heidelberg: Springer Spektrum.
- Schmidt, T.; Müller-Steinhagen, H. (2004): Die solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit saisonalem Aquifer-Wärmespeicher in Rostock - Ergebnisse nach vier Betriebsjahren. In: 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, 8. Geothermische Fachtagung. Landau in der Pfalz, Germany. Online verfügbar unter <http://www.swt-stuttgart.de/SWT-Forschung/Veroeffentlichungen/Puplic/04-07.pdf>, zuletzt geprüft am 07.04.2021.
- Schüppler, Simon; Fleuchaus, Paul; Blum, Philipp (2019): Techno-economic and environmental analysis of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) in Germany. In: *Geotherm Energy* 7 (1), S. 11. DOI: 10.1186/s40517-019-0127-6.
- smood (2021): smood - smart neighborhood. In: *smood-energy.de*. Online verfügbar unter <https://www.smood-energy.de>, zuletzt geprüft am 07.05.2021.
- Söll, Thomas; Kobus, Helmut (1992): Modellierung des großräumigen Wärmetransports im Grundwasser. Online verfügbar unter <http://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/556>.
- Somogyi, Viola; Sebestyén, Viktor; Nagy, Georgina (2017): Scientific achievements and regulation of shallow geothermal systems in six European countries - A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68, S. 934-952. DOI: 10.1016/j.rser.2016.02.014.
- Sterner, Michael; Stadler, Ingo (Hg.) (2017a): *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. 2., korrigierte und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Sterner, Michael; Stadler, Ingo (Hg.) (2017b): *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. 2., korrigierte und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Stober, Ingrid; Bucher, Kurt (2020): *Geothermie*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-60940-8>, zuletzt geprüft am 28.04.2021.
- Thüringer Landesverwaltungsamt (Hg.) (2013): *Nutzung oberflächennaher Geothermie. Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung*. Referat 440 Wasserwirtschaft.
- Tsagarakis, Konstantinos P.; Efthymiou, Loukia; Michopoulos, Apostolos; Mavragani, Amaryllis; Anđelković, Aleksandar S.; Antolini, Francesco et al. (2020): A review of the legal framework in shallow geothermal energy in selected European countries: Need for guidelines. In: *Renewable energy* 147, S. 2556-2571. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.007.

- Umweltbundesamt (2021): Erneuerbare Energien in Zahlen. In: *umweltbundesamt.de*. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>, zuletzt geprüft am 19.04.2021.
- VDI (2021): VDI 4640 Blatt 3 - Projekt Thermische Nutzung des Untergrunds - Unterirdische thermische Energiespeicher. In: *vdi.de*. Online verfügbar unter <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4640-blatt-3-thermische-nutzung-des-untergrunds-unterirdische-thermische-energiespeicher>, zuletzt geprüft am 29.04.2021.
- VDI 4640-2001: VDI-Richtlinie 4640 Blatt 3 - Thermische Nutzung des Untergrundes - Unterirdische Thermische Energiespeicher. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf.
- Vienken, Thomas; Händel, Falk; Epting, Jannis; Dietrich, Peter; Liedl, Rudolf; Huggenberger, Peter (2016): Energiewende braucht Wärmewende – Chancen und Limitierungen der intensiven thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes in urbanen Gebieten vor dem Hintergrund der aktuellen Energiedebatte in Deutschland. In: *Grundwasser* 21 (1), S. 69–73. DOI: 10.1007/s00767-015-0303-y.
- Weber, W.; Zöllner, G.; Barzantny, U.; Nobst, W. (1983): Hydrogeologischer Bericht Grundwasservorratsprognose Bezirk Leipzig. VEB Hydrogeologie Nordhausen, BT Torgau. Nordhausen und Halle.
- Zuurbier, Koen G.; Hartog, Niels; Valstar, Johan; Post, Vincent E. A.; van Breukelen, Boris M. (2013): The impact of low-temperature seasonal aquifer thermal energy storage (SATES) systems on chlorinated solvent contaminated groundwater: Modeling of spreading and degradation. In: *Journal of contaminant hydrology* 147, S. 1–13.



---

## ANHANG 1: Verwendete Geodaten

---

Die verwendeten Geodaten wurden ordnungsgemäß hinsichtlich ihrer Zugriffs- und Nutzungsbestimmungen mit Quellenvermerk und eventuellen Veränderungen angegeben.

### Hydrologische Karten

Hydrologische Übersichtskarte 1:250.000 (HÜK250):

Deutschland: HÜK250 v1.0.3, (C) BGR & SGD 2019; BGR Produktcenter.

### Hydrogeologische Karten

Hydrogeologische Karten 1:50.000 (HK50):

Sachsen: © GeoSN (Daten verändert), dl-de/by-2-0

(<https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>), Produktname: HK50.

Blattschnitte: 1106-1/2, 1106-3/4, 1206-1/2, 1206-3/4, 1107-1/2, 1107-3/4, 1207-1/2, 1207-3/4, 1307-1/2, 1108-1/2, 1108-3/4, 1208-1/2

Sachsen-Anhalt: © GeoBasis-DE / LVerGeo LSA (Daten verändert), dl-de/by-2-0 (<https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>), Produktname: HK50 [2021].

