GEOLOGIE • UMWELT • ROHSTOFFE • BAUGRUND

JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH · Saalbahnhofstraße 25 c · 07743 Jena

Fachbeiträge der JENA-GEOS® Nº 01/2022

JG	HOPF, J.: Potentialanalyse von Aquiferspeichern als Beitrag zur Umsetzung der Wärmewende in Thüringen Thüringen – JENA-GEOS, Fachbeiträge, Jg. 2022, Band 1	2022/01

Friedrich-Schiller-Universität Jena
Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät
Institut für Geowissenschaften

Ernst-Abbe-Hochschule Jena
Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen

Potentialanalyse von Aquiferspeichern als Beitrag zur Umsetzung der Wärmewende in Thüringen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Master of Science im Studiengang *Umwelt- und Georessourcenmanagement*
(M. Sc.)

vorgelegt von: Julia Hopf
geboren in: Arnstadt

in Zusammenarbeit mit: JENA-GEOS-Ingenieurbüro GmbH

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Schirmer, EAH Jena

Zweitgutachter: Dr. Kersten Roselt, JENA-GEOS-Ingenieurbüro GmbH

Jena, 22. Dezember 2021

~

Sollten einst auf der mehr oder weniger bevölkerten Erde die Wälder so stark gelichtet und die Kohlenlager erschöpft sein, so ist es wohl denkbar, dass man die Innenwärme der Erde sich mehr und mehr dienstbar macht, dass man sie durch besondere Vorrichtungen in Schächten oder Bohrlöchern zur Oberfläche leitet und zur Erwärmung der Wohnungen oder selbst zur Heizung von Maschinen verwendet.

~

Carl Bernhard von Cotta, Freiberger Bergrat und Mineraloge, 1858*

Inhalt

ABBILDUNGSVERZEICHNIS ..... **III**

TABELLENVERZEICHNIS ..... **V**

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS ..... **VI**

VARIABLENLISTE ..... **VIII**

1 EINLEITUNG **1**

2 STAND DES WISSENS & DER TECHNIK **3**

2.1 VORAUSSETZUNGEN FÜR DEN BAU VON ATES 4
2.1.1 Geeignete geologische Strukturen 4
2.1.2 Quellen thermischer Energie 5
2.1.3 Wärmesenken und Wärmenetz 5
2.2 FUNKTIONSWEISE 6
2.3 HISTORISCHER ABRISS 8
2.4 ATES-ANLAGEN IN DEUTSCHLAND 10
2.4.1 Deutscher Bundestag / Reichstagsgebäude Berlin 11
2.4.2 Geothermische Heizzentrale (GHZ) Neubrandenburg 11
2.4.3 Rostock 12
2.4.4 Bonner Bogen 12
2.5 GRUNDLAGEN DER WIRTSCHAFTLICHKEIT 12
2.6 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN & GENEHMIGUNGSFÄHIGKEIT 13
2.6.1 Rechtsrahmen in der EU und Deutschland 13
2.6.2 Raumwiderstände 16
2.6.3 Genehmigungsverfahren in Thüringen 18
2.7 UMWELTAUSWIRKUNGEN DER SPEICHERUNG THERMISCHER ENERGIE IM UNTERGRUND 19
2.8 FORSCHUNGS- UND HANDLUNGSBEDARFE 21

3 POTENTIALRÄUME IN THÜRINGEN **23**

3.1 GEOLOGIE THÜRINGENS - KURZABRISS 23
3.2 ERSTELLUNG DER POTENTIALKARTEN 24
3.3 QUARTÄRE POTENTIALRÄUME FÜR AQUIFERSPEICHER IN THÜRINGEN 29
3.4 DISKUSSION DER ERGEBNISSE 30

4 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG EINES AUSGEWÄHLTEN STANDORTES **33**

4.1 BESONDERHEIT *SMOOD® GEOHEATSTORAGE* 33
4.1.1 Dichtwände des *GeoHeatStorage* 33
4.1.2 Definition Muster-Wärmespeicher 35
4.2 ENTWICKLUNG EINES WÄRMEGESTEHUNGSKOSTENTOOLS FÜR AQUIFERSPEICHER 35
4.3 GESTEHUNGSKOSTENBERECHNUNG 36
4.3.1 Wärmebedarf bzw. Wärmeüberschuss 38
4.3.2 Geologie & Speicherauslegung 40
4.3.3 Brunnen & Pumpen 42
4.3.4 Investitionskosten 43
4.3.5 Betrieb & Wartung 43
4.3.6 Gestehungskosten 44
4.4 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG 45
4.4.1 Standortbeschreibung 45
4.4.2 Gegenüberstellung Standard-ATES und *GeoHeatStorage* 48
4.5 BERÜCKSICHTIGUNG CO_2-BEPREISUNG 50

5 ZUSAMMENFASSUNG **51**

5.1 WESENTLICHE ERKENNTNISSE 51
5.2 SCHLUSSFOLGERUNGEN & EINORDNUNG DER ERGEBNISSE 52
5.3 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN & AUSBLICK 52

REFERENZEN 54

ANHANG A 60

ANHANG B 64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsweise eines *Aquifer Thermal Energy Storage* Systems im Wechselprinzip. Links Winterbetrieb. Rechts Sommerbetrieb. Übernommen aus VDI 4640-2001. 7

Abbildung 2: Funktionsweise eines *Aquifer Thermal Energy Storage* Systems im Wechselprinzip unter Nutzung zweier übereinander liegender Aquifere. Links Sommerbetrieb. Rechts Winterbetrieb. Übernommen aus VDI 4640-2001. 8

Abbildung 3: 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). 9

Abbildung 4: Übersicht stillgelegter, in Betrieb und in Planung befindlicher Aquiferspeicher sowie Forschungsprojekte in Deutschland. Angepasst nach (Fleuchaus et al., 2021). 11

Abbildung 5: Überblick über mögliche Auswirkungen von Temperaturveränderungen im Untergrund (nach Hähnlein, 2013). 20

Abbildung 6: Geologische Übersichtskarte von Thüringen inkl. Untergliederung der geologischen Großräume Thüringens: 1) Südharz und Kyffhäuser 2) Thüringer Becken 3) Thüringer Wald 4) Thüringisch-Fränkisches Schiefergebirge 5)Südwest- und Südthüringen (Karte von Arbeitsgruppe Geologie, 2021; angepasst nach Bergmannsverein Erfurt e.V., 2007). 24

Abbildung 7: Datengrundlagen und Zusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren, Raumwiderständen und Aquiferspeicher-Potentialen in Thüringen. 26

Abbildung 8: Workflow der Erstellung der Aquiferspeicher-Potentialkarten Thüringen. 28

Abbildung 9: Quartäre Potentialräume für Aquiferspeicher in Thüringen. Rot (0,05 - 0,20): Sehr geringes Potential. Orange (0,21 - 0,40): Geringes Potential. Gelb (0,41 - 0,60): Mittleres Potential. Hellgrün (0,61 - 0,80): Gutes Potential. Grün (0,81 - 1,00): Sehr gutes Potential. Koordinatenbezugs-system: ETRS89 / UTM Zone 32N. 29

Abbildung 10: Quartäre Potentialräume für Aquiferspeicher in Thüringen - Übersicht aller Ausschlussgebiete. Koordinatenbezugssystem: ETRS89 / UTM Zone 32N. 30

Abbildung 11: Quartäre Potentialräume für Aquiferspeicher in Thüringen - Übersicht Raumwiderstände. Koordinatenbezugssystem: ETRS89 / UTM Zone 32N. 31

Abbildung 12: Quartäre Potentialräume für Aquiferspeicher in Thüringen und Standorte von Thüringer Abwärmeunternehmen und deren jährliche Abwärmemengen. Koordinatenbezugssystem: ETRS89 / UTM Zone 32N. 32

Abbildung 13: Verfahren zur Errichtung einer Mixed-in-Place-Dichtwand: a) Zugabe der Suspension beim Abteufen der Bohrung mit der Dreifachschnecke. b) Homogenisierungsvorgang durch gegenläufige Bewegung der Bohrschnecken beim Herausdrehen. c) Illustration des Ablaufs des „Doppelten Pilgerschrittverfahrens“ zur Herstellung einer geschlossenen Dichtwand (BAUER Gruppe, 2015). 34

Abbildung 14: Übersichtsschema Bestimmung Gestehungskosten: Eingangsgrößen der Gestehungskostenberechnung (hellrot, blau), Werte aus denen sie berechnet werden (grün, blau), ein Teil der Eingabeparameter (blau). 37

Abbildung 15: Übersichtsschema Eingangswerte Investitionskostenberechnung für die Wärmegestehungskostenberechnung eines Aquiferspeichers: Eingabeparameter (blau), Konstanten (violett), Berechnungsergebnisse (türkis, grün), Eingangsgröße (rot). 38

Abbildung 16: Übersichtsschema Eingangswerte Berechnung der laufenden Kosten für die Wärmegestehungskostenberechnung eines Aquiferspeichers: Eingabeparameter (blau), Konstanten (violett), Berechnungsergebnisse (türkis, grün), Eingangsgröße (rot). 39

Abbildung 17: Schema zur unterirdischen Speicherauslegung des *GeoHeatStorage* (nicht maßstabsgetreu). 41

Abbildung 18: Ausschnitt aus dem Gestehungskostentool. Beispiel für Warnhinweise bei unplausiblen Berechnungsergebnissen: a) Maximale Betriebstemperatur gem. VDI 4640 überschritten bei gewählter Temperaturspreizung für die Auslegung eines „Standard“-ATES. b) Minimale Betriebstemperatur kritisch nahe an Gefrierpunkt von Wasser bei gewählter Kombination von Durchläufen pro Halbjahr und Temperaturspreizung für die Auslegung des *GeoHeatStorage*. 41

Abbildung 19: Lokation des Standortes für die Beispiel-Szenarien in Nordhausen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Aquiferspeicheranlagen mit dem Gestehungskostentool. Hintergrundkarte: ESRI Satellite. Koordinatenbezugs-system: ETRS89 / UTM Zone 32N. 46

Abbildung 20: Steigerung der CO_2-Bepreisung und sich daraus ergebende zusätzliche Heizkosten für eine durchschnittliche Wohnung (Minol, 2020). 50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Relevante Gesetzesgrundlagen der Raumwiderstände und ihre Bedeutung für die Errichtung von Aquiferspeicheranlagen (verändert nach Hesse *et al.*, 2014). 17

Tabelle 2: Überblick über die in Thüringen anzuwendenden Rechtsvorschriften, zuständigen Stellen, Pflichten der Vorhabensträger*innen und die erforderlichen Genehmigungen für den Bau und Betrieb von Aquiferspeicher-Anlagen (TLVwA, 2013). 19

Tabelle 3: Eingabeparameter für das Gestehungskostentool entsprechend der Wahl des Standortes und der Festlegung der Beispielszenarien. 47

Tabelle 4: Mit dem Gestehungskostentool berechnete Eingangsgrößen und Wärmegestehungskosten beider Beispielszenarien. Gegenüberstellung Standard-ATES und GeoHeatStorage. Szenario 1: Heizbedarf bekannt. Szenario 2: Überschussleistung bekannt. 49

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
4GDH(C)	4th Generation District Heating (and Cooling)
5GDH(C)	5th Generation District Heating (and Cooling)
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage
BauGB	Baugesetzbuch
BBergG	Bundesberggesetz
BBodschG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BVG	Bundesverband Geothermie
COP	Coefficient of Performance (dt. Leistungszahl)
DL	Durchlauf
DOC	Dissolved Organic Carbon
DOI	U.S. Department of Energy
ECES	Energy Conservation through Energy Storage
EU	Europäische Union
GeolDG	Geologiedatengesetz
GHS	GeoHeatStorage
GHZ	Geothermische Heizzentrale
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
HQSG	Heilquellenschutzgebiet
HT-ATES	Hochtemperatur- bzw. High Temperature ATES
IEA	International Energy Agency
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LT-ATES	Low Temperature ATES
MIP	Mixed-in-Place-Verfahren
MT-ATES	Medium Temperature ATES
NL	Niederlande
NT-ATES	Niedrigtemperatur-ATES

RED II	EU-Richtlinie Renewable Energy Directive zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen vom 11.12.2018
ThEGA	Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH
ThürBVOT	Thüringer Tiefbohrverordnung
ThürKlimaG	Thüringer Klimagesetz
ThürUVPG	Thüringer UVP-Gesetz
ThürWG	Thüringer Wassergesetz
TLUBN	Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
TLVwA	Thüringer Landesverwaltungsamt
TRL	Technical Readiness Level (dt. Technologie-Reifegrad)
UTES	Underground Thermal Energy Storage
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
UWB	Untere Wasserbehörde
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WSG	Wasserschutzgebiet

Variablenliste

Variable	Einheit	Variablenbezeichnung
Potentialkarten		
$F_{1\ bis\ n}$	-	Einflussfaktoren 1 bis n
n	-	Anzahl der Einflussfaktoren
P	-	Potential
P_{geol}	-	geologisches Potential
X_i	versch.	zu transformierender Wert
$X_{i,\ 0\ bis\ 1}$	-	neuer, normalisierter Wert
X_{max}	versch.	Maximum des Wertes
X_{min}	versch.	Minimum des Wertes
Gestehungskostenberechnung		
a	m	Länge des *GeoHeatStorage*
A_M	m^2	Mantelfläche der Dichtwand *GeoHeatStorage*
A_t	€/a	Betriebsausgaben des jeweiligen Jahres
b	m	Breite des *GeoHeatStorage*
c_a	$MJ/m^3\ K$	volumetrische Wärmekapazität des Aquifers
CC	€	laufende Kosten (engl. *current costs*)
COP_{HP}	-	COP der Wärmepumpe
c_S	$MJ/m^3\ K$	volumetrische Wärmekapazität des Lockergesteins
d	m	Mindestdurchmesser
DC	€	bedarfsbezogene Kosten (engl. *demand-related costs*)
EC	€	Stromkosten (engl. *electricity costs*)
ED_C	MWh	Kühlenergiebedarf (bzw.)
ED_H	MWh	Heizenergiebedarf
h_{GWL}	m	Mächtigkeit des Grundwasserleiters
h_{top}	m	Mächtigkeit der Deckschicht
i	%/a	kalkulatorischer Zinssatz
I_0	€	Investitionskosten zur Gestehungskostenberechnung
I_{ATES}	€	Investitionskosten ATES-Anlage
I_{DW}	€	Investitionskosten der Dichtwände des *GeoHeatStorage*
k_f	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert
L_C	m	benötigte Filterlänge kalte Brunnen
L_H	m	benötigte Filterlänge warme Brunnen
M_{ATES}	€	Instandhaltungskosten

m_{ATES}	%	Instandhaltungsfaktor
N	a	Nutzungsdauer bzw. Lebenszeit der Anlage
n_P	%	Gesamtporenanteil
n_{Peff}	%	effektiver Porenanteil
OC	€	Betriebskosten (engl. *operating costs*)
P_C	kW	Kühlleistung
P_H	kW	Heizleistung
P_{PC}	kW	benötigte Pumpleistung zum Kühlen
P_{PH}	kW	benötigte Pumpleistung zum Heizen
q	-	Diskontierungsfaktor
Q	m^3/h	Wasseranfall je laufendem Meter Filtergalerie
Q_B	m^3/h	Wasseranfall je Brunnen
q_C	m^3/h	Pumprate zum Kühlen
q_H	m^3/h	Pumprate zum Heizen
R_{ATES}	€	Wiederbeschaffungskosten
t	-	jeweiliges Betriebsjahr
t_C	h	Zeit der Kühlperiode
t_H	h	Zeit der Heizperiode
U_S	m	Speicherumfang *GeoHeatStorage*
v	m/s	Fließgeschwindigkeit in Rohrleitungen
V_A	m^3	benötigtes Speichervolumens des *GeoHeatStorage*
V_C	m^3	benötigtes Grundwasservolumen zum Kühlen
V_H	m^3	benötigtes Grundwasservolumen zum Heizen
V_{Peff}	m^3	effektives (durchflusswirksames) Porenvolumen
W_{ges}	MWh/a	Gesamtenergiebedarf
WGK	€/MWh	Wärmegestehungskosten
W_h	MWh	produzierte Wärmemenge des jeweiligen Jahres
ΔQ_{Ges}	MJ	Gesamtwärmemenge
ΔT	K	Temperaturspreizung des Grundwassers
ε_{HP}	%	Leistungszahl der Wärmepumpe
η_P	%	Gesamteffizienz der Pumpen
η_S	%	Speichereffizienz

1 Einleitung

Wie können wir unser Leben nachhaltiger gestalten? An welchen Stellen können wir effektiv und einfach Treibhausgas-Emissionen vermindern? Welche Potentiale können ausgeschöpft werden, um das 1,5-Grad-Ziel des Pariser Klimaabkommens zu erreichen? Diese und ähnliche Fragen gehören zu den drängendsten unserer Zeit.

Längst sind sich Wissenschaft, Politik und Gesellschaft einig, dass weit mehr als bisher unternommen werden muss, um die Folgen des menschengemachten Klimawandels abzumildern. Dazu gehört auch, dass neben der ‚Energiewende' im Strom- und Mobilitätssektor seit wenigen Jahren auch eine ‚Wärmewende' angestrebt wird. Die Versorgung mit Wärme, Kälte und Warmwasser soll in Deutschland in Zukunft ebenfalls vorrangig durch den Einsatz erneuerbarer Energien erfolgen (BMWi, 2021).

Dies ist längst überfällig, da der Wärmesektor für rund die Hälfte des Endenergiebedarfs und ca. ein Drittel der Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich ist. Zudem stagnierte der Anteil erneuerbarer Energien in diesen Bereichen in den letzten 10 Jahren bei knapp 15 % (Fleuchaus *et al.*, 2021; Sandrock *et al.*, 2020; UBA, 2021a). Mögliche Ursachen dafür könnten sein:

1) ein Mangel an adäquaten Speicherlösungen zur Überbrückung des saisonalen Versatzes der Nachfrage und Produktion von thermischer Energie (Fleuchaus *et al.*, 2021)
2) der verhältnismäßig niedrige, stabile Gaspreis über die letzten Jahre (BDEW, 2021)
3) unzureichende Kompatibilität der konventionellen, flächig verbreiteten Wärmenetze und niedrigtemperierter Wärme aus erneuerbaren Energien (Buffa *et al.*, 2019; Lund *et al.*, 2014, 2021).

Oberflächennahe Aquifere sind hervorragend geeignet als Speicher zum Ausgleich saisonaler Angebots- und Nachfrageunterschiede nach thermischer Energie (Bloemendal *et al.*, 2015; Fleuchaus *et al.*, 2021; Lee, 2010; Schüppler *et al.*, 2019). Bisher sind sog. Aquiferspeicher noch wenig bekannt und es gibt nur vereinzelte Anlagen in Deutschland. Zudem sind ihr Bau und Betrieb an bestimmte Voraussetzungen gebunden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde anhand verschiedener Blickwinkel das Potential von Aquiferspeichern als Beitrag zur Umsetzung der Wärmewende in Thüringen analysiert.

Zu Beginn erfolgt eine ausführliche Dokumentation des Stands der Technik und des Wissens über Aquiferspeicher. Daran schließt sich die Identifikation und Darstellung

quartärer Potentialräume für ATES in Thüringen an. Im folgenden Kapitel wird die Entwicklung eines Tools zur automatisierten Berechnung der Wärmegestehungskosten von Aquiferspeichern erläutert, sowie dessen Anwendung an zwei Beispielszenarien demonstriert. Abschließend werden die wichtigsten Erkenntnisse der drei Teile zusammengefasst und in Beziehung zu den Zielen und Maßnahmen der Landeswärmestrategie Thüringens gesetzt.

2 Stand des Wissens & der Technik

Aquiferspeicher oder auch *Aquifer Thermal Energy Storage* (ATES) Systeme können eine wichtige Schlüsseltechnologie im Rahmen der Wärmewende sein. Sie dienen zur Überbrückung saisonaler Unterschiede zwischen Wärme-/Kälteangebot und -nachfrage. Wärme, produziert durch erneuerbare-Energien-Technologien und vorhandene Ab- und Überschusswärme von bspw. Gebäuden und Industrieanlagen kann in geologischen Strukturen gespeichert werden. Damit ist es möglich die Versorgung mit Wärme, Kälte und Warmwasser effizienter und treibhausgasärmer zu gestalten.

Aquiferspeicher gehören zu den sog. *Underground Thermal Energy Storage* (UTES) Systemen zur sensiblen Speicherung thermischer Energie in der Erdkruste. Entsprechend der Tiefenlage des Speichers sind sie der oberflächennahen, mitteltiefen oder tiefen Geothermie zuzuordnen. Die Anlagen zeichnen sich durch hohe Speichereffizienzen und Speicherkapazitäten aus (Sterner & Stadler, 2017; Fleuchaus *et al.*, 2018). Zudem sind die Speicherkosten von ATES im Verhältnis zu anderen Speichertechnologien vergleichsweise gering (Fleuchaus *et al.*, 2021). Dadurch sind sie sehr gut als Langzeitspeicher von thermischer Energie für großskalige Anwendungen, wie etwa die Versorgung ganzer Quartiere mit Heiz- und Kühlenergie sowie Warmwasser, geeignet (Sterner & Stadler, 2017; Fleuchaus *et al.*, 2018). Am effizientesten genutzt werden können Aquiferspeicher bei Abnehmern mit hohem und konstantem Energieverbrauch über das ganze Jahr hinweg. Dies sind z.B. Bürogebäude, Flughäfen, Universitäten, Einkaufszentren und Krankenhäusern (Schüppler *et al.*, 2019).

Die Technik zur Speicherung von Wärme im Grundwasser (GW) wurde bereits vor mehreren Jahrzehnten entwickelt und kann heute als gut etabliert betrachtet werden. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand des Wissens und der Technik von *Aquifer Thermal Energy Storage* (ATES)-Systemen in folgenden Themenbereichen:

- Voraussetzungen für den Bau von ATES,
- Funktionsweise von Aquiferspeichern,
- historischer Abriss,
- Überblick über kommerziell genutzte Anlagen in Deutschland,
- Grundlagen zu Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen,
- rechtliche Rahmenbedingungen und
- Umweltauswirkungen von ATES.

Schließlich werden sich aus diesen Themen ergebende Forschungs- und Handlungsbedarfe abgeleitet.

2.1 Voraussetzungen für den Bau von ATES

Drei wesentliche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit der Bau eines Aquiferspeichers an einem Standort möglich ist: das Vorliegen eines Grundwasserleiters mit bestimmten Eigenschaften sowie das Vorhandensein geeigneter Quelle(n) und Abnehmer von thermischer Energie.

2.1.1 Geeignete geologische Strukturen

Die wichtigste Voraussetzung zum Bau eines Aquiferspeichers ist die Geologie. Es 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 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.

Nach Hölting & Coldewey (2013) wird Grundwasser in DIN 4049 definiert als „unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich oder nahezu ausschließlich durch die Schwerkraft und den durch die Bewegung selbst ausgelösten Reibungskräften bestimmt wird“.

Ebenfalls entsprechend DIN 4049-3 ist ein Grundwasserleiter „ein Gesteinskörper, der Hohlräume (Poren, Klüfte) enthält und somit geeignet ist, Grundwasser zu leiten“(Hölting & Coldewey, 2013). Der aus dem Englischen stammende und inzwischen synonym verwendete Begriff Aquifer dagegen wird definiert als „der Teil einer Schichtenfolge, der ausreichend durchlässiges (Boden-)Material enthält, um ein signifikantes Wasservolumen an Brunnen oder Quellen abzugeben“ (Hölting &

Coldewey, 2013). Hölting & Coldewey (2013) empfehlen diesen und andere englischsprachige Begriffe nicht zu verwenden. Die Autorin hat sich jedoch entschieden der gängigen Praxis der (Fach-)Literatur zu folgen und Grundwasserleiter und Aquifer als Synonyme i.S. der Definition nach DIN 4049 zu benutzen.

2.1.2 Quellen thermischer Energie

Als Quelle für die einzuspeichernde thermische Energie dient im Regelfall der saisonale Wärme- bzw. Kälteüberschuss eines Gebäudes, Gebäudekomplexes oder Quartiers. Andere mögliche Quellen sind Überschusswärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), 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.

