JENA GEOS®
Ingenieurbüro GmbH

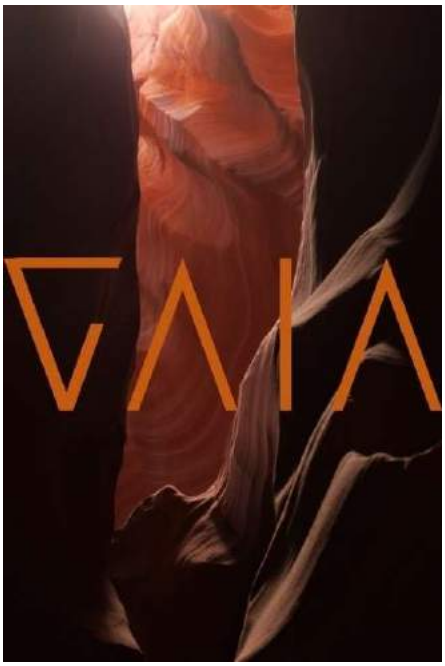
GAIA

Erschließung Geogener Strukturen zur Abspeicherung von Induzierter Anthropogener Wärme

Digitaler Planungsbaukasten für die Erschließung Geogener Strukturen zur Abspeicherung von Induzierter Anthropogener Wärme (GAIA)

Detektion, Bereitstellung und Betrieb geogener (Groß-)Wärmespeicher

Thermisch-Hydraulisch-Mechanisch gekoppelte Simulation Geogener Strukturen zur Abspeicherung von Induzierter Anthropogener Wärme



Marcus Meisel[1)], Dr. Stefan Klapperer[1)], Daniel Haase[2)], Stefan Eckardt[2)]

[1)] JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH
[2)] Dynardo (Dynamic Software and Engineering) GmbH

Projekt-Kenndaten

Das FuE-Verbundprojekt GAIA wurde durch die Thüringer Aufbaubank namens und im Auftrag des Freistaates Thüringen aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (*EFRE-OP 2014-2020*) und aus Landesmitteln gefördert. Die Zuwendung erfolgte gemäß der Richtlinie des Freistaates Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (*FTI*).

Das Projekt gehört zum Spezialisierungsfeld Nachhaltige Energie- und Ressourcenverwendung der RIS3 Thüringen und betrifft das Wettbewerbsthema „Energieversorgung durch erneuerbare Energien, Energiewandlung, Energiespeichersysteme, zukunftsfähige Netze“ mit dem Kennzeichen NER 4.1.

Verbundvorhaben 2018 VF 0010: Digitaler Planungsbaukasten für die Erschließung **G**eogener Strukturen zur **A**bspeicherung von **I**nduzierter **A**nthropogener Wärme (GAIA)

Teilvorhaben 2018 FE 9023: Detektion, Bereitstellung und Betrieb geogener (Groß-)Wärmespeicher

Teilvorhaben 2018 FE 9024: Thermisch-Hydraulisch-Mechanisch gekoppelte Simulation Geogener Strukturen zur Abspeicherung von Induzierter Anthropogener Wärme

Projektlaufzeit: 2019 bis 2021

Veröffentlichung: Dieser Projektbericht steht in digitaler Form zum Download bereit unter www.jena-geos.de/fachbeitraege/

Kurzfassung

Die Abminderung der Auswirkungen des Klimawandels erfordert eine deutliche Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen. Eine erhöhte Energieeffizienz, die Verbreitung der Nutzung erneuerbarer Energien sowie die Umstellung der Wärmenetze auf unvermeidbare Abwärme sind hierfür maßgebliche Voraussetzungen. Die saisonale Untergrundspeicherung anthropogener Abwärme kann hierfür einen vielversprechenden Beitrag leisten und erhöht zudem die Zuverlässigkeit in der Energieerzeugung. Aufgrund limitierender Faktoren (Gesteinseigenschaften, Umweltrecht etc.) ist eine umfassende Kenntnis zu den Rahmenbedingungen für geplante Speichervorhaben von essentieller Bedeutung. Die vorliegende Studie soll daher Ansätze für ein Systemverständnis zum erfolgreichen Betrieb eines Aquiferspeichers in Thüringen und darüber hinaus ermöglichen.

Aus petro- und thermophysikalischen Untersuchungsergebnissen an Kernmaterial von drei Tiefbohrungen und Literaturangaben lässt sich schlussfolgern, dass abseits bekannter Kohlenwasserstoff-Lagerstätten in den Sandsteinen des Mittleren Buntsandsteins voraussichtlich nur mit mäßigen bzw. nicht flächendeckend guten Speichereigenschaften zu rechnen ist. Die untertägige Verbreitung von Sedimentgesteinen des Unteren Buntsandsteins, die sich für den Betrieb eines Wärmespeichers potentiell eignen könnten, beschränkt sich auf den südthüringischen Raum. Quartäre Lockergesteinshorizonte mit geeigneten sedimentologischen bzw. hydraulischen/petrophysikalischen Eigenschaften und hinreichenden Mächtigkeiten bis etwa 100 m wurden nur lokal in der Goldenen Aue, der Unstrut-Helme-Aue und der Werra-Aue identifiziert.

Die Gestehungskosten für die Herstellung und den Betrieb eines Aquiferspeichers werden im Wesentlichen von geologischen und geotechnischen Faktoren bestimmt. Zu diesen zählen u. a. die Bohrstrecke, die Produktionsrate, die Aquifermächtigkeit oder die Speichertemperatur. Weitere wesentliche Eingangsparameter ergeben sich aus den Investitions- und den Betriebskosten. Im Ergebnis der Sensitivitätsanalyse konnten für die Gestehungskosten, Gesteinsversagen, Speichereffektivität gute Vorhersagewahrscheinlichkeiten ermittelt werden. Es wurde festgestellt, dass die Gestehungskosten unter Berücksichtigung der o. g. Eingangsparameter im angesetzten Simulationszeitraum von 30 Jahren entscheidend von der Speichertemperatur und der Förderrate abhängen. Die Speichereffektivität wird durch höhere Bohrteufen bzw. Aquifertiefen begünstigt. Das Zusammenspiel dieser drei Parameter beeinflusst sowohl die Gestehungskosten als auch die Speichereffektivität entscheidend. Das Gesteinsversagen und damit ein sicherer Betrieb des Aquifers hängt grundlegend von der Permeabilität des Speichergesteins und der Förderrate ab. Eine Optimierung insbesondere dieser Variablen kann maßgeblich zum Erfolg eines Aquiferspeicherprojektes beitragen.

Abstract

Mitigating the effects of climate change demands a significant reduction of greenhouse gas emissions. Increased energy efficiency, the spread of the use of renewable energies and the conversion of heating networks to unavoidable waste heat are key conditions for this. Seasonal underground storage of anthropogenic waste heat represents a promising approach for this objective and also increases the reliability of energy generation. Providing the knowledge of interactions between geological, geotechnical and legislative boundary conditions the present study contributes basic information for the successful operation of an aquifer thermal energy storage (ATES) in the region of Thuringia, and beyond.

Results of petro- and thermophysical laboratory investigations and further references show, that aside known hydrocarbon reservoirs the sandstones of the Middle Bunter possess poor or merely regionally appropriate storage properties. Lower Bunter sandstones suitable for thermal storage are restricted to southern Thuringia. Quaternary unconsolidated rock of appropriate hydraulic properties and adequate thickness up to circa 100 m are located in the Goldene Aue and the water meadows of the rivers Unstrut-Helme and Werra.

The costs for setting up an ATES are basically determined by geological and geotechnical factors as reservoir/drilling depth, production rate, aquifer thickness and storage temperature. Additional basic parameters result from investment costs and operating costs. As a result of the sensitivity analysis a good probability of prediction could be achieved for production costs, rock failure and storage efficiency. For a simulation period of 30 years and considering the above-mentioned factors the production costs mainly depend on *storage temperature* and *production rate*. A larger *drilling depth* facilitates the storage efficiency. The interplay of these three factors effects the production costs as well as the storage efficiency. Rock failure and therefore a reliable underground storage are essentially affected by the permeability of the reservoir rock and the production rate. The optimization of these variables can significantly contribute to the success of an ATES project.

Inhalt

Projekt-Kenndaten 2
Kurzfassung 3
Abstract 4
Inhalt 5
1 Einleitung 15
1.1 Energiekonzepte: Ziele, Erfolge u. Herausforderungen der Energiewende 15
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung von GAIA 15
2 Thermische Energiespeicherung 17
2.1 Übersicht Wärmespeichersysteme 18
2.1.1 Grubenspeicher (MTES) 18
2.1.2 Erdwärmesondenspeicher (BTES) 19
2.1.3 Behälterspeicher (TTES) 20
2.1.4 Erdbeckenspeicher (PTES) 20
2.1.5 Aquiferspeicher (ATES) 21
2.1.6 Vergleich von sensiblen Wärmespeichersystemen 22
2.2 Thermische Aquiferspeicher (ATES)–Projekte 24
2.2.1 Internationale ATES-Projekte 24
2.2.2 ATES-Projekte in Deutschland 27
2.3 Physikalische Eigenschaften eines Aquiferspeichers 29
2.3.1 Thermophysikalische Eigenschaften 29
2.3.2 Hydraulische Eigenschaften 32
2.4 Abwärmepotential und Wärmespeicher in Thüringen 33
2.4.1 Industrielle Überschusswärme 33
2.4.2 Bestehende Wärmespeicher-Anlagentechnik 35
3 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen 36
3.1 Politische Rahmenbedingungen 36
3.2 Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen 37
3.2.1 Wasserschutz- und Überschwemmungsgebiete 38
3.2.2 Natur- und Landschaftsschutz 39
3.2.3 Immissionsschutz 42
3.2.4 Bergrecht 42

3.2.5 Bauplanung ... 43
4 Geologischer Überblick - Stockwerkgliederung in Thüringen ... 44
4.1 Grundgebirgsstockwerk ... 44
4.2 Übergangsstockwerk ... 44
4.3 Tafeldeckgebirgsstockwerk ... 45
4.4 Lockergesteinsstockwerk ... 46
5 Methodische Grundlagen ... 47
5.1 Bohrkerne und Probenahme ... 47
5.2 Laboruntersuchungen und Probenpräparation ... 49
5.3 Geoinformationssystem ... 51
5.4 Thermisch-Hydraulisch-Mechanische (T-H-M) Modellierungen ... 52
5.4.1 Konzept der T-H-M-Kopplung ... 52
5.4.2 Thermisches Teilmodell ... 54
5.4.3 Hydraulisches Teilmodell ... 56
5.4.4 Mechanisches Teilmodell ... 58
5.5 Sensitivitätsanalyse ... 61
6 Laborergebnisse (Bohrkernuntersuchungen) ... 62
6.1 Gesteinsdichte, Porosität und Permeabilität ... 62
6.2 Wärmeleitfähigkeit und -kapazität ... 64
6.3 Wärmeausdehnungskoeffizient ... 65
6.4 Bewertung der hydraulischen und thermophysikalischen Eigenschaften ... 66
7 Ergebnisse der T-H-M-Modellierungen ... 68
7.1 Implementation der T-H-M-Kopplung ... 68
7.1.1 Thermische Teilmodell ... 68
7.1.2 Poroelastizität ... 70
7.1.3 Ansys CPT Elemente ... 71
7.2 Bewertung der thermischen Funktionalität ... 73
7.3 Verifizierung und Kalibrierung des T-H-M-Modells ... 75
7.4 Nachrechnung Laborversuche ... 75
7.4.1 Thermische Ausdehnung ... 76
7.4.2 Wärmeleitfähigkeit ... 77
7.5 T-H-M Kopplung ... 78

7.5.1 Simulationsmodell ... 78
7.5.2 Ein-/Ausspeisung und Strömung im Gestein ... 81
7.5.3 Zyklische Belastungen in Warm-/Kaltzeiten ... 81
7.5.4 Bestimmung und Visualisierung der Ergebnisse ... 82
7.6 Einfluss der Temperatur und der Salinität auf Materialparameter ... 91
7.7 Simulation zweier Speichertypen und Evaluierung der Ergebnisse ... 92
7.7.1 Ergebnisse der Referenzmodelle ... 92
7.7.2 Parametrische Modellbeschreibung ... 95
7.7.3 Sensitivitätsstudie ... 96
7.7.3.1 Metamodelle des T-H-M-Simulators ... 97
7.7.3.2 Anschluss der Metamodelle an das Gestehungskostentool ... 101
8 Standortidentifizierung und -bewertungen ... 103
8.1 Geologische Speicherkomplexe ... 103
8.1.1 Oberrotliegend ... 104
8.1.2 Buntsandstein ... 105
8.1.2.1 Unterer Buntsandstein ... 105
8.1.2.2 Mittlerer Buntsandstein ... 108
8.1.3 Quartär ... 113
8.2 Raumwiderstände ausgewählter Standorte ... 115
8.3 Synopsis von Geologie und Abwärme ... 116
8.4 Entscheidungsmatrix ... 117
9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ... 118
10 Schlussfolgerungen ... 121
11 Literaturverzeichnis ... 123

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Konzeptionelles Modell des MTES-Systems von Prosper-Haniel (HAHN et al. 2018) 19

Abbildung 2 Modellskizze eines Erdwärmesondenspeichers (BTES) (SCHMIDT, M. & MANGOLD 2009) 19

Abbildung 3 Modellskizze eines Behälterspeichers (TTES) (SCHMIDT, M. & MANGOLD 2009) 20

Abbildung 4 Modellskizze eines Erdbeckenspeichers (PTES) (SCHMIDT, M. & MANGOLD 2009) 21

Abbildung 5 Schematische Darstellung der Funktionsweise eines ATES-Systems im Lade- (Sommer, links) und Entladebetrieb (Winter, rechts) (SCHÜPPLER et al. 2019) 22

Abbildung 6 Allgemeiner Vergleich ausgewählter Energiespeichersysteme (FLEUCHAUS et al. 2018) 23

Abbildung 7 Investitionskosten und Speichervolumen ausgewählter realisierter (z. T. ehemaliger) und geplanter Projekte zur Speicherung thermischer Energie in Deutschland (verändert nach (SCHMIDT, M. & MANGOLD 2009) 23

Abbildung 8 Weltweite Anzahl an ATES-Systemen in 2020 (FLEUCHAUS 2020) (GB: Großbritannien, VR: Volksrepublik, DE: Deutschland) 24

Abbildung 9 Niederländische ATES-Projekte nach Verwendungszweck (nach SNIJDERS 2000) 25

Abbildung 10 Realisierter und erwarteter Ausbau von ATES-Systemen in den Niederlanden (modifiziert nach GODSCHALK, M. S. & BAKEMA 2009 und FLEUCHAUS et al. 2018) 26

Abbildung 11 Übersicht aktueller, stillgelegter und geplanter ATES-Projekte in Deutschland (FLEUCHAUS et al. 2021) 28

Abbildung 12 Betriebstemperatur und Tiefe ausgewählter deutscher und internationaler ATES-Systeme (Quellen: 1: ANDERSSON 2009; 2: PAKSOY et al. 2009; 3: BINE INFORMATIONSDIENST 2013; 4: SEIBT & KABUS 2006; 5: DRIJVER et al. 2012; 6: VAN LOON & VAN DER HEIDE 1992; 7: RADMANN & HANSEN 2019; 8: HOLSTENKAMP et al. 2017) 28

Abbildung 13 Terrestrische Wärmestromdichte in Thüringen (nach Daten des *Geothermie-Atlas der Deutschen Demokratischen Republik* (1984), TLUBN 2020) 30

Abbildung 14 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Porosität in Sand und Sandsteinen mit unterschiedlichen Porenfluiden (SCHÖN 2011) 31

Abbildung 15 Verteilung der bekannten bzw. verfügbaren Abwärmequellen in Thüringen (Quelle: Abwärmekataster Thüringen, Stand 2016) 35

Abbildung 16 Vereinfachtes geologisches Blockbild des Tafeldecksgebirges im Thüringer Becken (aus ROTHE 2005, nach WAGENBRETH & STEINER 1990) 46

Abbildung 17 Lokationen (rot) und Detailinformationen der beprobten Tiefbohrungen 47

Abbildung 18 Entnahmepunkte von Kernproben am Beispiel der Bohrung Erfurt 1/2013, Box 383 48

Abbildung 19 Probenkörper für Porositäts-/ Permeabilitätsmessungen aus den Bohrungen Erfurt 1/2013 und Rodenberg 1/1976 (Quelle: Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns, Heiligenstadt) 50

Abbildung 20 Kalottiertes Kernstück für Wärmeleitfähigkeitsmessung (*rechts*) und Entnahmestelle des zylindrischen Probenköpers für Wärmekapazitätsmessung (*links*, rote Markierung) (Quelle: Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns, Heiligenstadt) 50

Abbildung 21 Zylindrischer Probenkörper für die Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten (Quelle: Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns, Heiligenstadt) 51

Abbildung 22: T-H-M Kopplung zur Simulation eines Wärmespeichers. 53

Abbildung 23 Rohdichte der Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins (Fm.: Formation) im Verhältnis zur Entnahmetiefe 62

Abbildung 24 Gegenüberstellung der ermittelten effektiven Porosität und der Wasserpermeabilität bei einem Umlagerungsdruck von 94,2 bar (entspricht etwa 400 m u. GOK) 63

Abbildung 25 Wasserpermeabilität der Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins bei unterschiedlichen Umlagerungsdrücken (P_c = 10 bar ≙ lithostatischem Druck in ca. 40 m Tiefe, P_c = 235 bar ≙ lithostatischem Druck in ca. 1000 m Tiefe. mD: Millidarcy; m MD: Bohrmeter (engl.: meter measured depth) 64

Abbildung 26 Wärmeleitfähigkeit mit Standardabweichung für die Sandsteine des Buntsandsteins. m MD: Bohrmeter (engl.: meter measured depth); Fm: Formation (geol.) 65

Abbildung 27 Wärmekapazität der Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins für unterschiedliche Temperaturniveaus (links) und nach Stratigraphie bei 60 °C (rechts) 65

Abbildung 28 Thermische Ausdehnung der untersuchten Sandsteinproben des Buntsandsteins für trockene und wassergesättigte Proben 66

Abbildung 29: Numerisches Modell zur Bestimmung und Kalibrierung von Materialkennwerten....76

Abbildung 30 Temperaturkurve zur Aufwärmung und Abkühlung der Probe 77

Abbildung 31 Temperaturverlauf bei der Nachrechnung der Wärmeleitfähigkeit an der Probe 77

Abbildung 32 Simulierte Halbräume im Boden mit einem Aquifer (links) und zwei Aquiferen (rechts)....78

Abbildung 33 Randbedingungen....79

Abbildung 34 Verteilung des Porenwasserdrucks eines ungestörten Systems [Pa]....79

Abbildung 35 Vernetzung der Halbräume und Auswahl der Elemente der Brunnen 80

Abbildung 36 Verteilung des Porenwasserdrucks [Pa] mit Längsschnitt durch den Aquifer (rechts) nach 180 Tagen 82

Abbildung 37 Pfadauswertung des Porenwasserdrucks [MPa] zwischen den Brunnen 82

Abbildung 38 Verteilung der Änderung des Porenwasserdrucks [Pa] mit Längsschnitt durch den Aquifer (rechts); Über-/Unterschreitung der Skala mit Magenta/Grau.....83

Abbildung 39 Elementauswertung zur Änderung des Porenwasserdrucks [MPa] am Brunnen (A) und in Randbereichen (B & C) 84

Abbildung 40 Strömung des Fluids im Aquifer nach 180 d [m/s]; Über-/Unterschreitung der Skala mit Magenta/Grau.....85

Abbildung 41 Temperaturausbreitung nach 180 d (oben) und 360 d (unten) [K]; Unterschreitung der Skala mit Grau 85

Abbildung 42 Temperaturverlauf an den Brunnen [°C].....86

Abbildung 43 ein- bzw. ausgelagerte Wärmemengen [GWh/Zyklus].....87

Abbildung 44 Effektive Hauptnormalspannungen (oben) und Hauptschubspannungen (unten) [Pa] nach 180 d 88

Abbildung 45 Sicherheit gegen Schubversagen nach Mohr-Coulomb [-].....90

Abbildung 46: Effektive Hauptspannungen [Pa] nach 180 d 91

Abbildung 47: Spez. Wärmekapazität des Gesteins [J / (kg K)] in Abhängigkeit von Temperatur.....91

Abbildung 48 Spez. Wärmekapazität [J / (kg K)], Viskosität [mPa s] und Dichte [kg/m³] des Grundwassers in Abhängigkeit von Temperatur und Salinität.....92

Abbildung 49 Referenzdesigns - Temperaturausbreitung [°C] 93

Abbildung 50 Referenzdesigns – Temperaturverlauf an den Brunnen [°C].....93

Abbildung 51: Referenzdesigns –Annäherung der Temperaturfronten [m].....94

Abbildung 52 Referenzdesigns – Wärmemengen je Warm- und Kaltzeiten [GWh/Zyklus] 94

Abbildung 53 Referenzdesigns - Wärmemengenverluste [GWh/a] und Speichereffizienz [%].....94

Abbildung 54 Einschichtmodell - Temperatur am heißen Brunnen (nach 30 a) 97

Abbildung 55 Einschichtmodell - Temperatur am kalten Brunnen (nach 30 a, Halbjahr).....97

Abbildung 56 Einschichtmodell - Abstand der Temperaturfronten (nach 30 a).....98

Abbildung 57 Einschichtmodell - Porendruckabsenkung im Brunnen (nach 30 a).....98

Abbildung 58 Einschichtmodell – MOP Druckabsenkung über Verteufung und Aquifermächtigkeit, unzulässige Designs in Magenta.....99

Abbildung 59: Einschichtmodell – Speichereffizienz (nach 30 a).....99

Abbildung 60 Einschichtmodell - Eingespeiste Wärmemenge Warmzeiten (Summe über 30 a).....100

Abbildung 61 Einschichtmodell – Entzogene Wärmemenge Kaltzeiten (Summe über 30 a).....100

Abbildung 62 Einschichtmodell – Wärmeverlust (Summe über 30 a).....100

Abbildung 63 Einschichtmodell – Versagenswahrscheinlichkeit (nach 30 a) 101

Abbildung 64 Einschichtmodell – Versagenswahrscheinlichkeit ohne Berücksichtigung der Kohäsion (nach 30 a) 101

Abbildung 65: MoP-Solver in Excel 102

Abbildung 66 Lithologische Ausprägung des Unteren Buntsandsteins in Thüringen mit Mächtigkeitsangaben. Erf: Erfurt; Formationen: C–Calvörde, B–Bernburg (nach PUFF & RADZINSKI 1976) 106