Blattschnitte: 1103 - 12, 34; 1004 - 34; 1104 - 12, 34; 1204 - 12, 34; 0905 - 34; 1005 - 12, 34; 1105 - 12, 34; 1205 - 12, 34; 0906 - 34; 1006 - 12, 34; 1106 - 12, 34; 1206 - 12, 34; 1306 - 12

Thüringen: © GDI-Th (Daten verändert), dl-de/by-2-0

(<https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>), Produktname: HK50

Blattschnitte: 1206-3/4, 1306-1/2, 1207-3/4, 1307-1/2

### Bohrdatenbanken – zur Validierung der Aquifer-Daten, keine direkte Nutzung

Sachsen: Digitale Bohrungsdaten. 2021 Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. URL: <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/ida/p/bohrungen?>

Sachsen-Anhalt: Landesbohrdatenbank Sachsen-Anhalt. 2021 Landesportal Sachsen-Anhalt. URL: <https://lagb.sachsen-anhalt.de/service/geofachinformation/landesbohrdatenbank/>

Deutschland: Bohrpunktkarte Deutschland. 2021 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. URL: <https://boreholemap.bgr.de/mapapps/resources/apps/boreholemap/index.html?lang=de>

### Archiv-Daten, abgeschlossene Projekte

Grundwasservorratsprognose Leipzig - Weber et al. 1983

Detailerkundung BRK Elsterfelder - Klisch und Gräber 1984

Detailerkundung BRK Schwerzau - Roselt et al. 1988

Detailerkundung BRK Döbitzchen - Roselt et al. 1991

Bohrarchiv der JENA-GEOS

## Wasserschutzgebiete

Wasserschutzgebiete-DE

© WasserBLICK/BfG und Zuständige Behörden der Länder 2021 (Daten verändert), dl-de/by-2-0 (<http://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>), URL: <https://geoportal.bafg.de/inspire/download/AM/drinkingWaterProtectionArea/dataset-feed.xml>

## Bergbau

Bergbaugebiete Deutschland

HY1000 v1 © BGR 2019 (Daten verändert), dl-de/by-2-0 (<http://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>), URL: <https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/OpenSearch.do?search=%0953656EEE-00DC-4C65-ABDA-F097F86ACC20&type=/Query/OpenSearch.do>

Landinanspruchnahmegrenzen LMBV

© LMBV (Daten verändert), dl-de/by-2-0 (<http://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>), URL: [https://www.lmbv.de/index.php/geodaten.html?file=files/LMBV/Dokumente/Geoportal\\_Mitteldeutschland/Landinanspruchnahme\\_MD.etr89\\_utm33.zip](https://www.lmbv.de/index.php/geodaten.html?file=files/LMBV/Dokumente/Geoportal_Mitteldeutschland/Landinanspruchnahme_MD.etr89_utm33.zip)

Revierkarte Mitteldeutschland

Bundesverband Braunkohle – DEBRIV (2021): Revierkarte Mitteldeutschland. URL: [https://braunkohle.de/wp-content/uploads/2017/08/Revierkarte-MIBRAG-2020\\_August\\_quer.pdf](https://braunkohle.de/wp-content/uploads/2017/08/Revierkarte-MIBRAG-2020_August_quer.pdf) (zuletzt zugegriffen am: 03.11.2021).

## Naturschutzfachlich ausgewiesene Gebiete

Schutzgebiete:

Bettina Dibern (Bundesamt für Naturschutz). Geodienst Schutzgebiete (WFS). <https://gdk.gdi-de.org/geonetwork/srv/api/records/bec888f9-ba0c-42dc-846e-177b8265dafa>

## Administrative Daten

Digitales Landschaftsmodell (DLM250)

Deutschland: © GeoBasis-DE / BKG 2021 (Daten verändert), dl-de/by-2-0 (<https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>), URL: <https://daten.gdz.bkg.bund.de/produkte/dlm/dlm250/aktuell/dlm250.utm32s.shape.ebenen.zip>

Verwaltungsgebiete 1:250.000 (VG250)

Deutschland: © GeoBasis-DE / BKG 2021, dl-de/by-2-0  
(<https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>), URL: [https://daten.gdz.bkg.bund.de/produkte/vg/vg2500/aktuell/vg2500\\_01-01.utm32s.shape.zip](https://daten.gdz.bkg.bund.de/produkte/vg/vg2500/aktuell/vg2500_01-01.utm32s.shape.zip)

## ANHANG 2: Probenahmeprotokolle

### ANHANG 2.1 Grundwasserproben

© Schmidt Umwelttechnik

H2\_FB52\_PNP\_GW2014\_rev1\_2015

<b>Schmidt Umwelttechnik</b> Mobil 0174/ 34 53 440 schmidt@umwetech.de		<b>Probenahmeprotokoll Grundwasser</b> gemäß DIN 38 402 Teil 13	
Projekt:	Grundwassermonitoring Schwelerei Profen	Zeit:	17:30
Auftraggeber:	Eurofins Umwelt Ost GmbH	Temperatur:	7° C
Datum:	14.04.2021	Witterung:	wechselhaft

#### Messstelle:

Bezeichnung:	1/99
RW:	56 65 436,0
HW:	45 14 550,0
Höhe Messpunkt:	146,46 m HN

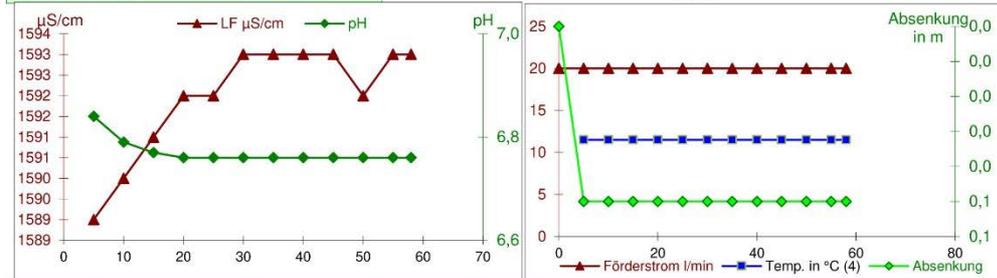
#### Ausbau:

Material:	PVC		
Bohrdurchmesser:	419 mm		
Pegelrohr (innen):	120 mm		
Filterrohr von:	7,90	bis:	k.A. m u MP
Filterkies von:	6,86	bis:	16,86 m u MP
Teufe (Ausbau):	18,05 m u MP		
Entnahmegesät:	Grundfos MP1		
Pumpdauer:	58 min		
Förderstrom:	20,0 l/min		
Fördervolumen:	1160 l		

Ruhewasserstand:	11,32	m u MP	
Teufe (gelotet):	13,30	m u MP	
Messstellenvolumen:	22 l	3 -fach	67 l
Filtervolumen:	764 l	1,5 -fach	1146 l
Entnahmetiefe:	12,8	m u MP	

#### spezifische Vorgabe Abpumpvolumen:

1146 l



Zeit min	Förderstrom l/min	Absenkung m u. MP	pH Wert <sup>(1)</sup>	LF µS/cm 25°C <sup>(2)</sup>	O <sub>2</sub> mg/l <sup>(3)</sup>	Temp. in °C <sup>(4)</sup>	Redoxspannung (mV) Messwert <sup>(5)</sup>	Redox UH <sup>(6)</sup>
0	20,0	11,32						
5	20,0	11,37	6,84	1589	7,0	11,5	143	359
10	20,0	11,37	6,79	1590	6,9	11,5	145	361
15	20,0	11,37	6,77	1591	6,9	11,5	146	362
20	20,0	11,37	6,76	1592	6,8	11,5	147	363
25	20,0	11,37	6,76	1592	6,8	11,5	147	363
30	20,0	11,37	6,76	1593	6,7	11,5	147	363
35	20,0	11,37	6,76	1593	6,7	11,5	147	363
40	20,0	11,37	6,76	1593	6,7	11,5	147	363
45	20,0	11,37	6,76	1593	6,7	11,5	147	363
50	20,0	11,37	6,76	1592	6,7	11,5	147	363
55	20,0	11,37	6,76	1593	6,6	11,5	147	363
58	20,0	11,37	6,76	1593	6,6	11,5	147	363

Wasserstand nach Abschalten der Pumpe: n.b. Redox-Nullwert: 216 mV bei 12°C

#### Beschreibung der Probe

Farbe:	farblos	Gefäße:	Vorgabe Labor
Trübung:	klar	Menge:	Vorgabe Labor
Geruch:	geruchlos	Bezeichnung:	1/99
Bodensatz:	ohne	Konservierung:	Vorgabe Labor
Ausgasung:	ohne		

#### Bemerkungen:

Zustandsprüfung:	Dummytest in Ordnung
Messstelle anfahrbar:	ja
Abweichung Teufe:	4,75 m
aufschwimmende Phase:	nein
sonstige Bemerkungen:	Absatz bei 12,70 m

(1): DIN 38404-5:2009-07; (2): DIN EN 27888:1993-11; (3): DIN EN 25814:1992-11; (4): DIN 38404-4:1976-12; (5): DIN 38404-6:1984-05; (6): berechnet

Probenehmer: Möller

Unterschrift:

<b>Schmidt Umwelttechnik</b> Mobil 0174/ 34 53 440 schmidt@umwetech.de		<b>Probenahmeprotokoll Grundwasser</b> gemäß DIN 38 402 Teil 13	
Projekt:	Grundwassermonitoring Schwelerei Profen	Zeit:	12:35
Auftraggeber:	Eurofins Umwelt Ost GmbH	Temperatur:	8° C
Datum:	14.04.2021	Witterung:	wechselhaft

**Messstelle:**

Bezeichnung:	1/2020
RW:	45 14 167,7
HW:	56 65 387,8
Höhe Messpunkt:	150,75 m HN

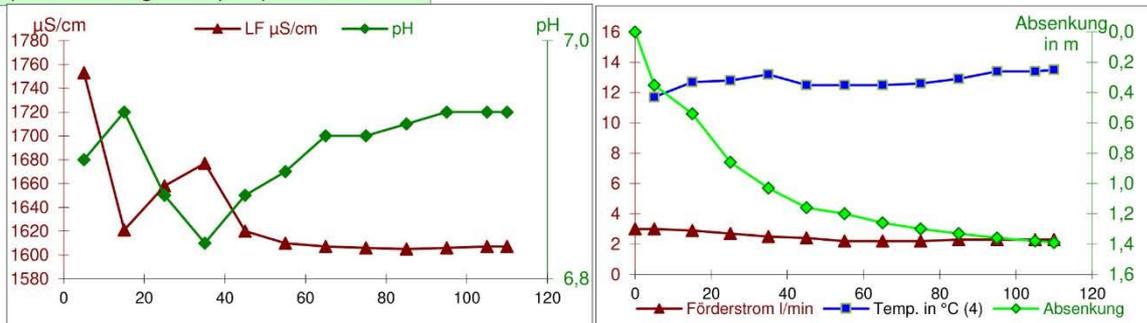
**Ausbau:**

Material:	PVC		
Bohrdurchmesser:	324 mm		
Pegelrohr (innen):	100 mm		
Filterrohr von:	14,90	bis:	16,90 m u MP
Filterkies von:	13,90	bis:	17,90 m u MP
Teufe (Ausbau):	17,90 m u MP		
Entnahmeggerät:	Grundfos MP1		
Pumpdauer:	110 min		
Förderstrom:	2,3 l/min		
Fördervolumen:	270 l		

Ruhewasserstand:	15,72	m u MP
Teufe (gelotet):	17,90	m u MP
Messstellenvolumen:	#WERT!	3 -fach #WERT!
Filtervolumen:	#WERT!	1,5 -fach #WERT!
Entnahmetiefe:	17,5	m u MP

spezifische Vorgabe Abpumpvolumen:

268 l



Zeit min	Förderstrom l/min	Absenkung m u. MP	pH Wert <sup>(1)</sup>	LF µS/cm 25°C <sup>(2)</sup>	O <sub>2</sub> mg/l <sup>(3)</sup>	Temp. in °C <sup>(4)</sup>	Redoxspannung (mV) Messwert <sup>(5)</sup>	Redox UH <sup>(6)</sup>
0	3,0	15,72						
5	3,0	16,07	6,90	1753	4,7	11,7	2	218
15	2,9	16,26	6,94	1621	6,3	12,7	35	250
25	2,7	16,58	6,87	1658	5,2	12,8	40	255
35	2,5	16,75	6,83	1677	5,0	13,2	31	246
45	2,4	16,88	6,87	1620	6,2	12,5	40	255
55	2,2	16,92	6,89	1610	7,2	12,5	55	270
65	2,2	16,98	6,92	1607	7,6	12,5	71	286
75	2,2	17,02	6,92	1606	7,8	12,6	81	296
85	2,3	17,05	6,93	1605	7,9	12,9	90	305
95	2,3	17,08	6,94	1606	8,0	13,4	97	312
105	2,3	17,10	6,94	1607	8,1	13,4	103	318
110	2,3	17,11	6,94	1607	8,1	13,5	110	325

Wasserstand nach Abschalten der Pumpe: n.b. Redox-Nullwert: 215 mV bei 14°C

**Beschreibung der Probe**

Farbe:	farblos	Gefäße:	Vorgabe Labor
Trübung:	schwach	Menge:	Vorgabe Labor
Geruch:	geruchlos	Bezeichnung:	1/2020
Bodensatz:	ohne	Konservierung:	Vorgabe Labor
Ausgasung:	ohne		

**Bemerkungen:**

Zustandsprüfung:	Dummytest in Ordnung
Messstelle anfahrbar:	ja
Abweichung Teufe:	0,00 m
aufschwimmende Phase:	nein
sonstige Bemerkungen:	

(1): DIN 38404-5:2009-07; (2): DIN EN 27888:1993-11; (3): DIN EN 25814:1992-11; (4): DIN 38404-4:1976-12; (5): DIN 38404-6:1984-05; (6): berechnet

Probenehmer: Möller

Unterschrift: 

<b>Schmidt Umwelttechnik</b> Mobil 0174/ 34 53 440 schmidt@umwetech.de		<b>Probenahmeprotokoll Grundwasser</b> gemäß DIN 38 402 Teil 13	
Projekt:	Grundwassermonitoring Schwelerei Profen	Zeit:	19:30
Auftraggeber:	Jena GEOS	Temperatur:	8° C
Datum:	13.04.2021	Witterung:	wechselhaft

**Messstelle:**

Bezeichnung:	4/96
RW:	56 65 679,0
HW:	45 14 475,0
Höhe Messpunkt:	148,54 m HN

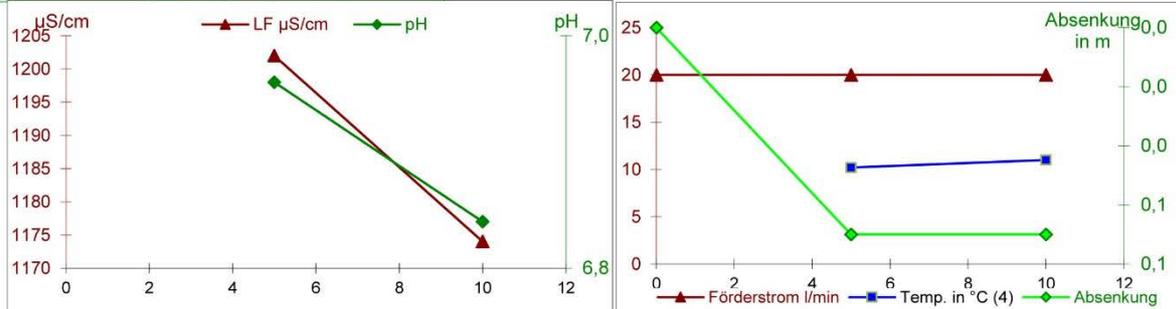
**Ausbau:**

Material:	PVC		
Bohrdurchmesser:	377 mm		
Pegelrohr (innen):	120 mm		
Filterrohr von:	26,90	bis:	k.A. m u MP
Filterkies von:	26,44	bis:	39,94 m u MP
Teufe (Ausbau):	41,40 m u MP		
Entnahmegesät:	Grundfos MP1		
Pumpdauer:	10 min		
Förderstrom:	20,0 l/min		
Fördervolumen:	200 l		

Ruhwasserstand:	26,36	m u MP	
Teufe (gelotet):	41,25	m u MP	
Messstellenvolumen:	168 l	3 -fach	505 l
Filtervolumen:	1507 l	1,5 -fach	2260 l
Entnahmetiefe:	27,7	m u MP	

spezifische Vorgabe Abpumpvolumen:

**2260 l**



Zeit min	Förderstrom l/min	Absenkung m u. MP	pH Wert <sup>(1)</sup>	LF µS/cm 25°C <sup>(2)</sup>	O <sub>2</sub> mg/l <sup>(3)</sup>	Temp. in °C <sup>(4)</sup>	Redoxspannung (mV)	
							Messwert <sup>(5)</sup>	Redox UH <sup>(6)</sup>
0	20,0	26,36						
5	20,0	26,43	6,96	1202	5,1	10,2	15	232
10	20,0	26,43	6,84	1174	0,2	11,0	-29	188

Wasserstand nach Abschalten der Pumpe: n.b. Redox-Nullwert: 217 mV bei 11°C

**Beschreibung der Probe**

Farbe:	farblos	Gefäße:	Vorgabe Labor
Trübung:	schwach	Menge:	Vorgabe Labor
Geruch:	geruchlos	Bezeichnung:	4/96
Bodensatz:	ohne	Konservierung:	Vorgabe Labor
Ausgasung:	ohne		