Die Wärmequellen dürfen aus ökologischen Gründen keine zu hohen Temperaturen aufweisen. Gemäß VDI 4640 darf während des Speicherbetriebs die ungestörte Grundwassertemperatur im Jahresmittel maximal um ± 6 K erwärmt bzw. abgekühlt werden. Zeitgleich gilt, dass die Speichertemperaturen 20 °C nicht über- sowie 5 °C nicht unterschreiten dürfen. In diesem Rahmen werden die Einflüsse des Speichers auf die physikalischen, chemischen und biologischen Gegebenheiten des Untergrunds als vernachlässigbar gering angesehen, aufgrund der ausgeglichenen thermischen Bilanz über ein Jahr hinweg. Bei Mittel- und Hochtemperaturspeichern (von 20 bis 90 °C) schreibt die VDI 4640 vor, dass standortspezifisch zu prüfen ist, ob eine Gefährdung der Grundwasserqualität ausgeschlossen werden kann (VDI, 2001b, 2010).

2.1.3 Wärmesenken und Wärmenetz

Bedingt durch den jahreszeitlichen Versatz der Generierung von Wärme und des tatsächlichen Heizbedarfs, gibt es in den mittleren Breiten v. a. während der Heizperiode fast flächendeckend Abnehmer von thermischer Energie. Diese wird in Form von Raumheizung und Warmwasser benötigt; kann allerdings auch saisonal oder ganzjährig zur Klimatisierung eingesetzt werden. Abnehmer sind demzufolge sowohl Wohngebäude als auch gewerbliche sowie öffentliche Einrichtungen und Gebäude, aber auch Gewächshäuser und Rechenzentren (Buffa *et al.*, 2019; Fleuchaus *et al.*, 2018; Lund *et al.*, 2014, 2021).

Im Bereich Heizung und Warmwasser besteht die Herausforderung, dass die von den momentan hauptsächlich verbauten Wärmenetzen benötigten Vorlauftemperaturen von knapp unter 100 °C von einem Niedrigtemperatur-Aquiferspeicher (NT-ATES),

auch in Verbindung mit einer Wärmepumpe, schwer zur Verfügung gestellt werden können (Buffa *et al.*, 2019; Lund *et al.*, 2014, 2021).
Ein Lösungsansatz hierfür könnte die Anbindung des Speichers an ein Wärmenetz der vierten oder fünften Genration sein. Alternative Begriffe, die teils synonym verwendet werden, obwohl sie sich in ihrer Definition unterscheiden können, sind Wärmenetz 4.0, Anergienetz oder Kaltes (Nah)Wärmenetz und international *4th* bzw. *5th Generation District Heating (and Cooling)*, kurz 4GDH(C) bzw. 5GDH(C). Diese Netze sind für niedrigere Temperaturen von weniger als 70 °C und das Einspeisen von thermischer Energie aus verschiedenen Quellen (hauptsächlich erneuerbaren Ursprungs) ausgelegt (Buffa *et al.*, 2019; Lund *et al.*, 2021; Pehnt *et al.*, 2017).

2.2 Funktionsweise

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 über eine Brunnendublette oder mehrere Paare von Brunnen. Im Sommer wird das Grundwasser aus dem sog. 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 sog. 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 Wärmenergie an den Heizkreislauf übertragen hat, über den kalten Brunnen wieder eingespeist. Es bilden sich zwei voneinander getrennte thermische Reservoire. 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 1 verdeutlicht die Funktionsweise von ATES im Wechselprinzip.

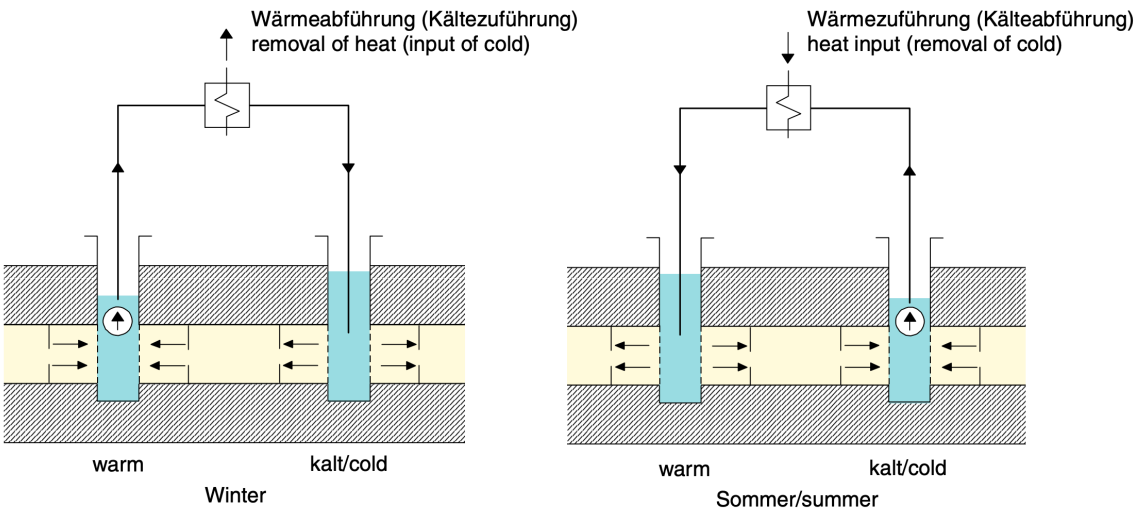


Abbildung 1: Funktionsweise eines *Aquifer Thermal Energy Storage* Systems im Wechselprinzip. Links Winterbetrieb. Rechts Sommerbetrieb. Übernommen aus VDI 4640-2001.

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 mit Hilfe einer Wärmepumpe realisiert werden (Fleuchaus *et al.*, 2018).

Sofern mehrere Grundwasser-Stockwerke vorhanden sind, kann die Speicherung von Wärme und Kälte auch in getrennten Aquiferen erfolgen (s. Abbildung 2). Dies kann sowohl mit mehreren Bohrungen als auch mit einer einzigen Bohrung 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).

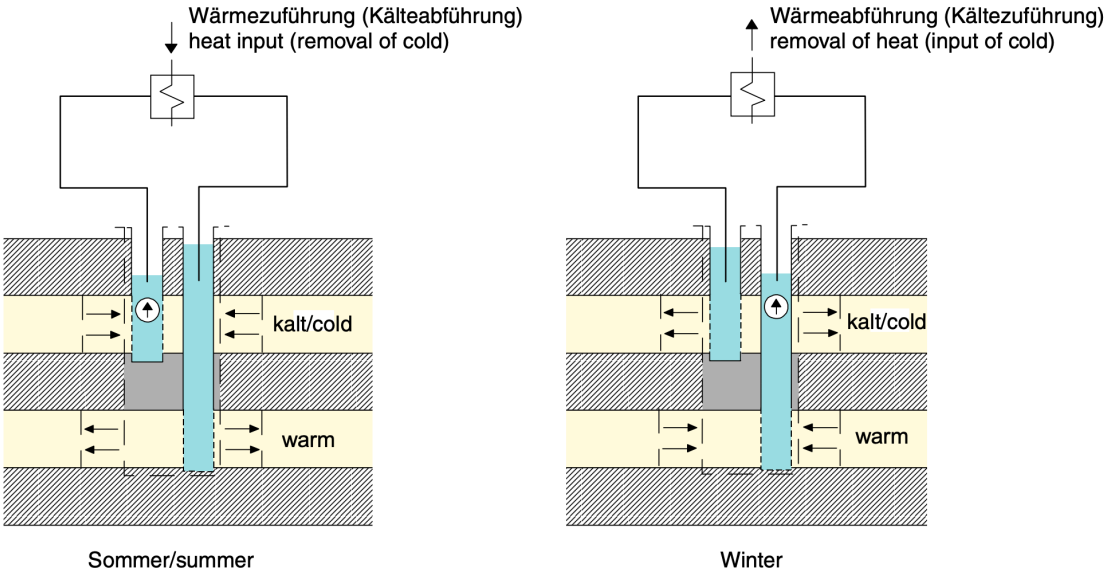


Abbildung 2: Funktionsweise eines *Aquifer Thermal Energy Storage* Systems im Wechselprinzip unter Nutzung zweier übereinander liegender Aquifere. Links Sommerbetrieb. Rechts Winterbetrieb. Übernommen aus VDI 4640-2001.

2.3 Historischer Abriss

Die erstmalige Nutzung von Aquiferen zur Speicherung thermischer Energie entwickelte sich in den 1960ern in Shanghai aus künstlicher Grundwasseranreicherung. 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 zu Energiespeicherung. Entscheidend hierfür war die Verabschiedung des Durchführungsabkommens *Energy Conservation through Energy Storage* (ECES) der *International Energy Agency* (IEA). Abbildung 3 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).

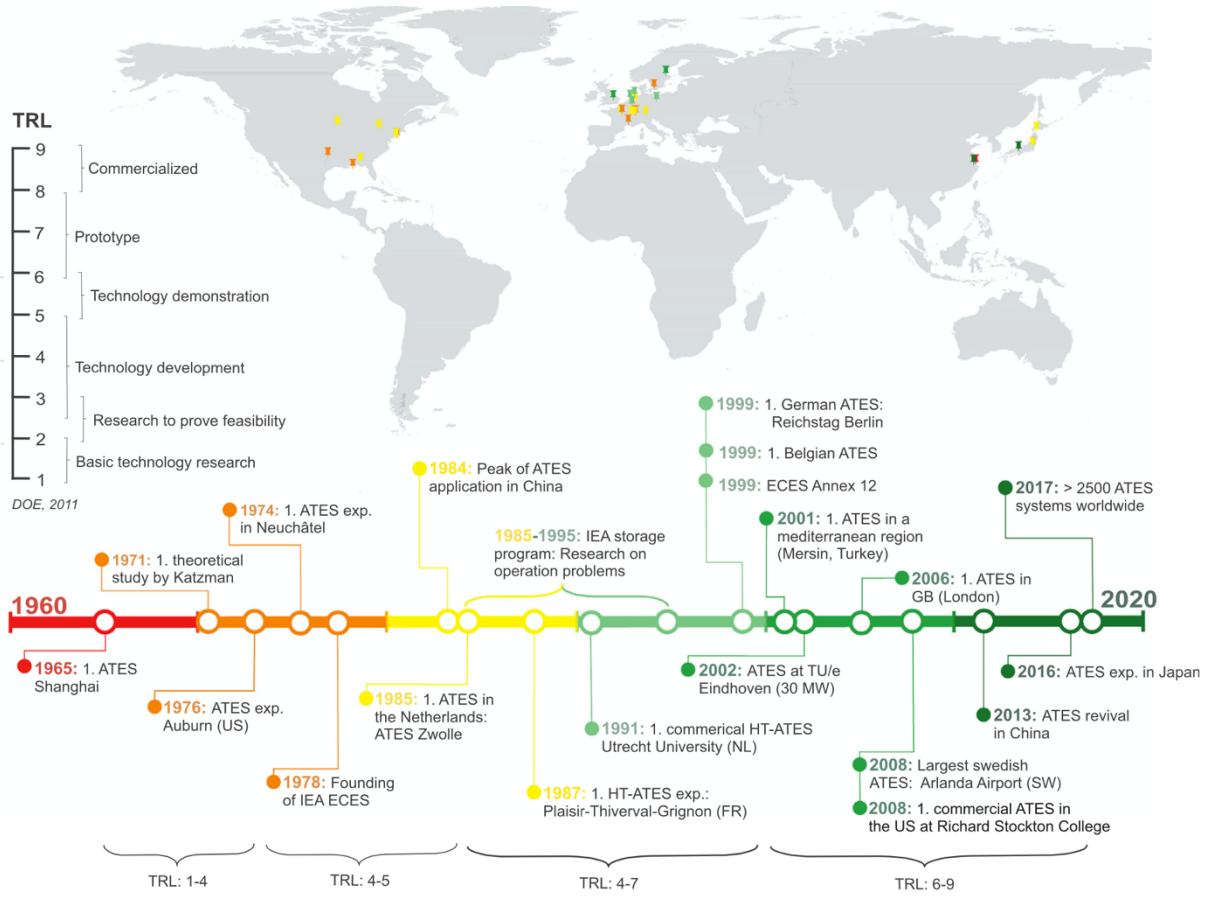


Abbildung 3: Chronologie und Meilensteine der weltweiten Entwicklung von ATES mit Technologie-Reifegrad (*Technical Readiness Level*, TRL) gemäß DOI (U.S. Department of Energy) (Fleuchaus et al., 2018).

Anfängliche Forschungsvorhaben konzentrierten sich auf HT-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,
- 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 störanfällig. 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 zur 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 bereit zu stellen (Hartl *et al.*, 2016).

Trotz intensiver Forschungstätigkeiten und Demonstrationsanlagen in einigen Ländern (Schweiz, Frankreich, USA, Kanada, Deutschland u. a.), konzentriert sich die weltweite Verteilung von Aquiferspeichern gegenwärtig in einigen wenigen Staaten, v.a. in Mittel- und Nordeuropa. Insgesamt sind weltweit über 2.800 ATES-Projekte realisiert wurden. Davon befinden sich über 85 % (> 2.500) allein in den Niederlanden (NL) 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 (Bloemendal *et al.*, 2015).

Momentan werden ATES-Anlagen in den führenden Nationen (NL, 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 Gebäude oder Wohngebäude. Von zunehmender Bedeutung ist auch die Klimatisierung von Treibhäusern und Rechenzentren (Fleuchaus *et al.*, 2018).

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 Speicher zu Forschungszwecken betrieben. Abbildung 4 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.

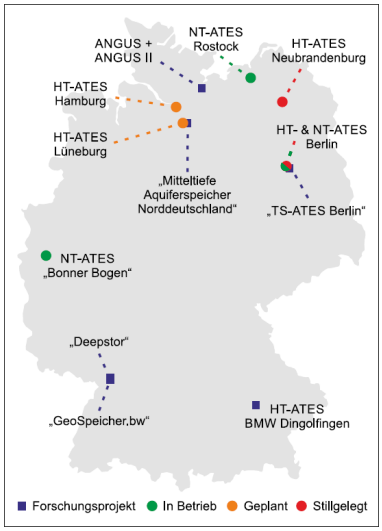


Abbildung 4: Übersicht stillgelegter, in Betrieb und in Planung befindlicher Aquiferspeicher sowie Forschungsprojekte in Deutschland. Angepasst nach (Fleuchaus et al., 2021).

2.4.1 Deutscher Bundestag 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, fast ausschließlich auf regenerativen Energiequellen basierend, 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 deckten (Fleuchaus *et al.*, 2021).

Ein HT-ATES in 320 m Tiefe fungierte als Wärmereservoir für die überschüssige Abwärme der Blockheizkraftwerke. 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).

2.4.2 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 als HT-ATES erneut in Betrieb genommen. Trotz vereinzelter 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 (Fleuchaus *et al.*,

2021). Die Stadtwerke Neubrandenburg arbeiten seitdem mit einem Stahltank zur Kurzzeit-Wärmespeicherung (Bundesverband Geothermie, 2020; Fleuchaus *et al.*, 2021).

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^2 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 & Müller-Steinhagen, 2004).

2.4.4 Bonner Bogen

Im Quartier Bonner Bogen wurde 2009 ein LT-ATES zur Versorgung von 60.000 m^2 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^3/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_2 pro Jahr gespart (Fleuchaus *et al.*, 2021; Mands *et al.*, 2010).

2.5 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 Gestehungskosten gleich dem oder besser kleiner als der Gaspreis sein sollten.

Bisher gibt es sehr wenig Literatur zu Planung und Kosten sowie 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 und aus diesem Grund nehmen die

spezifischen Kapitalkosten (€/kWh) mit zunehmender Anlagengröße ab. Die Speichereffizienzen zur indirekten Gebäudebeheizung und -kühlung weißen eine große Streuung von 40-85 % auf. Bei der direkten Kühlung dagegen sind Effizienzen von 90 % keine Seltenheit (Fleuchaus *et al.*, 2018). Außerdem zeigte sich, dass Aquiferspeicher für Gebäude mit hohem, konstantem Energiebedarf über das ganze Jahr, wie Bürogebäude, Flughäfen, Universitäten, Einkaufzentren und v.a. Krankenhäuser am nutzbringendsten eingesetzt werden können (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_2-Einsparung 74 niederländischer ATES-Systeme liegt bei 0,46 kg pro m^3 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_2 im Jahr. Das entspricht dem CO_2-Fußabdruck von rund 1.300 Einwohner*innen 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 positiven 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).

2.6 Rechtliche Rahmenbedingungen & Genehmigungsfähigkeit

2.6.1 Rechtsrahmen in der EU und Deutschland

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*innen 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

allgemein, 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 die Mitgliedsstaaten zur Umsetzung haben. RED II legt außerdem fest, dass allen Involvierten sämtliche relevanten Informationen zugänglich gemacht werden müssen.

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,
- 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 ausgeführt, ist in Deutschland die Einteilung geothermischer Systeme nach der Tiefe üblich. Eine Klassifizierung anhand der Temperatur des geothermischen Reservoirs in Hoch- und Niedrigenthalpie-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) und 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 des BBergG. Die Forderung des Bundesverband 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, [den] Umweltauswirkungen, erforderliche[n] 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, um die Verbreitung von Geothermieanlagen zu fördern, sind Informationen und Ausbildung sowie 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.

2.6.2 Raumwiderstände

Der Nutzung des Untergrundes als Speicher für thermische Energie stehen verschiedene Raumwiderstände gegenüber, die sich zum Einen aus dem Vorsorgeprinzip der deutschen Umweltgesetzgebung und zum Anderen aus konkurrierenden Nutzungsansprüchen ableiten lassen (Hesse *et al.*, 2014; UBA, 2021b).

Wasserschutz und Überschwemmungsgebiete

Die gesetzliche Grundlage zur Festsetzung von Wasserschutzgebieten (WSG), Heilquellenschutzgebieten (HQSG) und Überschwemmungsgebieten bildet das Wasserhaushaltsgesetz (Hesse *et al.*, 2014). Es legt außerdem fest, dass Grundwasser „als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut“ ein hohes Schutzgut ist (§ 1 WHG).

Wasser- und Heilquellenschutzgebiete werden jeweils in drei Zonen unterteilt (I, II und III). Im Fassungsbereich (Zone I WSG) und der engeren Schutzzone (Zone II WSG) sind Eingriffe vollständig ausgeschlossen bzw. stark reglementiert. Auch in der weiteren Schutzzone (Zone III) muss im Einzelfall geprüft werden, ob eine Nutzung des Grundwasserleiters möglich ist. HQSG stellen insgesamt ein Ausschlusskriterium dar (Hesse *et al.*, 2014; TLUBN, 2021a).

Überschwemmungsgebiete werden zum Zweck des vorbeugenden Hochwasserschutzes ebenfalls von der TLUBN festgesetzt. Daraus ergeben sich Baueinschränkungen, sodass im Einzelfall zu prüfen ist, ob ein Aquiferspeicher im betreffenden Gebiet errichtet werden darf (Hesse *et al.*, 2014; TLUBN, 2021b).

Natur-und Landschaftsschutz

„Zur Sicherung der Vielfalt, Eigenart und Schönheit von Natur und Landschaft werden schutzwürdige und schutzbedürftige Teile oder Bestandteile der Landschaft durch Rechtsverordnung unter Schutz gestellt, gepflegt und vor Beeinträchtigungen bewahrt.“ (TLUBN, 2021c). Entsprechend des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) können verschiedene Schutzkategorien ausgewiesen werden, in denen eine Bebauung gänzlich ausgeschlossen oder im Einzelfall möglich ist.

Konkurrierende Nutzungsansprüche

Konkurrierende Nutzungsansprüche ergeben sich bspw. durch Bergbauberechtigungen Dritter zur Gewinnung bergfreier Bodenschätze auf Grundlage des BBergG. Ob diese der Errichtung einer Aquiferspeicheranlage

entgegenstehen, ist im Einzelfall unter Beteiligung des TLUBN zu überprüfen (Hesse *et al.*, 2014; TLUBN, 2021d).

Zudem legt § 35 des Baugesetzbuchs (BauGB) fest, wann ein Bauvorhaben zulässig ist. So sind bspw. Vorhaben zur öffentlichen Versorgung mit Wärme dann zulässig, wenn sie u.a. dem Flächennutzungsplan nicht widersprechen und Belangen des Naturschutzes und der Landschaftspflege, des Bodenschutzes usw. nicht beeinträchtigen (Hesse *et al.*, 2014).

Tabelle 1 listet alle genannten Gesetzesgrundlagen und ihre Bedeutung für die Errichtung einer Aquiferspeicheranlage auf.

Tabelle 1: Relevante Gesetzesgrundlagen der Raumwiderstände und ihre Bedeutung für die Errichtung von Aquiferspeicheranlagen (verändert nach Hesse *et al.*, 2014).

Gesetz	Bedeutung für Aquiferspeicher
WHG	
§ 52 Abs. (1) Besondere Anforderungen in Wasserschutzgebieten	Eine Bebauung in den Wasserschutzzonen sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist eine Ausnahme in der Wasserschutzzone III (und selten auch in II) möglich.
§ 53 Abs. (3) Heilquellenschutz	Diese Gebiete werden ausgeschlossen.
§ 78 Abs. (5) Bauliche Schutzvorschriften für festgesetzte Überschwemmungsgebiete	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist eine Bebauung möglich.
BNatSchG	
§ 23 Naturschutzgebiete	Alle Handlungen, die zu einer Zerstörung, Beschädigung oder Veränderung führen können, sind verboten. Keine Bebauungsmöglichkeiten.
§ 24 Nationalparke, Nationale Naturmonumente	
§ 25 Abs. (3) Biosphärenreservate	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist ein Vorhaben möglich.
§ 26 Abs. (2) Landschaftsschutzgebiete	Eine Bebauung ist nur bei einer Eingliederung in die umgebende Landschaft möglich.
§ 27 Abs. (1) Nr. 2 Naturparke	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist ein Vorhaben möglich.
§ 29 Abs. (2) Geschützte Landschaftsbestandteile	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist ein Vorhaben möglich.
§ 30 Abs. (3) Gesetzlich geschützte Biotope	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist ein Vorhaben möglich.
§ 33 Abs. (1) Allgemeine Schutzvorschriften („Natura 2000“)	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist ein Vorhaben möglich.

§ 34 Abs. (3) Verträglichkeit und Unzulässigkeit von Projekten; Ausnahmen	Wenn Alternativen nicht gegeben sind, könnte das Vorhaben durch ein zwingendes öffentliches Interesse zugelassen werden.
BauGB	
§ 35 Abs. (1) Nr. 3 Bauen im Außenbereich	Errichtung im Außenbereich ist zulässig, da das Vorhaben der öffentlichen Versorgung mit Wärme dient.
§ 35 Abs. (3) Nr. 5-6 Bauen im Außenbereich	Die Anlagen müssen sich optisch in die Umgebung eingliedern und die Umwelt darf nicht negativ beeinflusst werden.

2.6.3 Genehmigungsverfahren in Thüringen

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. In Thüringen sind das die Unteren Wasserbehörden und das Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die anzuwendenden Rechtsvorschriften, Pflichten der Vorhabensträger*innen und die erforderlichen Genehmigungen.

Im Jahr 2013 hat das Thüringer Landesverwaltungsamt (TLVwA) eine Arbeitshilfe zur Nutzung oberflächennaher Geothermie veröffentlicht. Diese beinhaltet ein Kapitel zu Anlagen mit Grundwasserwärmepumpen und beschreibt das Zulassungsverfahren ebensolcher. Der/die Vorhabenträger*in muss zunächst die Bohrarbeiten bei dem TLUBN und der UWB anzeigen sowie bei Zweitgenannter einen Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis stellen. Die UWB prüft (i.d.R. in Zusammenarbeit mit dem TLUBN) das Vorhaben und erteilt die Erlaubnis oder untersagt das Vorhaben nach Einzelfallentscheidung. Außerdem prüft die UWB, ob UVP-Pflicht besteht. Nach Abschluss der (Bohr-)Arbeiten muss noch eine Baufertigstellungsanzeige bei der UWB und der TLUBN erfolgen.