Abbildung 67 Bohrungsprofile des Unteren Buntsandsteins. su_1: Übergangsfolge (Zechstein), su_2: Calvörde-Folge, su_3: Bernburg-Folge (HOPPE & SEIDEL, G. 1974) 107

Abbildung 68 Lithologische Kartendarstellung des Mittleren Buntsandsteins in Thüringen mit Mächtigkeitsangaben. Erf: Erfurt; Formationen: H–Hardegsen, S–Solling, V–Volpriehausen, D–Detfurth (nach PUFF & RADZINSKI 1976) 110

Abbildung 69 Bohrprofile des Mittleren Buntsandsteins von der Eichsfeldschwelle (Bohrung Scharfenberg) bis zur Thüringischen Senke (LANGE 1962) 111

Abbildung 70 Mächtigkeitsverteilung von quartären Grundwasserleitern bei Artern u. Nordhausen 114

Abbildung 71 Mächtigkeitsverteilung von quartären Grundwasserleitern in der Werra-Aue 114

Abbildung 72 Entscheidungsbaum zum Standortauswahlverfahren eines Aquiferspeichers 117

Abbildung 73 Gegenüberstellung der Eingabeparameter (hellgrau) und der Ergebnisgrößen (dunkelgrau) für 100 Designvarianten 119

Abbildung 74 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse: Abhängigkeiten der Ausgabegrößen *Gestehungskosten (a)*, *Gesteinsversagen* (b) und *Speichereffektivität* (c) von geo- und betriebstechnischen Parametern. 120

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Eigenschaften der niederländischen ATES-Projekte (nach SNIJDERS 2000) 25

Tabelle 2 Wertebereiche der Wärmeleitfähigkeit λ in verschiedenen Gesteinstypen. 31

Tabelle 3 Geologische und hydrologische Anforderungen an oberflächennahe (Lockergesteins-) Aquifere (CABEZA 2015) 33

Tabelle 4 Auswahl an thüringischen Unternehmen mit bedeutenden Abwärmemengen (Quelle: Abwärmekataster, Stand 2016) 34

Tabelle 5 Zusammenfassung der derzeit ausschließenden und einschränkenden Einflussfaktoren für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zum Zwecke der Untergrundspeicherung (HESSE et al. 2014) 38

Tabelle 6 Auszüge aus dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) (HESSE et al. 2014) 39

Tabelle 7 Auszüge aus dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) und deren Bedeutung für die Untergrundspeicherung (HESSE et al. 2014) 40

Tabelle 8 Auszüge aus dem Thüringer Naturschutzgesetztes (ThürNatG) (HESSE et al. 2014) 41

Tabelle 9 Auszüge aus dem Baugesetzbuch (BauGB) 43

Tabelle 10 Laboranalytisch untersuchte Kernsektionen 48

Tabelle 11 Petro- u. thermophysikalische Gesteinseigenschaften der untersuchten Sandsteine des Buntsandsteins aus Thüringen gegenüber Literaturangaben zu Sandsteinen. Werte in Klammern: hochporöser Sandstein der Detfurth-Formation. 67

Tabelle 12 In Laborversuchen ermittelte Materialkennwerte für Bundsandstein (LOUIS 2020) 76

Tabelle 13 Materiaparameter für die Nachrechnung der FEFLOW Simulation 80

Tabelle 14 Parameterräume für die Sensitivitäts-Analyse 95

Tabelle 15 Ergebnisgrößen der Sensitivitätsstudie 96

Tabelle 16 Stratigraphie der Speicher- und Barrieregesteine des Untergrundes in Thüringen, (modifiziert nach HESSE et al. 2014 und HUCKRIEDE & ZANDER 2011) 103

Tabelle 17 Vorauswahl tektonischer Antiklinalstrukturen im Oberrotliegenden von Thüringen als potentiell geeignete Untergrundspeicher-Struktur (SEIDEL, G. 2004) 104

Tabelle 18 Stratigraphische Gliederung des Mittleren und Unteren Buntsandsteins (BS) in Thüringen (nach SEIDEL, G. 1995). Fett gedruckt: Grobklastische bzw. Sandsteinhorizonte, die voraussichtlich für eine Wärmespeicherung von Interesse sind. 105

Tabelle 19 Vorauswahl Thüringer Antiklinalstrukturen des Mittleren Buntsandsteins als potentiell geeignete Untergrundspeicher-Struktur (aus SEIDEL, G. 2014) 108

Tabelle 20 Übersicht zu den vorhandenen Raumwiderständen potentieller Speicherstandorte (HESSE et al. 2014) 115

Abkürzungsverzeichnis

ATES	Aquiferspeicher, engl.: *aquifer thermal energy storage*
BauGB	Baugesetzbuch
BBergG	Bundesberggesetz
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BTES	Erdwärmesondenspeicher, engl.: *borehole thermal energy storage*
CTES	Hohlraumspeicher, engl.: *caverne thermal energy storage*
FE-Modellierungen	*Finite Elemente Modellierungen*
Fm.	Formation
GIS	Geoinformationssystem, Geoinformationssystem
GOK	Geländeoberkante
HT-System	Hochtemperatur-System
KW	Kohlenwasserstoff
LWG	Landeswassergesetz
m MD	Meter Bohrteufe, engl.: *meter measured depth*
mD	Millidarcy
MTES	Grubenspeicher, engl.: *mine thermal energy storage*
NL	Niederlande
NT-System	Niedrigtemperatur-System
P_c	Umschließungs-/Überlagerungsdruck (engl.: *confining pressure*)
PTES	Erdbeckenspeicher, engl.: *pit thermal energy storage*
TES	thermische Energiespeicher, engl.: *thermal energy storage*
ThEGA	Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur
TLUBN	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
TTES	Behälterspeicher, engl.: *tank thermal energy storage*
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Geologische Übersichtskarte
Anlage 2.1	Rotliegend: Isobathen, Speicherstrukturen
Anlage 2.2	Unterer Buntsandstein: Isobathen
Anlage 2.3	Mittlerer Buntsandstein: Isobathen, Speicherstrukturen
Anlage 2.4	Quartär: Isopachen (Struktur Artern)
Anlage 2.5	Quartär: Isopachen (Struktur Werra-Aue)
Anlage 3.1	Synopsis Rotliegend: Isobathen, Abwärmequellen, Speicherstrukturen
Anlage 3.2	Synopsis Unterer Buntsandstein: Tiefentemperaturen, Abwärmequellen, Isobathen
Anlage 3.3	Synopsis Mittlerer Buntsandstein: Isobathen, Abwärmequellen, Speicherstrukturen
Anlage 3.4	Synopsis Quartär (Artern): Isopachen, Abwärmequellen
Anlage 3.5	Synopsis Quartär (Werra-Aue): Isopachen, Abwärmequellen
Anlage 4.1	Schutzgebiete
Anlage 4.2	Wasserschutzgebiete

1 Einleitung

1.1 Energiekonzepte: Ziele, Erfolge u. Herausforderungen der Energiewende

Die zunehmende Bedeutung des Klimawandels im aktuellen gesellschaftlichen Gespräch macht deutlich, dass eine Antwort auf alarmierende wissenschaftliche Beobachtungen von der Politik und Wirtschaft gefordert wird. Um potentiell gefährliche und zerstörende Konsequenzen des Klimawandels zu vermindern und zu verhindern, führte die Bundesregierung das *Klimaschutz-programm 2030* ein. Infolge der Novellierung des *Erneuerbare Energien Gesetztes EEG* zum 01.01.2021 und der Änderung des Klimaschutzgesetzes zum 12.05.2021 sind Klimaschutzanstrengungen verbindlich festgehalten und bisherige Ziele zum Teil verschärft worden. So wird im Vergleich zum CO_2-Ausstoß im Jahr 1990 eine Emissionsminderung von mindestens 65 Prozent (bisher 55 Prozent) bis 2030, ein neues Zwischenziel von 88 Prozent Minderung bis 2040 und schließlich die Treibhaus-gasneutralität bis 2045 (bisher 2050) angestrebt.
Bis 2020 konnten die Treibhausgasemissionen mit Hilfe von Erneuerbaren Energien um 41 Prozent im Vergleich zu 1990 reduziert werden, wobei der Energiesektor den größten Emissionsrückgang zu verzeichnen hat. Die Emissionsvermeidung erfolgt für alle Sektoren hauptsächlich durch die Nutzung von **Windenergie** (89 Millionen CO_2-Äquivalente, davon 71,5 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente "an Land" und 17,6 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente "auf See"). Danach folgen **Biomasse** (65,8 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente), **Photovoltaik** (29,2 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente, **Wasserkraft** (15,1 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente), **Geothermie** mit 2,2 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente sowie **Solarthermie** mit 2,1 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente (Quelle: www.bundesregierung.de, Bundesumweltamt). Zum Erreichen der angestrebten Treibhausgasreduktion bis 2045 sind weitere energetische Einsparungen, eine erhöhte Energieeffizienz, die Verbreitung der Nutzung Erneuerbarer Energien sowie die Umstellung der Wärmenetze auf unvermeidbare Abwärme maßgebliche Voraussetzungen.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung von GAIA

Saisonale geogene Speicherung thermischer Energie kann einen wichtigen Beitrag zur Abminderung von Treibhausgasemissionen und damit möglicher Folgen des Klimawandels leisten. Ungenutzte Überschusswärme aus der Industrie und aus der Tages- und Jahreszeit abhängiger Überproduktion Erneuerbarer Energien, können mit (saisonalen) thermischen Energiespeichern (TES) für eine spätere Nutzung bereitgestellt werden. TES können im selben System auch die Kühlung von gekoppelten Strukturen begünstigen. Im vorliegenden Bericht wird erläutert, welche Möglichkeiten die geogene Speicherung thermischer Energie anbietet und wie Thüringen sich zu deren Umsetzung eignet. Dies ist der Fokus des Forschungsprojektes GAIA (Digitaler Planungsbaukasten für die Erschließung Geogener Strukturen zur Abspeicherung von Induzierter Anthropogener Wärme) mit den Teilthemen *„Detektion, Bereitstellung und Betrieb geogener (Groß-)Wärmespeicher“* (außerhalb von Siedlungsflächen) der JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH und *„Thermisch-Hydraulisch-Mechanisch gekoppelte Simulation Geogener Strukturen zur Abspeicherung von Induzierter Anthropogener Wärme“* der Dynardo GmbH.

Im ersten Schritt einer möglichen Nutzung eines Aquiferspeichers steht die Lokalisierung von geeigneten **geologischen Formationen und Strukturelementen**. Die Eignung wiederum ergibt sich in erster Linie aus den **Lagerungsverhältnissen** und den **hydraulischen sowie thermophysikalischen**

Eigenschaften der Speichergesteine. Zum Wissen um die Existenz dieser geologischen Strukturen gehören zwingend Kenntnisse um deren Nutzbarkeit bzw. möglicher bestehender **Raumwiderstände**. Da die thermische Aquiferspeicherung in der vorliegenden Studie außerhalb von Siedlungsflächen vorgesehen ist, muss anschließend die **geographische Lage** der Speicherstrukturen und gegebenenfalls vorhandene **Infrastrukturen** festgestellt und bewertet werden. Von grundlegendem Interesse sind zudem die räumlichen Distanzen zwischen der Abwärmequelle, dem Ort der Einspeicherung und schließlich der Lage von potentiellen Verbrauchern. Diese Systemkomponenten bestimmen maßgeblich den Umfang der benötigten **Fernwärmleitungen**.

Die Visualisierung von Bau- und Planungsprojekten jeglicher Art hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Dies betrifft sowohl den klassischen Hochbau (Gebäude) als auch den Tiefbau (Ingenieurbauwerke, Infrastrukturen) und kann zunehmend auch auf „Bau- und Planungsvorhaben“ im weiteren Sinne übertragen werden. Insbesondere in den Geowissenschaften korreliert dabei häufig die Simulation der Leistungsfähigkeit (z. B. von untertägigen geothermischen Anlagenteilen) mit einer Visualisierung in 2D oder 3D und wird daher immer häufiger im Zuge von Genehmigungsverfahren von den Behörden eingefordert.

Die Entwicklung von Methoden zur numerischen Simulation von Wärmespeichern zielte auf die Abbildung der im Speicher ablaufenden thermisch-hydraulisch-mechanischen gekoppelten Prozesse. Dabei wird einerseits die großflächige Wärmeausbreitung in Locker- und Festgestein untersucht. Andererseits bildet die Simulation auch die damit verbundenen Auswirkungen der Temperaturänderung, wie z.B. Änderungen des Spannungs- und Porendruckfeldes oder Rissbildung, auf umgebende Gesteinsschichten ab, um mögliche Risiken beim Wärmeeintrag bzw. Wärmeaustrag zu erkennen und zu vermeiden.

Ein wesentliches Ziel des aktuellen Verbundvorhabens ist es daher, zu evaluieren inwieweit potentielle Speichergesteine bestimmter stratigraphischer Horizonte als thermischer Aquiferspeicher geeignet sind. Zur Beantwortung dieser Frage werden neben der Kartierung potentieller Bereiche in einem Geoinformationssystem häufig numerische Modellrechnungen mittels Finite-Element-Modellierungen von Strömungs- und Wärmetransport durchgeführt. Im vorliegenden Forschungsprojekt soll die von der DYNARDO (Dynamic Software and Engineering) GmbH entwickelte Software optiSLang zum Einsatz kommen und in Kombination mit einem Gestehungskostentool und auf der Grundlage von regionalspezifischen Materialkennwerten die Haupteinflussfaktoren auf den Betrieb eines Aquiferspeichers (in Thüringen) eruieren.

2 Thermische Energiespeicherung

Thermische Energiespeichersysteme sollen primär eine bessere Vereinbarkeit des verfügbaren Energieangebotes mit dem bestehenden Energiebedarf ermöglichen. Der Nutzen bzw. die Vorteile von thermischen Energiespeichern beinhalten nach CABEZA (2015):

- Steigerung der Wirtschaftlichkeit (reduzierte Kapital- und Betriebskosten)
- Effizienzsteigerung bei der Energienutzung
- Verringerung von Treibhausgasemissionen / Umweltverschmutzung
- Nutzbarmachung von tages-/jahreszeitlich schwankenden, regenerativen Energiequellen
- Erhöhung der Zuverlässigkeit in der Energieversorgung
- Ausgleich von Lastspitzen

Thermische Energiespeicher werden entsprechend ihres Nutztemperaturniveaus in Niedrigtemperatur (NT)- und Hochtemperatur (HT)-Systeme sowie nach der Dauer der Speicherung in Kurz- und Langzeitspeicher klassifiziert. Da im Sommer Überschusswärme eingespeichert werden kann ist es möglich, die Jahresarbeitszahl einer Heizanlage mit Wärmepumpe deutlich zu verbessern.

Thermodynamisch werden thermische Energiespeicher in sensible, latente und thermochemische Wärmespeicher unterschieden:

Sensible Wärmespeicher

Sensible Wärmespeicher beruhen auf dem Prinzip der Temperaturänderung des Speichermediums durch den Be- und Endladestrom. Als Speichermedien kommen prinzipiell eine Vielzahl verschiedener Stoffe in Frage, weshalb die weitere Unterscheidung nach dem Aggregatzustand des Speichermediums (fest und flüssig) vorgenommen wird. Die sensible Wärmespeicherung unter Verwendung von Wasser als flüssiges Speichermedium stellt in Hinblick auf Fernwärmeanwendungen die verbreitetste Speichervariante dar, da Wasser eine hohe Wärmekapazität besitzt, ungiftig und in Europa bei niedrigen Preisen leicht verfügbar ist. Aus diesen Gründen wird Wasser auch als Arbeitsmedium in Fernwärmenetzen genutzt, wodurch eine direkte Speicherung in sogenannten Verdrängungswärme-speichern möglich wird. Andere praxisrelevante Typen sensibler Wärmespeicher sind Erdbecken-speicher, Erdwärmesondenspeicher, Behälterspeicher (jeweils zumeist Wasser befüllt) und der **Aquiferspeicher** (Einlagerung thermischer Energie in Gesteinsformationen) (CHRISTIDIS et al. 2017).

Latente Wärmespeicher

Im Gegensatz zu sensiblen Wärmespeichern ist bei Latentwärmespeichern oder PCM (Phase Change Materials) die gespeicherte Energie nicht fühlbar, sondern wird über eine Änderung des Aggregatzustandes konserviert bzw. freigesetzt. Für den Phasenübergang fest-flüssig wird die latente Wärme als Schmelz- oder Kristallisationswärme freigesetzt und ist im Falle des Übergangs flüssig-gasförmig in Form von Verdampfungs- oder Kondensationswärme erfassbar. Aufgrund der wesentlich geringeren Dichteänderung ist der Phasenübergang fest-flüssig trotz eines geringeren Energie-umsatzes technisch zu bevorzugen. Das prominenteste Speichermedium stellt wiederum Wasser bzw. Wassereis/-dampf dar (CABEZA 2015).

Thermochemische Wärmespeicher

Thermochemische Speicher beruhen auf der Freisetzung von Wärme infolge einer chemischen Reaktion. Grundvoraussetzung ist die Reversibilität der Reaktion und eine gewisse Geschwindigkeit mit der diese abläuft. Diese Form der Wärmespeicherung bietet theoretisch die größte Wärmespeicherdichte. Ein weiterer Vorteil der thermochemischen Wärmespeicherung stellt die Möglichkeit zur verlustfreien Langzeitspeicherung von Wärme dar. Allerdings existieren bislang nur wenige Pilotprojekte und es besteht hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf in den Bereichen der Materialentwicklung und von Speicherkonzepten (CABEZA 2015).

2.1 Übersicht Wärmespeichersysteme

Die sensible Speicherung thermischer Energie, kann in unterschiedlichen Formen realisiert werden: **Grubenspeicher, Erdwärmesondenspeicher**, **Behälterspeicher, Erdbeckenspeicher** und **Aquiferspeicher**. Sie unterscheiden sich hauptsächlich durch ihr Behältnis und durch die Technik, die für die Verwendung des Behälters als Wärmespeicher notwendig ist. Für Untergrundspeichersysteme sind neben technischen insbesondere die geo- und hydrogeologischen Bedingungen unterschiedlich geeignet. Grundlegendes Prinzip ist die Nutzung von Überschusswärme oder -kälte, um Wasser zu erwärmen bzw. abzukühlen. Ein Speicher wird mit diesem Wasser befüllt und zu einem späteren Zeitpunkt zur Nutzung rückgewonnen, um dem Wärmenetz Kälte oder Wärme zuzufügen bzw. zu entnehmen.

2.1.1 Grubenspeicher (MTES)

Grubenspeicher sind den Hohlraumspeichern (CTES) zuzuordnen, die Hohlräume im Untergrund jeglicher Art verwenden, um erhitztes Wasser oder Kies/Wasser-Gemische zu lagern. MTES-Systeme werden aktuell an den Standorten Heerlen (NL), Essen und Bochum erfolgreich verwendet. In Heerlen wurde ein bereits geflutetes Bergwerk durch gerichtetes Bohren erschlossen, während die Projekte in Essen und Bochum jeweils 28 °C und 20 °C warmes Wasser aus Bergwerkabflüsse der RAG AG nutzen, um Bildungsgebäude und eine Feuerwehrwache zu wärmen (HAHN et al. 2018).
Von Dezember 2014 bis November 2017 lief zusätzlich in Bottrop ein Pilotprojekt zur Entwicklung eines MTES-Systems, das die Möglichkeiten und Anforderungen der Nutzung eines ehemaligen Bergwerks als Wärmespeicher erforschte (Quelle: GeothermieZentrumBochum e.V., 2018). Im Ergebnis hydrogeochemischer Untersuchungen (JAGERT et al. 2018) und numerischer Modelle (HAHN et al. 2018) beweist das ehemalige Bergwerk Prosper-Haniel (Abbildung 1) eine potentielle Energiekapazität von 12,8 GWh/a bei maximaler Speichertemperatur (90 °C) und der Nutzung der gesamten 252.000 m^3 Wasserkapazität. Weitere Untersuchungen sind bis 2021 geplant und das Bergwerk könnte nach der vollständigen Flutung bis 2035 an das ruhr'sche Stromnetz angeschlossen werden (HAHN et al. 2018).

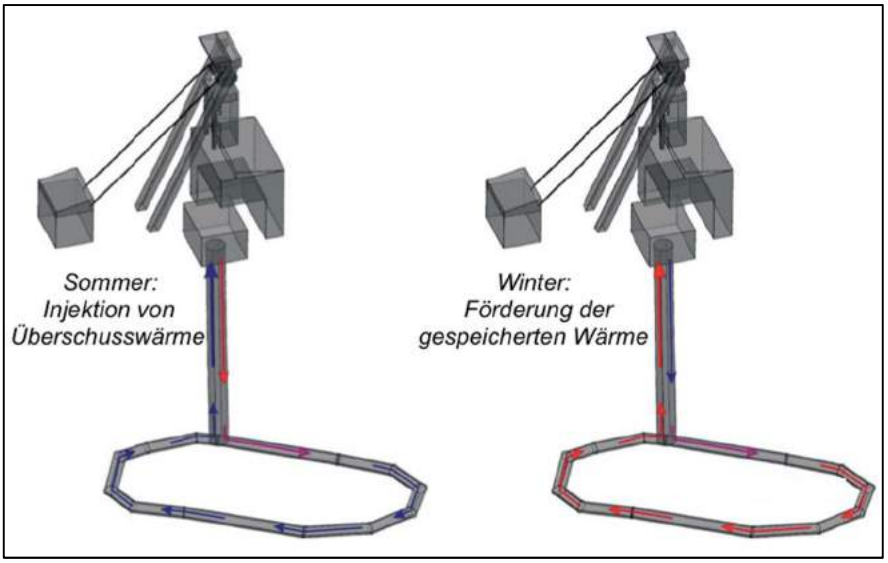


Abbildung 1 Konzeptionelles Modell des MTES-Systems von Prosper-Haniel (HAHN et al. 2018)

MTES-Systeme sind im Allgemeinen durch die räumliche Bindung an Standorte mit ehemaligen Bergwerken oder ähnlichen unterirdischen Hohlräumen beschränkt. Außerdem ist die Temperatur des Wassers, das zurzeit gelagert und abgepumpt wird, oft zu niedrig für tiefergelegene Kavernen, die mehr Strom für das Hochpumpen erfordern. Ein CTES-System angekoppelt mit oberirdischer Überschusswärme könnte jedoch die thermische Effizienz genug erhöhen, um ein Projekt wirtschaftlich sinnvoll zu machen.