**Bemerkungen:**

Zustandsprüfung:	Dummysstest in Ordnung
Messstelle anfahrbar:	ja
Abweichung Teufe:	0,15 m
aufschwimmende Phase:	nein
sonstige Bemerkungen:	

(1): DIN 38404-5:2009-07; (2): DIN EN 27888:1993-11; (3): DIN EN 25814:1992-11; (4): DIN 38404-4:1976-12; (5): DIN 38404-6:1984-05; (6): berechnet

Probennehmer: Möller

Unterschrift: *Schmidt Möller*

## ANHANG 2.2 Substratproben Braunkohle

### Probennahmeprotokoll Boden



JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH Telefon: +49 3641 4535-0  
 Saalbahnhofstraße 25 c Telefax: +49 3641 442806  
 07743 Jena E-Mail: info@jena-geos.de

**Projektnummer: 8126 aquistore**

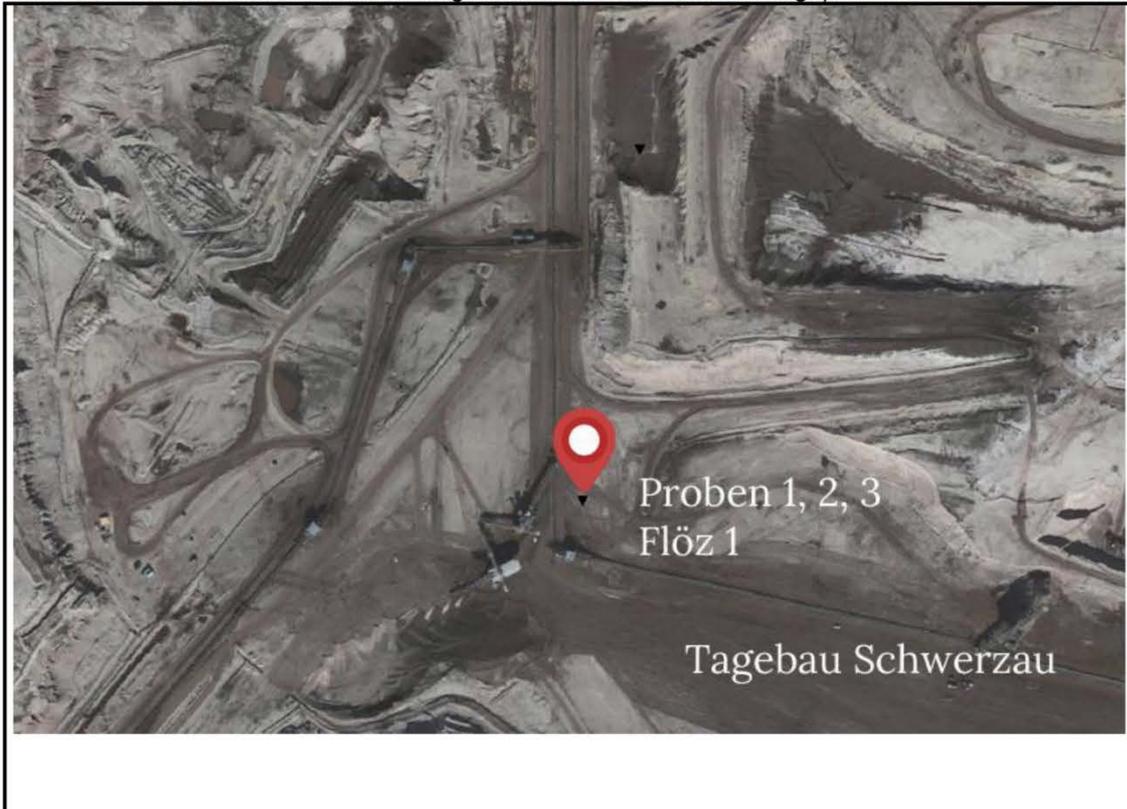
**Probennummern: 1, 2, 3 (Flöz 1)**

1. Betreff/Anlass/Grund der Probennahme/Veranlasser:  
Braunkohleproben für Mikrobiologische Untersuchungen
2. Ort der Probennahme (Gemeinde/Ort/Landkreis/Betrieb/Hoch- u. Rechtswert):  
Mibrag - Mitteldeutsches Braunkohlenrevier, Tagebau: Profen, Abbaufeld: Schwerzau;  
RW 4512771 / HW 5665341
3. Art des Materials: Braunkohle
4. Probennahmetag/Uhrzeit: 15.07.21, 11:40 Uhr
5. Probenehmer: Julia Hopf (Jena GEOS) im Beisein von Dr. Kersten Roselt (Jena GEOS) und Carsten Heinrich (Mibrag)
6. Vermutete Schadstoffe/Gefährdungen:  
Nicht zutreffend
7. Herkunft des Probenmaterials:  
AE: 5. Schnitt; Band/Gbf: 512; Bereich: Reudener Kessel, Flöz 1
8. Beschreibung des Materials bei der Probennahme:  
Farbe: überwiegend braun bis dunkelbraun Geruch: keiner  
Festigkeit/Konsistenz/Homogenität/Korngröße:  
mittelstückig, schwach gewebeführend, dichtes Gefüge, vereinzelt Retinitisprenkel, vereinzelt schwarze Kluffüllungen mit Dopplerit (auskristallisiertes Humusgel)
9. Art der Lagerung, Menge des beprobten Materials:  
gestörte Probe, 3 Mal 50-100g punktuelle Mischprobe aus dem Kohlestoß mit jeweils 1m Entfernung
10. Lagerungsdauer: Anschnitt 1 bis 2 Tage zuvor; unmittelbar vor Probennahme mit Spaten frisch angestochen
11. Einflüsse auf das Material (Witterung, Niederschläge):  
Am Abend des 13.07. starke Regenfälle
12. Art der Probennahme (Gerät, Einzelprobe, Mischprobe): Mit Löffelspatel; 3 Einzelproben
13. Art des Probengefäßes/Verschluss: Probenröhrchen mit Schraubverschluss Probenmenge: 3 Mal 50-100g
14. Anwesende, Zeugen: Dr. Kersten Roselt (Jena GEOS) und Carsten Heinrich (Mibrag)
15. Wurden Vergleichsproben genommen, ggf. durch wen?  
nein
16. Beobachtungen bei der Probennahme (Gasentwicklungen, Reaktionen):  
keine
17. Voruntersuchungen bei der Probennahme, Ergebnisse:  
keine
18. Probenüberführung und Lagerung bis zur analytischen Untersuchung, erfolgte Vorbehandlung:  
Keine Vorbehandlung; Transport auf Eis; über Nacht Lagerung im Kühlschrank
19. Untersuchungslabor: Institut für Mikrobiologie der Friedrich-Schiller-Universität Jena  
Prof. Dr. Erika Kothe, Dr. Katrin Krause  
Neugasse 25, 07743 Jena
20. Sonstige Bemerkungen zur Probennahme:  
keine