Temperaturgrenzen für die thermische Nutzung des Untergrunds sind in VDI 4640 Blatt 1 und 2 festgelegt:

- Temperaturminimum: 5 °C
- Temperaturmaximum: 20 °C bzw. bis zu 25 °C für nicht mehr als 30 Tage innerhalb eines Jahres
- Temperaturdifferenz: ± 6 K
- bei Speichern: ausgeglichene Wärmebilanz im Jahresmittel

Die Einhaltung dieser Grenzwerte soll sicherstellen, dass die Temperaturveränderungen im Untergrund möglichst geringe bis keine Auswirkungen v.a. auf die Grundwasserqualität haben (Hähnlein *et al.*, 2013; VDI,

2001b, 2010). In der Arbeitshilfe des TLVwA werden keine Angaben zu Temperaturgrenzen gemacht. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Werte auch beim Betrieb von Anlagen in Thüringen eingehalten werden müssen, da das Vorwort den Hinweis enthält, die „Arbeitshilfe berücksichtigt das Technische Regelwerk (VDI 4640 Verein Deutscher Ingenieure - ‚Thermische Nutzung des Untergrundes')" (TLVwA, 2013).

Tabelle 2: Überblick über die in Thüringen anzuwendenden Rechtsvorschriften, zuständigen Stellen, Pflichten der Vorhabensträger*innen und die erforderlichen Genehmigungen für den Bau und Betrieb von Aquiferspeicher-Anlagen (TLVwA, 2013).

Rechtsvorschriften unabhängig von der Bohrtiefe	Wasserhaushaltsgesetz (WHG), Thüringer Wassergesetz (ThürWG), Geologiedatengesetz (GeolDG), Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG), Thüringer UVP-Gesetz (ThürUVPG)
Bohrtiefe >100 m	zusätzlich Bundes-Berggesetz (BBergG), Thüringer Tiefbohrverordnung (ThürBVOT)
zuständige Stellen unabhängig von der Bohrtiefe	Untere Wasserbehörde (UWB) ggf. in Beteiligung des Thüringer Landesamts für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN)
Bohrtiefe >100 m	zusätzlich TLUBN Referat 84 (vormals Landesbergamt)
Pflichten	Anzeige / Antrag zur Errichtung einer Anlage zur Nutzung oberflächennaher Geothermie bei der UWB, Anzeige des Bohrbeginns und der Baufertigstellungsanzeige je bei der UWB und dem TLUBN
erforderliche Genehmigungen	wasserrechtliche Erlaubnis nach Einzelfallentscheidung, Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) nach Einzelfallentscheidung
Quelle	Nutzung oberflächennaher Geothermie - Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung (TLVwA, 2013)

2.7 Umweltauswirkungen 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, 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. Abbildung 5 gibt einen Überblick über mögliche Auswirkungen dieser auf physikalischer, chemischer und biologischer Ebene.

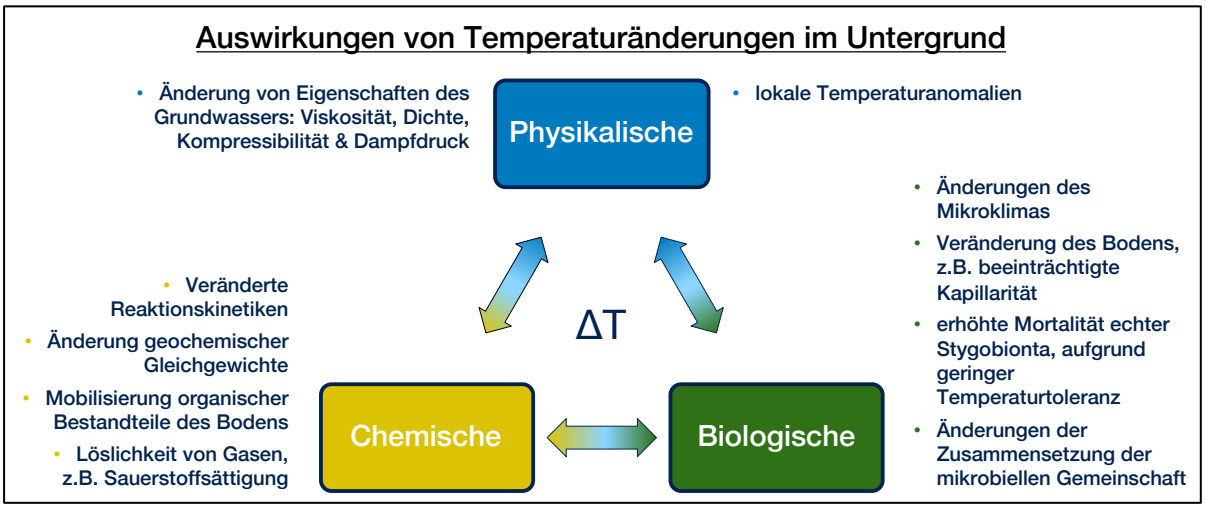


Abbildung 5: Überblick über mögliche Auswirkungen von Temperaturveränderungen im Untergrund (nach Hähnlein, 2013).

Einige Studien haben sich genauer mit den Auswirkungen von Temperaturerhöhungen auf geochemische Gleichgewichte und Grundwasserorganismen beschäftigt (z.B. Bonte, 2013; Brielmann *et al.*, 2009, 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 naturbelassenen und energiearmen (oligotrophen) Aquiferen zu erwarten. Für energiereiche (eutrophe) Bedingungen stehen entsprechende Untersuchungen noch aus.

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, 2018; Zuurbier *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.

In dieser Arbeit wird nicht ausführlicher auf die Umweltauswirkungen der Speicherung thermischer Energie im Untergrund eingegangen, da der Fokus auf der Darstellung der räumlichen Potentiale Thüringens und einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung liegt.

2.8 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 und deren Vorteile sind den behördlichen Entscheidungsträgern bekannt. 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 sie hervorgerufenen Temperaturanomalien auf Mikroorganismen, Ökosystemdienstleistungen, die hydrogeologischen Eigenschaften des Aquifers usw. haben, ist bisher noch nicht in ausreichendem Maße untersucht wurden (Blum *et al.*, 2021). Gleichzeitig bietet dieser Bereich aber auch Potentiale für mögliche Synergien mit *in situ*-Bioremediation kontaminierter Grundwasserleiter.

Handlungsbedarf besteht auch auf Seiten der Gesetzgeber. EU- sowie Deutschland-weit 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).

3 Potentialräume in Thüringen

Die Errichtung von Aquiferspeicheranlagen ist, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, an das Vorliegen bestimmter Voraussetzungen gebunden. Je nach Ausprägung und Kombination dieser ergeben sich Räume, in denen ein mehr oder weniger günstige Bedingungen für den Bau und Betrieb von Aquiferspeicheranlagen besteht. Ein Bestandteil dieser Arbeit ist es, Potentialräume des Thüringer Quartärs zu identifizieren und graphisch darzustellen. Es wurde sich auf die Gesteine des Quartärs beschränkt, da diese als geologisch jüngste Einheiten oberflächennah anzutreffen sind und die Hauptgrundwasserleiter Thüringens bilden. Die Limitation auf oberflächennahe Grundwasserleiter aus Kies-Sand-Gemischen ergibt sich aus der Definition des Muster-Wärmespeichers des *GeoHeatStorage* mit einer maximalen Tiefe der Dichtwand von 15 m unter Geländeoberkante (GOK) und dem festgelegten Bodenaufbau (s. Kapitel 4.1.2).

3.1 Geologie Thüringens - Kurzabriss

Die Geologie Thüringens ist sehr vielfältig und kann in fünf geologische Großräume unterteilt werden (Bergmannsverein Erfurt e.V., 2007):

1) Südharz und Kyffhäuser
2) Thüringer Becken
3) Thüringer Wald
4) Thüringisch-Fränkisches Schiefergebirge
5) Südwest- und Südthüringen

Abbildung 6 zeigt die geologische Übersichtskarte von Thüringen, in welcher die Regionen gekennzeichnet sind.

Der Harz und das Thüringer Schiefergebirge bestehen aus altpaläozoischen Gesteinen, die während der variszischen Gebirgsbildung gefaltet wurden. Im Rotliegend kam es zur horstartigen Heraushebung des Thüringer Waldes und mit der Orogenese einhergehendem Vulkanismus. In der sich anschließenden Trias lagerten sich die Sedimentgesteine des Zechsteins, Buntsandsteins, Muschelkalks und Keupers ab. Diese prägen auch heute noch hauptsächlich das Erscheinungsbild des Thüringer Beckens sowie des Südwestthüringer Triasgebiets. Daran anschließend fand die alpidische Gebirgsbildung statt, während derer der Harz und der Thüringer Wald herausgehoben wurden. Damit einhergehend fand die Abtragung der jüngeren Gesteinsschichten der Mittelgebirge statt. Gesteine aus Jura und Kreide sind heute in Thüringen nur in sehr vereinzelten kleinräumigen Gebieten zu finden, ebenso wie

Ablagerungen des Tertiärs. Dies ist in Abbildung 6 erkennbar (Arbeitsgruppe Geologie, 2021; Bergmannsverein Erfurt e.V., 2007; Ellenberg, 2012).

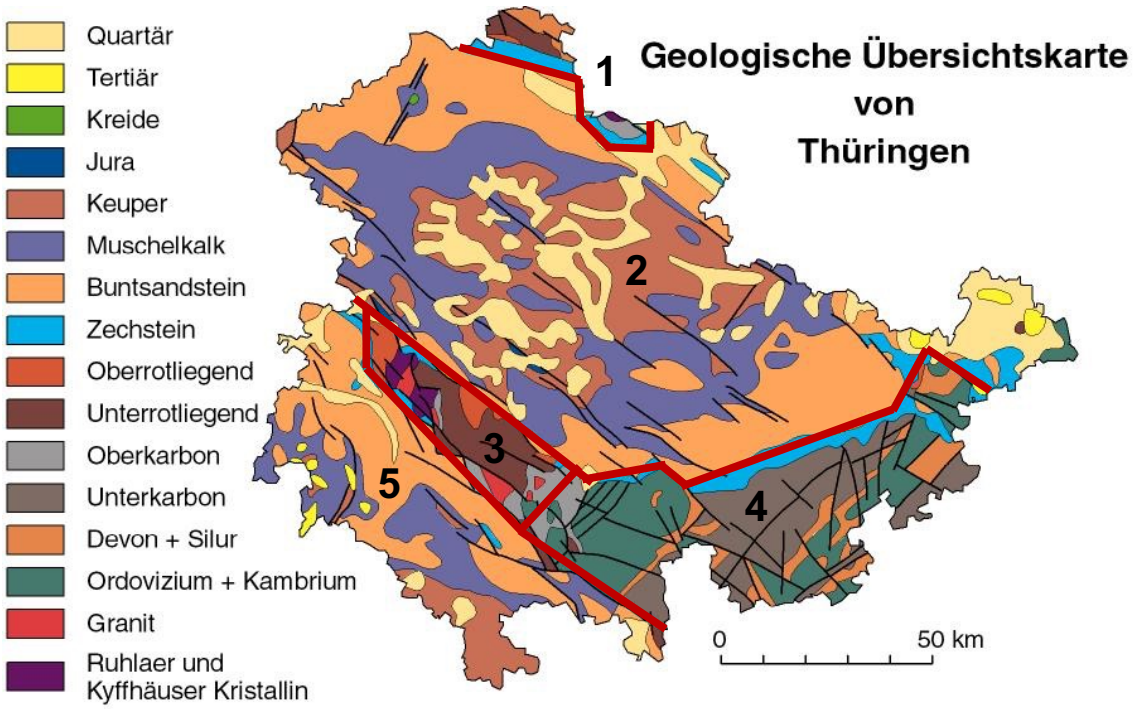


Abbildung 6: Geologische Übersichtskarte von Thüringen inkl. Untergliederung der geologischen Großräume Thüringens: 1) Südharz und Kyffhäuser 2) Thüringer Becken 3) Thüringer Wald 4) Thüringisch-Fränkisches Schiefergebirge 5)Südwest- und Südthüringen (Karte von Arbeitsgruppe Geologie, 2021; angepasst nach Bergmannsverein Erfurt e.V., 2007).

Die jüngste erdgeschichtliche Epoche des Quartärs war von vergleichsweise schnellen Wechseln zwischen Warm- und Kaltzeiten geprägt. Letztere waren gekennzeichnet durch großräumige Vergletscherungen Mitteleuropas. Jedoch reichte lediglich das Eisschild der sog. Elster-Kaltzeit bis ins heutige Thüringen hinein. Begünstigt durch bspw. Frostsprengung kam es zu intensiven Verwitterungs- und Erosionsprozessen, in deren Folge sich die Flüsse tief in die triassischen Ablagerungen im Thüringer Becken eingruben. Dieser Prozess setzte sich in den folgenden Warmzeiten fort. Zusätzlich wurde der durch Auftauen der Permafrostböden entstandene Verwitterungsschutt entlang der Flusstäler Richtung Nordsee transportiert. Parallel dazu bildeten sich Schotterterrassen (Ellenberg, 2012). Während der Weichsel-Kaltzeit wurden Niederterrassenkiese in den Tälern und abseits davon Löss und löss-ähnliche Sedimente abgelagert. Im Holozän erfolgte die Bildung der heutigen Talfüllungen mit Auekiesen, -lehmen und Mudden sowie der heutigen Böden (Felgentreff *et al.*, 2021).

3.2 Erstellung der Potentialkarten

Die Methodik zur Erstellung der Potentialkarten orientiert sich lose an den Richtlinien des *Vulnerability Sourcebooks* der Deutschen Gesellschaft für Internationale

Zusammenarbeit (Fritzsche *et al.*, 2014). Die standardisierte Verfahrensweise zur Vulnerabilitätsabschätzung lässt sich sehr gut auf verschiedenste Sachverhalte übertragen.

Unter Berücksichtigung der (kostenfrei) und (nahezu) flächendeckend zur Verfügung stehenden Daten, wurden der Durchlässigkeitsbeiwert und die Mächtigkeit als Haupteinflussfaktoren auf das Aquiferspeicher-Potential identifiziert. Zudem wurde berücksichtigt, dass durch Raumwiderstände einzelne Gebiete gänzlich als Potentialflächen ausgeschlossen werden müssen bzw. dass in anderen Gebieten für konkrete Projekte eine Einzelfallprüfung der zuständigen Behörden erfolgen wird. Abbildung 7 verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Raumwiderständen.

Als Datengrundlage dienten folgende digitale bzw. digitalisierte geologische Karten:

- Hydrogeologische Übersichtskarte 1:250.000 von Deutschland (HÜK250)
- Digitale Geologische Karte von Thüringen 1:200.000 (GÜK200)
- Hydrogeologisches Kartenwerk 1:50.000 (HK50)
- Wasser- und Heilquellenschutzgebiete Thüringen
- Überschwemmungsgebiete Thüringen
- Naturschutzgebiete Thüringen.

Ergänzend wurden Informationen aus dem Wärmekataster des *Energieatlas Thüringen* der Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH (ThEGA) zu Abwärmeunternehmen verwendet (ThEGA Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH, 2021). Anhang B.1 (Hopf_MA_Datenquellen_Potentialkarten.xlsx) gibt einen detaillierten Überblick über die verwendeten Daten, deren Herkunft, Auflösung und Format.

Die Anfertigung der Potentialkarten erfolgte unter Verwendung von QGIS, Version 3.16.12-Hannover und RStudio 2021.09.0+351 "Ghost Orchid" Release. Datenakquise, -management und -bereinigung erfolgten in QGIS. Dazu gehörte bspw. die Digitalisierung und Georeferenzierung der als Blattschnitte vorliegenden HK50. Des weiteren wurden die Shapefiles, wenn erforderlich (HÜK250 und HK50), auf den Umriss von Thüringen zugeschnitten. Anschließend erfolgte die qualitative Bereinigung auf Grundlage der geologischen Voraussetzungen zum Bau von Aquiferspeichern. Alle ungeeigneten Flächen (nicht-quartäre und karbonatische Einheiten, anthropogene Ablagerungen) wurden entfernt. Im nächsten Schritt wurden die angepassten Shapefiles von HÜK250, GÜK200 und HK50 zu einem Layer kombiniert, sodass für jedes Polygon Informationen zum k_f-Wert und der Mächtigkeit vorlagen.

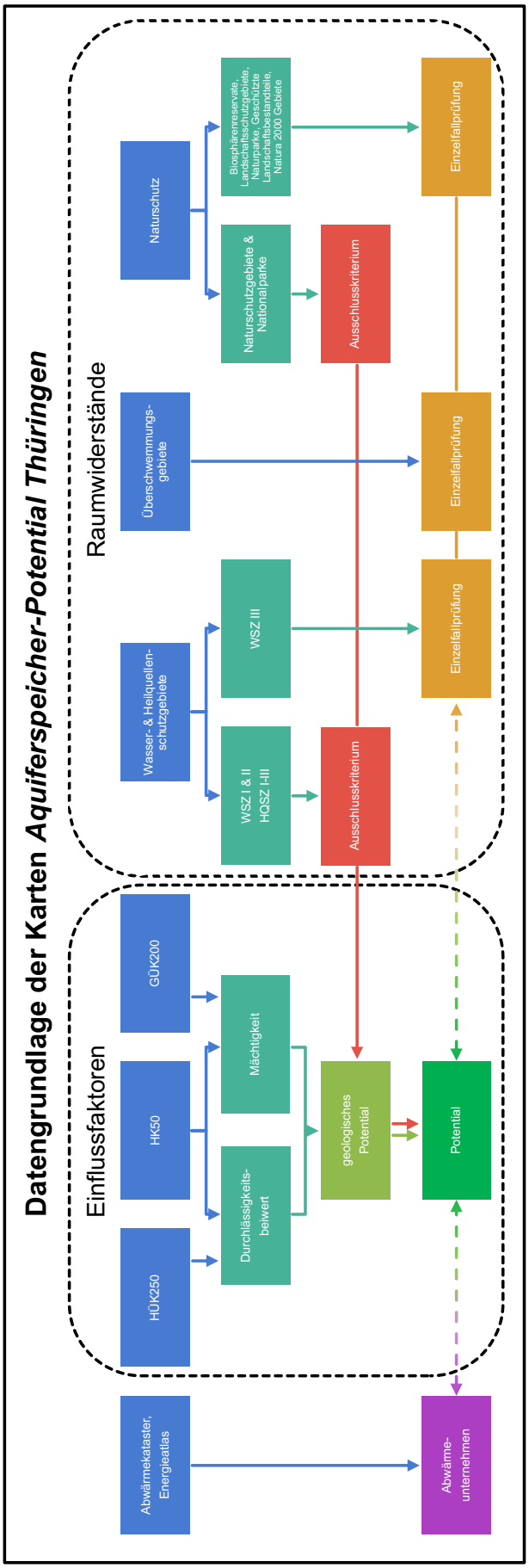


Abbildung 7: Datengrundlagen und Zusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren, Raumwiderständen und Aquiferspeicher-Potentialen in Thüringen.

Da die Informationen nicht einheitlich hinterlegt waren, wurden für jedes Polygon im neuen Layer zwei neue Attribute hinzugefügt: die mittlere Durchlässigkeit und die maximale Mächtigkeit. Ersterer wurde aus der HK50 übernommen bzw. als Mittelwert aus den Angaben der HÜK250 zur minimalen und maximalen Durchlässigkeit berechnet. Die maximale Mächtigkeit wurde, sofern vorhanden, aus der HK50, andernfalls aus der GÜK200 übernommen. Auf Grundlage dieser kombinierten Informationen wurde je ein Rasterlayer mit den Werten der beiden Einflussfaktoren erstellt. Zusätzlich wurde ein Rasterlayer der Ausschlusskriterien erzeugt. Die Raster bilden die Basis zur Weiterverarbeitung mit RStudio.
In RStudio erfolgte die Normierung und Aggregation der Daten zum geologischen Potential und dessen Verschneidung mit den Ausschlusskriterien zum Potential für die Kartendarstellung. Die Normalisierung ist notwendig aufgrund der unterschiedlichen Einheiten der Einflussfaktoren, k_f-Wert in m/s und Mächtigkeit in m. Der Wert jeder Rasterzelle wurde nach folgender Formel in den Standard-Wertebereich zwischen 0 und 1 transformiert (Fritzsche *et al.*, 2014):

$$X_{i,0\ bis\ 1} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \tag{1}$$

Mit:

X_i	zu transformierender Wert
X_{min}	Minimum des Wertes
X_{max}	Maximum des Wertes
$X_{i,\ 0\ bis\ 1}$	normalisierter Faktor

Bei der Mächtigkeit wurden das im Wertebereich des Rasters liegende Minimum und Maximum von 5 m bzw. 100 m übernommen. Für die Normalisierung der Durchlässigkeit wurde nur das Maximum des Rasters von 1,01 10^{-3} m/s übernommen. Als Minimum wurde 10^{-6} m/s festgesetzt. Anschließend erfolgte die Aggregation der Einflussfaktoren Durchlässigkeit und Mächtigkeit zum geologischen Potential als arithmetischer Mittelwert (Fritzsche *et al.*, 2014):

$$P_{geol} = \frac{F_1 + F_2 + \ldots + F_n}{n} \tag{2}$$

Mit:

$F_{1\ bis\ n}$	Einflussfaktor 1 bis n
n	Anzahl der Einflussfaktoren

P_{geol} Maximum des Wertes

Durch die anschließende Verschneidung des geologischen Potentials mit den Ausschlusskriterien WSZ I und II, HQSZ I bis III, Naturschutzgebiete und Nationalparke ergibt sich schließlich das Potential P. Beide Potentiale wurden als Raster aus RStudio ausgegeben und in QGIS erfolgte die Fertigstellung der Karten. Der Gesamt-Workflow ist in Abbildung 8 dargestellt.

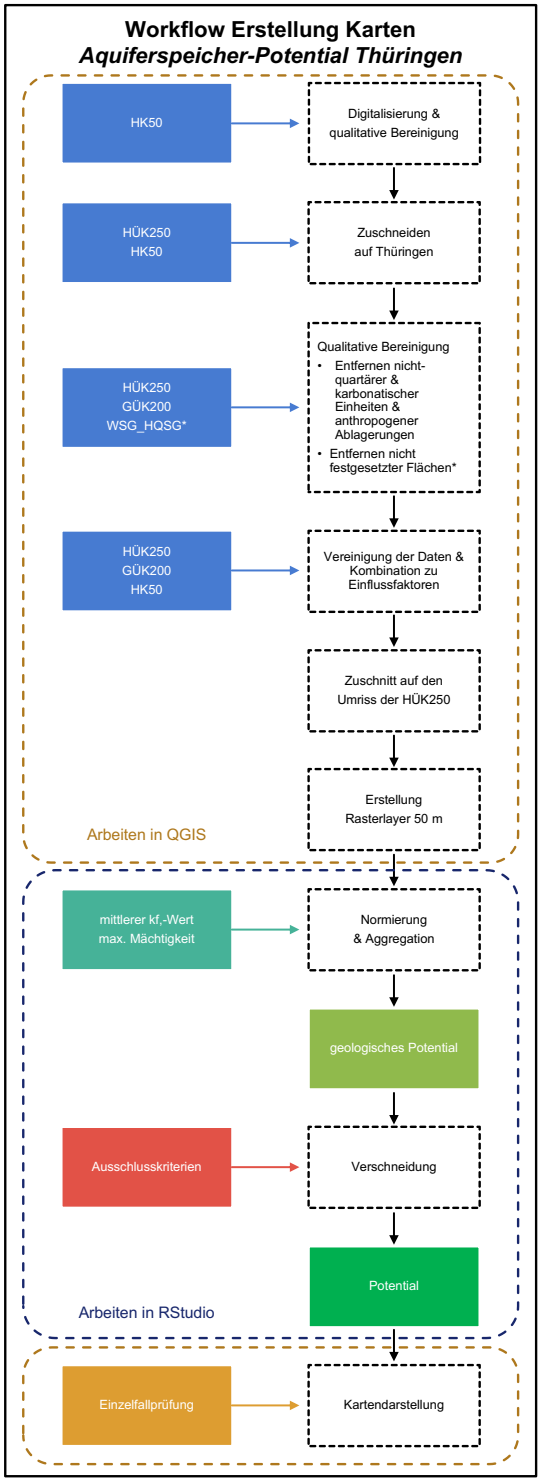


Abbildung 8: Workflow der Erstellung der Aquiferspeicher-Potentialkarten Thüringen.