2.1.2 Erdwärmesondenspeicher (BTES)

Erdwärmesondenspeicher nutzen mehrere vertikale Bohrlöcher, um Wärme mit dem oberflächennahen Untergrund (etwa 50 m bis 200 m Tiefe) auszutauschen. In den Bohrlöchern sind meistens U-förmige Röhren installiert, durch die Wasser oder ein anderes Medium fließt und Wärme dem umgebenden Boden/Gestein zuführt oder entnimmt. Bereits tausende von solchen Systemen finden in mehreren Ländern Verwendung (CABEZA 2015).

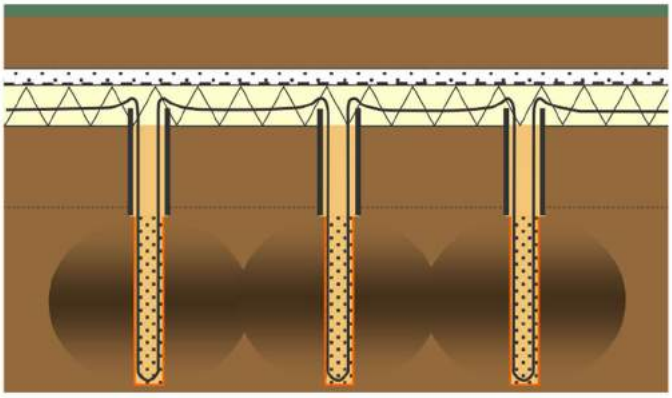


Abbildung 2 Modellskizze eines Erdwärmesondenspeichers (BTES) (SCHMIDT, M. & MANGOLD 2009)

In Neckarsulm ist ein BTES-System seit 1997 in Betrieb. Dieses System speichert solarthermische Energie, um eine Schule, ein Altersheim und ein Einkaufszentrum unter anderem mit Wärme zu versorgen. Die gewärmte Fläche umfasst insgesamt 25.000 m^2. Das Solarnetz hat eine Absorptionsfläche von 5.469 m^2 und ist mit 528 Bohrlöchern von ca. 30 m Tiefe gekoppelt, um 63.400 m^3 Wasser als energietragendes Medium zu nutzen. Eine thermische Effizienz von 70 % wird in Dauerleistung erwartet (NUSSBICKER et al. 2006).
BTES-Systeme finden verbreitet Anwendung wegen ihrer Abgeschlossenheit der Umgebung gegenüber – sowohl Kontaminationsrisiken als auch Abhängigkeit zur geologischen Lage sind meistens niedriger als bei anderen UTES-Systemen. Jedoch ist die BTES-Technik eingeschränkt durch den starken Einfluss von klimatischen Bedingungen (DAHASH et al. 2019) und durch die hohen Investitionskosten, die für die (z. T. zahlreichen) Bohrungen erforderlich sind. Erdwärmesonden sind durch ihren in sich geschlossenen Aufbau mehr oder weniger unabhängig von der Permeabilität des Gebirges (FLEUCHAUS et al. 2018).

2.1.3 Behälterspeicher (TTES)

Behälterspeicher können wie BTES-Systeme an einem breiten Spektrum an Orten gebaut werden. Bei Tank-TES-Systemen handelt es sich um einen isolierten konstruierten Behälter, meistens aus armiertem Beton oder Edelstahl, der mit einem energietragenden Medium wie Wasser gefüllt wird. Der Behälter kann komplett im Untergrund oder an der Erdoberfläche konstruiert werden (Abbildung 3) (GEHLIN et al. 2009).

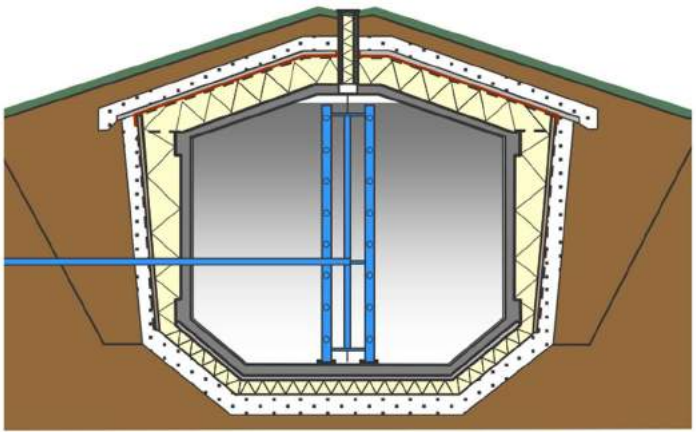


Abbildung 3 Modellskizze eines Behälterspeichers (TTES) (SCHMIDT, M. & MANGOLD 2009)

2.1.4 Erdbeckenspeicher (PTES)

Erdbeckenspeicher haben meistens weniger Isolierung und verwenden eine Kies-Wasser-Mischung, die als energietragendes Medium gelagert wird. Wegen der niedrigeren spezifischen Wärme müssen PTES-Systeme um die 50 % größer sein, um dieselbe Menge an Wärme wie ein Tank-TES zu speichern (SCHMIDT, T. et al.).

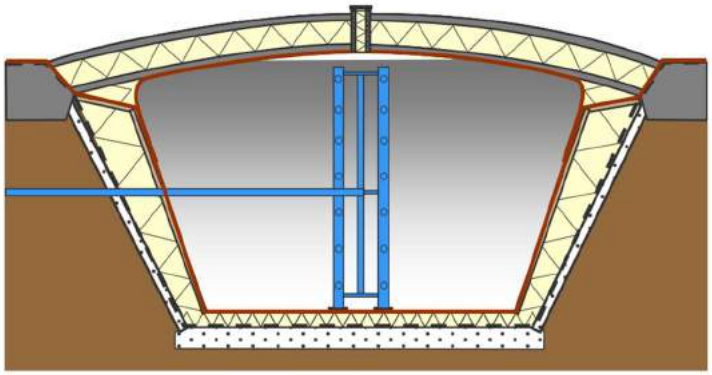


Abbildung 4 Modellskizze eines Erdbeckenspeichers (PTES) (SCHMIDT, M. & MANGOLD 2009)

In Deutschland findet die PTES-Technik an mehreren Orten Verwendung: in Eggenstein seit 2008, in Steinfurt seit 1998 und in Chemnitz seit 2002 (in 2006 abgebrochen). Der PTES-Speicher in Eggenstein hat ein Speichervolumen von 4.500 m^3 und versorgt 12.000 m^2 von Schul-, Sport- und Feuerwehrgebäuden mit Wärme. Der Speicher in Steinfurt hat ein ähnliches Größe-Wärme-Verhältnis und benutzt einen 1.500 m^3 Speicher, um 3.800 m^2 von Wohnungen und Einfamilienhäuser mit Wärme zu versorgen (GEHLIN et al. 2009).

2.1.5 Aquiferspeicher (ATES)

Aquiferspeicher nutzen Grundwasser, um thermische Energie von und zu einer oder mehreren wasserführenden Schichten im Untergrund zu transportieren. Diese Systeme können sowohl allein Kälte oder Wärme als auch Kälte und Wärme einem System zufügen bzw. entnehmen. Dadurch ist es möglich, Energieeinsparungen in Höhe von

- 95 % bis 98 % für direkte Heiz- und Kühlanwendungen,
- 85 % bis 90 % für Heiz- und Kühlanwendungen, die durch eine Wärmepumpe unterstützt werden,
- 60 % bis 75 % für reine Heizanwendungen, die durch eine Wärmepumpe unterstützt werden,
- 90 % bis 97 % für direkte Kühlanwendungen

zu erzielen (ANDERSSON et al. 2003, ANDERSSON et al. 2013). Die für einen wirtschaftlichen Betrieb maßgebenden Aquifer- und Nutzungseigenschaften sind u. a. die Aquifermächtigkeit und -tiefe sowie die hydraulischen und thermophysikalischen Aquifereigenschaften (Porosität, Permeabilität). Bei der Speicherung von Wärme wird in Niedrigtemperatur-(NT) und Hochtemperatur-(HT)Speichersystemen (> 50 °C) unterschieden. Hierbei werden NT-ATES über eine maximale Speichertemperatur von etwa 25 °C (vereinzelt bis 40 °C) definiert. HT-ATES sind hingegen durch eine Speichertemperatur von mindestens 50 °C charakterisiert und können im Vergleich zur direkten tiefengeothermischen Nutzung mit deutlich flacheren Förderhorizonten betrieben werden. HT-ATES bieten somit ein großes Potential sowohl Erneuerbare Energien als auch zumeist ungenutzte industrielle Abwärme, flächendeckend als Wärmequelle in den thermischen Energiesektor zu integrieren (FLEUCHAUS et al. 2021). Bei geeigneten geologischen Bedingungen sind ATES-Systeme eine attraktive großskalige Lösung für die benötigte Effizienzsteigerung bei der Energieerzeugung und -nutzung.

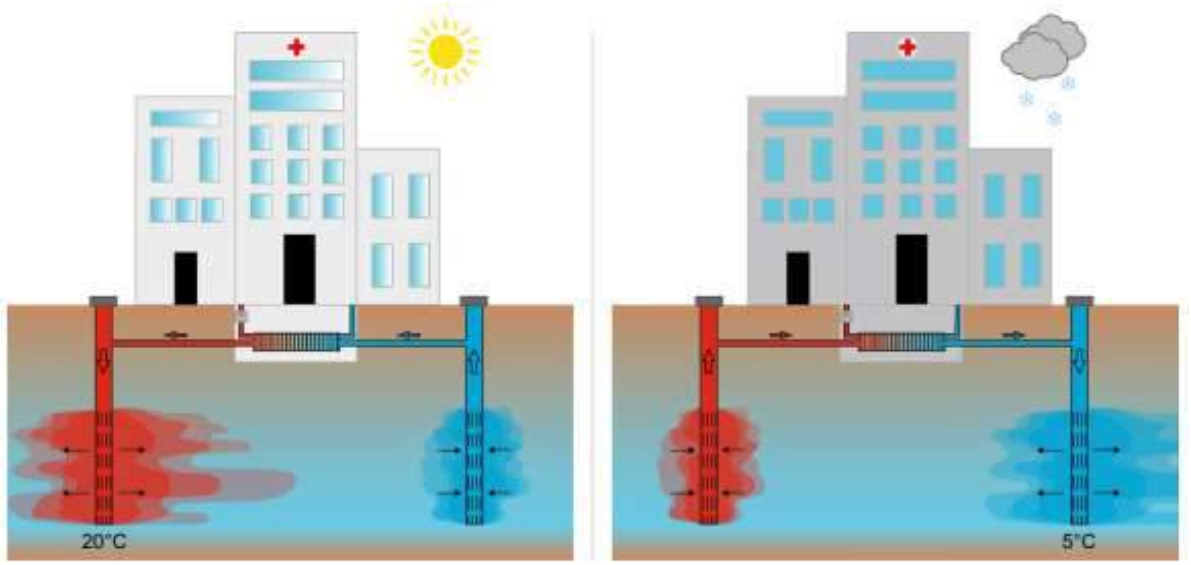


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Funktionsweise eines ATES-Systems im Lade- (Sommer, links) und Entladebetrieb (Winter, rechts) (SCHÜPPLER et al. 2019)

2.1.6 Vergleich von sensiblen Wärmespeichersystemen

Nach BAKEMA et al. (1995) sind folgende Eigenschaften beim Vergleich verschiedener TES-Systeme von grundlegender Bedeutung:

- die Wärmekapazität
- die Einspeicherung- und Ausspeicherungstemperatur
- die thermische Effizienz
- die Investitions- und Wartungskosten
- die nützliche Lebensdauer

Abbildung 6 zeigt eine Übersicht der wesentlichen Aspekte, die sich hinsichtlich der technischen und geologischen Bedingungen auf den Betrieb der Wärmespeicher auswirken können.
Die Investitionskosten eines ATES-Systems sind in Bezug zum Speichervolumen als vergleichsweise gering einzuschätzen (siehe Abbildung 6). Zudem sind Aquiferspeicher für eine direkte Nutzung von Kälte oder Wärme geeignet, wohingegen bei BTES-Systemen hierfür im Allgemeinen der Einsatz einer Wärmepumpe benötigt wird (PAKSOY et al. 2009). Oberirdisch ist der benötigte Raum für ein ATES-System vergleichsweise gering (SCHMIDT, M. & MANGOLD 2009).
Die Exploration und Wartung eines ATES-Systems nimmt jedoch gegenüber PTES-/TTES- und BTES-Systemen einen höheren Stellenwert ein und kann zusätzliche Kosten verursachen. Darüber hinaus bedarf es genauen Untersuchungen zu Wechselwirkungen von ATES-Systemen mit der Umwelt, da das Speichervolumen in der Regel sehr groß ist und die Speichergesteine als natürliches Medium und Habitat ein komplexes System darstellen (SCHMIDT, M. & MANGOLD 2009). Im Vergleich zu geschlossenen geothermischen Systemen benötigen ATES die Verfügbarkeit eines geeigneten Aquifers mit relativ niedrigen Grundwasserfließgeschwindigkeiten, eines homogenen Aufbaus, einer hohen Permeabilität und geochemischen Verhältnissen, die Ausfällungen und Korrosionserscheinungen verhindern.

Comparison of seasonal Underground thermal energy storage (UTES) concepts (+ + + high; + + moderate; + low).

	PTES / TTES	ATES	BTES
Storage medium	Water; water/ gravel	Groundwater/ sediments	Groundwater/ sediments
Subsurface requirements	+	+ + +	+ +
Required pre-investigation	+	+ + +	+ +
Maximum storage capacity (kwh/m³)	+ + +	+ +	+
Storage volumes	+	+ + +	+ +
Space requirement	+ + +	+	+
Investment costs	+ + +	+	+ +
Maintenance	+	+ + +	+
Environmental interaction	+	+ + +	+ +

Abbildung 6 Allgemeiner Vergleich ausgewählter Energiespeichersysteme (FLEUCHAUS et al. 2018)

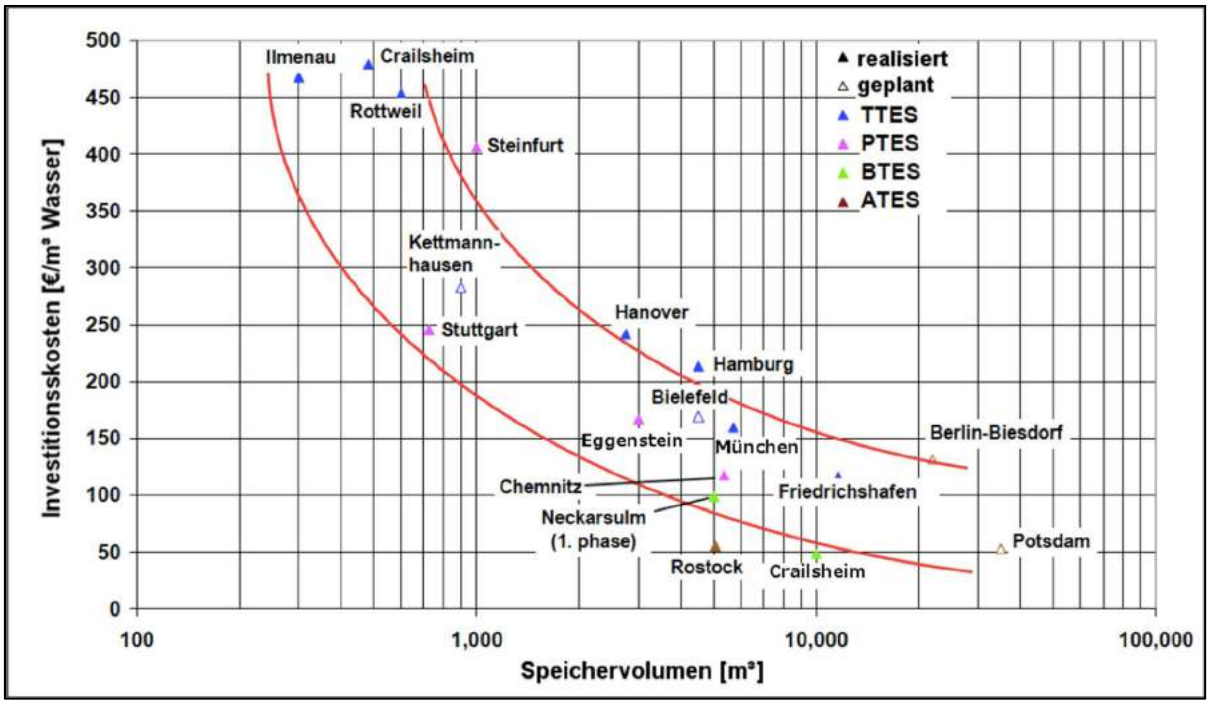


Abbildung 7 Investitionskosten und Speichervolumen ausgewählter realisierter (z. T. ehemaliger) und geplanter Projekte zur Speicherung thermischer Energie in Deutschland (verändert nach (SCHMIDT, M. & MANGOLD 2009)

2.2 Thermische Aquiferspeicher (ATES)–Projekte

2.2.1 Internationale ATES-Projekte

Die Verwendung von ATES-Systemen für großskalige Projekte begann in den 1960er Jahren in der Volksrepublik (VR) China. Bis zu 492 Bohrungen wurden hier bis 1984 genutzt, um Kühlung in der (Textil-)Industrie zu leisten. Diese Zahl ist jedoch in der VR China seitdem deutlich gesunken, da Probleme bei der Nachladung der Aquifere nicht gelöst werden konnten (GAO et al. 2009). Aktuell sind etwa 2800 ATES-Systeme weltweit in Betrieb (Abbildung 8). Die überwiegende Mehrheit (2500) sind in den **Niederlanden** installiert, gefolgt von **Schweden** (220), **Dänemark** (55) sowie **Belgien** (30) (FLEUCHAUS et al. 2018, FLEUCHAUS 2020). Laut (SCHMIDT, T. et al. 2018) sind ungefähr 3 % von den weltweiten Projekten an einem großskaligen District-Heating-and-Cooling (DHC) (Stadtquartier Heizung und Kühlung) Netz gekoppelt.

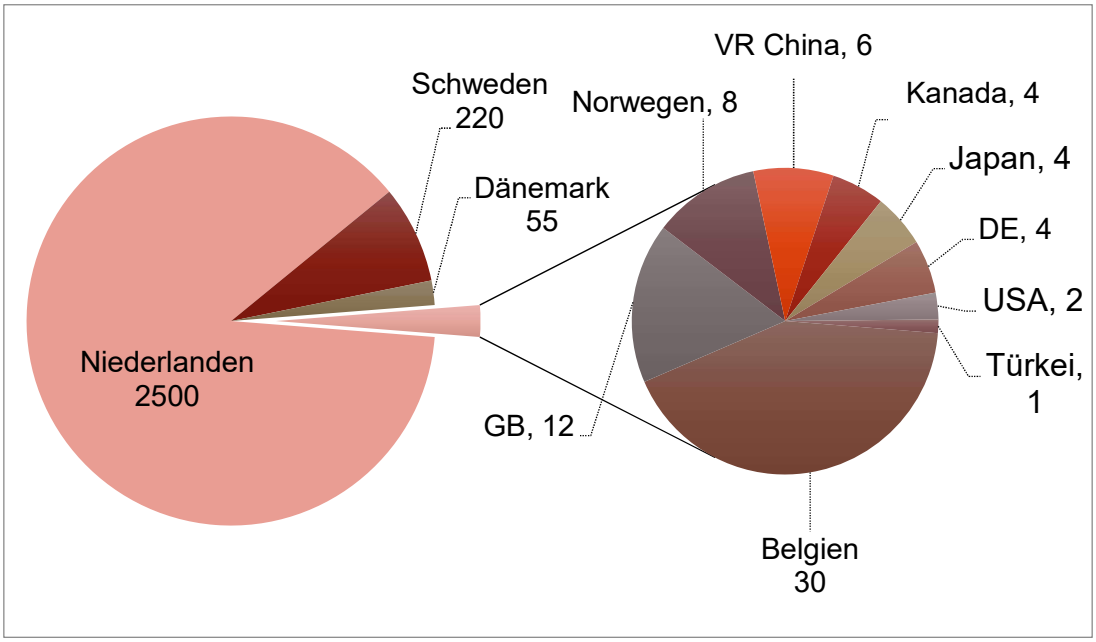


Abbildung 8 Weltweite Anzahl an ATES-Systemen in 2020 (FLEUCHAUS 2020) (GB: Großbritannien, VR: Volksrepublik, DE: Deutschland)

ATES in den Niederlanden

In 2000 hatten die meisten ATES Systeme in den Niederlanden eine thermische Kapazität zwischen 500 kWh und 1000 kWh und wurden überwiegend im Bereich Heizen und Kühlen von Bürogebäuden verwendet (Abbildung 9). Die Mehrheit der Systeme verwenden Wasser mit einer relativ niedrigen Temperatur, um zu kühlen (bei 12 °C) und um Wärme zu speichern (bei 20 °C) (siehe Tabelle 1 nach (SNIJDERS 2000).