## Probennahmeprotokoll Boden

21. Lageskizze (mit Bezeichnung der Probennahmestelle, Einzeichnung von Deponien, Gewässern, Trinkwassernutzung, Straßen, Gebäuden u. dergl.):



22. Erläuterungen zur Lageskizze:



23. Hinweise an die Untersuchungsstelle (z.B. Untersuchungsumfang):



Die Probennahme und obige Arbeiten haben ausgeführt:

Julia Hopf, Kersten Roselt

Ort, Datum, Unterschrift Profen / Schwerzau, 15.7.2021

Die Proben wurden übergeben

am 16.07.21 um 12 Uhr an Dr. Katrin Krause

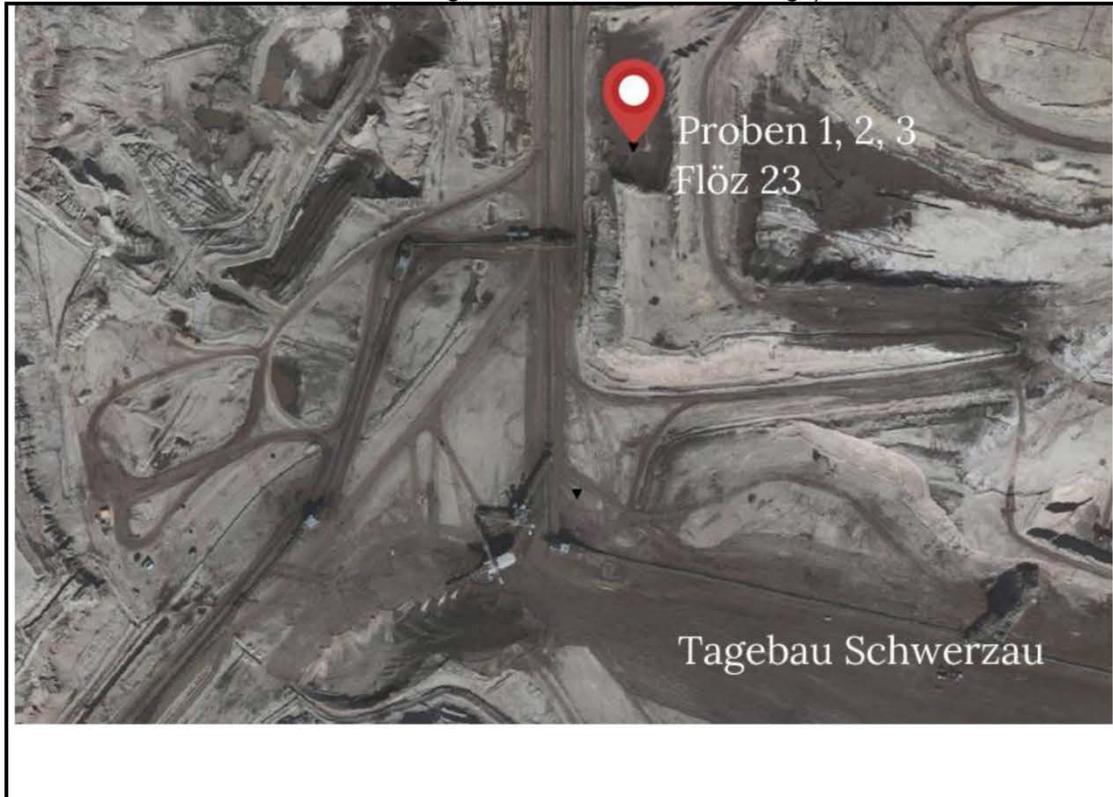
Analysenregister-Nr.:





## Probennahmeprotokoll Boden

21. Lageskizze (mit Bezeichnung der Probennahmestelle, Einzeichnung von Deponien, Gewässern, Trinkwassernutzung, Straßen, Gebäuden u. dergl.):



22. Erläuterungen zur Lageskizze:

■

23. Hinweise an die Untersuchungsstelle (z.B. Untersuchungsumfang):

■

Die Probennahme und obige Arbeiten haben ausgeführt:

Julia Hopf, Kersten Roselt

Ort, Datum, Unterschrift Profen / Schwerkrau, 15.7.2021

Die Proben wurden übergeben

am 16.07.21 um 12 Uhr an Dr. Katrin Krause

Analysenregister-Nr.: ■

### ANHANG 3: Übersicht zu Wärmenetzen

Klassifizierung	Eisnetz	Kältenetz	Quellnetz	niedertemperaturiges Abwärme-Wärmenetz	wechselwarmes Wärmenetz	umschaltbares Wärmenetz	niedertemperaturige Wärmenetze	hohtemperaturige Wärmenetze
Einsatzgebiet	<b>Kühlung</b>		<b>kalte, intelligente Wärmenetze</b>			<b>konventionelle Wärmenetze</b>		
typisches Temperatur-Niveau	Vorlauf: -1 °C – 0 °C Rücklauf: 12 °C	Vorlauf: 6 °C Rücklauf: 12 °C	Vorlauf: 6 °C – 25 °C Rücklauf: 3 °C – 6 °C	Vorlauf: 25 °C – 45 °C Rücklauf: 10 °C – 20 °C	Sommer: VL: 25 °C - RL: 10 °C Winter: VL: 45 °C - RL: 25 °C	Sommer: VL: 30 °C - RL: 10-15 °C Winter: VL: 70 °C - RL: 30-40 °C	Sommer: VL: 70 °C - RL: 50 °C Winter: VL: 90 °C - RL: 70 °C	Sommer: VL: 90 °C - RL: 70 °C Winter: VL: 130 °C - RL: 90 °C
Betriebsweise	ganzjährig, bedarfsgerecht	ganzjährig, bedarfsgerecht	ganzjährig, abhängig vom Temperaturniveau der Quelle	ganzjährig, Temperaturführung abhängig von der Abwärmequelle	gleitende Fahrweise, bedarfsgerecht und Zieltemperatur-gesteuert	Sommer-Winter Umschaltung	ganzjährig	ganzjährig
Medium	Flüssigeis	Wasser	See- oder Flusswasser (alt. Sole)	aufbereitetes Wasser	aufbereitetes Wasser	aufbereitetes Wasser	aufbereitetes Wasser	aufbereitetes Wasser
Rohrsystem	konventionell, isoliert	konventionell, isoliert	Kunststoff, ohne Isolation	Kunststoff möglich, isoliert	Kunststoff möglich, isoliert	Kunststoff auch möglich, sonst konventionell, immer isoliert	konventionell, isoliert	konventionell, isoliert, hochdruckbeständig (15 bar)
Anwendung	Gewerbegebiete und Innenstädte mit hohem Kühlbedarf	Innenstädte (nur noch Bestandsanlagen – kein Neubau)	kleinere Netze von Oberflächengewässern (Seen, Flüsse), Grubenwasser und Abwasser; sowie mit Wärmeübertrager und Sole: Erdsonden, Erdkollektor oder Brunnenwasser	Neubauquartiere als Anrainer von niedertemperaturiger Abwärme	Neubauquartiere mit hohem Anteil Erneuerbarer Energieträger	zu sanierende Bestandsquartiere und /oder Wärmenetze mit hocheffizienten Spitzenlasten (z.B.: Hackschnitzel)	bewährtes Anlagenkonzept in Kleinstädten	bewährtes Anlagenkonzept in Großstädten
Vorteile	wesentlich effizienter als die Summe vieler Einzelkälteanlagen	sinnvoll beim Einsatz durch Absorptions-Kältemaschinen und Nutzung von Abwärme	kleinere Projekte mit kurzen Wegen (der Wärmeweg selbst gehört zur Wärmequelle) und / oder mit hohem sommerlichen Kühlbedarf	besonders wirtschaftlich und zukunftsfähig, „nahezu CO <sup>2</sup> -Emissions frei	universell versorgbares Konzept mit hohem Nutzen und Zukunftssicherheit; das Netz selbst kann zur Aufnahme von Regelenergie und als Puffer genutzt werden	entwickelt zur Transformation konventioneller Wärmenetze oder der Umstellung von Quartieren mit Einzelheizungen auf eine dekarbonisierte und ökonomische Wärmeversorgung	bewährtes Anlagenkonzept in Kleinstädten	bewährtes Anlagenkonzept in Großstädten