3.3 Quartäre Potentialräume für Aquiferspeicher in Thüringen

Abbildung 9 zeigt die quartären Potentialräume für Aquiferspeicher in Thüringen. Niedrige Werte bedeuten ein geringes Potential. Je höher die Werte sind, desto besser sind die geologischen Voraussetzungen für Bau und Betrieb von Aquiferspeicheranlagen. In der Karte ist gut zu erkennen, dass sich die Gebiete hauptsächlich in den Flusstälern von Saale, Werra, Apfelstädt, Hörsel, Ilm und Pleiße sowie im Thüringer Becken, der Goldenen Aue und der Diamantenen Aue finden. Insgesamt erstrecken sich die quartären Potentialgebiete über rund 4,6 % der Fläche Thüringens.

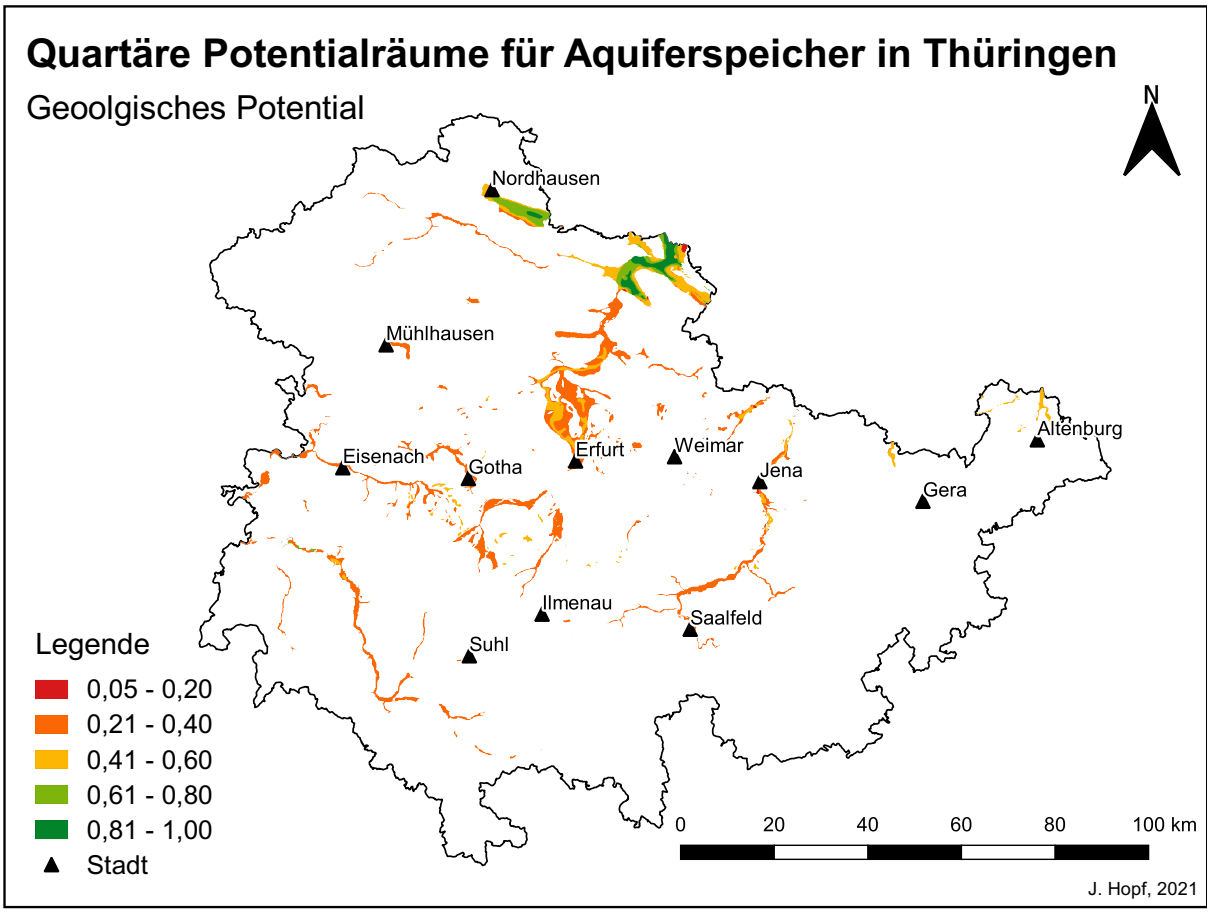


Abbildung 9: Quartäre Potentialräume für Aquiferspeicher in Thüringen. Rot (0,05 - 0,20): Sehr geringes Potential. Orange (0,21 - 0,40): Geringes Potential. Gelb (0,41 - 0,60): Mittleres Potential. Hellgrün (0,61 - 0,80): Gutes Potential. Grün (0,81 - 1,00): Sehr gutes Potential. Koordinatenbezugssystem: ETRS89 / UTM Zone 32N.

In Abbildung 10 ist das geologische Potential sowie eine Übersicht aller Ausschlussgebiete dargestellt. Nur an wenigen Stellen gibt es Überlappungen. Diese Flächen wurden bei der Erstellung der Potentialkarte (Abbildung 9) nicht berücksichtigt. Im Vergleich dazu gibt es jedoch zahlreiche Überschneidungen mit Gebieten, in denen Bau und Betrieb von ATES nicht von vornherein ausgeschlossen wird. Die in Abbildung 11 dargestellten Flächen stellen ebenfalls Raumwiderstände

dar, jedoch ist eine Bebauung dort nicht grundsätzlich untersagt. Die Entscheidung obliegt der zuständigen Behörde.

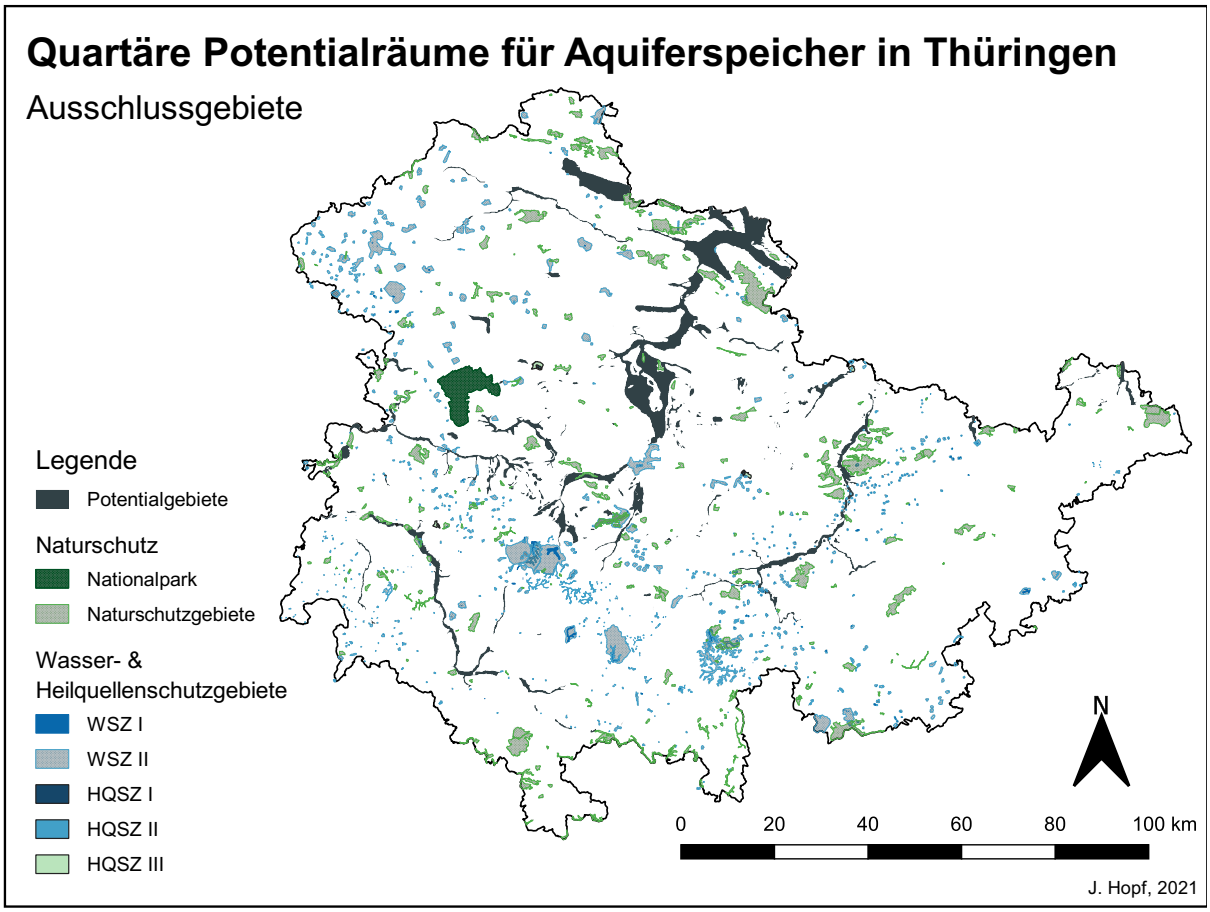


Abbildung 10: Quartäre Potentialräume für Aquiferspeicher in Thüringen - Übersicht aller Ausschlussgebiete. Koordinatenbezugssystem: ETRS89 / UTM Zone 32N.

Neben dem geologischen Potential ist auch das Vorhandensein geeigneter Quellen thermischer Energie Voraussetzung für den Bau von Aquiferspeichern. Industrielle Abwärme stellt eine solche dar. Abbildung 12 zeigt die Standorte von Thüringer Abwärmeunternehmen und deren jährliche Abwärmemenge.

3.4 Diskussion der Ergebnisse

Wie Abbildung 9 entnommen werden kann, konzentrieren sich die Gebiete mit gutem bis sehr gutem geologischen Potential (hellgrün und grün, 0,61 bis 1) auf den Norden Thüringens um Artern und Heldrungen sowie südöstlich von Nordhausen. Der Hauptanteil aller Flächen weist ein niedriges bis mittleres Potential (orange und gelb, 0,21 bis 0,60) auf. Ausgehend von dieser Betrachtung und dem insgesamt geringen Flächenanteil von weniger als 5 % könnte darauf geschlossen werden, dass Aquiferspeicher nur in geringem Maße zur zukünftigen Wärmeversorgung Thüringens beitragen können. Wichtig ist jedoch zu betonen, dass für die Erstellung der Karten dieser Arbeit lediglich Gesteinseinheiten des Quartärs betrachtet wurden.

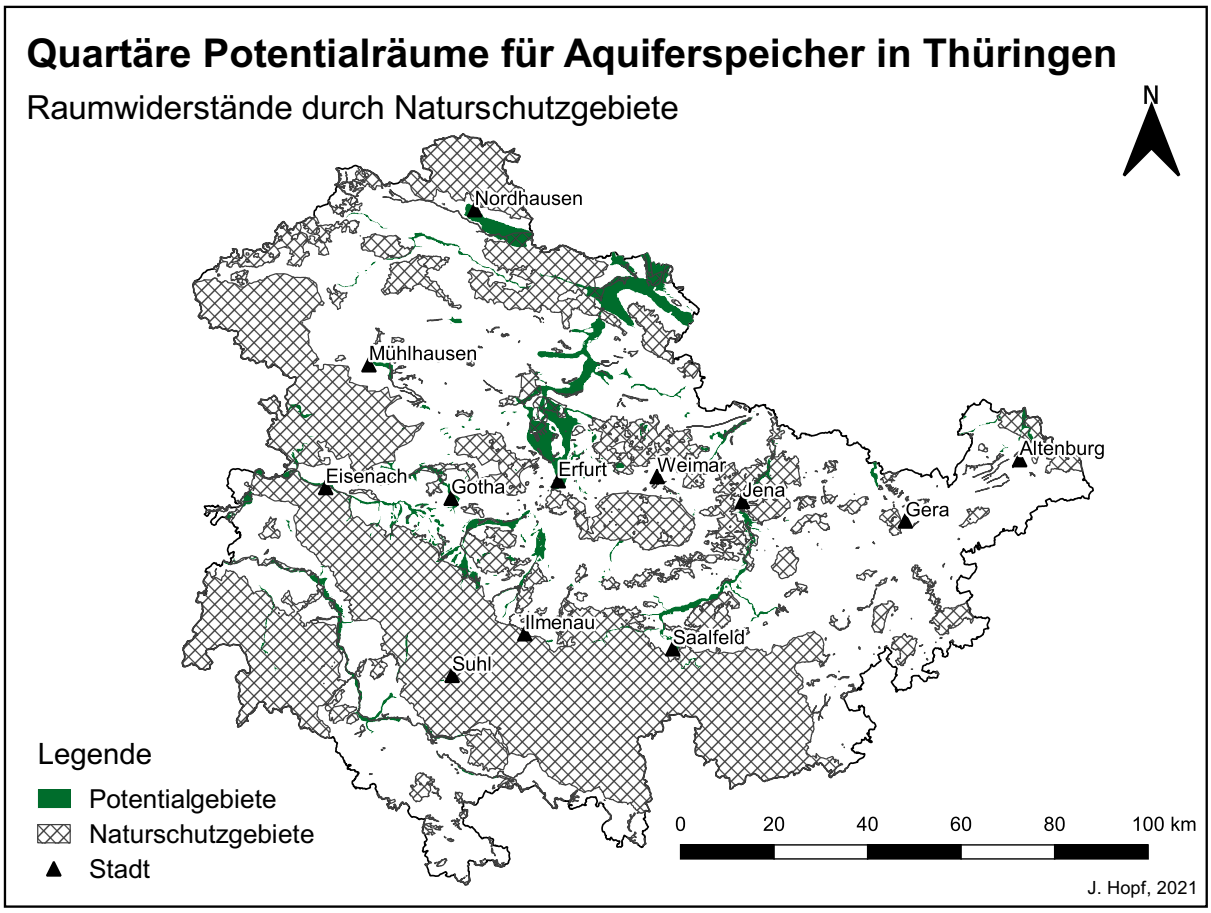


Abbildung 11: Quartäre Potentialräume für Aquiferspeicher in Thüringen - Übersicht Raumwiderstände. Koordinatenbezugssystem: ETRS89 / UTM Zone 32N.

Eine Erweiterung der Flächen könnte sich ergeben, wenn Grundwasserleiter geologisch älterer Schichten ebenfalls zur Erstellung von Potentialkarten herangezogen würden. Aufgrund der zunehmenden Tiefe wäre eventuell zusätzlich eine Differenzierung des Potentials für oberflächennahe (bis ca. 400 m), mitteltiefe (rund 400 bis 1.000 m) und tiefe Anlagen (ab 1.000 m) möglich.

Zudem lässt sich die Methodik zur Berechnung des Potentials auf verschiedene Art anpassen. Einerseits kann sie um weitere Einflussfaktoren ergänzt werden. Dazu könnten bspw. Daten genutzt werden zu Grundwasserfließgeschwindigkeit, Salinität, Temperaturen in den entsprechenden Tiefen, Grundwasserflurabstände oder weiteren Ausschlusskriterien, wie (ehemalige) Bergbaugebiete u.a. Andererseits kann durch Gewichtung der Faktoren, ein möglicherweise unterschiedlicher Einfluss auf das Potential berücksichtigt werden.

Weiterhin ist die Methode skalierbar und somit einfach übertragbar auf andere Bundesländer bzw. ganz Deutschland oder auf einzelne Regionen, je nach Datenverfügbarkeit.

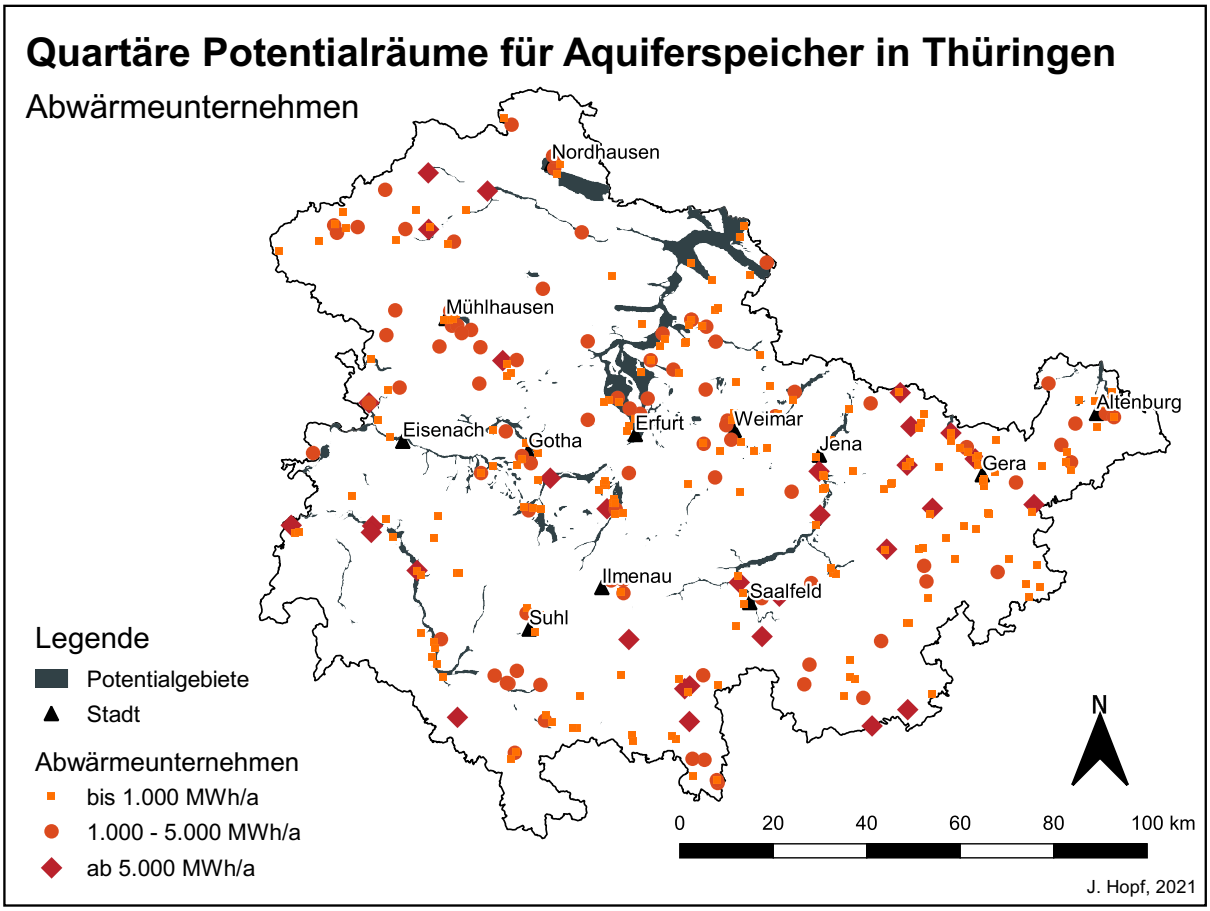


Abbildung 12: Quartäre Potentialräume für Aquiferspeicher in Thüringen und Standorte von Thüringer Abwärmeunternehmen und deren jährliche Abwärmemengen. Koordinatenbezugssystem: ETRS89 / UTM Zone 32N.

Aus der Verteilung der Abwärmeunternehmen in Abbildung 12 in Kombination mit Abbildung 9 lässt sich entnehmen, dass sich in den Gebieten mit dem größten geologischen Potential keine bis wenig solcher Unternehmen befinden. Dies macht die Suche nach alternativen Wärmequellen für den Betrieb eines ATES in diesen Regionen erforderlich. Grundsätzlich ist bei konkreten Vorhaben zum Bau eines Aquiferspeichers immer eine Machbarkeitsstudie mit Untersuchungen vor Ort notwendig. Ziel der Potentialkarten ist es, eine erste Orientierung zu geben. Sie ersetzen keine geologische Standortuntersuchung und -bewertung.

4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines ausgewählten Standortes

Die Wirtschaftlichkeit großer Energie-Produktions-Anlagen wird üblicherweise nach dem *Least-Cost*-Ansatz ermittelt. Das bedeutet, dass die Anlage mit den niedrigsten Kosten als die wirtschaftlichste angesehen wird. Eine gut etablierte Kennzahl zum Vergleich verschiedener Techniken zur Wärmeversorgung sind die sog. Wärmegestehungskosten (WGK). Sie geben die spezifischen Kosten einer Mega- bzw. Kilowattstunde Wärme in €/MWh oder ct/kWh an (Konstantin, 2017).
Mit Hilfe eines selbst entwickelten Tools wurden die Gestehungskosten von Aquiferspeichern in zwei Beispielszenarien ermittelt und verglichen. Damit soll gezeigt werden, dass ATES Teil der zukünftigen Wärmeversorgung Thüringens werden können. Zusätzlich erfolgte die Gegenüberstellung zweier Varianten von Aquiferspeichern: dem „Standard"-ATES, wie in Kapitel 2 beschrieben und dem *smood® GeoHeatStorage*.

4.1 Besonderheit *smood® GeoHeatStorage*

Der *smood® GeoHeatStorage* (GHS) ist ein Aquiferspeicher mit einem ähnlichen Funktionsprinzip wie ATES, weist jedoch einige deutliche Unterschiede auf: *GeoHeatStorage* ist ein, durch unterirdische Dichtwände, hydraulisch vom Grundwasser abgeschlossenes Untergrundbauwerk. Dies soll die Speicherung skalierbarer Energiemengen auf begrenztem Raum unter Bestandsquartieren zu niedrigen Wärmegestehungskosten (< 10 ct/kWh) ermöglichen (smood, 2021).
GeoHeatStorage wird wie konventionelle Aquiferspeicher auch über eine Brunnendublette bzw. mehrere Paare von Brunnen betrieben. Diese dienen als Förder- und Schluckbrunnen für (Grund-)Wasser, dass in einen Aquifer hinein und heraus gepumpt wird, um thermische Energie zu speichern und diese in Form von Wärme und Kälte an einen Heiz- bzw. Kühlkreislauf zu übertragen.

4.1.1 Dichtwände des *GeoHeatStorage*

Die Besonderheit des *GeoHeatStorage* sind um das Speichervolumen herum errichtete Dichtwände. Sie werden mit dem sog. *Mixed-in-Place*-Verfahren (MIP) hergestellt. Dabei handelt es sich um ein spezielles Bodenmischverfahren, das von der BAUER Spezialtiefbau GmbH entwickelt wurde. Die Wände entstehen direkt im Boden durch Mischung desselben mit einem *in situ* aushärtenden Bindemittel (BAUER Spezialtiefbau GmbH, 2021). Abbildung 13 illustriert das Verfahren zur Errichtung einer MIP-Dichtwand.