Tabelle 1 Eigenschaften der niederländischen ATES-Projekte (nach SNIJDERS 2000)

Ziel	Speichertyp	Temperaturniveau [°C]	Anteil der Projekte [%]
Kühlung	Kältespeicher	12	27
Kühlung + Heizung	Kältespeicher und Niedrigtemperatur-Wärmespeicher	12; 12 bis 20	58
Heizung	Niedrigtemperatur-Wärmespeicher	20 bis 50	2
Heizung	Hochtemperatur-Wärmespeicher	> 50	3

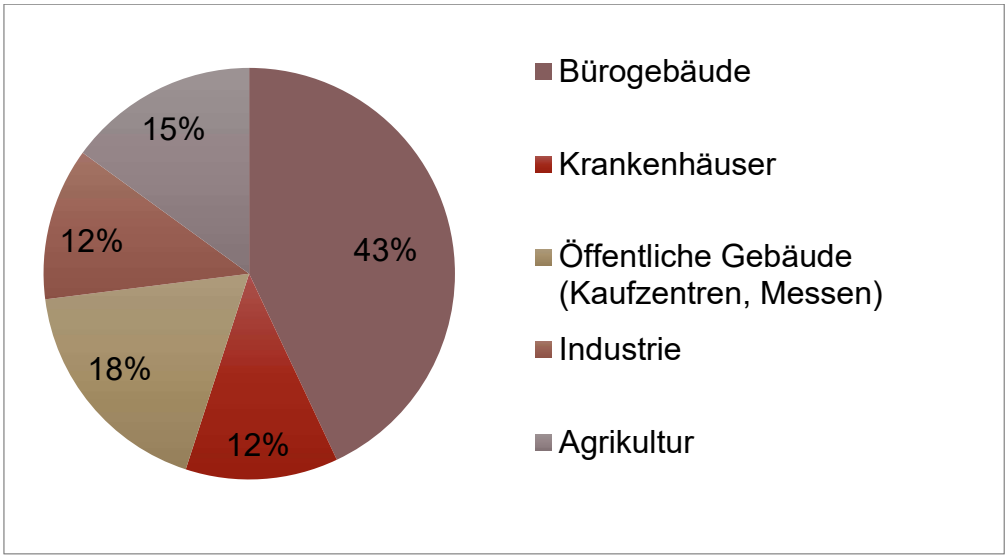


Abbildung 9 Niederländische ATES-Projekte nach Verwendungszweck (nach SNIJDERS 2000)

Die Niederlande sind damit der weltweite Marktführer im Bereich ATES und ein Beispiel für ein reifes Stadium dieser Technologie. Laut WU & OUYANG (2019) liegt dieser Erfolg zum großen Teil daran, dass geeignete Aquifere nahezu überall in den Niederlanden zu finden sind. GODSCHALK, M. S. & BAKEMA (2009) bemerken, dass eine Förder- bzw. Versickerungsrate von über 250 m^3/h in der Umgebung von Amsterdam mit einem Bohrloch möglich ist. Außerdem braucht das höchst-urbanisierte Land eine nachhaltige Energietechnologie, die wie ATES geruchsarm (im Gegensatz zu z. B. Biomasse) und platzsparend (gegenüber Windkraft- oder Solaranlagen) betrieben werden kann. Die hohe Baudichte begünstigt außerdem großskalige Projekte, in denen mehrere Akteure teilnehmen können.
WU & OUYANG (2019) beschreiben auch, dass die niedrige Grundwasser-Temperatur (direkt für Kühlung geeignet) und die Aktivität der niederländischen Ingenieurbüros für den Erfolg der ATES-Technologie in den Niederlanden mitverantwortlich ist. Demnach bieten niederländische Ingenieurbüros eine umfassende Lösung für Systemdesign, Kontrolle und Inbetriebnahme, was die Risiken minimiert und eine hohe Qualität gewährleistet. Hochentwickelte Belieferungsketten und qualitative Bohrtechnik und Baumaterialien ermöglichen ebenso einen verlässlichen Ausbau der Technologie.
ATES-Systeme werden in den Niederlanden noch weiter ausgebaut. In Kombination mit anderen Veränderungen müssten bis 2020 insgesamt 20.000 ATES-Systeme in Betrieb sein, um den gesamten

Energieverbrauch der Niederlande um 2 % zu senken (GODSCHALK, M. S. & BAKEMA 2009), was eines der Klimaziele der niederländischen Regierung darstellt. Um dieses Ziel zu erreichen, braucht es eine umfängliche und verlässliche Lösung, die für die Niederlande zum Teil aus dem weiteren Ausbau von ATES-Systemen besteht. Abbildung 10 zeigt die Prognose in 2009 für den Ausbau von ATES-Systemen basierend auf der Ausbaurate von ca. 200 pro Jahr zwischen 2004 bis 2009. Diese Prognose korreliert sehr gut mit den von FLEUCHAUS et al. (2018) erhobenen Daten (vgl. Abbildung 8).

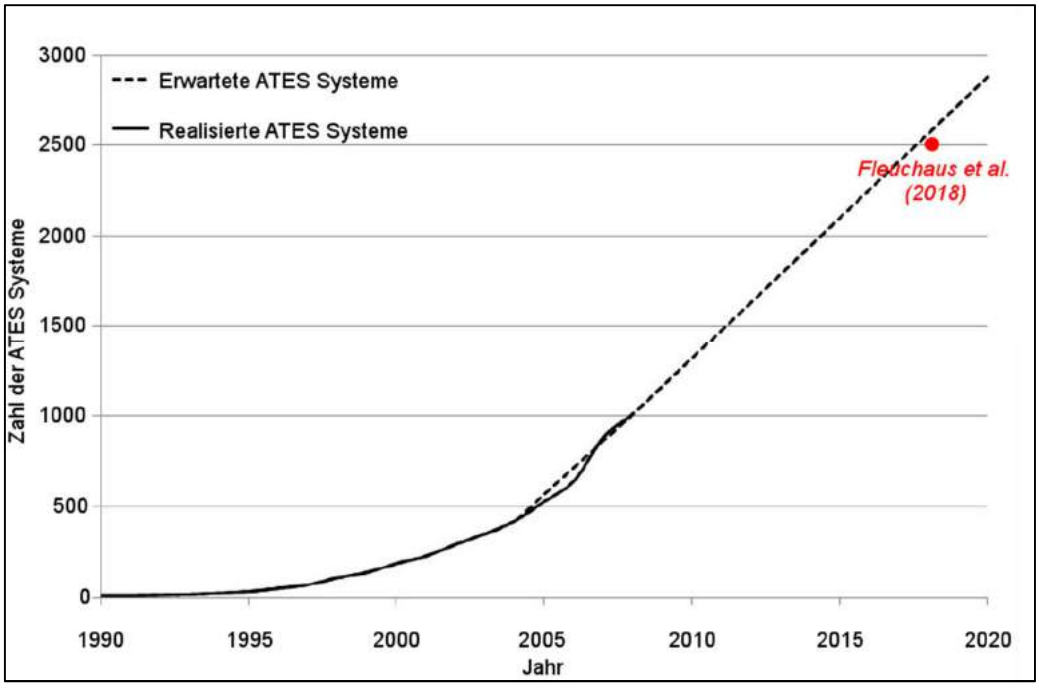


Abbildung 10 Realisierter und erwarteter Ausbau von ATES-Systemen in den Niederlanden (modifiziert nach GODSCHALK, M. S. & BAKEMA 2009 und FLEUCHAUS et al. 2018)

ATES in Schweden und Dänemark

Vergleichbar zu den Niederlanden werden die insgesamt 275 ATES-Systeme in Schweden und Dänemark zu etwa 70 % für die Energieversorgung von öffentlichen Einrichtungen und Geschäftsgebäuden genutzt. Die verbleibenden 30 % dienen der Versorgung von industriellen Gebäuden und Wohnhäusern (FLEUCHAUS 2020). Nach Bestandsunterlagen der Betreiber werden in Schweden bereits seit 1983 ATES-Anlagen betrieben, wobei 85 % der Wärme- und Kälteversorgung dienen und 15 % für reine Heiz- oder Kühlanwendungen genutzt werden (ANDERSSON et al. 2013). Prominente Beispiele von ATES-Anlagen, die sämtlich zum Heizen und Kühlen von Gebäuden dienen, sind das Expo-Gebäude in Malmö (Schweden), der Flughafen in Arlanda (Schweden) sowie der Flughafen und ein Hotel in Copenhagen (Dänemark) (FLEUCHAUS 2020).

ATES in Belgien

ATES-Systeme wurden bereits 1995 in den belgischen Markt eingeführt. Diese Technologie findet jedoch nur eingeschränkt Anwendung: In 2018 waren in Belgien trotz des Interesses seitens vieler Unternehmen lediglich 30 ATES-Systeme in Betrieb (FLEUCHAUS et al. 2018). Grund für diese relativ geringe Anzahl sind die Lage der geeigneten Aquifere in Bezug zu den industriellen und wirtschaftlichen

Regionen. Im Nordosten von Belgien existieren nutzbare Aquifere, jedoch befinden sich die meisten industriellen Gebiete im Süden und im Westen des Landes, wo mächtige Tonschichten und kristallines Grundgebirge anstehend sind. Dies verdeutlicht, dass die Nutzung der ATES-Technologie in erster Linie vom Zusammenspiel geologischer und geografischer Verhältnisse abhängig ist (DESMEDT et al. 2007).

2.2.2 ATES-Projekte in Deutschland

Erste Ansätze zur Nutzung von Aquiferspeichern wurden in Deutschland in den 70er und 80er Jahren als Reaktion auf die erste große Ölkrise in Krefeld (WERNER, D. & KLEY 1977) und an der Universität Stuttgart (SILVERMAN 1980) unternommen. In den folgenden Jahren konnte sich die Technologie jedoch aufgrund technologischer Probleme und stark sinkender Öl- und Gaspreise am Energiemarkt nicht durchsetzen. Mit derzeit lediglich zwei betriebenen Aquiferspeichern (NT-ATES in Rostock und Bonn) fristet die ATES-Technologie in Deutschland bis heute ein Nischendasein, obwohl ein erhebliches Nutzungspotential besteht (FLEUCHAUS et al. 2021). Neben wirtschaftlich genutzten Anlagen werden seit der Jahrtausendwende durch neue Förderprogramme die Möglichkeiten der Nutzung von Aquiferspeichern in aktuellen bzw. vor kurzem abgeschlossenen Projekten wie in Hamburg, Kiel oder Lüneburg wissenschaftlich untersucht (RABENSTEIN 2018; GÖRKE et al. 2017; OPEL et al. 2017).
Die aktuell in Betrieb befindlichen Aquiferspeicher befinden sich in Rostock und Bonn. Bei dem ATES-System in Rostock-Brickmannshöhe handelt es sich derzeit um den weltweit einzigen, wirtschaftlich genutzten HT-Speicher mit einer Einspeisetemperatur von 50 °C bei einer Speichertiefe von 20 m. Das NT-ATES-System in Bonn dient der saisonalen Wärme- und Kälteversorgung des Gebäudekomplexes „Bonner Bogen“ (Hotel, Rechenzentrum, Bürogebäude) und zählt zu den größten Wärmepumpen-anlagen Europas (FLEUCHAUS et al. 2021).
Im Rahmen des Klimaneutralitätskonzeptes der Leuphana Universität ist in Lüneburg geplant, ein HT-ATES zu betreiben, um eine Minimierung der Wärmeversorgung aus erdgasbefeuerten Spitzenlastbehältern zu erreichen. Hierfür soll Abwärme mit einer Temperatur von 90 °C in einer Tiefe von etwa 400 m gespeichert werden (HOLSTENKAMP et al. 2017, OPEL et al. 2017). Allerdings ist die Unterstützung für eine tatsächliche Realisierung aufgrund einer unklaren Risikowahrnehmung lokaler politischer und wirtschaftlicher Entscheidungsträger derzeit gering (FLEUCHAUS et al. 2021). Im Zuge einer Umstrukturierung des Hamburger Fernwärmenetzes soll ein HAT-ATES installiert werden, um unterschiedliche Wärmequellen (Tiefengeothermie, industrielle Abwärme, Power-to-Heat) optimal zu integrieren (FLEUCHAUS et al. 2021). Als aussichtsreiche Speicherhorizonte gelten dabei die „Oberen Braunkohlesande“ (OBKS) in einer Tiefe von 200 m bis 300 m und eine 1000 m tiefe Sandstein-formation.
Die ATES-Anlagen in Berlin und Neubrandenburg waren zwischen 1999 und 2019 in Betrieb und mussten infolge technischer Probleme (u. a. Verschleiß und Korrosion der Brunnenpumpen, Leckage-probleme) stillgelegt werden. Über mehrere Jahre hinweg konnten diese Projekte dennoch den erfolgreichen Speicherbetrieb für eine nachhaltige Wärme- und Kälteversorgung demonstrieren (FLEUCHAUS et al. 2021).

Eine Übersicht stillgelegter, in Betrieb befindlicher und geplanter ATES-Projekte ist in Abbildung 11 dargestellt. In Abbildung 12 ist zudem eine Auswahl an deutschen und internationalen ATES-Projekten dargestellt, welche das generelle Spektrum an ATES-Systemen und deren Betriebstemperaturen zeigt.

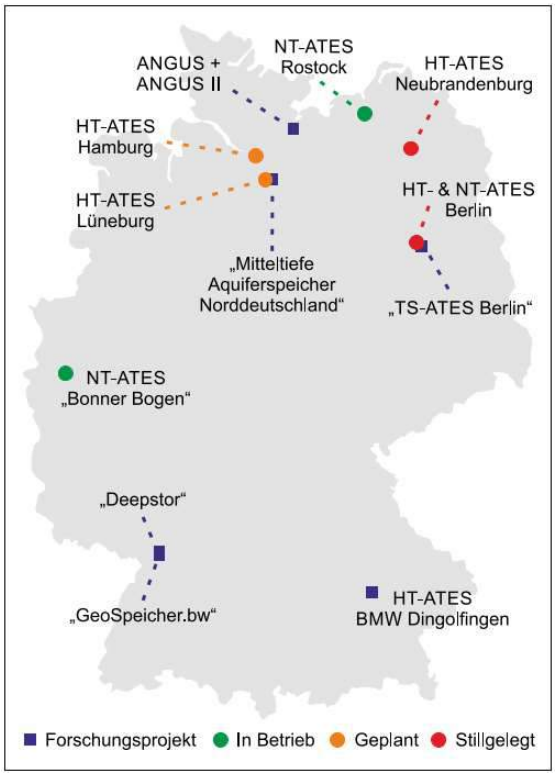


Abbildung 11 Übersicht aktueller, stillgelegter und geplanter ATES-Projekte in Deutschland (FLEUCHAUS et al. 2021)

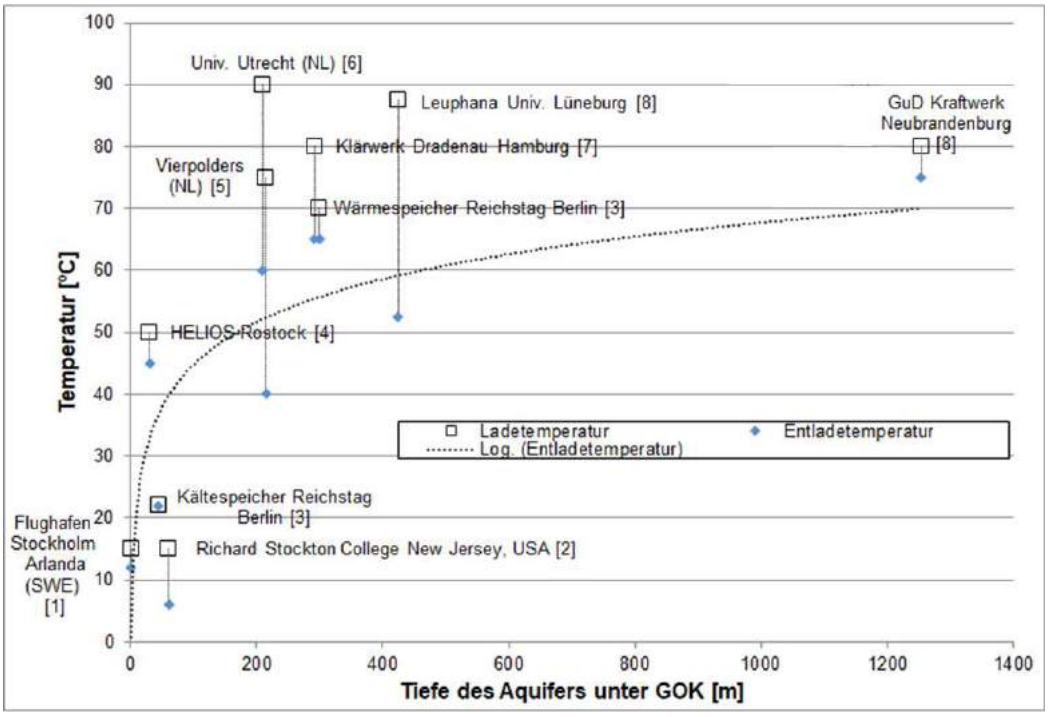


Abbildung 12 Betriebstemperatur und Tiefe ausgewählter deutscher und internationaler ATES-Systeme (Quellen: 1: ANDERSSON 2009; 2: PAKSOY et al. 2009; 3: BINE INFORMATIONSDIENST 2013; 4: SEIBT & KABUS 2006; 5: DRIJVER et al. 2012; 6: VAN LOON & VAN DER HEIDE 1992; 7: RADMANN & HANSEN 2019; 8: HOLSTENKAMP et al. 2017)

2.3 Physikalische Eigenschaften eines Aquiferspeichers

Die Entwicklung und der Betrieb eines Aquiferspeichers setzen ein umfassendes Verständnis der zugrundeliegenden thermohydraulischen Zusammenhänge und der daran gekoppelten physiko-chemischen Prozesse voraus. Für ersteres sind u. a. nummerische Simulationen nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) die Grundlage. Da es sich bei einem Aquifer um ein Mehr-Phasensystem handelt, bilden neben den thermischen Eigenschaften sowohl die Eigenschaften der festen als auch der flüssigen Phase entscheidende Eingangsparameter.

2.3.1 Thermophysikalische Eigenschaften

Für die Modellierung geothermaler Prozesse entscheidende thermophysikalische Parameter sind die **Wärmestromdichte** q [$W \cdot m^{-2}$], die **Wärmeleitfähigkeit** λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] und die spezifische **Wärmekapazität** c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]. Aus der Wärmestromdichte q und der Wärmeleitfähigkeit λ ergibt sich der lokale **Temperaturgradient** grad T [$K \cdot m^{-1}$] und damit die **Temperatur** T [K] im Reservoir (STOBER et al. 2009, BAUER, M. et al. 2014, BAEHR & KABELAC 2016).

In Thüringen liegt die Schwankungsbreite der terrestrischen **Wärmestromdichte** q laut aktuellen Angaben des THÜRINGER LANDESAMT FÜR UMWELT, BERGBAU UND NATURSCHUTZ, die auf Informationen aus dem *Geothermie-Atlas der Deutschen Demokratischen Republik* (1984) beruhen, zwischen Werten < 30 bis zu 100 $mW \cdot m^{-2}$ (Abbildung 13). In neueren, aber weniger hoch aufgelösten, unkorrigierten Datensätzen (HURTER & HAENEL, R. 2002, HURTIG et al. 1992) liegt die Wärmestromdichte im gleichen Wertebereich. Auch hier ist ein Kontrast zwischen niedrigeren Wärmestromdichten (< 60 $W \cdot m^{-2}$) im Osten und höheren Werten (> 60 $W \cdot m^{-2}$) im westlichen Landesteil erkennbar (DOORNENBAL & STEVENSON 2010).

Die **Wärmeleitfähigkeit** λ ist in Lockergesteinen mit Werten zwischen 1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ und 3,1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ etwas niedriger als im Festgestein (VDI-GESELLSCHAFT ENERGIE UND UMWELT 2010), während die von Wasser 0,598 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (bei 20°C) beträgt. Somit sind die thermischen Verluste durch Wärmeleitung in hochdurchlässigen, stark porösen Lockergesteins-Aquiferspeichern geringer als in weniger porösen Festgesteins-Aquiferspeichern.

Untersuchungen an mesozoischen Sandsteinen aus Mecklenburg-Vorpommern zeigen, dass die Variation der auftretenden Wärmeleitfähigkeiten im Buntsandstein mit Werten zwischen 2,7 ± 0,1 und 3,5 ± 0,45 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ am größten ist (). Der Mittelwert der beprobten Buntsandsteinkerne aus Tiefenlagen um 1.500 m liegt bei 3,2 ± 0,37 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, wobei eine Anisotropie in Bezug zur Schichtung im Mittel praktisch nicht nachgewiesen werden konnte (FUCHS & FÖRSTER 2010). Sandsteine aus dem Thüringer Becken zeigen neben einer generell niedrigeren Wärmeleitfähigkeit im Mittel eine leichte Anisotropie von 1,19 ($k_{\parallel}$ / $k_{\perp}$) auf (CERMAK & RYBACH 1982).

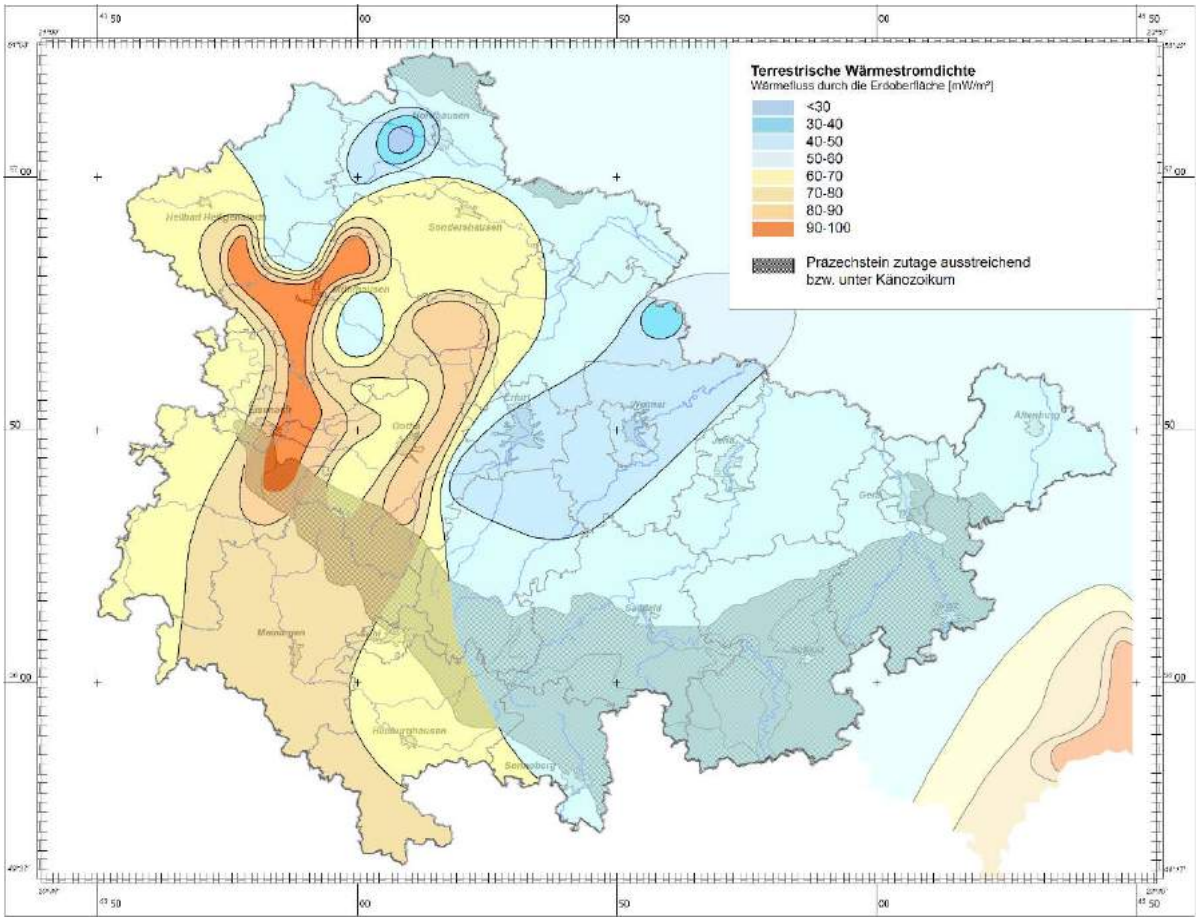


Abbildung 13 Terrestrische Wärmestromdichte in Thüringen (nach Daten des *Geothermie-Atlas der Deutschen Demokratischen Republik* (1984), TLUBN 2020)

Weitere Untersuchungen der Wärmeleitfähigkeit des Unteren und Mittleren Buntsandsteins stammen aus dem Bereich der Ost- bzw.- Südostflanke des Spessarts aus Tiefen bis 250 m. Die zum Teil quarzitisch gebundenen Sandsteine weisen eine Wärmeleitfähigkeit zwischen 3,6 ± 0,3 und 4,1 ± 0,6 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ bei 14 % bis 20 % Gesamtporosität auf (FRANZ, C. & SCHULZE 2016).