Klassifizierung	Eisnetz	Kältenetz	Quellnetz	niedertemperaturiges Abwärme-Wärmenetz	wechselwarmes Wärmenetz	umschaltbares Wärmenetz	niedertemperaturige Wärmenetze	hohtemperaturige Wärmenetze
technische Besonderheit	durch die Nutzung latenter Wärme sehr große Kühlleistung (Faktor 5-8 zum typischen Kältenetz); neues Geschäftsfeld für Stadtwerke	zentrale Kälte aus sommerlicher Überschusswärme von BHKW über Absorptions-Kältemaschinen	bei jedem Anrainer wird eine Wärmepumpe benötigt, die durch die Wärmequelle kostengünstiger arbeitet als z.B. Luftwärmepumpen; sehr gut geeignet zum Heizen und Kühlen	die beim Anrainer benötigte Wärmepumpe arbeitet wesentlich effektiver mit deutlich besseren Leistungszahlen als kalte Quellen	die beim Anrainer benötigte Wärmepumpe muss nur die Temperatur auf das Niveau für die Warmwasserbereitung heben; sehr effektive Wärmeversorgung mit Leistungszahlen der Wärmepumpe bis zum Faktor 7. Vorteil bei z.B. MFH- oder Gewerbe-Quartieren o.ä. ist die Platzverschiebung, da die großen Heizlasten zentral gedeckt werden können und die WW-Versorgung mit kleinen WP oder Wohnungsstationen oder Durchlauferhitzern platzsparend je Gebäude abgewickelt werden können, gleichzeitig aber die Netzverluste eingespart werden	die in der Übergabestation enthaltene Wärmepumpe hebt im Bedarfsfall die Temperaturen auf das Soll und macht damit das Wärmenetz Prosumenten-fähig, zum "Mitmachnetz". Wichtig: Bindung des Netzes an "schlechtesten" Abnehmer entfällt durch den Bivalenzbetrieb mit der Wärmepumpe	ausgereifte Technik	ausgereifte Technik
ökonomische Besonderheit	momentan aus Wirtschaftlichkeitsgründen nur in etwas größerer Anwendung (mind. 100 kW Kühlleistung) umsetzbar	mit 6 K / m <sup>3</sup> sehr kleine Kühlleistung und relativ hoher Antriebsaufwand	mit besserem Nutzen als Erdwärmepumpen durch ganzjährig kontinuierlichere Quelltemperaturen. Zudem entfallen die aufwendigen Bohrungen für die einzelnen Erdsonden.	Nutzung bisher nicht genutzter Potenziale mit weitgehender Unabhängigkeit von Energieimporten	günstige Lösung zur energetischen Transformation der Energieversorgung gegenüber der Einzelhausversorgung; sehr vielfältige Nutzung von Synergien (ungenutzte Potenziale des Ortes)	günstige Lösung zur energetischen Transformation der Energieversorgung gegenüber der Einzelhausversorgung; sehr vielfältige Nutzung von Synergien (ungenutzte Potenziale des Ortes)	bisher gute und günstige Lösung	bisher gute und günstige Lösung
ökologische Besonderheit	arbeitet ohne Chemie (Kältemittel ist Wasser)	spart viel einzelne klimabedenkliche Kälteanlagen	durch bessere Leistungszahl bessere Ökobilanz	besonders gute Ökobilanz durch Nachnutzung von sonst kaum nutzbarer Abwärme	Nutzung von Erneuerbarer Energie außerhalb des eigenen Grundstückes (Scheune am Ortsrand)	Nutzung von Erneuerbarer Energie außerhalb des eigenen Grundstückes (Scheune oder Biogasanlage am Ortsrand)	abhängig von Öl, Gas und Kohle. Ausnahme Raum München mit Tiefengeothermie oder Anlagen mit thermischer Abfallbehandlung (Müllverbrennung)	abhängig von Öl, Gas und Kohle. Ausnahme Raum München mit Tiefengeothermie oder Anlagen mit thermischer Abfallbehandlung (Müllverbrennung)
soziologische Besonderheit	betriebsübergreifende Nutzung - dadurch Kollektive Lösung von Klimaschutzaufgaben	kommunale Dienstleistung als Geschäftsmodell für Stadtwerke	Chance zur ökonomischen Dekarbonisierung von kleinen Ortschaften oder Siedlungen an Flüssen und Seen; interessant für eine	sektorübergreifend zwischen Industrie und Kommune	sektorübergreifend zwischen Industrie, Gewerbe, Kommune und Bürgerschaft; besonders geeignet für die Betriebsführung über eine Energiegenossenschaft	sektorübergreifend zwischen Industrie, Gewerbe, Kommune und Bürgerschaft; besonders geeignet für die Betriebsführung über eine Energiegenossenschaft	Gewinne der Stadtwerke unterstützen zum Beispiel die Subventionen des Nahverkehrs	Gewinne der Stadtwerke unterstützen zum Beispiel die Subventionen des Nahverkehrs

Klassifizierung	Eisnetz	Kältenetz	Quellnetz	niedertemperaturiges Abwärme-Wärmenetz	wechselwarmes Wärmenetz	umschaltbares Wärmenetz	niedertemperaturige Wärmenetze	hohtemperaturige Wärmenetze
			Betriebsführung als Energiegenossenschaft					
Zukunfts-fähigkeit	erstmalig kann Kälte als Regelenenergie durch die sehr hohe Speicher-fähigkeit von Flüssigeis bis zur saisonalen Spei-cherung eingesetzt werden	es werden selten Neuanlagen errichtet	fähig, auf bis zu 100 % Erneuerbare Energien transformiert zu werden	hohe Nachhaltigkeit	langfristige Versorgungs-sicherheit gegenüber Klimawandel, Energie-impporten und dynamischer Gesetze	besondere Chance für den Gebäudebestand, ökologisch <u>und</u> ökonomisch den technologi-schen Wandel aus der fossilen Energieversor-gung zu organisieren	nur sehr bedingt dekarbonisierbar	nur sehr bedingt dekarbonisierbar
Referenz (Stand 06/2021)	in Planung	Chemnitz	Lott in Achern (in Pla-nung / Umsetzung) --> Flusswasser	Meitingen	Haßfurt	Dollnstein	alle Kleinstädte mit Fernwärme	alle Großstädte
			Schlier (in Umsetzung) → Erdsonden	Kerpen Horrem (in Planung) → Grubenwasser Braunkohle-Tagebau	Flehingen, Erweiterung im Bau	St. Georg-Leipzig (in Bau)		
			Weißenburg (in Planung) → Reinwasser aus Kläranlage		Kerpen, Vinger Weg (z.Z. im Probebetrieb)			
			weitere im frühen Stadium...		Bedburg Kaster (in Planung / Umsetzung) → Abwasser-Wärmetau-scher			
					Arbach (in Planung) → Erdsonden aber dann gleitend wg. Argument vgl. Zeile 12			



INNOVATIONSREGION  
MITTELDEUTSCHLAND

## **Kontakt**

Metropolregion Mitteldeutschland Management GmbH  
Schillerstraße 5  
04105 Leipzig

0341 / 600 16 – Durchwahl  
Gansler@mitteldeutschland.com

[www.mitteldeutschland.com](http://www.mitteldeutschland.com)  
[www.innovationsregion-mitteldeutschland.com](http://www.innovationsregion-mitteldeutschland.com)

Ein Projekt der



METROPOLREGION  
MITTELDEUTSCHLAND