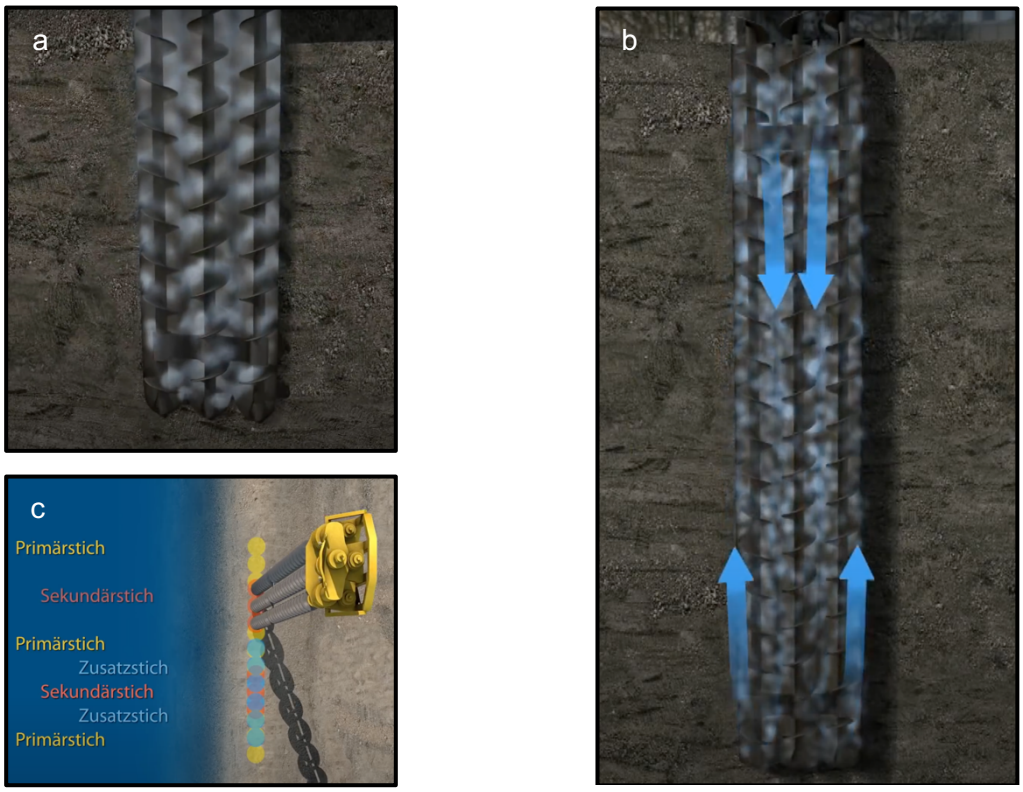


Abbildung 13: Verfahren zur Errichtung einer Mixed-in-Place-Dichtwand: a) Zugabe der Suspension beim Abteufen der Bohrung mit der Dreifachschnecke. b) Homogenisierungsvorgang durch gegenläufige Bewegung der Bohrschnecken beim Herausdrehen. c) Illustration des Ablaufs des „Doppelten Pilgerschrittverfahrens“ zur Herstellung einer geschlossenen Dichtwand (BAUER Gruppe, 2015).

Eingesetzt werden die mit MIP errichteten Dichtwände üblicherweise als Hochwasserschutzmaßnahme, zur Umschließung von Baugruben und als Gründungselemente für Gebäude. Neu ist der geplante Einsatz zur Abdichtung eines Aquiferspeichers (BAUER Spezialtiefbau GmbH, 2020, 2021).

Das Umschließen des Speichervolumens mit einer Dichtwand bietet einen entscheidenden Vorteil gegenüber einem konventionellen Niedrigtemperatur-Speicher: Das Wasser kann mit Temperaturen von mehr als 20 °C eingespeist werden, entgegen der Vorgaben der VDI 4640 (s. Kapitel 2.1.2). Dies wird durch mehrere Belade- bzw. Entladezyklen pro Saison erreicht. Pro Zyklus bzw. Durchlauf wird das Wasser innerhalb der Dichtwände um mehrere Kelvin aufgeheizt bzw. abgekühlt. So kann die Gesamt-Temperaturspreizung des *GeoHeatStorage* erhöht werden. Da die einspeicherbare Energiemenge proportional zur Temperaturdifferenz ist, kann also entweder mehr Energie pro Wasservolumen gespeichert werden oder das zum Speichern einer vorgegebenen Energiemenge benötigte Volumen reduziert werden. Formel (4) (s. Kapitel 4.3) verdeutlicht den Zusammenhang.

Diese Betriebsweise ist möglich, da die Dichtwände den Wärmeaustausch des thermisch beeinflussten Wassers innerhalb des Speichers und des Grundwassers

außerhalb auf ein Minimum reduzieren. Somit kann der Einfluss des Speichers auf die physikalischen, chemischen und biologischen Gegebenheiten des Untergrunds als vernachlässigbar gering angesehen.

4.1.2 Definition Muster-Wärmespeicher

Im Rahmen des Projektes wurden in Abstimmung mit den Verbundpartnern die Kennwerte für einen Muster-Wärmespeicher festgelegt:

- Fläche von 60 x 100 m (wenn möglich ovale Grundform)
- Flurabstand Grundwasser bei 5 m
- Grundwassermächtigkeit: 5 m (bis max. 10 m)
- Stauerlage/Einbindung Dichtwand in 10 m (max. 15 m Tiefe) u. GOK
- Bodenaufbau: Sandkiesgemische, Auelehm, Ton
- Durchlässigkeitsbeiwert: k_f von $5 \cdot 10^{-4}$ m/s
- Dichtwand:
  - 4-seitig
  - soll GWL einschließen, Wandhöhe bei 5 m (max. 10 m)
  - Überströmung bei GW-Hochwasserständen soll ermöglicht werden
  - Durchlässigkeit im Bereich von 10^{-7} m/s
- Temperaturbereich: 6 °C bis 40 °C
- Wasserabsenkung: 2 m über 4 Brunnen, im 1. Schritt nur 2 Brunnen
- Zunächst Sommer-/Winterbetrieb mit statischen Volumenströmen und Ein-/Ausspeisetemperaturen
- Betrachtungszeitraum: 20 Jahre

Diese Vorgaben wurden bei der Entwicklung des Tools so weit wie möglich berücksichtigt.

4.2 Entwicklung eines Wärmegestehungskostentools für Aquiferspeicher

Zielstellung war die Entwicklung eines übersichtlichen, anwender*innenfreundlichen, Excel-basierten Tools zur überschlägigen Berechnung der Wärmegestehungskosten eines Aquiferspeichers. In einem vorherigen Projekt wurde bereits ein Gestehungskostentool mit denselben Anforderungen für den *smood® GeoHeatStorage* entwickelt. Dieses wurde als Grundlage genommen und erweitert sowie zur Berechnung der Gestehungskosten für beide Varianten, ‚konventioneller' Aquiferspeicher und *GeoHeatStorage* angepasst.

Der Entwicklungsprozess umfasste folgende Arbeitsschritte:

1) Identifikation der benötigten Eingangsgrößen zur Gestehungskostenberechnung

2) Bestimmung von Abhängigkeiten
3) Datenbeschaffung (z.B. k_f-Wert, Porosität, spezifische Wärmekapazität, Kosten)
4) Untergliederung in sinnvolle Betrachtungseinheiten (Wärmebedarf, Geologie, Brunnen und Pumpen, Investitions-, Betriebs-, Wartungs- und Gestehungskosten)
5) Iterative Überarbeitung / Verbesserung

Für die im Tool verwendeten geologischen Parameter, wie z.B. k_f-Wert, Porosität und Wärmekapazität, wurden Literaturwerte hinterlegt. Diese bieten eine ausreichende Genauigkeit für die überschlägige Berechnung der Gestehungskosten und können an einigen Stellen des Tools durch Laborwerte ersetzt werden. Für eine korrekte Brunnenauslegung in einem spezifischen Projekt ist das Tool nicht konzipiert.
Dieser Arbeit ist das Gestehungskostentool mit dem Bearbeitungsstand vom 21.12.2021 in elektronischer Form als Anlage B.2 (Hopf_MA_Gestehungskostentool_ATES.xlsx) beigefügt.

4.3 Gestehungskostenberechnung

Es gibt mehrere Methoden zur Ermittlung von Wärmegestehungskosten (*WGK*). Für das Tool wurde sich für die Berechnung mit der Kapitalwertmethode nach folgender Formel entschieden (Konstantin, 2017):

$$WGK = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^{t=N} \frac{A_t}{q^t}}{\sum_{t=1}^{t=N} \frac{W_h}{q^t}} \tag{3}$$

Mit:

WGK	Wärmegestehungskosten in €/MWh
I_0	Investitionskosten in €
A_t	Betriebsausgaben des jeweiligen Jahres in €/a
W_h	produzierte Wärmemenge des jeweiligen Jahres in MWh
q	Diskontierungsfaktor (q=1+i/100)
i	Kalkulatorischer Zinssatz in %/a
t	jeweiliges Betriebsjahr
N	Nutzungsdauer bzw. Lebenszeit der Anlage in Jahren

Dabei wird der sog. 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).

Somit ergaben sich als Eingangsgrößen zur Gestehungskostenberechnung die Investitionskosten des Aquiferspeichers, die laufenden Kosten, welche sich aus bedarfs- und betriebsbezogenen Ausgaben zusammensetzen sowie die jährlich produzierte Wärmemenge des Speichers. Diese Größen hängen von bestimmten unabhängigen Ausgangsgrößen (im Folgenden Eingabeparameter) ab und sind zum Teil voneinander abhängig. Abbildung 14 gibt einen Überblick über die Eingangsgrößen der Gestehungskostenberechnung.

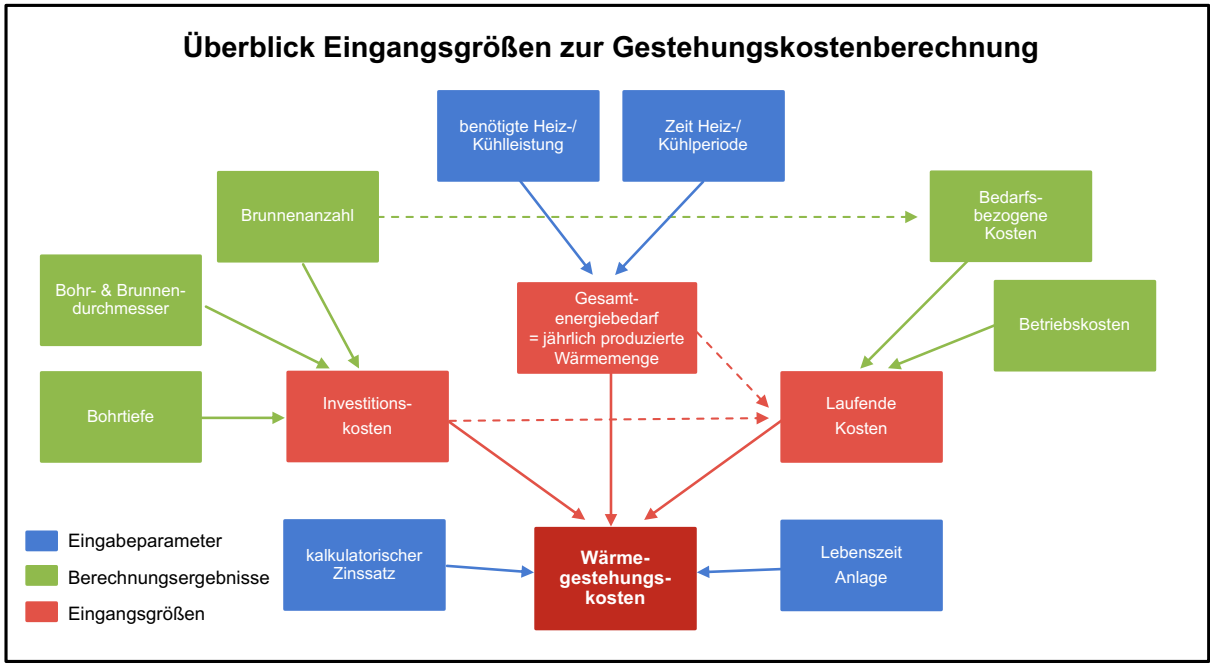


Abbildung 14: Übersichtsschema Bestimmung Gestehungskosten: Eingangsgrößen der Gestehungskostenberechnung (hellrot, blau), Werte aus denen sie berechnet werden (grün, blau), ein Teil der Eingabeparameter (blau).

Aufgrund der Komplexität der Beziehungen der Eingangsgrößen Investitionskosten und laufende Kosten, ihrer jeweiligen Eingangswerte sowie der Eingabeparameter zueinander, sind diese in zwei separaten Schemata dargestellt: Abbildung 15 und Abbildung 16.

Den beiden Abbildungen kann entnommen werden, dass viele der Eingabeparameter, wie z.B. die Mächtigkeit des Grundwasserleiters, zur Berechnung mehrerer Werte benötigt werden. Außerdem wird ersichtlich, dass in die Berechnung der laufenden Kosten nicht nur alle Eingabeparameter eingehen, sondern auch die Investitionskosten und der Gesamtenergiebedarf selbst.

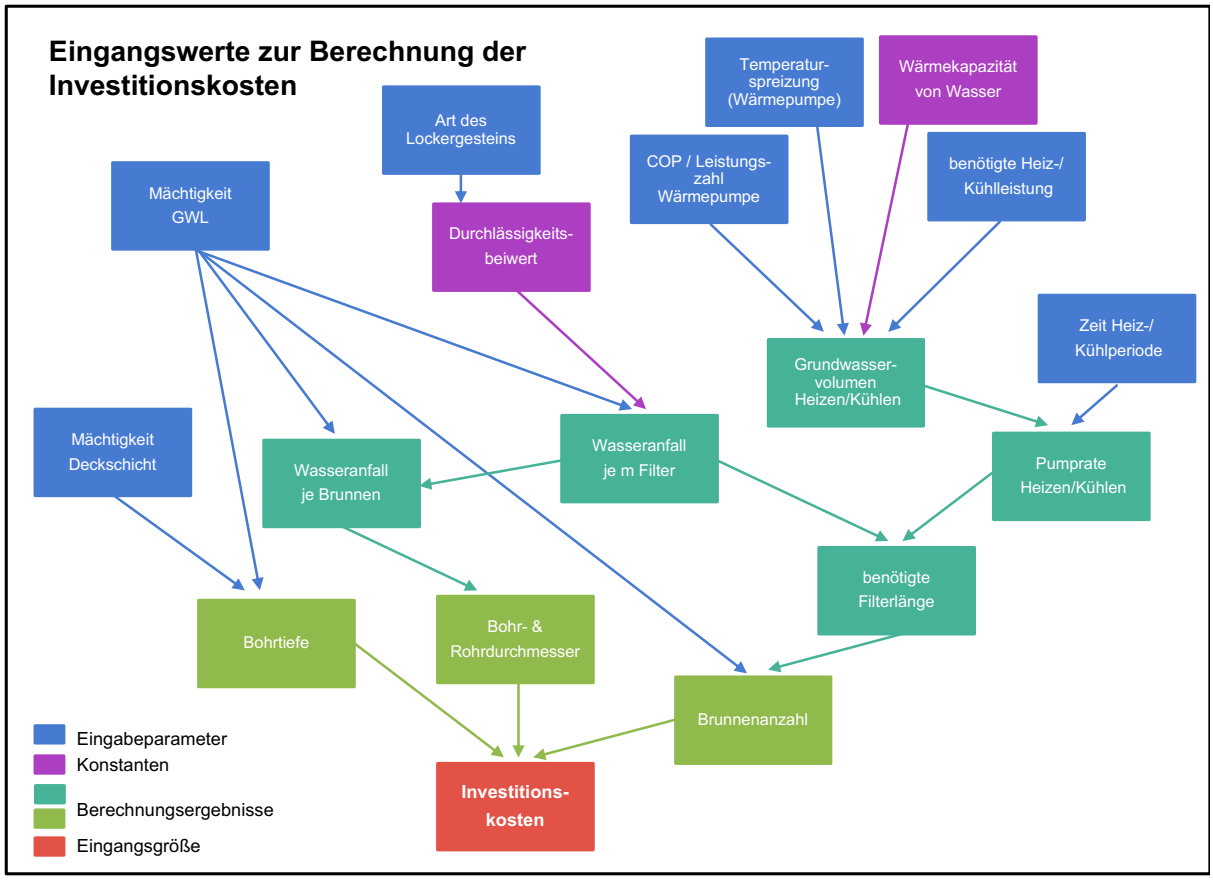


Abbildung 15: Übersichtsschema Eingangswerte Investitionskostenberechnung für die Wärmegestehungskostenberechnung eines Aquiferspeichers: Eingabeparameter (blau), Konstanten (violett), Berechnungsergebnisse (türkis, grün), Eingangsgröße (rot).

Im Folgenden werden die wichtigsten Berechnungsschritte des Gestehungskostentools dargelegt.

4.3.1 Wärmebedarf bzw. Wärmeüberschuss

Zu Beginn wird im Tool die zur Beheizung eines Gebäudes o.ä. benötigte Heizleistung P_H (Szenario 1) oder die vorhandene Überschussleistung (bzw. Kühlleistung) P_C (Szenario 2) in kW erfasst. In Szenario 1 wird die Kühlleistung P_C als Quotient aus P_H und der Speichereffizienz η_S berechnet. Damit stellt P_C in diesem Fall gleichzeitig die zur Einspeicherung benötigte Überschussleistung dar. Umgekehrt wird in Szenario 2 die resultierende Heizleistung als Produkt aus P_C und η_S gebildet. Weitere Berechnungsergebnisse dieser Betrachtungseinheit sind der Heiz- und Kühlenergiebedarf (ED_H bzw. ED_C) in MWh sowie die Gesamtwärmemenge (ΔQ_{Ges}) in MJ. Die Summe aus ED_H und ED_C ist der Gesamtenergiebedarf W_{ges}.

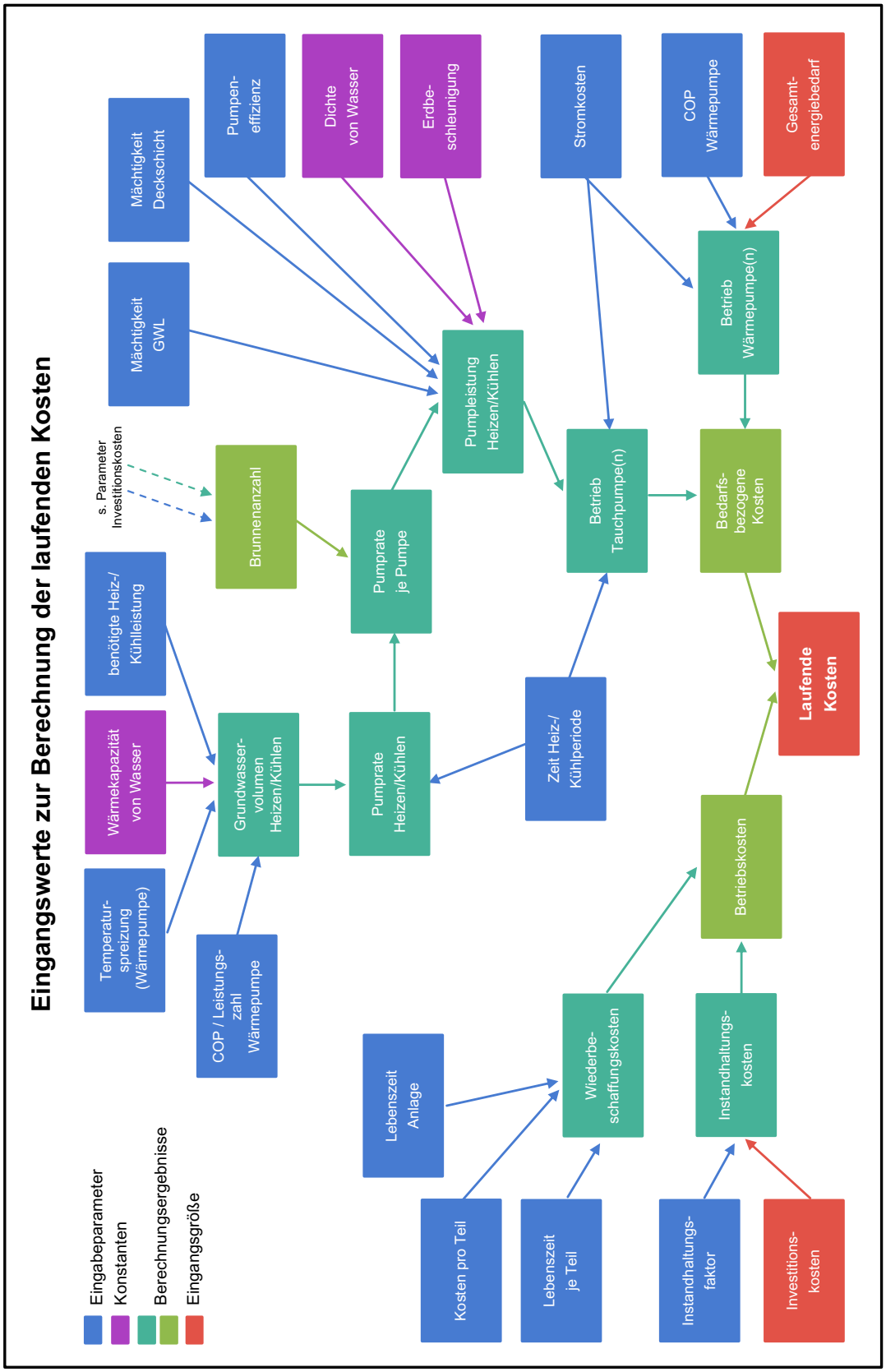


Abbildung 16: Übersichtsschema Eingangswerte Berechnung der laufenden Kosten für die Wärmegestehungskostenberechnung eines Aquiferspeichers: Eingabeparameter (blau), Konstanten (violett), Berechnungsergebnisse (türkis, grün), Eingangsgröße (rot).

4.3.2 Geologie & Speicherauslegung

Wichtigster geologischer Eingabeparameter ist neben der Mächtigkeit des GWL (h_{GWL}) und der Deckschicht (h_{top}) die Art des Lockergesteins. Aus dieser lassen sich einige wichtige Rechengrößen des Tools ableiten, wie der Durchlässigkeitsbeiwert (k_f), Gesamt- und effektiver Porenanteil (n_P und n_{Peff}) sowie die volumetrische Wärmekapazität (c_S) des Lockergesteins. Dies erfolgt automatisiert durch Abgleich mit hinterlegten Literaturwerten(Hölting & Coldewey, 2013; VDI, 2010). Gleichzeitig bietet das Tool die Möglichkeit zur Eingabe von Laborwerten.

Für die Berechnung des benötigten Speichervolumens des *GeoHeatStorage* (V_A) ist die Berechnung der volumetrischen Wärmekapazität des Aquifers (c_a; Gestein plus Grundwasser) anhand der genannten Literatur- oder Laborwerte notwendig. Für die Speicherauslegung eines „Standard"-ATES bedarf es lediglich der Berechnung der benötigten Grundwasservolumina zum Heizen und Kühlen (V_H bzw. V_C) mittels folgender Formel (angepasst n. Schüppler *et al.*, 2019):

$$V_{H/C} = \frac{ED_{H/C} \cdot \varepsilon_{HP} \cdot 3.600}{c_W \cdot \Delta T} \tag{4}$$

Dabei ist ε_{HP} die Leistungszahl der Wärmepumpe in %, welche sich aus dem Eingabeparameter COP der Wärmepumpe ergibt und ΔT die Temperaturspreizung des Grundwassers in K.

Die Auslegung des *GeoHeatStorage* gestaltet sich wesentlich komplexer. Da das Wasser innerhalb des GHS mehrfach im Laufe einer Saison ausgetauscht werden soll, werden zusätzlich die benötigten GW-Volumina zum Heizen und Kühlen pro Durchlauf (DL) berechnet. Diese dürfen das effektive, also durchflusswirksame Porenvolumen (V_{Peff}) innerhalb des GHS nicht übersteigen, welches sich aus der Multiplikation des effektiven Porenanteils n_{Peff} mit dem Speichervolumen V_A ergibt (Hölting & Coldewey, 2013). V_A setzt sich aus dem Volumen des Lockergesteins und dem Volumen des Wassers zusammen. Demzufolge muss die Wärmekapazität des Wassers in Formel (4) durch die Wärmekapazität des Aquifers ersetzt werden:

$$V_A = \frac{(ED_H \cdot \varepsilon_{HP-H} + ED_C \cdot \varepsilon_{HP-C}) \cdot 3.600}{c_a \cdot \Delta T} \tag{5}$$

Das Speichervolumen wird genutzt, um die mittels der Gesamttiefe (h_{GWL} plus h_{top}) und des Seitenverhältnisses die Länge a und Breite b des Speichers zu ermitteln. Abbildung 17 zeigt das Schema zur unterirdischen Speicherauslegung des *GeoHeatStorage*.