Insgesamt ist die Wärmeleitfähigkeit, im stratigraphisch höher liegenden Buntsandstein, etwas geringer als in den veröffentlichten Daten von NORDEN & FÖRSTER 2006 aus permo-karbonen Sandsteinen zwischen 3.000 m und 5.000 m Tiefe mit Werten zwischen 2,6 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ und 4,8 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Die Hauptursache hierfür ist die unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung. Die Wärmeleitfähigkeit wird demnach hauptsächlich durch den Quarzgehalt im Korngerüst sowie im Zement gesteuert, wobei ein höherer Quarzgehalt zu einer höheren Wärmeleitfähigkeit führt (NORDEN & FÖRSTER 2006, FRANZ, C. & SCHULZE 2016). Ein weiterer Grund für die höhere Wärmeleitfähigkeit in den permo-karbonen Sandsteinen wird in der deutlich reduzierten Porosität gesehen (Abbildung 14), was durch eine stärkere Kompaktion infolge einer tieferen Versenkung zu erklären ist. In 85 % der Fälle liegt die Porosität der permo-karbonen Sandsteine unter 10 % gegenüber 20 % bis 35 % im Buntsandstein (FUCHS & FÖRSTER 2010, SCHÖN 2011).

Tabelle 2 Wertebereiche der Wärmeleitfähigkeit λ in verschiedenen Gesteinstypen.

Lithologie	Wärmeleitfähigkeit [W·m⁻¹·K⁻¹]		Volumen-bezogene spez. Wärmekapazität ρ·cp [MJ·m⁻³·K⁻¹]	Quellenangabe
	min. – max.	empfohlener Rechenwert / Mittelwert*		
Ton/Schluff, wassergesättigt	1,1 – 3,1	1,8	2,0 – 2,8	VDI 4640
Ton	0,6 – 2,6	1,53		CERMAK & RYBACH 1982
Tonstein/Siltstein	1,05 – 1,45			SCHÖN 2011
Tonstein	0,6 – 4,0	2,04		CERMAK & RYBACH 1982
Sand, wassergesättigt	2,0 – 3,0	2,4	2,2 – 2,8	VDI 4640
Sand (Quartär)	0,1 – 2,75	1,44*		CERMAK & RYBACH 1982
Sand (Tertiär)	1,8 – 2,2			SCHÖN 2011
Kies/Steine, wassergesättigt	1,6 – 2,5	1,8	2,2 – 2,6	VDI 4640
Sandstein (allgemein)	1,9 – 4,6	2,8	1,8 – 2,6	VDI 4640
Sandstein (allgemein)	0,9 – 6,5	2,47*		CERMAK & RYBACH 1982
Sandstein (Thüringer Becken)	1,3 – 2,4	1,84		CERMAK & RYBACH 1982
Sandstein (Thüringer Becken)		2,29*		CERMAK & RYBACH 1982
Sandstein (allgemein)	1,88 – 4,98	3,72*		SCHÖN 2011
Sandstein (allgemein)	1,2 – 4,2			SCHÖN 2011
Sandstein (allgemein)	2,5 – 4,2			SCHÖN 2011
Sandstein (allgemein)	1,56 – 3,86	2,57*		SCHÖN 2011
Sandstein (Buntsandstein)	2,7 – 3,5	3,2*		FUCHS & FÖRSTER 2010
Sandstein (Buntsandstein)	3,6 – 4,1	3,8*		FRANZ, C. & SCHULZE 2016
Sandstein (Perm)	2,6 – 4,2			NORDEN & FÖRSTER 2006
Sandstein (Karbon)	3,6 – 4,8		(2,3)	NORDEN & FÖRSTER 2006, CERMAK & RYBACH 1982

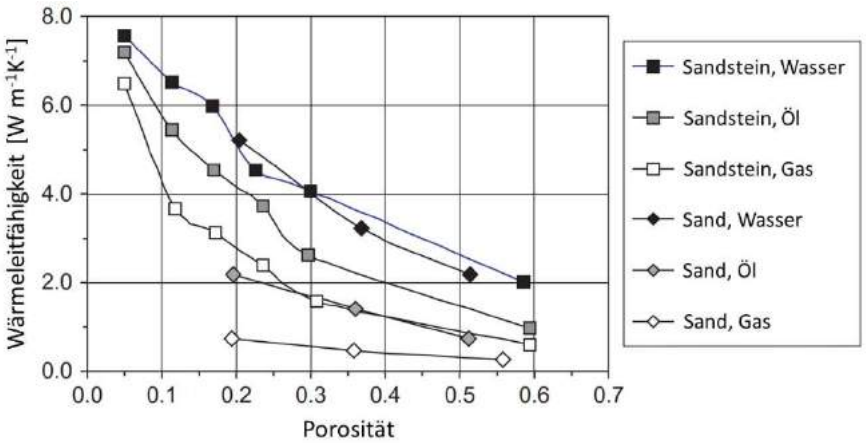


Abbildung 14 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Porosität in Sand und Sandsteinen mit unterschiedlichen Porenfluiden (SCHÖN 2011)

Die **Wärmekapazität** *c* für Sandsteine aus Deutschland wird von HAENEL, R. (1971) mit Werten zwischen 0,76 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ und 1,08 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ angegeben. Das Mittel von 17 Proben liegt bei 0,96 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. Die Wärmekapazität von Ton und Tonstein liegt mit Werten zwischen 0,89 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ und 1,00 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ (im Mittel 0,93 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) sowie 0,82 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ und 0,93 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ (im Mittel 0,88 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) in der gleichen Größenordnung (KAPPELMEYER & HAENEL, R. 1974).

2.3.2 Hydraulische Eigenschaften

Prinzipiell sind die hydraulischen Eigenschaften die wichtigsten Faktoren für eine erfolgreiche Umsetzung eines Aquiferspeichers. Dabei unterscheiden sich die Anforderungen an einen oberflächennahen (Lockergesteins-)Aquifer z. T. deutlich von denen mitteltiefer und tiefer (Festgesteins-)Aquifere, bei denen ähnliche Anforderungen an die hydraulischen Eigenschaften wie in der tiefen Geothermie angenommen werden können.

Die Nutzung von Porenspeichern ist an bestimmte geologische Voraussetzungen gebunden, die eine langfristige und stabile Förderung und Reinjektion gewährleisten sollen. Obwohl hierfür keine eindeutigen Grenzwerte definiert sind, sollte das Zielgestein folgende Voraussetzungen nach Möglichkeit erfüllen (ROCKEL & SCHNEIDER 1992, WOLFGRAMM et al. 2014):

- Mächtigkeit: > 20 m
- Nutzporosität: > 20 % bis 25 %
- Permeabilität: > 250 mD bis 500 mD
- k_f-Wert: 10^{-4} m/s bis 10^{-5} m/s
- Transmissivität: 10^{-3} m²/s bis 10^{-5} m²/s
- Produktivität: 75 m³/h MPa
- geringes Lösungs- und Fällungspotential der Fluide / Gesteine

Hiermit sollte eine effiziente Nutzung mit Volumenströmen von **> 50 m³/h** gewährleistet sein. Die genannten Eigenschaften treffen häufig auf Sandstein-Porenspeicher mit guter Kornsortierung, einem geringen Matrixgehalt (Ton/Silt) und entsprechend hohem Quarzgehalt zu. Durch Zementation, besonders bei der Diagenese und den daran geknüpften Prozessen, kann der Porenraum sekundär modifiziert werden. Generell ist mit einer Verschlechterung der hydraulischen Eigenschaften mit zunehmender Tiefe zu rechnen. Außerdem ist zu beachten, dass geschichtete Sandsteine eine deutliche Anisotropie (Richtungsabhängigkeit) aufweisen können. In diesen Fällen ist die Permeabilität innerhalb der Schichtung gut, senkrecht zur Schichtung aber deutlich reduziert. Nur richtungslos körnige Sandsteine verhalten sich hydrodynamisch isotrop. Aufgrund der Tatsache, dass die genannten Voraussetzungen häufig nicht erfüllt sind, wird in der tiefen Geothermie in der Regel die Erschließung komplexer Poren-, Kluft- oder Karstspeichersysteme angestrebt.

Die Anforderungen an die hydraulischen Eigenschaften eines oberflächennahen (Lockergesteins-) Aquifers unterscheiden sich vor allem hinsichtlich geologischer und hydrologischer Eigenschaften, die im Wesentlichen aus der fehlenden Sedimentkonsolidierung und den oberflächennahen Lagerungsverhältnissen resultieren. In Tabelle 3 sind die Hauptkriterien für die Auswahl eines Lockergesteinsaquifers nach CABEZA (2015) aufgeführt.

Tabelle 3 Geologische und hydrologische Anforderungen an oberflächennahe (Lockergesteins-) Aquifere (CABEZA 2015)

Parameter	Minimum	Mittel	Maximum
Mächtigkeit [m]	2 bis 5	25	-
Tiefe [m u. GOK]	5	50	150
Permeabilität [m/s]	$3*10^{-5}$	$3*10^{-4}$	$1*10^{-3}$
GW-Fließgeschwindigkeit [m/d]	0	0,1	0,3
Grundwasserspiegel [m u. GOK]	50	10	-5

Die Eigenschaften des Fluids sind vor allem bei der Betrachtung der Energiebilanz sowie der Strömungsverhältnisse im Untergrund und im Sondenkreislauf entscheidend. Die Fluide werden im Modell über die Wärmeleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität charakterisiert. Diese wiederum wurden anhand der Mineralisation (Dichte) und der Reservoirtemperatur berechnet.

2.4 Abwärmepotential und Wärmespeicher in Thüringen

2.4.1 Industrielle Überschusswärme

Überschuss- bzw. Abwärme ist Bestandteil von zahlreichen mechanischen und thermischen Prozessen in der Industrie/Wirtschaft, womit diese ohne zusätzlichen Flächenverbrauch einhergeht. Gegenwärtig geht ein großer Teil dieser industriellen, stark branchenabhängigen Abwärme ungenutzt verloren. Das größte Potential hinsichtlich verfügbarer Abwärme entsteht bei der Herstellung von Glas und Keramik, Papier/Pappe sowie Metall. Eine Auswahl der bislang 412 im Abwärmekataster erfassten Unternehmen, die Abwärme zur Verfügung stellen können (Stand 2016), ist in Tabelle 4 aufgelistet und in Abbildung 15 kartographisch dargestellt. Das Abwärmepotential in Thüringen liegt bei etwa 4.050 GWh/a (Stand 2014) und beträgt im Ergebnis zahlreicher Studien zwischen 18 % und 30 % des Energieeinsatzes im verarbeitenden Gewerbe. Dieses theoretische Potential berücksichtigt keine weiteren Abwärmequellen aus dem Sektor „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“. Die technische Nutzbarmachung dieser Abwärme erfolgt in erster Linie mittels Wärmetauscher. Der Wirkungsgrad eines Wärmetauschers ist abhängig von dem Wärmedurchgangskoeffizienten des Wärmeübertragungsmaterials, der Wärmeübertragungsfläche sowie dem Temperaturunterschied der beiden Medien (PEHNT 2010, WALDHOFF & RECKZÜGEL 2014, THEGA THÜRINGER ENERGIE- UND GREENTECH-AGENTUR 2018). Da die Abwärme häufig nicht gleichzeitig mit dem Wärmebedarf anfällt, sind Wärmespeicher grundsätzlich sinnvoll. Aquiferspeicher können in diesem Zusammenhang im Vergleich zu anderen thermischen Energiespeicheranlagen (s. Kapitel 2.1.1.6) eine relativ kostengünstige und platzsparende Lösung darstellen.

Tabelle 4 Auswahl an thüringischen Unternehmen mit bedeutenden Abwärmemengen (Quelle: Abwärmekataster, Stand 2016)

Unternehmen	Lokalität	Abwärme-menge [MW/a]	Mittlere Prozess-temperatur [°C]	Branche
Erdgasverdichterstation Rückersdorf	Rückersdorf	103.144	570	Gasverteilung durch Rohrleitungen
Zellstoff- und Papierfabrik Rosenthal GmbH	Blankenstein	70.420	224	Holz- und Zellstoffherstellung
Glaswerk Ernstthal GmbH	Lauscha	58.141	352	Hohlglasherstellung
Stahlwerk Thüringen GmbH	Unterwellen-born	32.301	412	Erzeugung von Roheisen, Stahl u. Ferrolegierungen
Werra Papier Wernshausen GmbH	Schmalkalden	29.383	202	Papier-, Karton- und Pappeherstellung
Stadtwerke Arnstadt/Triniusstr.	Arnstadt	24.312	409	Wärme- und Kälteversorgung
GD Gotha Druck und Verpackung GmbH & Co. KG	Günthersleben -Wechmar	22.546	286	Drucken von Zeitungen
Wienerberger GmbH Werk Eisenberg / Th.	Eisenberg	18.216	197	Herstellung von Ziegeln und sonstiger Baukeramik
DEUSA International GmbH Sol-Bergwerk	Kehmstedt	14.491	120	Gewinnung von Salz
Heizkraftwerk Jena Süd	Jena	11.535	117	Heizkraftwerk Jena Süd

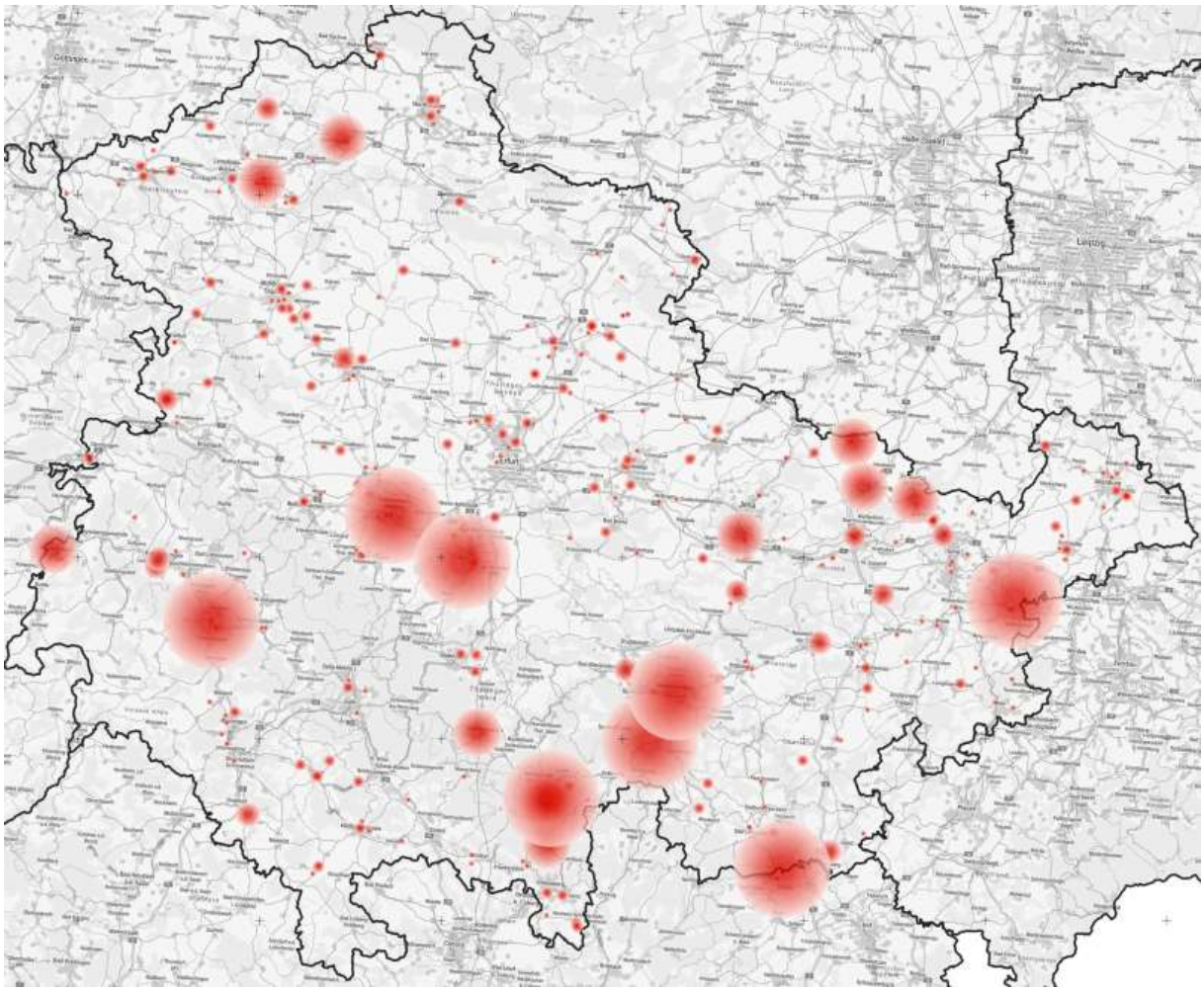


Abbildung 15 Verteilung der bekannten bzw. verfügbaren Abwärmequellen in Thüringen (Quelle: Abwärmekataster Thüringen, Stand 2016)

2.4.2 Bestehende Wärmespeicher-Anlagentechnik

Laut einer Energiespeicherstudie vom August 2019 existieren in Thüringen zwei Behälterspeicher (TTES) für (Fern-)Wärme, die sich in Jena (Volumen 13.000 m^3, Speicherkapazität ca. 480 MWh) und in Erfurt (Volumen 7.500 m^3, Speicherkapazität 250 MWh) befinden. Beide Energiespeicher sind oberflächliche, sensible Wärmespeicher, die daher das Potential des Untergrundes nicht ausnutzen. Darüber hinaus wird angenommen, dass auch kleinere Wärmespeicher in der Industrie, in Privathaushalten und im Handels-/Gewerbebereich Anwendung finden. Da diese jedoch keine Anmeldung benötigen, konnte ihr Anteil bei der Berechnung der Gesamtspeicherkapazitäten Thüringens nicht berücksichtigt werden (STOLZE et al. 2019).

Die Nutzung der oberflächennahen Geothermie hat in den letzten Jahren u. a. in Form von Erdwärmesonden und -kollektoren oder Brunnenbohrungen im Zusammenspiel mit Wärmepumpen stetig an Bedeutung gewonnen. So wurden bislang rund 32.000 Sonden und Kollektoren installiert (THÜRINGER ERNEUERBARE ENERGIEN NETZWERK E.V. 2021). Jedoch werden nach aktuellem Kenntnisstand in Thüringen bisher keine Aquifere zur untertägigen Wärmespeicherung genutzt.

3 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen

3.1 Politische Rahmenbedingungen

Der Bau und die Verbreitung von ATES-Systemen können neben den o. g. geologisch-geographischen Verhältnissen (siehe u. a. ATES in Belgien) auch aufgrund juristischer bzw. politischer Hürden eingeschränkt werden. Am Beispiel der Niederlande sind nachfolgend einige wichtige Fragestellungen bzw. Herausforderungen aufgeführt, bei denen ein juristischer Ansatz nötig war (DRIJVER & GODSCHALK, B. 2018):

1. Klärung der Eigentumsrechte von Wärme und Kälte im Untergrund
2. Entwicklung von ATES-spezifischen Verordnungen
3. Standardisierung der Prozesse für die Förderung, die Genehmigung, den Bau und den kontrollierten Betrieb von ATES-Systemen
4. Vereinfachung von unnötig komplizierten Kontrollen der Effekte eines ATES-Systems auf die Umwelt
5. Die Optimierung eng nebeneinanderliegender privater ATES-Systeme
6. Umgang mit Transport von Schadstoffen im Untergrund

Diese Probleme wurden in den Niederlanden erfolgreich gelöst, was den exponentiellen Anstieg in der Verbreitung von ATES-Systemen und die damit verbundene Annäherung an die Klimaziele der Niederlande unterstützt hat.

Insbesondere für HT-ATES-Projekte stellen die Trägheit der Systeme in Verbindung mit saisonalen Schwankungen des Energieangebots und der Energienachfrage sowie sich ändernde Nutzungskonzepte große Herausforderungen dar. Darüber hinaus ist es jedoch von entscheidender Bedeutung mit weiteren Demonstrationsprojekten die Akzeptanz bei Entscheidungsträgern aus Politik, Gebäudeplanung und Energiewirtschaft zu erhöhen. Zudem bedarf es der Vereinfachung genehmigungsrechtlicher Anforderungen, wofür u. a. der Einfluss der Speichertemperatur (> 20 °C) auf die Ökologie und Geochemie des Grundwassers weiter erforscht werden muss. Anreizprogramme und Fördermaßnahmen beschränken sich in Deutschland oftmals auf Machbarkeitsstudien und sollten daher ausgeweitet, für spezifische Speichertechnologien konkretisiert und schlussendlich transparent gestaltet werden. In geothermischen Anwendungen findet die Risikobetrachtung oft wenig Beachtung, weshalb zukünftig geeignete Methoden entwickelt und die Projektbeteiligten dafür sensibilisiert werden müssen. Hierzu zählt neben den technischen Risiken insbesondere die Betrachtung legislativer, sozialer und politischer Faktoren. (FLEUCHAUS et al. 2021).
HAEHNLEIN et al. (2010) bewerteten hingegen positiv, dass in Deutschland Empfehlungen aufgrund des Wasserhaushaltsgesetzes und Bundesberggesetzes in vielen Bereichen der Nutzung flacher Geothermie bereits vorhanden sind. Baden Württemberg war hierbei das erste Bundesland mit Richtlinien für offene geothermische Systeme (UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG 2009). Dennoch ist die Genehmigungspraxis für Geothermie-Anlagen bislang recht komplex. Der Bundesverband Geothermie e.V. und ein Ausschuss des Bundesrates empfehlen daher, dass im Zuge der anstehenden Novellierung des Bundesberggesetztes (BBergG) folgende Änderungen vorgenommen werden:

1. Regelungen zur oberflächennahen Geothermie sollen außerhalb des Bundesberggesetzes festgelegt werden, sodass die Realisierung einer Anlage um einiges erleichtert wird.
2. Regulatorisch soll es nun möglich sein, im selben Gebiet in verschiedenen Tiefen die verschiedenen Arten von Geothermie gleichzeitig zu nutzen, sofern es technisch und geologisch realisierbar ist.
3. Beschleunigungen in den Genehmigungsverfahren sind ebenfalls geplant. Insbesondere sollen Hauptbetriebspläne für Anlagen von zwei auf vier Jahre verlängert werden, sodass die Investitions- und Planungssicherheit in verbessertem Maße gewährleistet ist.