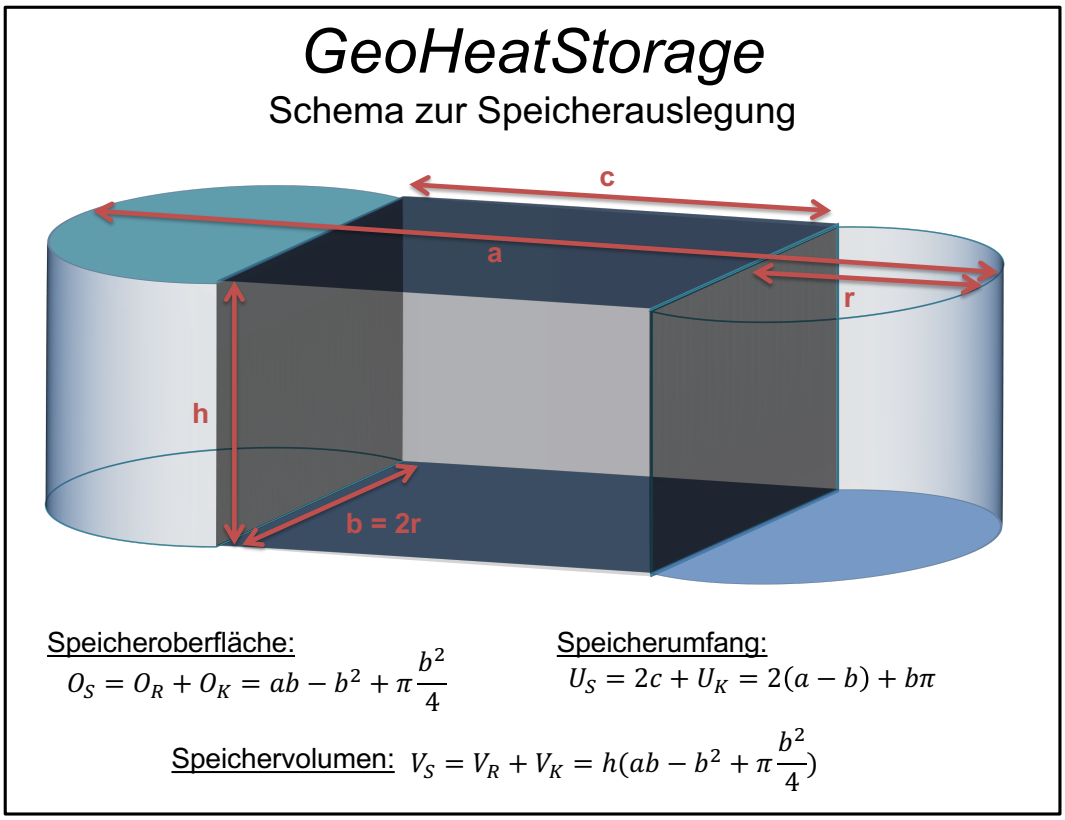


Abbildung 17: Schema zur unterirdischen Speicherauslegung des *GeoHeatStorage* (nicht maßstabsgetreu).

Zur weiteren Steigerung der Anwender*innenfreundlichkeit (auch durch fachunkundige Personen) wurden an entsprechenden Stellen im Tool Hinweise und Warnungen integriert. Diese erscheinen, wenn die Eingaben unvollständig oder inkorrekt sind oder zu physikalisch nicht möglichen Speicherauslegungen führen würden. Ein Beispiel ist der Abgleich der maximalen und minimalen Betriebstemperaturen mit den Temperaturgrenzen der VDI 4640 bzw. dem Gefrierpunkt von Wasser (s. Abbildung 18).

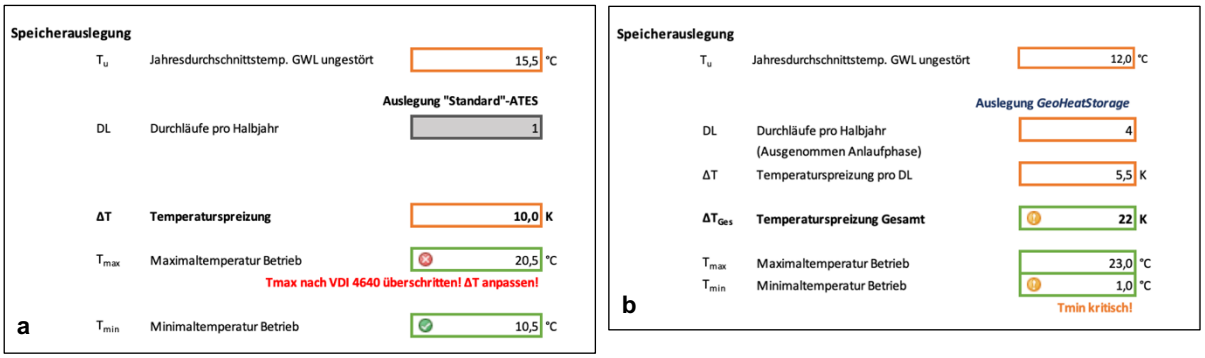


Abbildung 18: Ausschnitt aus dem Gestehungskostentool. Beispiel für Warnhinweise bei unplausiblen Berechnungsergebnissen: a) Maximale Betriebstemperatur gem. VDI 4640 überschritten bei gewählter Temperaturspreizung für die Auslegung eines „Standard"-ATES. b) Minimale Betriebstemperatur kritisch nahe an Gefrierpunkt von Wasser bei gewählter Kombination von Durchläufen pro Halbjahr und Temperaturspreizung für die Auslegung des *GeoHeatStorage*.

4.3.3 Brunnen & Pumpen

Die Berechnung der benötigten Filterlänge und der Anzahl der Brunnen erfolgt in Abhängigkeit vom Lockergestein. Anhand des Durchlässigkeitsbeiwertes und der zu erwartenden Grundwasserabsenkung (in m) kann auf den Wasseranfall je laufendem Meter Filtergalerie Q (in m^3/h) geschlossen werden (Prinz & Strauß, 2011). Aus diesem kann durch Multiplikation mit der Aquifermächtigkeit der Wasseranfall je Brunnen Q_B berechnet werden. Zur Vereinfachung für das Tool wurde angenommen, dass die Filtergalerie über die gesamte Aquifermächtigkeit ausgebaut werden würde.
Der Wasseranfall je Meter bildet die Grundlage zur Berechnung der benötigten Filterlänge L_H bzw. L_C (in m) und somit der Anzahl der warmen und kalten Brunnen:

$$L_{H/C} = \frac{q_{H/C}}{Q} \quad \text{mit} \quad q_{H/C} = \frac{V_{H/C}}{t_{H/C}} \qquad (6 \text{ und } 7)$$

Wobei q_H bzw. q_C die Pumprate zum Heizen bzw. Kühlen ist und t_H und t_C die Zeit der Heiz- und Kühlperiode. Die Brunnenanzahl ergibt sich als Quotient aus Filterlänge und Mächtigkeit des Aquifers.
Zur späteren Ermittlung der bedarfsbezogenen Kosten wird die benötigte Pumpleistung in kW zum Heizen P_{PH} bzw. Kühlen P_{PC} wie folgt berechnet (Schüppler *et al.*, 2019):

$$P_{PH/C} = \frac{q_{H/C} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_{GWL} + h_{top})}{3{,}6 \cdot 10^6 \cdot \eta_P} \qquad (8)$$

Die Pumpleistung ergibt sich aus der Hubarbeit, die die Pumpen in einer Heiz. bzw. Kühlperiode verrichten müssen, um die entsprechende Menge Grundwasser an die Oberfläche zu pumpen, unter Berücksichtigung der Gesamteffizienz der Pumpen η_P.
Bei der Auslegung der Brunnen und Pumpen gibt es keine Unterschiede in der Berechnung für den *GeoHeatStorage* und einen „Standard"-ATES. Die Ergebnisse unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Grundwasservolumina.
Ein weiterer Bestandteil der Brunnenauslegung ist die Bestimmung des erforderlichen Rohr- und Bohrdurchmessers. Dafür wird der Mindestdurchmesser d (in m) wie folgt berechnet (STÜWA, 2013):

$$d = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}} \quad \text{mit} \quad A = \frac{Q_B}{v} \qquad (9 \text{ und } 10)$$

Die Fließgeschwindigkeit v in Rohrleitungen wurde im Tool zur Vereinfachung auf 1 m/s festgelegt. Es wird davon ausgegangen, dass sich bei dieser Geschwindigkeit die

Reibungsverluste im Rohr in vertretbaren Grenzen halten (STÜWA, 2013). Entsprechend des Mindestdurchmessers wird automatisch die nächstgrößere Nennweite als Rohrdurchmesser gewählt und der dazu benötigte Bohrdurchmesser.

4.3.4 Investitionskosten

Die Investitionskosten eines Aquiferspeichers setzen sich aus vielen einzelnen Posten zusammen, die sich in folgende Kategorien gruppieren lassen (Schüppler *et al.*, 2019):

- Voruntersuchungen
- Vorbereitung, Organisation, Proben und Abschlussarbeiten
- Bohren von Brunnen und Messstelle(n)
- Verrohrung und Brunnenausbau
- Pumpen
- Controlling- und Monitoringeinrichtungen
- Leitungen und Gebäudeintegration.

Die hinterlegten Kosten setzen sich zusammen aus den in Schüppler *et al.* (2019) angegebenen Werten und aktuellen Angaben verschiedener, deutscher Bohrfirmen. Diese wurden telefonisch und per Mail angefragt.

Zur Ermittlung der Investitionskosten I_{ATES} werden die entsprechenden Posten mit der Aquifermächtigkeit, der Gesamtbohrtiefe, der Gesamtbrunnenanzahl, dem Nenn- oder Bohrdurchmesser multipliziert und alle Posten summiert.

Beim *GeoHeatStorage* werden zusätzlich getrennt davon die Investitionskosten der Dichtwände I_{DW} folgendermaßen berechnet:

$$I_{DW} = 116.370\,€ + 131{,}50\,\frac{€}{m^2} \cdot A_M \tag{11}$$

A_M ist die Mantelfläche der Dichtwand, welche das Produkt aus dem Speicherumfang U_S und der Speicherhöhe h ist (s. Abbildung 17).

4.3.5 Betrieb & Wartung

Die Betriebskosten *OC* (von engl. *operating costs*) und die bedarfsbezogenen Kosten *DC* (engl. *demand-related costs*) werden für ein „Standard"-ATES und den *GeoHeatStorage* in gleicher Art ermittelt. Ihre Summe ergibt die laufenden Kosten pro Jahr *CC* (engl. *current costs*).

Die bedarfbezogenen Kosten setzen sich zusammen aus den Betriebskosten für die Wärmepumpe(n) zum Heizen (und ggf. auch zum Kühlen) sowie für die Tauchpumpen (Schüppler *et al.*, 2019):

$$DC = \frac{ED_H}{COP} \cdot EC + P_{PH} \cdot t_H \cdot EC + P_{PC} \cdot t_C \cdot EC \tag{12}$$

Dabei sind EC die Stromkosten.

Die Instandhaltungskosten M_{ATES} werden durch Multiplikation des Instandhaltungsfaktors m_{ATES} mit den Investitionskosten I_0 berechnet. Die Wiederbeschaffungskosten R_{ATES} beinhalten alle Ersatzanschaffungen innerhalb der Lebenszeit N_{ATES} der Anlage. Die Summe aus M_{ATES} und dem Anteil von R_{ATES} für ein Jahr ergibt die Betriebskosten.

4.3.6 Gestehungskosten

Die Gestehungskosten werden als Mittel über die Lebensdauer der Anlage ausgegeben. Aus diesem Grund ist es notwendig die zukünftigen Zahlungsbeträge der Betriebskosten durch Abzinsen zu bestimmen. Die sich ergebenden, diskontierten Werte werden aufsummiert und gehen als sog. Barwert aller Ausgaben in Formel (3) ein. Ebenso wird mit dem Gesamtenergiebedarf verfahren, wodurch sich der Barwert der jährlich produzierten Energiemenge ergibt (Konstantin, 2017). Für ein „Standard"-ATES entspricht I_{ATES} den Investitionskosten I_0 zur Gestehungskostenberechnung. Beim GeoHeatStorage setzen sich aus I_{ATES} und I_{DW} zusammen.

4.3.7 Das Kostentool

Das Gestehungskostentool wurde als Instrument entwickelt, um in der frühen Phase einer Machbarkeitsstudie überschlägige Aussagen über die wahrscheinlich zu erwartenden Gestehungskosten treffen zu können. Es dient nicht dazu eine konkrete Aquiferspeicheranlage bis ins Detail zu planen.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse sind einige Dinge zu beachten. Zum einen werden nur die Kosten des Aquiferspeichers ohne die Anbindung an die Gebäudetechnik berechnet. Ebenso bietet das Tool momentan keine Möglichkeit eventuell anfallende Ausgaben für Energiebeschaffung mit einzurechnen. Zum anderen ist es notwendig und vorgesehen, dass die den Investitionskosten zugrunde liegenden Preise regelmäßig aktualisiert werden.

Insgesamt ist das Gestehungskostentool ein hilfreiches Werkzeug für die Praxis im Alltag eines Ingenieurbüros. Es ist sehr übersichtlich und kann auch von fachunkundigen Personen benutzt werden. Zwischenergebnisse werden angezeigt, damit bei Vergleich verschiedener Varianten nachvollzogen werden kann, wie sich die Gestehungskosten zusammensetzen und welche Größen Einfluss darauf haben. Mit

nur wenigen Eingaben können erste Aussagen zur Wirtschaftlichkeit eines Projekts getroffen werden.

4.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Mit Hilfe des Tools wird an zwei Beispielszenarien gezeigt, dass Aquiferspeicheranlagen in Thüringen wirtschaftlich betrieben werden können. Zudem werden die Wärmegestehungskosten eines „Standard"-ATES und dem *GeoHeatStorage* verglichen.

4.4.1 Standortbeschreibung

Als Standort für die Szenarien wurde eine Fläche im Süden von Nordhausen gewählt (s. Abbildung 19). Sie befindet sich in einem Gebiet mit gutem Potential für Aquiferspeicher gemäß Abbildung 9. Zudem lässt sich aus den Daten der Bohrpunktkarte Deutschland schließen, dass ausreichend mächtige, quartäre Strukturen vorhanden sind (BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2021). Die Deckschicht am Standort ist rund 1 m mächtig und der sich anschließende Feinkies ist zwischen 10 und 28 m mächtig. Die Schichtenverzeichnisse der entsprechenden Bohrungen sind als Online-Ausdrucke als Anhang A dieser Arbeit beigefügt.

Da der *GeoHeatStorage* maximal 15 m tief sein kann und von einem Grundwasserflurabstand von 5 m ausgegangen wurde, sind für die Mächtigkeiten der Deckschicht (h_{top}) und des GWL (h_{GWL}) die Höchstwerte von 5 m und 10 m festgelegt wurden.

Gut einen Kilometer nördlich des Standortes befindet sich die Hochschule Nordhausen. Sie wird in den Beispielszenarien als Abnehmer sowohl der Wärme- als auch der Kälteenergie fungieren. In einer Hochschule ist davon auszugehen, dass Hörsäle, Seminarräume, Büros u.a. beheizt werden müssen und dass im Sommer z.B. Laborräume klimatisiert werden müssen.

Szenario 1

In Szenario 1 wird der Bedarf der Hochschule als bekannt angenommen. Die benötigte Heizleistung P_H beträgt 345 kW. Dies entspricht umgerechnet einem Heizenergieverbrauch von rund 191 kWh/m² a, welcher als Mittelwert für Fachhochschulen von Fraunhofer-Institut für Bauphysik ermittelt wurde (Kluttig *et al.*, 2002).

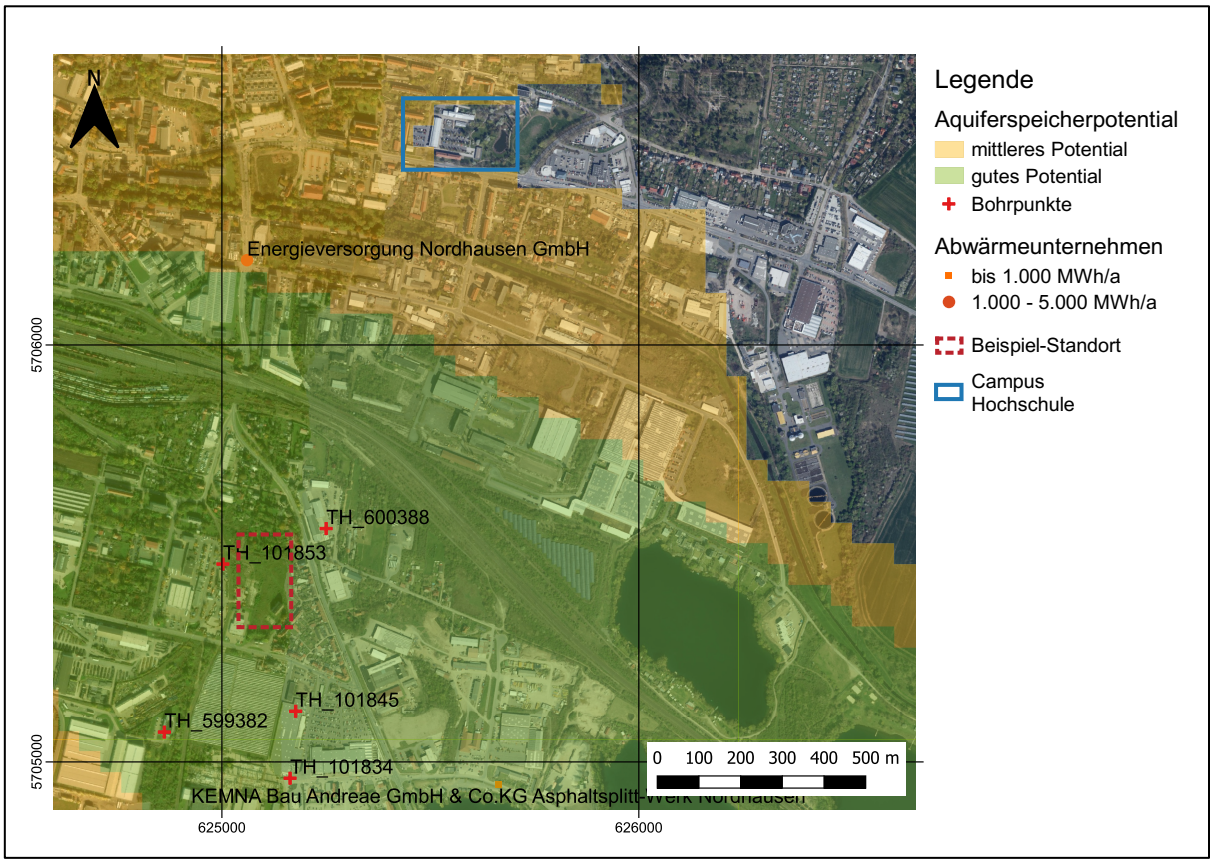


Abbildung 19: Lokation des Standortes für die Beispiel-Szenarien in Nordhausen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Aquiferspeicheranlagen mit dem Gestehungskostentool. Hintergrundkarte: ESRI Satellite. Koordinatenbezugs-system: ETRS89 / UTM Zone 32N.

Szenario 2

Rund 1 km nördlich des Standortes befindet sich Energieversorgung Nordhausen GmbH. Dies ist eines der Unternehmen aus dem Wärmekataster des Energieatlas Thüringen. Es hat einen jährlichen Wärmeüberschuss von 4.650 MWh. Das entspricht rund 531 kW. Damit die Szenarien sich deutlicher voneinander unterscheiden, wurde angenommen, dass noch andere (Ab-)Wärmequellen in der Umgebung genutzt werden können, sodass die vorhandene Überschussleistung (P_C) auf 1.200 kW festgelegt wurde.

Tabelle 3 listet alle Eingabeparameter für das Gestehungskostentool auf. Die oben beschriebenen Parameter ergaben sich aus der Wahl des Standortes und dazu getroffenen Annahmen. Die übrigen Parameter wurden anhand von Praxis- und Literaturwerten festgelegt.

Da die Grundwassertemperaturen in geringen Tiefen der Lufttemperatur folgen, wurde für die ungestörte Jahresdurchschnittstemperatur des GW (T_u) der Wert von 10,4 °C eingesetzt. Dies entspricht dem Jahresmittel der Temperatur 2020 (BMU, 2008; DWD, 2021).

Tabelle 3: Eingabeparameter für das Gestehungskostentool entsprechend der Wahl des Standortes und der Festlegung der Beispielszenarien.

Eingabeparameter		Einheit	Standard-ATES	GHS
Geologische Parameter				
h_{GWL}	Mächtigkeit GWL	m	10	
h_{top}	Mächtigkeit Deckschicht	m	5	
	Lockergestein GWL	-	sandiger Kies	
T_u	Jahresdurchschnittstemperatur GWL ungestört	°C	10,4 [a, b]	
Anlagentechnische Parameter				
A_H	zu beheizende Fläche	m²	9.000	
A_C	ggf. zu kühlende Fläche	m²	9.000	
t_H	Zeit Heizperiode	h	3.000	
t_C	Zeit Kühlperiode	h	2.000	
P_H	ben. Heizleistung (Szenario 1)	kW	345 [c]	
P_C	vorh. Überschussleistung (Szenario 2)	kW	1.200	
η_S	Speichereffizienz	%	75 [d]	
COP_{HP}	COP Wärmepumpe Heizen	-	4,5 [e, f]	
COP_{HP}	COP Wärmepumpe Kühlen	-	entfällt	
ΔT	Temperaturspreizung	K	6	-
DL	Durchläufe pro Halbjahr	-	-	3
ΔT	Temperaturspreizung pro DL	K	-	6
x/y	Seitenverhältnis b zu a	-	-	3/4
η_P	Gesamteffizienz der Pumpe(n)	%	60 [g]	
	Länge horizontale Leitungen	m	1000	
EC	Stromkosten	ct/kWh	32,16 [h]	
m_{ATES}	Instanthaltungsfaktor	%	4,0 [g]	
N_{ATES}	Lebenszeit ATES System	a	30 [d, g]	
N_P	Lebenszeit Tauchpumpen	a	6 [g]	
i	kalkulatorischer Zinssatz	%/a	5,00 [g, i, j]	

[a] (DWD, 2021), [b] (BMU, 2008), [c] (Kluttig *et al.*, 2002), [d] (Fleuchaus *et al.*, 2018), [e] (Günther *et al.*, 2020), [f] (Swegon Germany GmbH, 2021), [g] (Schüppler *et al.*, 2019), [h] (BDEW, 2021b), [i] (Konstantin, 2017), [j] (BNetzA, 2021)

Die Anlagenkonfiguration sieht eine indirekte Beheizung mittels Wärmepumpe und eine direkte Kühlung vor. Dadurch ergibt sich eine mittlere Speichereffizienz η_S von 75 % (Fleuchaus *et al.*, 2018). Auf Grundlage von Angaben eines Herstellers industrieller Großwärmepumpen und Projektdaten des Fraunhofer ISE wurde eine

mittlere Leistungszahl (COP_{HP}) von 4,5 gewählt (Günther *et al.*, 2020; Swegon Germany GmbH, 2021). Außerdem wurde davon ausgegangen, dass die maximal mögliche Temperaturspreizung (ΔT) von 6 K durch die Wärmepumpe realisiert werden kann. Entsprechend dieses Wertes und ausgehend von der gewählten GW-Temperatur sind nur 3 Durchläufe pro Halbjahr im *GeoHeatStorage* möglich.
Als Strompreis (*EC*) wurde der durchschnittliche Strompreis für einen Haushalt von 32,16 ct/kWh angesetzt, da der Verbrauch unter dem von Industriekunden liegt (BDEW, 2021b). Der kalkulatorische Zinssatz *i* wurde auf 5 % festgelegt. Dies entspricht dem Wert den Schüppler *et al.* (2019) bei ihrer techno-ökonomischen Analyse eines ATES zugrunde gelegt hatten. Zudem ist der Wert nur wenig höher als der von der Bundesnetzagentur im Juli diesen Jahres festgesetzte Eigenkapitalzins von 4,59 % vor Steuer (BNetzA, 2021).
Alle vorgenannten anlagentechnischen Parameter sollten in einem konkreten Fall mit dem zuständigen TGA-Planer abgestimmt werden.

4.4.2 Gegenüberstellung Standard-ATES und *GeoHeatStorage*

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die durch das Tool berechneten Eingangsgrößen und Gestehungskosten in den beiden Szenarien.