Für eine weitere Reduzierung des Verwaltungsaufwandes schlägt der Bundesverband Geothermie u. a. vor, dass oberflächennahe Geothermie bis 400 m Tiefe (bisher bis 100 m Tiefe) nur dem Wasserecht unterliegt, und nicht wie bislang auch dem Bergrecht unterworfen ist. Mögliche Nutzungskonflikte könnten wie bei sonstigen Gewässernutzungen durch das Wasserrecht und das Nachbarrecht in ausreichendem Maße geregelt werden (BUNDESVERBAND GEOTHERMIE E.V. 2021).

3.2 Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen

Geeignete Standorte zur Wärmespeicherung sind vor dem Hintergrund genehmigungsrechtlicher Bedingungen zu betrachten. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Nutzung von Untergrundwärmespeichern hinsichtlich dieser Voraussetzungen behandelt.

Der Betrieb von Untergrundspeichern erfordert die Einrichtung über- und untertägiger Infrastruktureinrichtungen. Hierbei sind einerseits Raumwiderstände zu beachten, die in Form von konkurrierenden Nutzungsansprüche aus dem Baugesetzbuch (BauGB) und gegenwärtig noch aus dem Bundesberggesetzt (BBergG) hervorgehen. Bestrebungen zur Änderung der Regelungen des genehmigungsrechtlichen Umgangs oberflächennaher Geothermie (bis 400 m Tiefe) außerhalb des Bundesberggesetzes sind derzeit im Gange (siehe Kapitel 3.1). Des Weiteren sind Raumwiderstände infolge gesetzlich privilegierter Schutzgüter zu berücksichtigen, welche durch das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) und das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) geregelt sind. Sonderbestimmungen wie jene des Fischereirechts oder des Strahlenschutzrechts können hinzutreten.
Die Summe aller ausschließenden und einschränkenden Einflussfaktoren, vor allem der Natur- und Wasserschutzzonen, können die Nutzungspotentiale des Thüringer Untergrunds einschränken. Eine Untergliederung dieser Faktoren in Bereiche, für die eine Nutzung als Untergrundspeicher ‚nicht möglich' ist, und in solche, für die eine Einzelfallprüfung erforderlich wird, erlaubt jedoch eine differenziertere Betrachtung und Relativierung (Tabelle 5).
Eine synoptische Zusammenfassung der Ausschluss- und Restriktionsräume ist in Anlage 4.1 dargestellt. Nachfolgend werden die ausschließenden und einschränkenden Restriktionen für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zum Zwecke eines Untergrundspeichers detailliert erläutert.

Tabelle 5 Zusammenfassung der derzeit ausschließenden und einschränkenden Einflussfaktoren für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zum Zwecke der Untergrundspeicherung (HESSE et al. 2014)

‚nicht möglich' (Ausschlüsse)	- Heilquellenschutzgebiete - Wasserschutzzone I - Naturschutzgebiete - Nationalparke/ Nationale Naturmonumente
‚nur mit Einzelfallprüfung möglich' (Restriktion)	- Wasserschutzzonen II und III - Überschwemmungsschutzgebiete - Biosphärenreservate - Landschaftsschutzgebiete - Naturparke - Geschützte Landschaftsbestandteile und Biotope - Netz „Natura 2000" - Bergbauliche Restriktionen

3.2.1 Wasserschutz- und Überschwemmungsgebiete

Die rechtlichen Rahmenbedingungen zu Wasserschutz- und Überschwemmungsgebieten sind im Wasserhaushaltsgesetz geregelt. Dem Schutz des Grundwassers ist stets Vorrang einzuräumen.
Grundwassergefährdungen sind durch die Bohrtätigkeiten in Form von Stoffeinträgen (z. B. Bohrspülungszusätze, Kraft- und Schmierstoffe, andere wassergefährdende Stoffe), das Verbinden verschiedener Grundwasserstockwerke (hydraulischer Kurzschluss) oder eine Beschaffenheitsänderung des Grundwassers nicht gänzlich auszuschließen. Schädliche Veränderungen des Grundwassers durch Stoffeintrag sind infolge der Speichertätigkeit selbst (Förderung und Reinjektion von Formationswasser) eher nicht zu erwarten. Die wesentliche juristische Grundlage zum Gewässer- und Grundwasserschutz, auch für die Errichtung und den Betrieb von Untergrundspeichern, bilden bundesweit das WHG und diesem untergeordnet die landesrechtlichen Wassergesetze (LWG, hier: Thüringer Wassergesetz). Darüber hinaus sind die Bestimmungen der jeweiligen Wasserschutzgebietsverordnungen zu berücksichtigen.
Grundwasservorkommen, die in Qualität und Quantität der Gewinnung von Trinkwasser genügen, besitzen meist einen Schutzstatus. Dazu sind zum Schutze des Grundwasservorkommens in ihrem Sicherheitsniveau unterschiedlich gestaffelte Schutzzonen eingerichtet.
Auf den Flächen, die den Trinkwasserschutzzonen I und II zugeordnet sind, gelten ausschließende oder stark restriktive Nutzungseinschränkungen (ca. 3,4 % der Landesfläche Thüringens). Die Gesamtfläche an Trinkwasserschutzzonen beträgt mit 3.172 km² knapp 20 % der Landesfläche Thüringens (siehe Anlage 4.2). In der Schutzzone III ist eine Einzelfallprüfung aller Aktivitäten mit Umweltrelevanz erforderlich.
Die Errichtung von Untergrundspeichern ist genehmigungspflichtig und bedarf eines erweiterten Prüf- und Genehmigungsverfahrens mit dem Ausschluss von umweltrelevanten Beeinflussungen des Grundwassers in Güte und Menge.

Die Autoren empfehlen, in den ausgewiesenen Heilwasserschutzzonen Thüringens möglichst auf die Errichtung und den Betrieb zu verzichten, um unvorhersehbare Einflussnahmen auf Heilwasserquellen und Förderbrunnen auszuschließen.
Innerhalb von Überschwemmungsgebieten sind bauliche Anlagen nach § 78 Abs. 1 Nr. 2 WHG (bis auf Ausnahmeregelungen) unzulässig. Die zuständige Behörde kann bauliche Anlagen genehmigen, wenn im Einzelfall das Vorhaben die Hochwasserrückhaltung nicht oder nur unwesentlich beeinträchtigt, der Verlust von verlorengehendem Rückhalteraum zeitgleich ausgeglichen wird, Wasserstand und Abfluss bei Hochwasser nicht nachteilig verändert werden, das Vorhaben den bestehenden Hochwasserschutz nicht beeinträchtigt, die Anlage hochwasserangepasst ausgeführt wird oder wenn die nachteiligen Auswirkungen durch Nebenbestimmungen ausgeglichen werden können. Die Flächen sind in Anlage 4.2 dargestellt.

Tabelle 6 Auszüge aus dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) (Hesse et al. 2014)

Gesetz	Kurzfassung des Gesetzesauszuges	Bedeutung für einen Untergrundspeicher
WHG		
§ 52 Abs. (1) Besondere Anforderungen in Wasserschutzgebieten	zuständige Behörde kann eine Befreiung von Verboten oder Beschränkungen erteilen, wenn der Schutzzweck nicht gefährdet wird oder überwiegende Gründe des Wohls der Allgemeinheit dies erfordern	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	keine Bebauungsmöglichkeiten, nur für Betriebs- und Überwachungspflichten	Diese Gebiete werden ausgeschlossen.
§ 78 Abs. (3) Besondere Schutzvorschriften für festgesetzte Überschwemmungs-gebiete	zuständige Behörde kann bauliche Anlagen genehmigen, wenn im Einzelfall das Vorhaben die Hochwasserrückhaltung nicht oder nur unwesentlich beeinträchtigt und der Verlust von verloren gehendem Rückhalteraum zeitgleich ausgeglichen wird, Wasserstand und Abfluss bei Hochwasser nicht nachteilig verändert und bestehenden Hochwasserschutz nicht beeinträchtigt wird und die Anlage hochwasserangepasst ausgeführt wird oder wenn die nachteiligen Auswirkungen durch Nebenbestimmungen ausgeglichen werden können	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist eine Bebauung möglich.

3.2.2 Natur- und Landschaftsschutz

Die Sicherung und Entwicklung des reichen Naturerbes von Thüringen erfolgen durch die Ausweisung von Schutzgebieten, in denen eine Bebauung untersagt oder eingeschränkt ist. Schutzgebiete unterscheiden sich in Größe, Schutzzweck, Schutzziel und daraus abzuleitenden Nutzungsein-schränkungen und werden in Kategorien wie Naturschutzgebiete, Naturparks, Nationalparks oder

Biosphärenreservate untergliedert. Diese Schutzgebietskategorien sind im BNatSchG verankert und können sich räumlich in Ihrer Ausdehnung überschneiden, weshalb eine rein summarische Angabe der Gesamtfläche nicht möglich ist. Im Jahre 2019 betrug der Anteil der *Naturschutzgebiete* 44.543 ha (2,7 % der Landesfläche Thüringens). In Thüringen gibt es derzeit 54 *Landschaftsschutzgebiete* mit einer Gesamtfläche von 386.800 ha, was einem Anteil an der Landesfläche von 23,9 % entspricht. Die beiden *Biosphärenreservate* ‚Rhön' und ‚Thüringer Wald' nehmen mit einer Gesamtfläche von 82.582 ha etwa 5,1 % der Landesfläche ein. Der *Nationalpark* Hainich verfügt über eine Fläche von 7.500 ha, was 0,5 % der Landesfläche entspricht. Die 5 bestehenden Naturparke besitzen flächenmäßig mit 434.000 ha bzw. 26,8 % der Landesfläche den größten Anteil. Das europäische Schutzgebietssystem „Natura 2000" setzt sich zusammen aus den europäischen Vogelschutzgebieten und den FFH(Fauna-Flora-Habitat)-Gebieten der europäischen Union. Die gesamte Fläche des Schutzgebietsnetzes „Natura 2000" betrug in Thüringen im Jahre 2007 272.268 ha (16,8 % der Landesfläche) (THÜRINGER MINISTERIUM FÜR UMWELT 2019). Im bestehenden Schutzgebietssystem sind diese Gebiete in Abhängigkeit von der Schutzbedürftigkeit nach naturschutzfachlichen Kriterien erfasst (vgl. Tabelle 7). Tabelle 8 zeigt eine Übersicht über wesentliche Punkte des Thüringer Naturschutzgesetzes, die von Bedeutung für die Untergrundspeicherung sind. Das Thema ‚Schutzgebiete in Thüringen' ist in den Anlagen 41 und 4.2 dargestellt.

Tabelle 7 Auszüge aus dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) und deren Bedeutung für die Untergrundspeicherung (HESSE et al. 2014)

Gesetz	Kurzfassung des Gesetzesauszuges	Bedeutung für ein Untergrundspeicher
BNatSchG		
§ 23 Naturschutzgebiete	keine Bebauungsmöglichkeiten	Alle Handlungen, die zu einer Zerstörung, Beschädigung oder Veränderung führen können, sind verboten.
§ 24 Nationalparke, Nationale Naturmonumente		
§ 25 Abs. (3) Biosphärenreservate	unter Berücksichtigung der durch die Großräumigkeit und Besiedlung gebotenen Ausnahmen unter Auflagen eine Bebauung möglich	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist ein Vorhaben möglich.
§ 26 Abs. (2) Landschaftsschutz-gebiete	alle Handlungen verboten, die den Charakter des Gebietes verändern oder dem besonderen Schutzzweck zuwiderlaufen	Eine Bebauung ist nur bei einer Eingliederung in die umgebende Landschaft möglich.
§ 27 Abs. (1) Nr. 2 Naturparke	Naturparke sind überwiegend Landschaftsschutzgebiete oder Naturschutzgebiete	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist ein Vorhaben möglich.

Gesetz	Kurzfassung des Gesetzesauszuges	Bedeutung für ein Untergrundspeicher
BNatSchG		
§ 29 Abs. (2) Geschützte Landschafts-bestandteile	Zerstörung, Beschädigung oder Veränderung kann die Verpflichtung zu einer angemessenen Ersatzpflanzung oder zur Leistung von Ersatz in Geld vorgesehen werden	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist ein Vorhaben möglich.
§ 30 Abs. (3) Gesetzlich geschützte Biotope	von den Verboten kann auf Antrag eine Ausnahme zugelassen werden, wenn die Beeinträchtigungen ausgeglichen werden können	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist ein Vorhaben möglich.
§ 33 Abs. (1) Allgemeine Schutzvorschriften („Natura 2000“)	die für Naturschutz und Landschaftspflege zuständige Behörde kann Ausnahmen von dem Verbot zulassen	Eine Bebauung in diesen Gebieten sollte vermieden werden, aber unter Auflagen ist ein Vorhaben möglich.
§ 34 Abs. (3) Verträglichkeit und Unzulässigkeit von Projekten; Ausnahmen	abweichend darf ein Projekt nur zugelassen werden, soweit es aus zwingenden Gründen des überwiegenden öffentlichen Interesses notwendig ist und zumutbare Alternativen mit geringeren Beeinträchtigungen nicht gegeben sind	Wenn Alternativen nicht gegeben sind, könnte das Vorhaben durch ein zwingendes öffentliches Interesse zugelassen werden.
§ 34 Abs. (4) Verträglichkeit und Unzulässigkeit von Projekten; Ausnahmen	als zwingende Gründe des überwiegenden öffentlichen Interesses können günstige Auswirkungen des Projekts auf die Umwelt geltend gemacht werden	Untergrundspeicher stellen als Systemkomponente zur Verbesserung der Grundlast-fähigkeit Erneuerbarer Energien ein großes Potential für günstige Auswirkungen auf unsere Umwelt.

Tabelle 8 Auszüge aus dem Thüringer Naturschutzgesetztes (ThürNatG) (Hesse et al. 2014)

Gesetz	Kurzfassung des Gesetzesauszuges	Bedeutung für ein Untergrundspeicher
ThürNatG		
§ 7 Abs. (2) Genehmigung von Eingriffen	der Verursacher eines Eingriffs ist zu verpflichten, vermeidbare Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft zu unterlassen sowie unvermeidbare Beeinträchtigungen durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege vorrangig auszugleichen (Ausgleichsmaßnahmen)	Die Eingriffe (z.B. Zerstörungen durch den Anlagenbau und optische Einschränkungen durch Anlagenteile), welche nicht vermeidbar sind, müssen ausgeglichen werden.

Gesetz	Kurzfassung des Gesetzesauszuges	Bedeutung für ein Untergrundspeicher
ThürNatG		
§ 7 Abs. (3) Genehmigung von Eingriffen	unvermeidbare Beeinträchtigungen, die nicht ausgleichbar sind, sind vom Verursacher in sonstiger Weise zu kompensieren (Ersatzmaßnahmen)	Wenn kein Ausgleich möglich ist, müssen die Eingriffe durch Ersatzmaßnahmen (Ersatz-pflanzungen, Aufforstung, etc.) ausgeglichen werden.
§ 26 b Abs. (1) Verträglichkeit und Unzulässigkeit von Projekten, Ausnahmen („Natura 2000“)	Projekte sind vor ihrer Zulassung oder Durchführung auf ihre Verträglichkeit mit den Erhaltungszielen eines Gebiets von gemeinschaftlicher Bedeutung oder eines Europäischen Vogelschutzgebiets zu überprüfen	Die Auswirkungen der Eingriffe dürfen die geschützten Tierarten nicht gefährden.

3.2.3 Immissionsschutz

Eine immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht gilt weder für über- noch für untertägige Anlagenteile (§ 4 Abs. 2, Satz 1 Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG). Die Vorgaben § 22 BImSchG sind zu realisieren. Für Tiefbohrarbeiten sind Sonderregelungen hinsichtlich der Wochenend- und Nachtarbeit zu beachten.

Für Dampf- oder Warmwasserrohrleitungen ab 5 km Länge oder weniger als 5 km Länge im Außenbereich besteht Planfeststellungs- oder -genehmigungspflicht gemäß dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung.

Signifikante Auswirkungen einer Temperaturerhöhung auf die Qualität des Grundwassers und die mikrobielle Diversität sind insbesondere bei bestehenden Hintergrundbelastungen (erhöhte Konzentrationen an organischen Verbindungen, Nährstoffen bzw. Schwermetallen) beobachtet worden. In diesen Fällen wird bereits im Zuge des Zulassungsverfahrens empfohlen, entsprechende thermische Auswirkungen durch ein begleitendes Monitoring abzuschätzen (Griebler et al. 2014).

3.2.4 Bergrecht

Bohrungen mit Bohrstrecken über 100 m sind der zuständigen Stelle nach § 127 Bundesberggesetz (BBergG) anzuzeigen.

Gemäß § 4 Abs. 9 BbergG ist ein Untergrundspeicher „eine Anlage zur unterirdischen behälterlosen Speicherung von Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen mit Ausnahme von Wasser“. Die unterirdische Speicherung von (Wärme-)Energie selbst unterliegt damit **nicht** den Vorschriften des Bundesberg-gesetzes.

Eine bergrechtlich relevante Gewinnung von Erdwärme ist erst dann gegeben, wenn aufgrund der Wärmebilanz Speicherung/Entnahme bei der Speicher-Entladung mit einem Anteil *geogener Erdwärme* zu rechnen ist.

Rechte Dritter sind als Restriktion einzelfallbezogen zu bewerten.

3.2.5 Bauplanung

Angesichts der umwelt- und energiepolitischen Intentionen zur Nutzung Erneuerbarer Energien hat in den vergangenen Jahren insbesondere die Windenergie eine zunehmende Rolle übernommen. Die bauplanerische Zulässigkeit von Energieanlagen beurteilt sich nach § 35 Abs. 1 BauGB (Privilegierung). Nach § 35 Abs.1 Nr. 3 BauGB sind Vorhaben der Bebauung im Außenbereich für eine öffentliche Versorgung mit Energie bei ausreichender Erschließung zulässig.

Tabelle 9 Auszüge aus dem Baugesetzbuch (BauGB)

Gesetz	Kurzfassung des Gesetzesauszuges	Bedeutung für ein Untergrundspeicher
BauGB		
§ 35 Abs. (1) Nr. 3 Bauen im Außenbereich	Vorhaben ist zulässig, wenn es der öffentlichen Versorgung mit Elektrizität oder Wärme dient	Errichtung im Außenbereich ist zulässig, da es der öffentlichen Versorgung mit Energie dient.
§ 35 Abs. (3) Nr. 5-6 Bauen im Außenbereich	Belange des Naturschutzes, der Landschaftspflege, das Orts- und Landschaftsbild und bestehender Hochwasserschutz dürfen nicht verunstaltet oder gefährdet werden	Die Anlagen müssen sich in seine Umgebung optisch eingliedern und die Umwelt darf nicht negativ beeinflusst werden.

4 Geologischer Überblick - Stockwerkgliederung in Thüringen

4.1 Grundgebirgsstockwerk

Das Grundgebirgsstockwerk tritt im Wesentlichen im Thüringer Schiefergebirge zu Tage. Im westlich anschließenden Thüringer Wald ist es an Hochlagen wie das Ruhlaer Kristallin, das Grundgebirge von Schmiedefeld/Vesser und Ilmenau sowie die Suhler Scholle und den Schleuse-Horst gebunden. Darüber hinaus ist im Kyffhäuser (Thüringer Becken) und im Kleinen Thüringer Wald (Südwestthüringischen Triasgebiet) infolge tektonischer Prozesse das Grundgebirge oberflächlich anstehend (siehe Anlage 1).

Das Grundgebirgsstockwerk besteht aus sedimentären und magmatischen Gesteinen unterschiedlicher Genese von jungproterozoischem bis unterkarbonischem Alter. Durch die variszische Gebirgsbildung vor ca. 380 Ma bis 330 Ma erfolgte seine strukturelle und mineralfazielle Überprägung. Dadurch liegt es als vorwiegend NE-SW streichende, tektonisch stark deformierte, undeutlich bis stark regionalmetamorph beanspruchte Gesteinsfolge mit dominierend SE-vergenter Hauptschieferung vor. Es gehört fast ausschließlich zum Saxothuringikum (Peri-Gondwana).

Die Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) stellt eine *strike-slip*-Sutur zwischen Rhenoherzynischer Mikroplatte (East-Avalonia) und Saxothuringikum dar. Die Verformungsaufteilung am Rand der Sutur bedingte ein Nebeneinander von Dehnung, Absenkung und Krustenstapelung im Bereich der MKZ. Die MKZ bildet den NW-Rand des Saxothuringikums und trennt die anchimetamorph bis grünschieferfaziell beanspruchten Einheiten des Saxothuringikums von den ebenfalls niedriggradig metamorphen Einheiten des Rhenoherzynikums, welches im NW ab der Linie Treffurt/Nordhausen mit NW-vergenter Hauptschieferung folgt. Im Ruhlaer Kristallin und im Kyffhäuser tritt die Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) zutage. Sie enthält hochmetamorphe bis migmatitische Gesteine, durchsetzt mit partiell anatektischen Granitoiden. Edukte sind Magmatite oder Sedimentite von wahrscheinlich proterozoischem bis unterdevonischem Alter. Die Obergrenze des Grundgebirgsstockwerks bildet die variszische Diskordanz zum Übergangs- bzw. Tafeldeckgebirgsstockwerk.

Potentielle Speichergesteine beschränken sich auf spröde-elastisch reagierende Gesteinseinheiten und darin enthaltene, deformationsbedingte Verwerfungen und Kluftzonen. Da diese schwer zu explorieren sind und meist nur kleine Volumina besitzen, sind diese praktisch nicht nutzbar (HUCKRIEDE & ZANDER 2011). In Südthüringen sind ehemals genutzte CO_2-Lagerstätten im Grundgebirge ausgebildet (KÄSTNER 1994).

4.2 Übergangsstockwerk

Im Anschluss an die variszische Gebirgsbildung erfolgte eine Heraushebung SW-NE verlaufender Gebirgsstränge, verbunden mit der Ausbildung intramontaner Tröge mit zeitlich variierenden Konturen. Durch NW-SE orientierte Senkungsstrukturen entstanden auch Teiltröge, die quer zur NE-SW streichenden variszischen Hauptrichtung verliefen. Das Abtragungsmaterial des variszischen Gebirges sammelte sich in den Trögen. Aus der Versenkung und Aufschmelzung von Krustenteilen entstandene Schmelzen drangen an tiefreichenden Brüchen als saure oder intermediäre, seltener auch

basische Vulkanite, auf und bildeten Decken, Stöcke und Gänge oder pyroklastische Bildungen, die sich miteinander oder mit den Sedimenten der Becken verzahnten.
Zwischen den Gebirgssträngen begann die tektonisch damit verbundene MKZ allmählich, vom Raum Halle in südwestlicher Richtung fortschreitend, einzusinken. Am vollständigsten ist das Übergangsstockwerk im Saale-Trog entwickelt, welcher etwa auf dem Zentrum der abgesunkenen MKZ liegt. Nach SW setzt sich der Saale-Trog in der Oberhöfer Mulde und dem Meininger bzw. Fränkischen Trog fort. Der Saale-Trog ist im Bereich der Hermundurischen Scholle und südlich davon durch ein Querelement gegliedert. Seine Begrenzung wird wohl durch intrapermosilesische Bruchtektonik bestimmt worden sein. Im Bereich dieses Querelementes sind im Permosiles sehr wahrscheinlich auch Vulkanite vorhanden. Etwa parallel zum Saale-Trog folgen im Westen Ilfelder, Mühlhausener, Eisenacher und Werra-Trog. Kleinere, vorwiegend durch Störungen begrenzte Tröge liegen bei Stockheim, Rudolstadt, Pößneck und Gera. Das Rotliegende von Altenburg ist in einem einheitlichen Bildungsraum mit dem Rotliegend der Vorerzgebirgssenke entstanden.
Die Gesteine des Übergangsstockwerks werden in das höchste Oberkarbon bis in das permische Oberrotliegend eingestuft. Überwiegend konkordant beginnt darüber mit dem Zechstein das Tafeldeckgebirgsstockwerk.
Während die Sedimente des Oberkarbons und Unterrotliegend vorwiegend tonig, schlecht sortiert und stark zementiert sind, sind im höheren Oberrotliegend auch gut sortierte Sandsteine bekannt, die teilweise Nutzporositäten über 10 % aufweisen. Nur diese Sandsteine kommen als Speichergesteine in Frage (Huckriede & Zander, 2011).

4.3 Tafeldeckgebirgsstockwerk

Im Germanischen Becken gebildete Sedimente von Zechstein, Trias, Jura und Kreide bilden das Tafeldeckgebirgsstockwerk Thüringens (Anlage 1). Die Ablagerungen des Zechsteins und teilweise auch des Buntsandsteins zeigen, dass der zeitlich unterschiedlich verlaufende ESE-Rand des Germanischen Beckens in der Nähe von S- und E-Thüringen, der Zeitz-Schmöllner Mulde und des Altenburger Sattels lag. Die SSW-NNE-streichende Eichsfeld-Altmarkschwelle mit Faziesänderungen, reduzierten Mächtigkeiten und Schichtlücken in Zechstein und Trias trennt den Südteil des Germanischen Beckens in die Hessische und die Thüringische Senke (Hesse et al. 2014).
Die Sedimente des Zechsteins wie auch des Muschelkalks, des Lias und der Oberkreide sind marinen Ursprungs. Vorwiegend kontinentale Verhältnisse herrschten im Buntsandstein und im Keuper. Salinargesteine treten vor allem im Zechstein, untergeordnet auch in der Trias auf.
Im Tafeldeckgebirgsstockwerk dominieren NW-SE- und NNE-SSW-streichende Elemente (siehe auch Abbildung 16). Herausgehobene Schollen wie Thüringer Wald, Thüringisches Schiefergebirge, Harz und Kyffhäuser sowie eingesunkene Schollen wie Thüringer Becken und Südwestthüringisches Triasgebiet prägen weitgehend den heute sichtbaren geologischen Bau Thüringens. Die Ausbildung von Speicherstrukturen ist maßgeblich an NW-SE-streichende Sattelstrukturen innerhalb des Tafeldeckgebirges gebunden. Insbesondere die Abfolge von Gesteinseinheiten mit hohen Porositäten und offenen Klüften, wie z. B. den Karbonaten des Zechsteins und den Sandsteinen des Buntsandsteins, überlagert durch mächtige Steinsalzablagerungen mit wirksamen Barriereeigenschaften, bilden die natürlichen Voraussetzungen für bergbausichere Untergrundspeicherstrukturen.

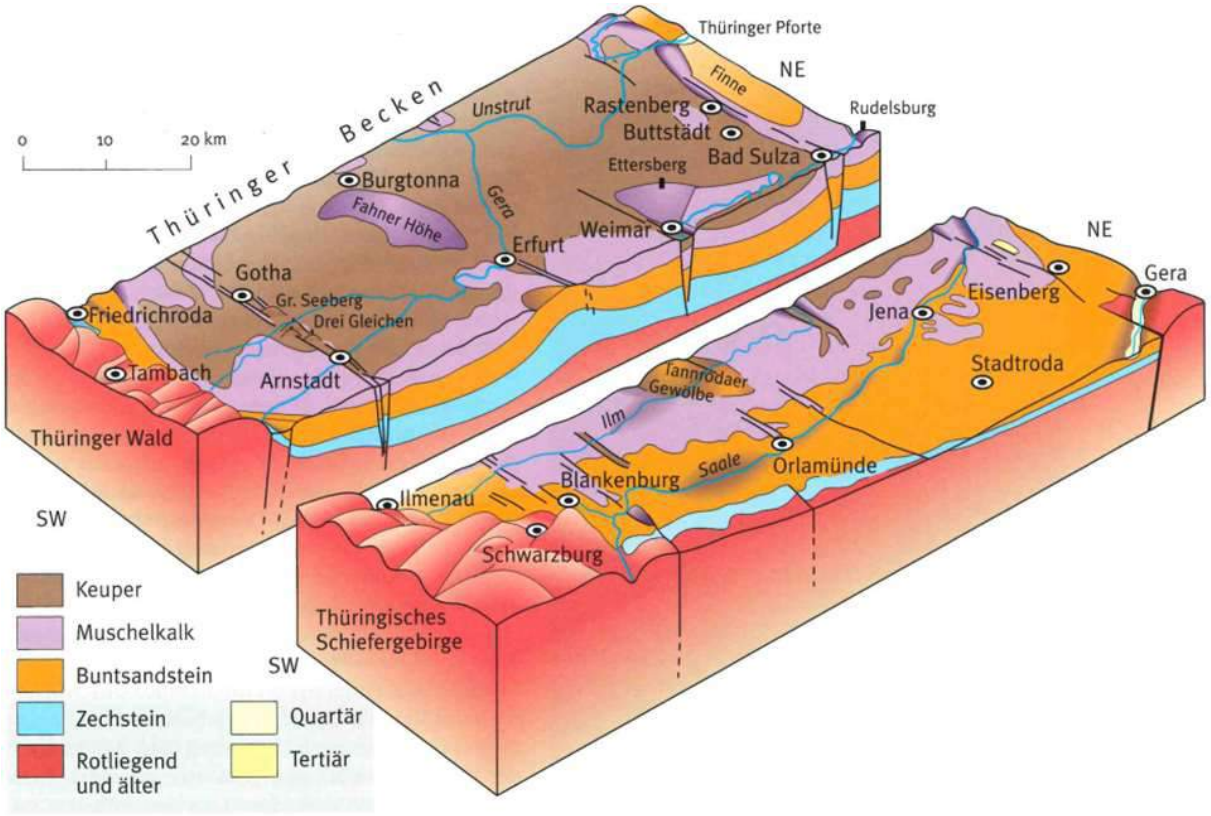


Abbildung 16 Vereinfachtes geologisches Blockbild des Tafeldecksgebirges im Thüringer Becken (aus ROTHE 2005, nach WAGENBRETH & STEINER 1990)

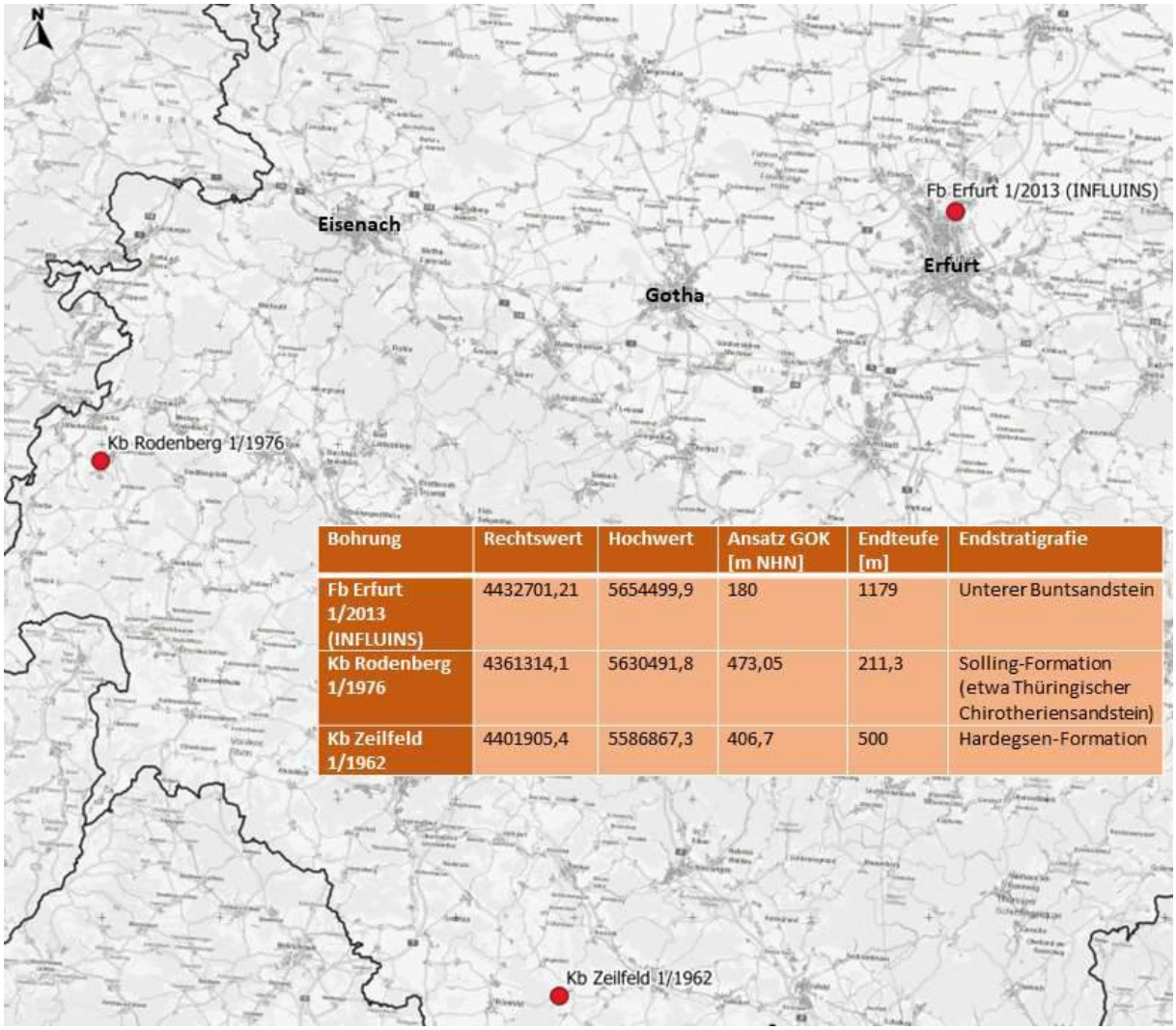
4.4 Lockergesteinsstockwerk

Die känozoischen Verwitterungsprodukte sind als jüngste geologische Bildung aus sämtlichen älteren Stockwerken Thüringens und der weiteren Umgebung hervorgegangen. Sie sind meist geringmächtig in unzusammenhängenden Deckschichten flächendeckend vertreten. Lediglich in kleineren Beckenstrukturen wie dem Weißelsterbecken und Bereiche in der Umgebung des Kyffhäusers sowie im Werragebiet und der sich anschließenden Vorderrhön kam es zur Ablagerung mächtigerer fluviatiler Sedimente (SEIDEL, G. 1995). Durch Auslaugungsprozesse in Zechsteinsalzen bildeten sich Senken, wie z. B. die Goldene Aue südöstlich von Nordhausen, die Unstrut-Helme-Aue bei Artern oder die Werra-Aue zwischen Ettmarshausen (Wartburgkreis) und Wernshausen (Landkreis Schmalkalden-Meiningen). Im Quartär wurden diese Senkungsgebiete infolge fluviatiler Prozesse mit bis zu 150 m mächtigen Terrassensedimenten aufgefüllt (WAGENBRETH & STEINER 1990), die heute zum Teil für die Kiesgewinnung genutzt werden (z. B. Kieswerk Heringen).

5 Methodische Grundlagen

5.1 Bohrkerne und Probenahme

Für die Auswahl einzusehender (Tief-)Bohrungen wurden die vom TLUBN zur Verfügung gestellten Daten zum Bohrungsbestand verarbeitet. Die Auswahl der Bohrkerne richtete sich im Wesentlichen nach der Verfügbarkeit und Qualität von Sandsteinen des Buntsandsteins und Rotliegenden. Keine der gesichteten Bohrungen befindet sich dabei innerhalb einer bekannten KW-Lagerstätte. Im Ergebnis der Materialsichtung konnten die Sandsteine des Buntsandsteins aus den drei Tiefbohrungen Fb Erfurt 1/2013 (nachfolgend Influins-Bohrung genannt), Kb Rodenberg 1/1976 und Kb Zeilfeld 1/1962 (Abbildung 17) an insgesamt 18 Kernsektionen (Tabelle 10) beprobt werden. Um möglichst intakte Probenkörper herstellen zu können, wurden Bohrkernabschnitte mit einer hinreichenden Homogenität gewählt. Zudem lagen die Entnahmestellen der Probenkörper für die unterschiedlichen Tests möglichst nah zueinander, um eine Korrelation der daran ermittelten Materialparameter zu ermöglichen (s. Abbildung 18).



Bohrung	Rechtswert	Hochwert	Ansatz GOK [m NHN]	Endteufe [m]	Endstratigrafie
Fb Erfurt 1/2013 (INFLUINS)	4432701,21	5654499,9	180	1179	Unterer Buntsandstein
Kb Rodenberg 1/1976	4361314,1	5630491,8	473,05	211,3	Solling-Formation (etwa Thüringischer Chirotheriensandstein)
Kb Zeilfeld 1/1962	4401905,4	5586867,3	406,7	500	Hardegsen-Formation

Abbildung 17 Lokationen (rot) und Detailinformationen der beprobten Tiefbohrungen

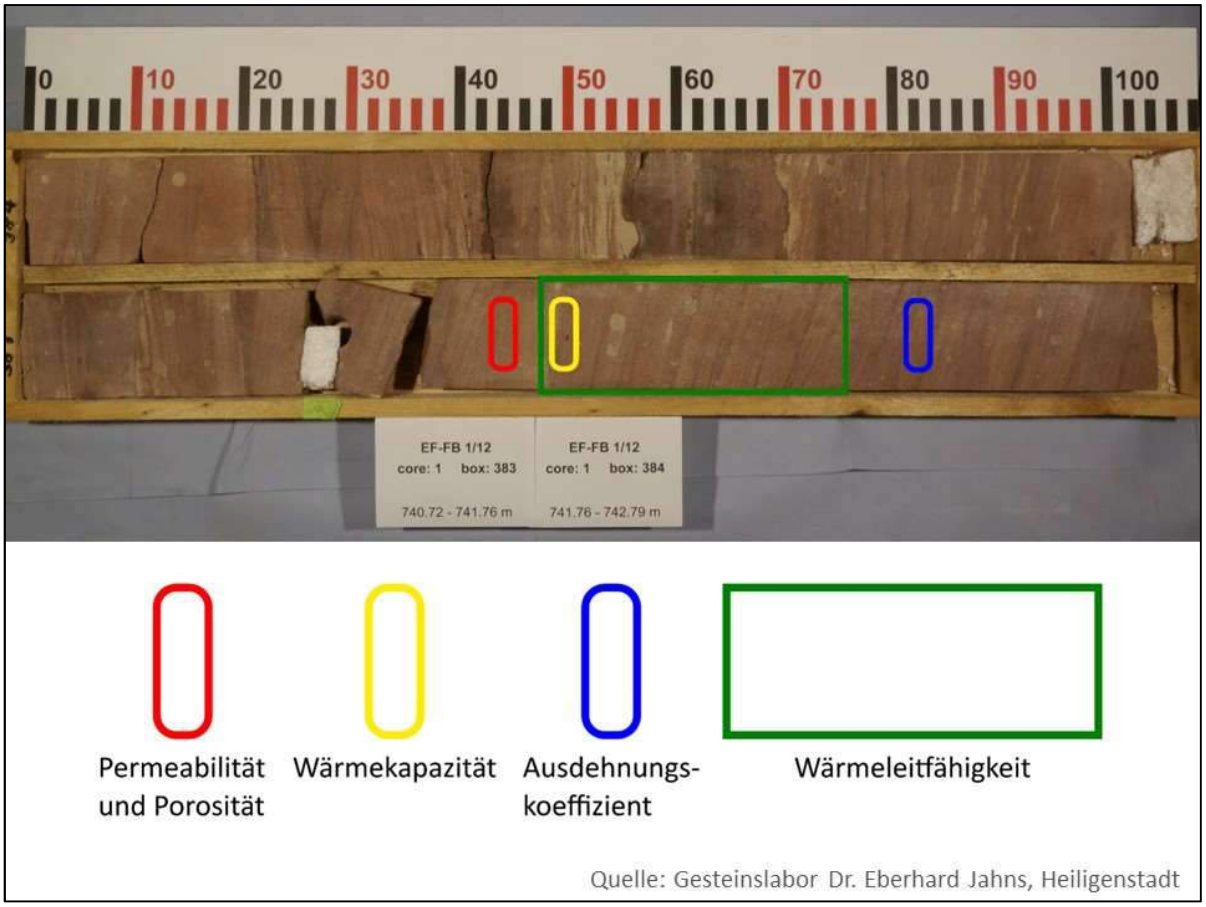


Abbildung 18 Entnahmepunkte von Kernproben am Beispiel der Bohrung Erfurt 1/2013, Box 383

Tabelle 10 Laboranalytisch untersuchte Kernsektionen

Bohrung	Stratigraphie (Buntsandstein-Formation)	Teufe [m MD]	Kistennr.
Fb Erfurt 1/2013 (INFLUINS)	Hardegsen	740,72–741,76	383
Fb Erfurt 1/2013 (INFLUINS)	Hardegsen	759,99–761,02	403
Fb Erfurt 1/2013 (INFLUINS)	Detfurth	786,96–787,95	430
Fb Erfurt 1/2013 (INFLUINS)	Detfurth	795,41–796,46	440
Fb Erfurt 1/2013 (INFLUINS)	Volpriehausen	883,84–884,82	530
Fb Erfurt 1/2013 (INFLUINS)	Volpriehausen	897,91–898,81	546
Kb Rodenberg 1/1976	Solling	206,6–208,6	208
Kb Rodenberg 1/1976	Solling	208,6–211,3	210
Kb Zeilfeld 1/1962	Solling	452,3–455,7	411
Kb Zeilfeld 1/1962	Solling	455,7–461,4	415
Kb Zeilfeld 1/1962	Solling	464,1–467,8	420
Kb Zeilfeld 1/1962	Solling	470,1–471,1	432

5.2 Laboruntersuchungen und Probenpräparation

Mit der petro- und thermophysikalischen Charakterisierung der potentiellen Speichergesteine des thüringischen Buntsandsteins wurde das Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns, Heiligenstadt, beauftragt. Die Ermittlung hydraulisch-thermischer Eigenschaften der Sandsteine des thüringischen Buntsandsteins soll einerseits regionalspezifische Rückschlüsse der zu erwartenden Produktivität eines ATES erlauben. Andererseits dienen die Laborergebnisse zum Zwecke der Parametrisierung von hydromechanisch-thermischen FE-Modellierungen und schließlich als geowissenschaftliche Eingangsparameter für die Ermittlung von Gestehungskosten einer Speicheranlage. Folgende Parameter wurden hierfür ermittelt:

- Gesteinsdichte
- effektive Porosität und Permeabilität unter quasi-atmosphärischen Druckbedingungen
- stationäre Wasserdurchlässigkeit bei fünf hydrostatischen Belastungsstufen
- thermischer Ausdehnungskoeffizient
- Wärmeleitfähigkeit
- Wärmekapazität

Als Hilfsmessungen zur besseren Interpretation der thermischen Messergebnisse wurden die Kernstücke mit einem Multi-Sensor-Corelogger der Firma Geotek auf die Gamma-Dichte und Kompressionswellengeschwindigkeit untersucht. In Vorbereitung der Messungen wurden die Proben durch Trocknung bis zur Massenkonstanz bei 105 °C (Porosität, Permeabilität, Wärmeleitfähigkeit) bzw. 40 °C (Ausdehnungskoeffizient) konditioniert. Die Trocknung im Vorfeld der Wärmekapazitätsmessung erfolgte über einen Zeitraum von sieben Tagen bei 125 °C. Die thermische Ausdehnung wurde zusätzlich auch an wassergesättigten Proben durchgeführt.