Szenario 1

In Szenario 1 sind die benötigte jährliche Heizleistung von 345 kW und die daraus resultierende produzierte Wärmemenge von knapp 2.000 MWh verhältnismäßig gering. Es handelt sich damit um eine eher kleine ATES-Anlage (Fleuchaus *et al.*, 2018). Die daraus resultierenden Gestehungskosten von 11 ct/kWh (Standard-ATES) bzw. 13 ct/kWh sind im Vergleich zum diesjährigen, durchschnittlichen Gaspreis sehr hoch. Dieser lag bei 6,35 ct/kWh (bei einem Jahresverbrauch von 80.000 kWh; BDEW, 2021). Der Unterschied in den Gestehungskosten ergibt sich aus den deutlich unterschiedlichen GW-Volumina. Im konventionellen Aquiferspeicher müssen knapp 250.000 m^3 pro Jahr gepumpt werden. Für den *GeoHeatStorage* reduziert sich die Menge auf rund 83.000 m^3. Dies ergibt sich aus der Proportionalität der Temperaturdifferenz zur Energiemenge (s. Formel (4)). Dadurch reduziert sich der Energiebedarf der Pumpen des GHS auf weniger als die Hälfte im Vergleich zum Standard-ATES. Dies schlägt sich in deutlich geringeren bedarfsbezogenen Kosten nieder. Dennoch sind die GSK des *GeoHeatStorage* höher, aufgrund der zusätzlichen Investitionsausgaben (+ 73 %) für die Dichtwand.

Tabelle 4: Mit dem Gestehungskostentool berechnete Eingangsgrößen und Wärmegestehungskosten beider Beispielszenarien. Gegenüberstellung Standard-ATES und GeoHeatStorage. Szenario 1: Heizbedarf bekannt. Szenario 2: Überschussleistung bekannt.

Berechnete Eingangsgrößen		**Einheit**	**Standard-ATES**	***GeoHeatStorage***
Szenario 1				
I_{ATES}	Investitionskosten	€	1.223.718,96	1.223.718,96
I_{DW}	Dichtwand	€	-	887.676,88
I_0	Summe	€	1.223.718,96	2.111.395,84
DC	Bedarfsbezogene Kosten	€	79.432,05	75.789,35
OC	Betriebskosten	€	50.506,26	50.506,26
CC	Laufende Kosten	€	129.938,31	126.295,61
W_{ges}	jährl. prod. Wärmemenge	MWh	1.955	1.955
WGK	**Wärmegestehungskosten**	**€/kWh**	**0,11**	**0,13**
Szenario 2				
I_{ATES}	Investitionskosten	€	1.450.631,92	1.223.718,96
I_{DW}	Dichtwand	€	-	1.362.143,00
I_0	Summe	€	1.450.631,92	2.585.861,96
DC	Bedarfsbezogene Kosten	€	207.214,05	197.711,35
OC	Betriebskosten	€	61.919,03	50.506,26
CC	Laufende Kosten	€	269.133,07	248.217,61
W_{ges}	jährl. prod. Wärmemenge	MWh	5.100	5.100
WGK	**Wärmegestehungskosten**	**€/kWh**	**0,07**	**0,08**

Szenario 2

In Szenario 2 unterscheiden sich alle berechneten Größen deutlicher zwischen Standard-ATES und *GeoHeatStorage* als in Szenario 1. Die Investitionskosten (I_{ATES}) des GHS sind geringer, da weniger Brunnen benötigt werden. Dies wirkt sich auch auf die laufenden Kosten aus, da weniger Pumpen benötigt werden. Trotz dessen sind die Gestehungskosten höher, da die Investitionsausgaben für die Dichtwand stark ansteigen im Vergleich zu Szenario 1. Sie sind höher als die eigentlichen Investitionskosten.

Szenario 2 zeigt allerdings auch, dass mit zunehmender Wärmemenge die Gestehungskosten für beide Varianten sinken. Das bedeutet sie werden zunehmend wirtschaftlicher, auch im Vergleich zum Gaspreis. Dennoch sollten die konkreten Zahlen der Ergebnisse nicht unkritisch betrachtet werden. Wie bereits in Kapitel 4.3.7 ausgeführt, dient das Tool als Hilfsmittel um überschlägige Aussagen über die

wahrscheinlich zu erwartenden Gestehungskosten treffen zu können. Dennoch weißen die Ergebnisse dieses Kapitels darauf hin, dass Aquiferspeicher das Potential haben Teil der zukünftigen Wärmeversorgung Thüringens zu werden.

4.5 Berücksichtigung der CO_2-Bepreisung

Mit Beginn des Jahres 2021 wurde im Bereich Wärme eine CO_2-Bepreisung auf fossile Energieträger, wie z.B. Heizöl und Erdgas eingeführt. Unternehmen, die mit diesen handeln, sind verpflichtet Emissionszertifikate für ihre Produkte zu kaufen. Dabei gilt ein Festpreis pro Tonne Kohlenstoffdioxid von 25 €. Bis 2026 wird er schrittweise erhöht auf 55 bis 65 €, wie Abbildung 20 verdeutlicht. Ziel des CO_2-Preises ist es langfristig die Treibhausgasemissionen zu senken. Die Verteuerung fossiler Brennstoffe soll ein Anreiz sein, Energieverbräuche zu senken und auf klimafreundlichere Technologien umzusteigen (Bundesregierung, 2021).

Aufgrund der CO_2-Bepreisung werden die Gaspreise jährlich steigen. Somit werden alternative Lösungen zur Wärmeversorgung, wie z.B. Aquiferspeicher auch aus wirtschaftlicher Sicht immer vorteilhafter.

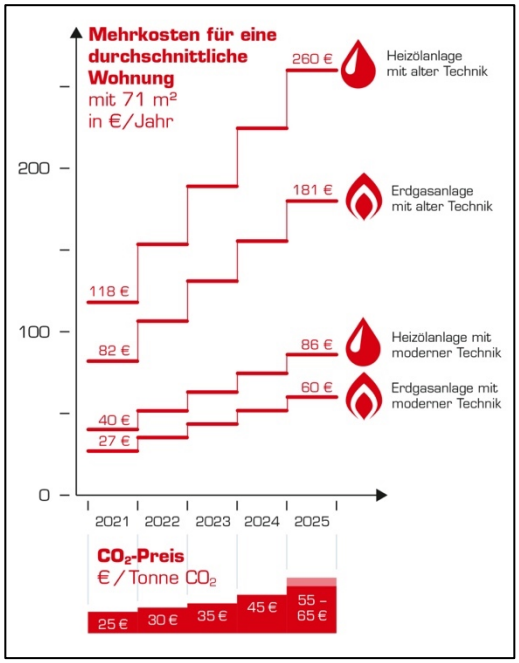


Abbildung 20: Steigerung der CO_2-Bepreisung und sich daraus ergebende zusätzliche Heizkosten für eine durchschnittliche Wohnung (Minol, 2020).

5 Zusammenfassung

Die politische Strategie in Deutschland, sowohl auf Bundesebene als auch auf Landesebene in Thüringen, sieht vor im Rahmen der Wärmewende „den Wärmebedarf erheblich zu senken und die Wärmeversorgung schrittweise auf erneuerbare Wärme und unvermeidbare Abwärme umzustellen“ (BMWi, 2021). Mit dem übergeordneten Ziel, den Wärmebedarf des Gebäudebestands bis 2050 nahezu klimaneutral zu decken. Dies ist von der Thüringer Landesregierung im Thüringer Klimagesetz (ThürKlimaG) und der Thüringer Klimastrategie festgeschrieben wurden (TMUEN, 2019). Die Maßnahmen, die zur Erfüllung dieses Ziels umgesetzt werden, sollen umweltverträglich und wirtschaftlich sein sowie eine sichere Wärmeversorgung garantieren. Aquiferspeicher sind geeignet zur Verwirklichung des Ziels beizutragen.

5.1 Wesentliche Erkenntnisse

Trotz vieler offener Fragen (Kapitel 2.5, 2.7, 2.8) und eindeutiger Handlungsbedarfe seitens der Politik (Kapitel 2.6.1) werden *Aquifer Thermal Energy Storage* Systeme als Baustein für das Voranbringen der Wärmewende in Deutschland und Thüringen angesehen:

1) 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).
2) Der Einsatz von ATES bietet ein enormes CO_2-Einsparpotential im Vergleich zu Gebäudebeheizung auf Basis fossiler Energieträger und ausschließlich strombasierter Gebäudeklimatisierung (Fleuchaus *et al.*, 2018; Vienken *et al.*, 2016).
3) Die Vorreiter-Nationen Niederlande, Schweden, Dänemark und Belgien zeigen, dass eine Implementierung von ATES in den Wärmesektor möglich ist, dass v.a. LT-ATES bereits einen sehr hohen Technologie-Reifegrad aufweisen und dass der Betrieb wirtschaftlich ist (Fleuchaus *et al.*, 2018; Schüppler *et al.*, 2019).
4) ATES können hervorragend mit Kalten Nahwärmenetzen kombiniert werden (Buffa *et al.*, 2019; Lund *et al.*, 2021; Pehnt *et al.*, 2017).

In Thüringen scheinen die Potentiale auf einen geringen Anteil der Landesfläche begrenzt zu sein. Die Ergänzung der Methodik um weitere geologische Einheiten

sollte die Fläche der Potentialgebiete vergrößern. Außerdem könnte die Erweiterung um zusätzliche Einflussfaktoren die Aussagekraft der Karten erhöhen.
Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit Hilfe des Gestehungskostentools hat die bisherigen Forschungsergebnisse bestätigt und gezeigt, dass mit zunehmender Wärmemenge die Gestehungskosten eines ATES sinken (Fleuchaus *et al.*, 2018). Zudem weißen die Ergebnisse der Berechnungen darauf hin, dass Aquiferspeicher das Potential haben Teil der zukünftigen Wärmeversorgung Thüringens zu werden. Schon jetzt können große Anlagen (> 5 MW; Fleuchaus *et al.*, 2018) Gestehungskosten im Bereich des Gaspreises erreichen. In Zukunft dürften selbst mittlere Anlagen durch die jährlich steigenden CO_2-Preise konkurrenzfähige GSK erzielen.

5.2 Schlussfolgerungen & Einordnung der Ergebnisse

Nach bisherigen Erkenntnissen sind Aquiferspeicher eine umweltverträgliche Alternative zur sicheren, wirtschaftlichen und Treibhausgas-ärmeren Versorgung mit Wärme, Kälte und Warmwasser. Auch in Thüringen könnten sie Teil der zukünftigen Wärmeversorgung werden. Mindestens in den quartären Strukturen im Norden von Thüringen finden sich gute bis sehr gute Voraussetzungen dafür.
Auch die politischen Rahmenbedingungen sind günstig für die Etablierung von Aquiferspeichern in Thüringen. Die Landeswärmestrategie als Teil der *Integrierten Energie- und Klimaschutzstrategie* beinhaltet sieben strategische Leitlinien und eine große Anzahl konkreter Maßnahmen, um die Wärmewende voranzutreiben. Bau und Betrieb von Aquiferspeichern können hervorragend in die Strategie integriert werden. Beispielsweise können ATES, entsprechend Leitlinie 5, in Kombination mit erneuerbaren Energien und dem Ausbau bestehender Infrastrukturen, d.h. Wärmenetzen, einen Beitrag zur verlässlichen Wärmeversorgung leisten. Außerdem soll ein Pilotprojekt zur Einbindung von Geothermie in hybride Energieanlagen gefördert werden. Weitere Maßnahmen zielen auf die Transformation des Wärmenetzes und den Ausbau der Nutzung von Abwärme ab. Dadurch wird die Integration von Aquiferspeichern in die zukünftige Wärmeversorgung Thüringens erleichtert werden.

5.3 Handlungsempfehlungen & Ausblick

Um die Anwendung von Aquiferspeichern in Deutschland im Allgemeinen voranzubringen, sollten aus Sicht der Autorin zunächst möglichst schnell, mehrere kleinere ATES-Anlagen errichtet werden. Diese sind zwar im Vergleich zu größeren Anlagen weniger wirtschaftlich, gleichzeitig aber auch mit einem geringeren

Investitionsrisiko verbunden. Eine Einbindung in Forschungsprojekte mit umfangreichen Monitoringmaßnahmen vor und während des Speicherbetriebs würde sich zudem eignen, um auf Grundlage der umfangreichen Daten die Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit von Aquiferspeichern zu demonstrieren. Als außerordentlich wichtig erachten die Autorin darüber hinaus die frühzeitige und fortlaufende Einbindung aller Interessengruppen. Auf diesem Weg kann einer breiten Öffentlichkeit sowohl der gesamtgesellschaftliche Nutzen (klimafreundliche Wärmeproduktion) als auch der individuelle Nutzen (regionale Wertschöpfung) verdeutlicht werden.

Referenzen

Arbeitsgruppe Geologie (2021) Stratigraphische Tabellen der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie. In: Geologische Kartieranleitung. https://www.geokartieranleitung.de/Fachliche-Grundlagen/Stratigraphie-Kartiereinheiten/Stratigraphie-der-Bundesrepublik/Tabellen-der-Bundesländer/Thüringen. Accessed 7 Dec 2021

Bauer, M.J., **Freeden, W.**, **Jacobi, H.** and **Neu, T.** (eds) (2018) Handbuch oberflächennahe Geothermie. *Springer Spektrum*, Berlin, 817 pp.

BAUER Gruppe (2015) BAUER Spezialtiefbau GmbH - Mixed-in-Place-Verfahren (MIP). In: https://www.youtube.com/watch?v=k83GafIAYNo. Accessed: 7 Nov 2021

BAUER Spezialtiefbau GmbH (2021) Bodenmischverfahren. In: www.bauer.de. https://www.bauer.de/bst/construction_method/soil_mixing_methods/. Accessed 7 Nov 2021

BAUER Spezialtiefbau GmbH (2020) BAUER Mixed-in-Place. https://www.bauer.de/export/shared/documents/pdf/bst/print/905_039_1_MIP.pdf

BDEW (2021a) BDEW-Gaspreisanalyse November 2021: Haushalte. *BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.*, Berlin. https://www.bdew.de/media/documents/20211115_BDEW-Gaspreisanalyse_November-2021.pdf

BDEW (2021b) BDEW-Strompreisanalyse November 2021 Haushalte und Industrie. *BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.*, Berlin. https://www.bdew.de/media/documents/20211115_BDEW-Strompreisanalyse_November-2021.pdf

Bergmannsverein "Otto Ludwig Krug von Nidda" e.V., Erfurt (2007) Thüringer Bergbau heute - Übersicht. In: bergmannsverein-erfurt.de. https://www.bergmannsverein-erfurt.de/main.php?unmenue=uebersicht_heute&content=uebersicht_heute. Accessed 7 Dec 2021

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2021) Bohrpunktkarte Deutschland. In: bgr.bund.de. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Geodatenmanagement/Bohrpunktkarte-Deutschland/bohrpunktkarte-deutschland_node.html. Accessed 10 Dec 2021

Bloemendal, M., **Olsthoorn, T.** and **van de Ven, F.** (2015) Combining climatic and geo-hydrological preconditions as a method to determine world potential for aquifer thermal energy storage. *Science of The Total Environment*, **538**, 621–633.

Blum, P., **Menberg, K.**, **Koch, F.**, **Benz, S.A.**, **Tissen, C.**, **Hemmerle, H.** and **Bayer, P.** (2021) Is thermal use of groundwater a pollution? *Journal of Contaminant Hydrology*, **239**, 103791.

BMU (2008) Grundwasser in Deutschland. *BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*, Berlin. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3642.pdf

BMWi (2021) Dialog Klimaneutrale Wärme - Zielbild, Bausteine und Weichenstellungen 2030/2050. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, Berlin.

BNetzA Bundesnetzagentur (2021) Beschluss BK4-21-056. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/BK4-GZ/2021/BK4-21-0056/BK4-21-0056_Konsultation_Gas_BF.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Access 10 Dec 2021

Bonte, M. (2013) Impacts of Shallow Geothermal Energy on Groundwater Quality. Dissertation Vrije Universiteit Amsterdam.

Brielmann, H., **Griebler, C.**, **Schmidt, S.I.**, **Michel, R.** and **Lueders, T.** (2009) Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems: Ecosystem impacts of groundwater heat discharge. *FEMS Microbiology Ecology*, **68**, 273–286.

Brielmann, H., **Lueders, T.**, **Schreglmann, K.**, **Ferraro, F.**, **Avramov, M.**, **Hammerl, V.**, **Blum, P.**, **Bayer, P.** and **Griebler, C.** (2011) Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. *Grundwasser*, **16**, 77–91.

Buffa, S., **Cozzini, M.**, **D'Antoni, M.**, **Baratieri, M.** and **Fedrizzi, R.** (2019) 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **104**, 504–522.

Bundesanzeiger Verlag GmbH (2021) Gesetz zur Änderung des Bundesberggesetzes und zur Änderung der Verwaltungsgerichtsordnung. In: Bundesanzeiger Verlag. https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s1760.pdf%27%5D__1634909597983. Accessed 22 Oct 2021

Bundesregierung (2021) CO2 hat einen Preis: Anreiz für weniger CO2-Emissionen. In: bundesregierung.de. https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/weniger-co2-emissionen-1790134. Access 20 Dec 2021

Bundesverband Geothermie (2020) NEUBRANDENBURG - GEOTHERMIEANLAGE. In: geothermie.de. https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/n/neubrandenburg-geothermieanlage.html. Accessed 26 Apr 2021

Bundesverband Geothermie (2021) DER BUNDESRAT EMPFIEHLT EINE ÄNDERUNG DES BUNDESBERGGESETZES ZUGUNSTEN DER NUTZUNG VON GEOTHERMIE. In: geothermie.de. https://www.geothermie.de/aktuelles/nachrichten/news-anzeigen/news/der-bundesrat-empfiehlt-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. Accessed 5 May 2021

DWD (2021) Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2020. *DWD Deutscher Wetterdienst*, Offenbach am Main. https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2020.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Ellenberg, J. (2012) Geologie erleben: Saale-Holzland und Jena, 1. Aufl. *Jenzig*, Golmsdorf, 132 pp.

Felgentreff, B., **Hopf, J.**, **Kothe, E.**, **Landgraf, D.**, **Meisel, M.**, **Papsdorf, A.**, **Roselt, K.**, **Schmidt, J.** and **Voigt, M.** (2021) aquistore - Adaption von Technologien saisonaler geogener Wärmespeicher auf die Aquifere der Innovationsregion - Schlussbericht. *JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH │ Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Mikrobiologie │ e7 UG │ Energieberatung Bernd Felgentreff*, Jena & Leipzig.

Fleuchaus, P., **Godschalk, B.**, **Stober, I.** and **Blum, P.** (2018) Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **94**, 861–876.

Fleuchaus, P., **Schüppler, S.**, **Stemmle, R.**, **Menberg, K.** and **Blum, P.** (2021) Aquiferspeicher in Deutschland. Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie. doi: 10.1007/s00767-021-00478-y

Fritzsche, K., **Schneiderbauer, S.**, **Bubeck, P.**, **Kienberger, S.**, **Buth, M.**, **Zebisch, M.** and **Kahlenborn, W.** (2014) The Vulnerability Sourcebook: Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments.

Griebler, C., **Brielmann, H.**, **Haberer, C.M.**, **Kaschuba, S.**, **Kellermann, C.**, **Stumpp, C.**, **Hegler, F.**, **Kuntz, D.**, **Walker-Hertkorn, S.** and **Lueders, T.** (2016) Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. *Environ Earth Sci*, **75**, 1391.

Günther, D., **Wapler, J.**, **Langner, R.**, **Helmling, S.**, **Miara, M.**, **Fischer, D.**, **Zimmermann, D.**, **Wolf, T.** and **Wille-Hausmann, B.** (2020) Wärmepumpen in Bestandsgebäuden - Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt “WPsmart im Bestand.” *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*, Freiburg.

Hähnlein, S. (2013) Oberflächennahe Geothermie - Nachhaltigkeit und rechtliche Situation. Dissertation Eberhard Karls Universität Tübingen.

Hähnlein, S., **Bayer, P.**, **Ferguson, G.** and **Blum, P.** (2013) Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy*, **59**, 914–925.

Hartl, M., **Biermayr, P.**, **Schneeberger, A.** and **Schöfmann, P.** (2016) Österreichische Technologie-Roadmap für Wärmepumpen. *Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreich*, Wien.

Hesse, G., **Horlbeck, J.**, **Richling, S.**, **Schaubs, A.**, **Seher, M.**, **Kleinickel, C.**, **Kretzschmar, H.-J.** and **Schmitz, S.** (2014) Potenzialstudie Untergrundspeicher in Thüringen - Systemkomponenten zur Verbesserung der Grundlastfähigkeit Erneuerbarer Energien. *ARGE UNTERGRUNDSPEICHER THÜRINGEN*, Jena.

Hofman-Caris, C.H.M., **Harmsen, D.J.H.**, **Hartog, N.**, **Nicolaes, T.**, **Janssen, L.J.J.M.**, **Winters-Breur, E.** and **Keijzer, T.J.S.** (2017) The potential of using UV photolysis in an aquifer thermal energy storage system to remediate groundwater contaminated with chloro ethenes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **5**, 2921–2929.

Hölting, B. and **Coldewey, W.G.** (2013) Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 8. Auflage. *Spektrum Akademischer Verlag Imprint*, Heidelberg.

Kluttig, H., **Erhorn, E.** and **de Boer, J.** (2002) Energieverbräuche von Bildungsgebäuden. In: IBP-Mitteilung, Neue Forschungsergebnisse, kurz gefaßt, Nr. 29 (2002). *IBP Fraunhofer-Institut für Bauphysik*, Stuttgart, Valley.

Konstantin, P. (2017) Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung, Übertragungsnetzausbau und Kernenergieausstieg, 4., aktualisierte Auflage. *Springer Vieweg*, Berlin, 572 pp.

Lee, K.S. (2010) A Review on Concepts, Applications, and Models of Aquifer Thermal Energy Storage Systems. Energies, 3, 1320-1334. doi: 10.3390/en3061320

Lund, H., **Østergaard, P.A.**, **Nielsen, T.B.**, **Werner, S.**, **Thorsen, J.E.**, **Gudmundsson, O.**, **Arabkoohsar, A.** and **Mathiesen, B.V.** (2021) Perspectives on fourth and fifth generation district heating. *Energy*, **227**, 120520.

Lund, H., **Werner, S.**, **Wiltshire, R.**, **Svendsen, S.**, **Thorsen, J.E.**, **Hvelplund, F.** and **Mathiesen, B.V.** (2014) 4th Generation District Heating (4GDH). *Energy*, **68**, 1–11.

Mands, E., **Sanner, B.**, **Sauer, M.**, **Grundmann, E.** and **Brehm, D.** (2010) Grundwassergekoppelte Wärmepumpeanlage am Bonner Bogen. *bbr- Sonderheft 2010*.

Michalzik, D. (2013) Mitteltiefe Geothermie – was ist das? *Geothermische Energie*, **76**, 30–31.

Minol Messtechnik W. Lehmann GmbH & Co. KG (2020) Minol hat nachgerechnet: So verteuert sich das Heizen durch den CO2-Preis ab 2021. In: BundesBauBlatt online. https://www.bundesbaublatt.de/news/co2-preis-so-verteuert-sich-das-heizen-ab-2021_3507842.html. Accessed 12 Dec 2021

Ni, Z., **van Gaans, P.**, **Rijnaarts, H.** and **Grotenhuis, T.** (2018) Combination of aquifer thermal energy storage and enhanced bioremediation: Biological and chemical clogging. *Science of The Total Environment*, **613–614**, 707–713.

Ni, Z., **van Gaans, P.**, **Smit, M.**, **Rijnaarts, H.** and **Grotenhuis, T.** (2015) Biodegradation of *cis* -1,2-Dichloroethene in Simulated Underground Thermal Energy Storage Systems. *Environ. Sci. Technol.*, **49**, 13519–13527.

Ni, Z., **van Gaans, P.**, **Smit, M.**, **Rijnaarts, H.** and **Grotenhuis, T.** (2016) Combination of aquifer thermal energy storage and enhanced bioremediation: resilience of reductive dechlorination to redox changes. *Appl Microbiol Biotechnol*, **100**, 3767–3780.

Nordell, B., **Snijders, A.** and **Stiles, L.** (2015) The use of aquifers as thermal energy storage (TES) systems. In: *Advances in Thermal Energy Storage Systems* (Ed. L.F. Cabeza), *Woodhead Publishing*, 87–115.

Pehnt, M., **Nast, M.**, **Götz, C.**, **Blömer, S.**, **Barckhausen, A.**, **Schröder, D.**, **Miljes, R.**, **Pottbäcker, C.**, **Breier, H.**, **Nabe, C.**, **Lundner, S.** and **Dannemann, B.** (2017) Wärmenetzsysteme 4.0: Endbericht – Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen“. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, Berlin, Düsseldorf, Köln.

Prinz, H. and **Strauß, R.** (2011) Ingenieurgeologie. *Spektrum Akademischer Verlag*, Heidelberg.

Sandrock, M., **Maaß, C.**, **Weisleder, S.**, **Baisch, C.**, **Löschan, G.**, **Kreuter, H.**, **Reyer, D.**, **Mangold, D.**, **Riegger, M.** and **Köhler, C.** (2020) Ein neuer Weg zu effizienten Wärmenetzen mit Niedertemperaturwärmeströmen - Ein Leitfaden für Kommunen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Schmidt, T. and **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.

Schüppler, S., **Fleuchaus, P.** and **Blum, P.** (2019) Techno-economic and environmental analysis of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) in Germany. *Geotherm Energy*, **7**, 11.

smood (2021) GeoHeatStorage. In: smood-energy.de. https://www.smood-energy.de/wachstumskern/projekte/smoodgeoheat/. Accessed 7 May 2021

Somogyi, V., **Sebestyén, V.** and **Nagy, G.** (2017) Scientific achievements and regulation of shallow geothermal systems in six European countries – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **68**, 934–952.

Sterner, M. and **Stadler, I.** (eds) (2017) Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration, 2., korrigierte und ergänzte Auflage. *Springer Vieweg*, Wiesbaden, 861 pp.

STÜWA Konrad Stükerjürgen GmbH (ed) (2013) STÜWA Taschenkalender für den Brunnenbauer: Brunnen- und Borhtechnischer Anhang, 5. überarbeitete. Rietberg, 201 pp.

Swegon Germany GmbH (2021) Wassergekühlte Kaltwassererzeuger und Wärmepumpen. In: swegon.com. https://www.swegon.com/de/produkte/kuhlen--heizen/wassergekuehlte-kaltwassererzeuger-und-waermepumpen/. Accessed 10 Dec 2021

ThEGA Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH (2021) Energieatlas Thüringen. In: Energieatlas Thüringen. https://karte.energieatlas-thueringen.de. Accessed 6 Dec 2021

TLUBN Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (2021a) Wasser- und Heilquellenschutzgebiete. In: tlubn.thueringen.de. https://tlubn.thueringen.de/wasser/wsg-hqsg. Accessed 5 Dec 2021

TLUBN Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (2021b) Hochwasserrisiko- und Überschwemmungsgebiete. In: tlubn.thueringen.de. https://tlubn.thueringen.de/wasser/ueberschwemmungs-und-hochwasserrisikogebiete. Accessed 5 Dec 2021

TLUBN Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (2021c) Schutzgebiete. In: tlubn.thueringen.de. https://tlubn.thueringen.de/naturschutz/schutzgebiete. Accessed 5 Dec 2021

TLUBN Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (2021d) Geologie und Bergbau. In: tlubn.thueringen.de. https://tlubn.thueringen.de/geologie-bergbau. Accessed 5 Dec 2021

TLVwA Thüringer Landesverwaltungsamt (ed) (2013) Nutzung oberflächennaher Geothermie - Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung.

TMUEN Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (ed) (2019) Integrierte Energie- und Klimaschutzstrategie.

Tsagarakis, K.P., **Efthymiou, L.**, **Michopoulos, A.**, **Mavragani, A.**, **Anđelković, A.S.**, **Antolini, F.**, **Bacic, M.**, **Bajare, D.**, **Baralis, M.**, **Bogusz, W.**, **Burlon, S.**, **Figueira, J.**, **Genç, M.S.**, **Javed, S.**, **Jurelionis, A.**, **Koca, K.**, **Ryżyński, G.**, **Urchueguia, J.F.** and **Žlender, B.** (2020) A review of the legal framework in shallow geothermal energy in selected European countries: Need for guidelines. *Renewable Energy*, **147**, 2556–2571.

UBA Umweltbundesamt (2021a) Erneuerbare Energien in Zahlen. In: umweltbundesamt.de. https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick. Accessed 19 Apr 2021

UBA Umweltbundesamt (2021b) Vorsorgeprinzip. In: umweltbundesamt.de. https://www.umweltbundesamt.de/vorsorgeprinzip. Accessed 5 Dec 2021

VDI (2001a) VDI-Richtlinie 4640 Blatt 3 - Thermische Nutzung des Untergrundes - Unterirdische Thermische Energiespeicher.

VDI (2001b) VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 - Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.

VDI (2010) VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1 - Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte.

VDI (2021) VDI 4640 Blatt 3 - Projekt Thermische Nutzung des Untergrunds - Unterirdische thermische Energiespeicher. In: vdi.de. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4640-blatt-3-thermische-nutzung-des-untergrunds-unterirdische-thermische-energiespeicher. Accessed 29 Apr 2021

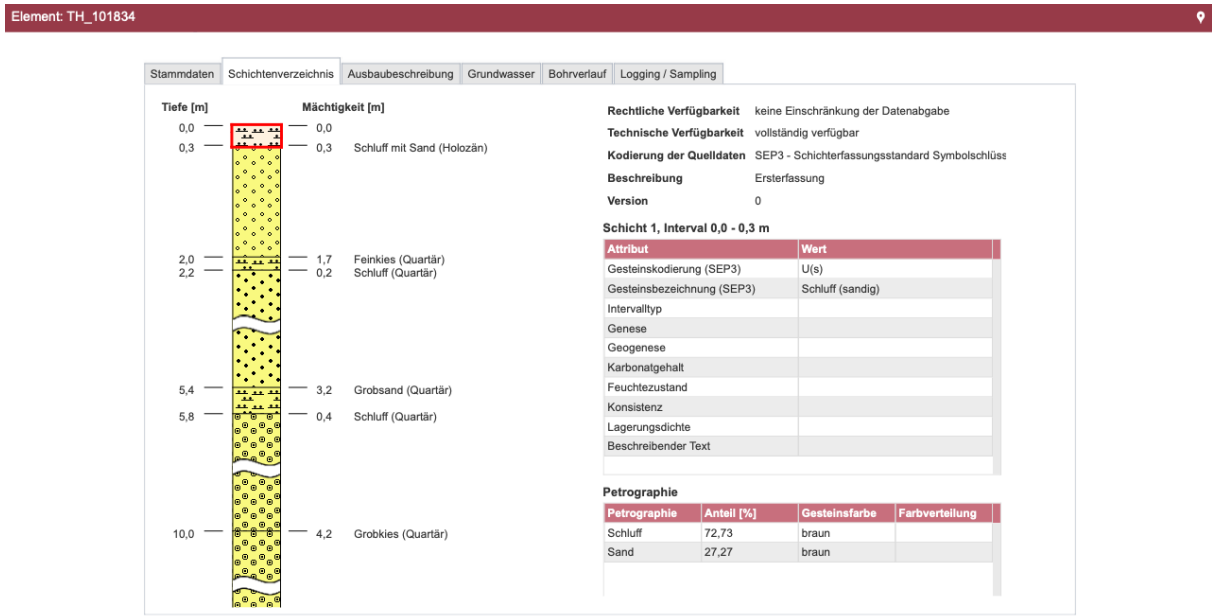
Vienken, T., **Händel, F.**, **Epting, J.**, **Dietrich, P.**, **Liedl, R.** and **Huggenberger, P.** (2016) Energiewende braucht Wärmewende – Chancen und Limitierungen der intensiven thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes in urbanen Gebieten vor dem Hintergrund der aktuellen Energiedebatte in Deutschland. *Grundwasser*, **21**, 69–73.

Zuurbier, K.G., **Hartog, N.**, **Valstar, J.**, **Post, V.E.A.** and **van Breukelen, B.M.** (2013) The impact of low-temperature seasonal aquifer thermal energy storage (SATES) systems on chlorinated solvent contaminated groundwater: Modeling of spreading and degradation. *Journal of Contaminant Hydrology*, **147**, 1–13.

Anhang A

Online-Ausdrucke der Schichtenverzeichnisse aus der Bohrpunktkarte der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Quelle: BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2021) Bohrpunktkarte Deutschland. In: boreholemap.bgr.de. https://boreholemap.bgr.de/mapapps/resources/apps/boreholemap/index.html?lang=de. Accessed 20 Dec 2021



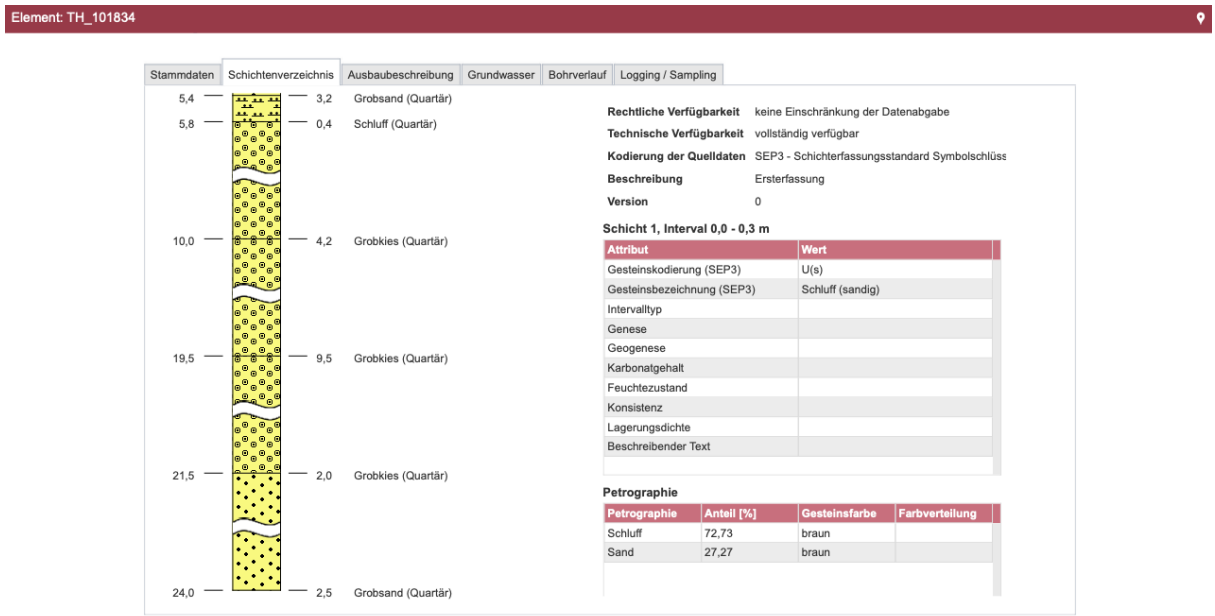


Abbildung A.1: Schichtenverzeichnis Bohrpunkt TH_101834. Oben: Beginn. Unten: Fortsetzung. (BGR, 2021).

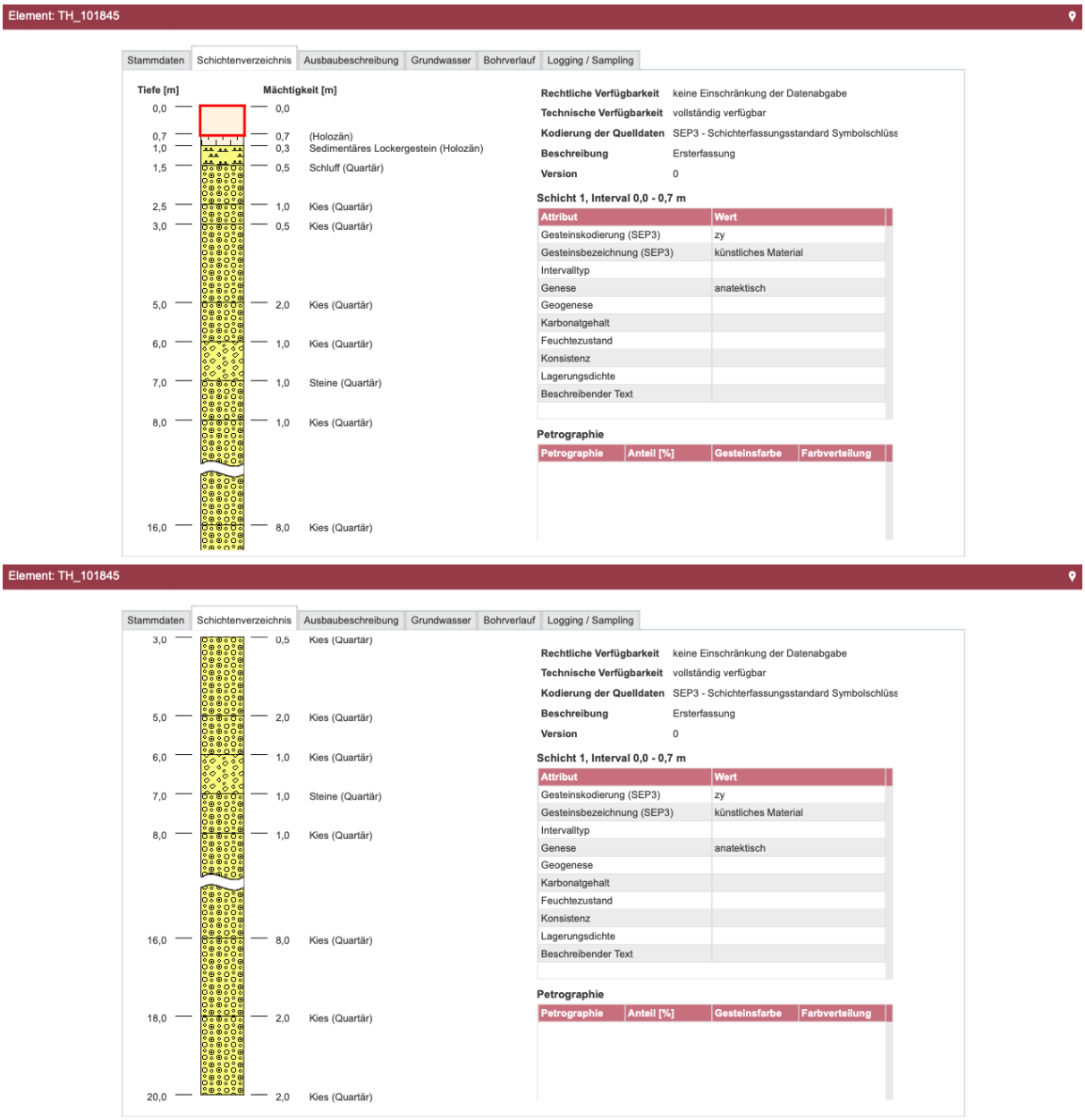


Abbildung A.2: Schichtenverzeichnis Bohrpunkt TH_101845. Oben: Beginn. Unten: Fortsetzung. (BGR, 2021).

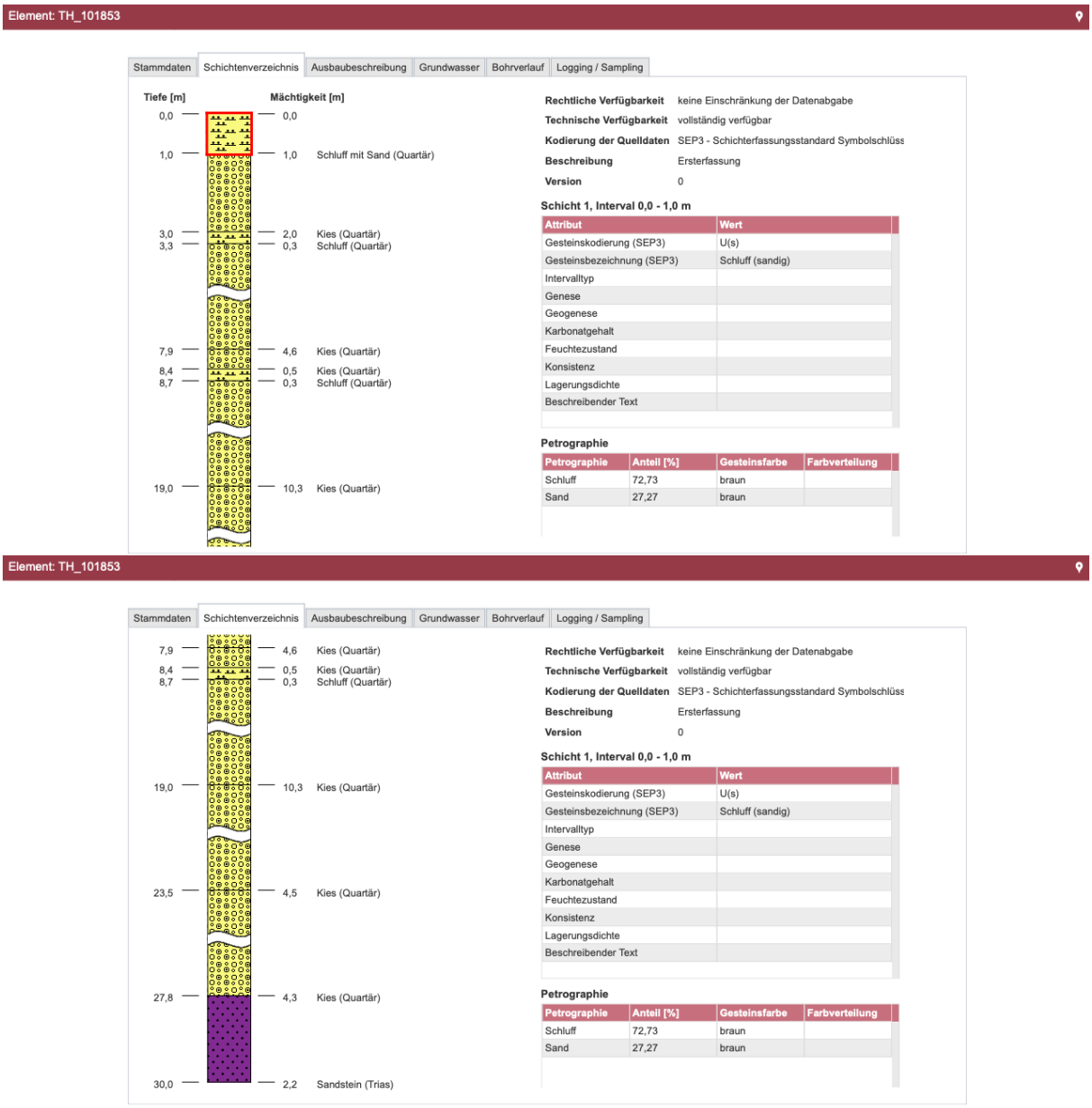


Abbildung A.3: Schichtenverzeichnis Bohrpunkt TH_101853. Oben: Beginn. Unten: Fortsetzung. (BGR, 2021).

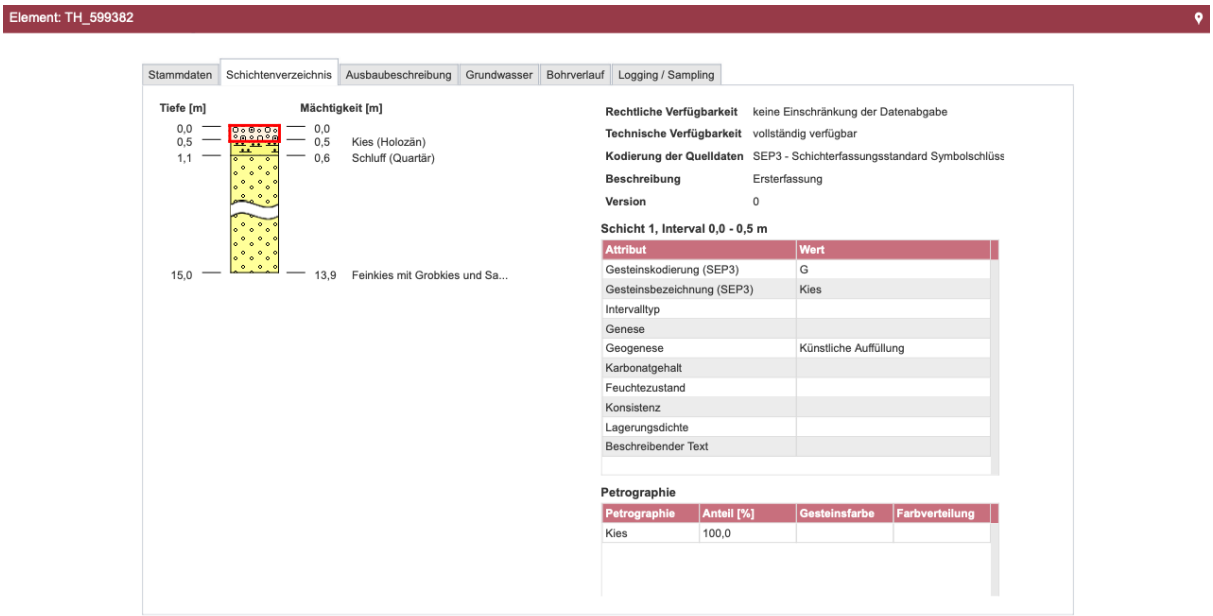


Abbildung A. 4: Schichtenverzeichnis Bohrpunkt TH_599382 (BGR, 2021).

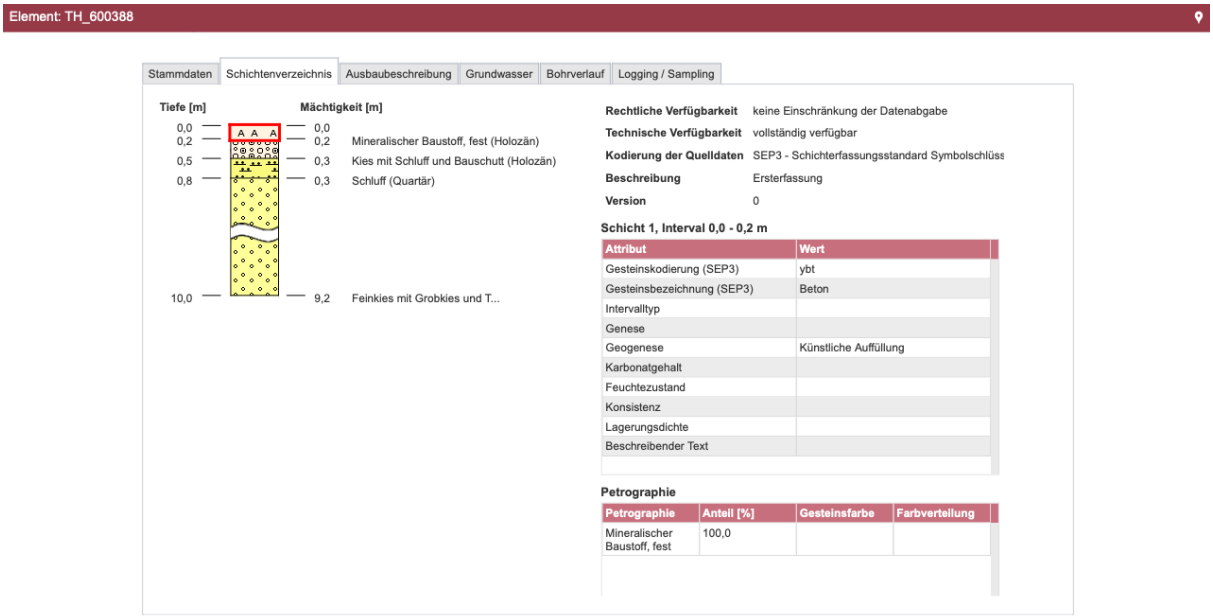


Abbildung A.5: Schichtenverzeichnis Bohrpunkt TH_600388 (BGR, 2021).

Anhang B

Anhang Teil B liegt der Arbeit in elektronischer Form auf einem Datenträger bei und beinhaltet:

- Anhang B.1: Hopf_MA_Datenquellen_Potentialkarten.xlsx
- Anhang B.2: Hopf_MA_Gestehungskostentool_ATES.xlsx

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum	Unterschrift