Porositäts- und Permeabilitätsmessungen wurden an insgesamt 12 zylindrischen Probenkörpern durchgeführt, die senkrecht zur Kernachse entnommen wurden. Die Probenkörper mit einem Durchmesser von ca. 30 mm verfügten über planparallele Endflächen bei einer variablen Länge von etwa 32 mm bis 60 mm (Abbildung 19). Für die Ermittlung der Porosität ϕ [Vol.-%] wurde ein Heliumpyknometer (*Micromeritics AccuPyc II 1340*) verwendet. Die Gaspermeabilität wurde mit Hilfe des halbautomatischen Permeameters *Syroperm* ermittelt und dient vor allem als Orientierung, um die Druckbedingungen bei der Messung der stationären Wasserdurchlässigkeit besser regulieren zu können. Die Wasserpermeabilität k [mD] wird schließlich in einer Prüfzelle gemessen, die es ermöglicht, einen hydrostatisch erzeugten Umlagerungsdruck auf den Prüfkörper zu übertragen und somit In-Situ-Bedingungen zu simulieren.

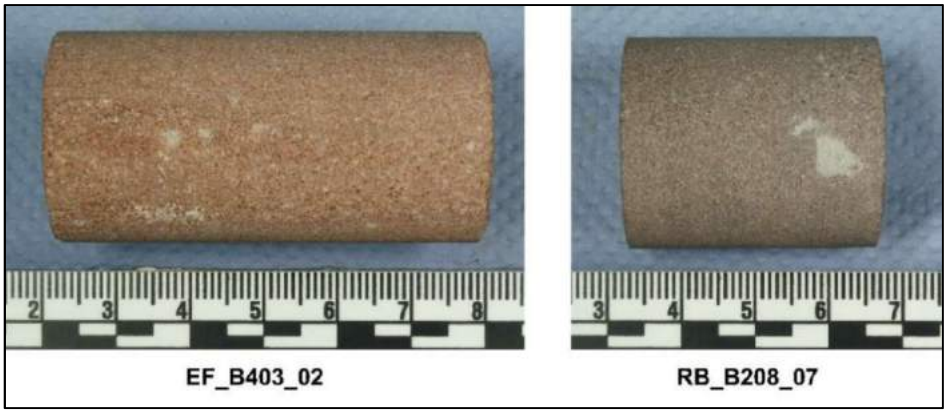


Abbildung 19 Probenkörper für Porositäts-/ Permeabilitätsmessungen aus den Bohrungen Erfurt 1/2013 und Rodenberg 1/1976 (Quelle: Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns, Heiligenstadt)

Für **Wärmeleitfähigkeitsmessungen** wurden 12 kalottierte Kernstücke der o. g. Bohrungen mit einer Länge von 100 mm bis 300 mm und einer Materialstärke von mindestens 3 cm im zentralen Bereich verwendet. Um eine einheitliche Reflektivität zu erhalten, wurde ein schwarzer Acryl-Lackanstrich aufgetragen (Abbildung 20). Die Messung der Wärmeleitfähigkeit λ [W mK^{-1}] wurde mit einem Thermal Conductivity Scanner (TCS) der Firma Lippmann und Rauen GbR durchgeführt und basiert auf der thermischen Abtastung der Probenoberfläche mit einer fokussierten Wärmequelle (POPOV 1997, POPOV et al. 1999). Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt das Vermögen eines Stoffes, thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren.

Nach der Wärmeleitfähigkeitsmessung wurden für **Wärmekapazitätsmessungen** zylindrische Probenkörper mit einem Durchmesser von 11 mm und einer Länge von 20 mm bis 40 mm aus den jeweiligen, kalottierten Kernstücken gebohrt (Abbildung 20). Mit Hilfe eines Calvet-Kalorimeters C80 der Firma Setaram wurde die Wärmekapazität c [J kg^{-1} K^{-1}] aus dem Temperaturverlauf über die Zeit und den zum Aufheizen notwendigen Wärmeströmen bestimmt. Die Wärmekapazität kennzeichnet das Vermögen eines Stoffes, Wärme zu speichern und ist wichtig für die Charakterisierung transienter, d. h. zeitlich veränderlicher Prozesse.

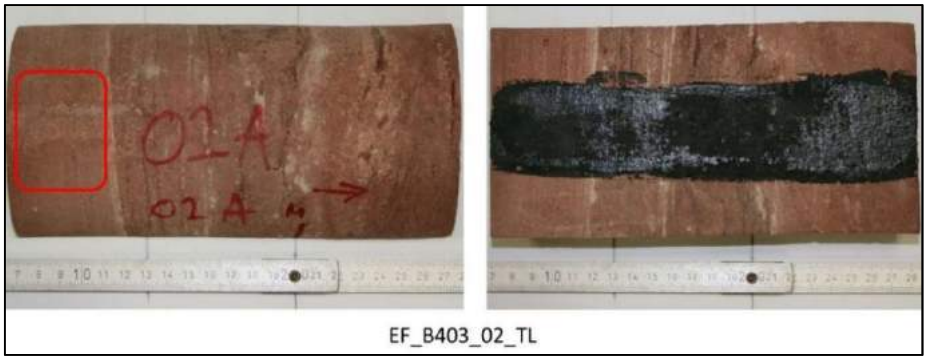


Abbildung 20 Kalottiertes Kernstück für Wärmeleitfähigkeitsmessung (*rechts*) und Entnahmestelle des zylindrischen Probenköpers für Wärmekapazitätsmessung (*links*, rote Markierung) (Quelle: Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns, Heiligenstadt)

Der **thermische Ausdehnungskoeffizient** α [K^{-1}] wurde an 12 zylindrischen Probenkörpern bestimmt, die eine Länge von 50 mm und einen Durchmesser von 15 mm besaßen. Die Messung wurde mit einem sog. 6-Stangen-Dilatometer (s. STROHMEYER 2003) durchgeführt. Temperaturvariationen zwischen 20 °C und 80 °C innerhalb einer Messzelle verursachen hierbei Längenänderungen der darin eingespannten Probenkörper, woraus sich der Ausdehnungskoeffizient ableiten lässt.

Abbildung 21 Zylindrischer Probenkörper für die Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten (Quelle: Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns, Heiligenstadt)

5.3 Geoinformationssystem

Im Rahmen des aktuellen Projektes sind verschiedene geographisch referenzierte Datensätze in den Aufbau eines Geoinformationssystems (GIS) eingeflossen, um die Rahmenbedingungen für die Nutzung des thüringischen Untergrundes als Wärmespeicher zu visualisieren. Hierfür sind Veröffentlichungen des Thüringer Landesamtes für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) und der Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur ThEGA, allgemeine topographische Informationen sowie historisches Kartematerial eine wesentliche Datengrundlage. Mit Hilfe geologischer Karten (Buntsandstein, Rotliegend, Quartär), Daten zu gesetzlichen Restriktionen (u. a. Schutzgebiete), dem Abwärmekataster und gesichteten Bohrungen sollen die Möglichkeiten zur geogenen Wärmespeicherung anhand der Lokalisierung geeigneter Speicherstrukturen und deren räumlicher Bezug zu möglichen Abwärmequellen veranschaulicht werden. Diese Informationsgrundlage kann zu einer generellen Einschätzung der Möglichkeiten bzw. Restriktionen und voraussichtlichen Wirtschaftlichkeit der Untergrundspeicherung von Wärme beitragen.

Kenntnisse zu den **geographischen Rahmenbedingungen** sind zu Beginn eines Planungsprozesses essentiell für die Vorauswahl von Speicherstandorten. Anhand dieser Informationsgrundlage lassen sich Rückschlüsse auf die bestehende Infrastruktur, die räumliche Nähe zu Siedlungsstrukturen o. ä. ziehen, um die Dimensionierung obertägiger Anlagenteile einschließlich zu verlegender Leitungen von der Abwärmequelle zum Speicherort und schließlich zum Verbraucher zu beurteilen.

Das bestehende Wissen um die Lagerungsverhältnisse (Verbreitung, Tiefenlage, strukturgeologisches Inventar) und die lithofazielle Ausprägung von potentiellen Speicherhorizonten zählen zu den **geologischen Hauptindikatoren**, um eine einfache und schnelle Verortung eines Aquiferspeichers vornehmen zu können. **Hydrogeologische Karten** zur Verbreitung und Mächtigkeitsverteilung von Grundwasserleitern dienen einer ersten Einschätzung der potentiellen Speicherkapazität eines Aquifers.

Die über das Auskunftssystem Geothermie verfügbaren und in das GIS integrierten Daten z. B. zur Wärmestromdichte und spezifischen Wärmeleitfähigkeit des thüringischen Untergrundes ermöglichen

eine vorläufige standortspezifische Ersteinschätzung der **thermophysikalischen Eigenschaften** des Untergrundes bis in 120 m Tiefe.
Die Kenntnis über die Lage eines Standortes in Bezug zu Schutzgebieten wie Wasser- und Heilquellenschutzgebiete, Flora-Fauna-Habitate (FFH), Landschaftsschutzgebiete oder Nationalparks ermöglichen Aussagen zu **umweltrechtlichen Einschränkungen** (siehe auch Kapitel 2.4.2).
Die räumliche Verteilung der in Thüringen zur Verfügung stehenden Abwärmequellen sind anhand des **Abwärmekatasters** abrufbar. Für die darin erfassten Unternehmen sind Information wie Name, Adresse, Abwärmemenge, Prozesswärme oder die technischen Spezifikationen der Abwärmeprozesse erhältlich. Die Verteilung der Unternehmensstandorte mit der verfügbaren Abwärme ist den synoptischen Kartendarstellungen in Anlage 3.1 bis 3.5 zu entnehmen. Die Kenntnis über die Lage und Menge der zur Verfügung stehenden Abwärme soll das Bewusstsein für die „Ressource Abwärme“ verbessern und Investitionen in die Abwärmenutzung fördern. Die Datenbasis des Abwärmekatasters enthält derzeit 421 Datensätze (Stand: 2016) und wird von der ThEGA alle vier Jahre nach Freigabe durch die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie aktualisiert.
Im vorliegenden Bericht wird das Abwärmekataster genutzt, um unter Berücksichtigung der o. g. Einflussfaktoren strategisch günstige Bereiche für die Installation von potentiellen Wärmespeichern zu identifizieren.

5.4 Thermisch-Hydraulisch-Mechanische (T-H-M) Modellierungen

5.4.1 Konzept der T-H-M-Kopplung

Als Ergebnis der Literaturrecherche wurden die erforderlichen Erweiterungen des bei Dynardo vorhandenen hydraulisch-mechanischen Simulators (WILL et al. 2015, WILL & ECKARDT 2017, WILL et al. 2017) identifiziert. Dieser verwendet zur drei-dimensionalen Simulation der hydraulischen Stimulation von Fels einen homogenisierten Kontinuumsansatz. In diesem Zusammenhang wird für die Lösung der entsprechenden Differentialgleichungen die Finite-Elemente-Methode eingesetzt. Im mechanischen Teilmodell kommen nichtlineare Materialformulierungen zur Beschreibung der Rissbildung infolge Zug- und Schubbeanspruchung zum Einsatz. Das statische Gleichgewicht wird im effektiven Spannungsraum formuliert. Der Einfluss des Porendrucks wird mittels so-genannter Strömungskräfte berücksichtigt. Im hydraulischen Teilmodell wird die instationäre (Sicker-)Strömung mittels des Darcy-Gesetzes beschrieben. Die hydraulische Durchlässigkeit ist dabei an Ergebnisgrößen des mechanischen Teilmodells, wie Spannungen oder Rissöffnungsweiten, gekoppelt. Im vorhandenen Modell wird der Einfluss der Rissbildung auf die hydraulischen Eigenschaften des Systems als primär angesehen und Effekte der Poroelastizität wurden vernachlässigt. Die Kopplung zwischen den beiden Teilmodellen erfolgt sequenziell und explizit. Das bedeutet, dass die Teilmodelle nacheinander und unabhängig voneinander gelöst werden. Kopplungsgrößen werde jeweils aus den Ergebnissen des vorangegangenen Lösungsschrittes extrahiert und auf das jeweilige Teilmodell übertragen. Innerhalb eines Zeitschrittes kommt es nicht zu einer zusätzlichen Iteration zwischen den Teilmodellen.

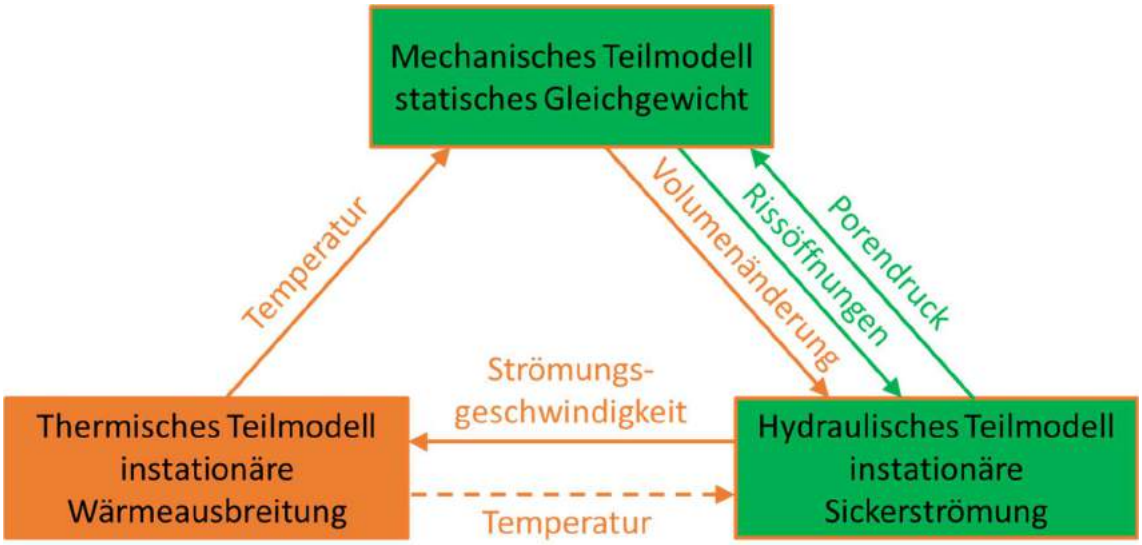


Abbildung 22: T-H-M Kopplung zur Simulation eines Wärmespeichers.

Abbildung 22 zeigt konzeptionell die angestrebte T-H-M Kopplung für die Simulation des Wärmespeichers. Die bereits vorhandene H-M Kopplung ist grün dargestellt. Die erforderlichen Erweiterungen sind orange hervorgehoben. Neben der Einführung des thermischen Teilmodells, sind auch im mechanischen und hydraulischen Teilmodell Anpassungen erforderlich. Weiterhin müssen zusätzliche Kopplungen zwischen den Teilmodellen ausgebildet werden. Zusammengefasst sind für die Simulation eines Wärmespeichers die folgenden Erweiterungen des vorhandenen H-M-Simulators auf ein T-H-M System erforderlich:

- Einführung des thermischen Teilmodells zur Beschreibung der Wärmeausbreitung infolge Wärmetransport und Wärmeleitung
- Da bei der Wärmespeicherung Rissbildungen nicht gewünscht sind, ist die Berücksichtigung der Poroelastizität (Biot-Theorie) bei der hydraulisch-mechanischen Kopplung erforderlich:
    - Einführung des Biot-Koeffizienten bei der Berechnung der Strömungskräfte im mechanische Teilmodell.
    - Berücksichtigung des Einflusses volumetrischer (elastischer) Dehnungen, d.h. Veränderungen der Porosität, im hydraulischen Teilmodell. Dabei soll primär der Einfluss auf den Druck und auf die Speicherfähigkeit betrachtet werden. Die Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit von der „elastischen“ Porosität soll nicht berücksichtigt werden. Die bereits vorhandene Kopplung zwischen Rissbildung und hydraulischer Durchlässigkeit soll erhalten bleiben, um die Auswirkungen ungewollter Rissbildungen zu erfassen.
- Einführung der thermisch-mechanischen Kopplung: Temperaturveränderungen führen zu (thermischen) Dehnungen, welche bei der Berechnung der Spannungen im mechanischen Teilmodell berücksichtigt werden müssen.
- Einführung der hydraulisch-thermischen Kopplung: Zur Abbildung des Wärmetransportes müssen Strömungsgeschwindigkeiten aus den Ergebnissen des hydraulischen Teilmodells abgeleitet werden und auf das thermische Teilmodell übertragen werden.
- Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit und der Salinität bei der Definition der Materialparameter:

- Die Salinität wird während der Simulation als konstant angenommen. Diese wird daher nur bei der Bestimmung der Eingangsgrößen berücksichtigt.
- Da es im Wärmespeicher zu einer deutlichen zeitlichen Veränderung der Temperatur kommt, soll die Abhängigkeit ausgewählter Materiakenngrößen von der Temperatur berücksichtigt werden. Dazu werden in der Simulationsumgebung diese Zusammenhänge in Tabellen hinterlegt.

Die Simulation des T-H-M-Systems soll weiterhin den drei-dimensionalen homogenisierten Kontinuumsansatz auf Basis der FEM verwenden. Die Kopplung soll nach wie vor sequenziell erfolgen. Dabei können Iterationen zwischen den Teilmodellen zur Herstellung des Gleichgewichtes erforderlich werden.

5.4.2 Thermisches Teilmodell

Die Differentialgleichung zur Beschreibung der instationären Wärmeausbreitung kann aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik abgeleitet werden. Die Energieerhaltung in einem infinitesimalen Kontrollvolumen kann durch folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{q_T} = Q_T, \tag{1}$$

wobei ρ die Dichte, C die spezifische Wärmekapazität, T die Temperatur, t die Zeit, q_T der Wärmestrom, und Q_T die Rate äußerer Wärmegenerierung ist. Dabei wird angenommen, dass im Kontrollvolumen die Temperatur im Gestein und im Wasser identisch ist. Bei den Materialparameter ρC handelt es sich um eine effektive Größe, welche durch Homogenisierung unter Berücksichtigung der Porosität n aus den entsprechenden Parametern des Gesteins (ρ_G und C_G) und des Wassers (ρ_W und C_W) wie folgt berechnet werden können:

$$\rho C = (1-n)\rho_G C_G + n\rho_W C_w. \tag{2}$$

Der Wärmestrom q_T kann in einen Anteil aus Wärmeleitung q_{TL} und einen Anteil aus Massentransport q_{TM}, d.h. die Wärme wird durch das strömende Wasser transportiert, aufgeteilt werden:

$$\boldsymbol{q_T} = \boldsymbol{q_{TL}} + \boldsymbol{q_{TM}}. \tag{3}$$

Der Wärmestrom infolge Wärmeleitung wird über das Fouriersche Gesetz beschrieben

$$\boldsymbol{q_{TL}} = -\boldsymbol{\Lambda}\nabla\mathrm{T}, \tag{4}$$

wobei $\nabla\mathrm{T}$ der Temperaturgradient, und $\boldsymbol{\Lambda}$ die Wärmeleitfähigkeitsmatrix ist. In einem für die Geotechnik typische transversal isotropen Material ergibt sich die Wärmeleitfähigkeitsmatrix zu

$$\boldsymbol{\Lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_h & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_h & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_v \end{pmatrix}, \tag{5}$$

wobei λ_h und λ_v die Wärmeleitfähigkeiten in horizontaler und vertikaler Richtung sind. Dabei handelt es sich ebenfalls um homogenisierte Größen

$$\mathbf{\Lambda} = (1-n)\mathbf{\Lambda_G} + n\mathbf{\Lambda_W}. \tag{6}$$

Der Wärmestrom infolge Wärmetransport ergibt sich zu

$$\boldsymbol{q_{TM}} = n\rho_W C_W \boldsymbol{v} T, \tag{7}$$

wobei $\boldsymbol{v}$ die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids ist. Diese kann als Ergebnis der hydraulischen Simulation aus dem Darcy-Durchfluss $\boldsymbol{q_H}$ (auch Filtergeschwindigkeit genannt) berechnet werden

$$\boldsymbol{v} = \frac{1}{n}\boldsymbol{q_H}. \tag{8}$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (4) und (7) in Gleichung (3) und unter Verwendung von Gleichung (8) ergibt sich der Gesamtwärmestrom zu

$$q_T = -\mathbf{\Lambda}\nabla\mathrm{T} + \rho_W C_W \boldsymbol{q_H} T. \tag{9}$$

Unter Verwendung von Gleichung (9) und unter Annahme, dass die Strömungsgeschwindigkeit im Kontrollvolumen konstant ist, ergibt sich die Energieerhaltungsgleichung (1) für das poröse Medium zu

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot [\mathbf{\Lambda}\nabla\mathrm{T}] + \rho_W C_W \boldsymbol{q_H} \cdot \nabla T = Q_T. \tag{10}$$

Da es sich um ein instationäres Problem handelt, müssen neben den Randbedingungen (entweder direkt als Temperatur oder als Wärmestrom) auch Anfangsbedingungen für die Temperaturen definiert werden:

$$T(t_0) = T_0. \tag{11}$$

Bei der Lösung der Differentialgleichung mit Standard Finiten Elementen (Galerkin Formulierung) kann es aufgrund der Art der Differentialgleichung zu Instabilitäten kommen, wenn der Anteil des Wärmetransports durch das Wasser im Vergleich zur Wärmeleitung zu groß wird. Dieses Verhältnis kann über die Pèclet-Zahl (Gresho & Lee 1981) abgeschätzt werden. Für die Wärmeausbreitung im porösen Medium ergibt sich die Pèclet-Zahl zu

$$Pe = \frac{\rho_W C_W \|\boldsymbol{q_H}\| L}{2\lambda_{eq}} \tag{12}$$

wobei L die Elementgröße, λ_{eq} die Wärmeleitfähigkeit in Richtung der Hauptströmung ist. Die Lösung ist stabil, solange die Pèclet-Zahl kleiner 1 ist ($Pe < 1$). Eine einfache Möglichkeit diese Bedingung

einzuhalten ist die Einführung einer künstlichen Wärmeleitfähigkeit, wenn die Pèclet-Zahl größer oder gleich 1 ist. Für die künstliche Wärmeleitfähigkeit ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\lambda_{korr} \begin{cases} = 0 & Pe < 1 \\ > \dfrac{\rho_W C_W \|\boldsymbol{q_H}\| L}{2} - \lambda_{eq} & Pe \geq 1 \end{cases}. \tag{13}$$

Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Streamline Upwind Petrov-Galerkin (SUPG) Elementformulierungen nach BROOKS, A. Nelson (1981) und BROOKS, A. N. & HUGHES (1982). Eine Übersicht zu Stabilisierungsmethoden bei der Lösung von Transport Problemen ist in KUZMIN (2010).

5.4.3 Hydraulisches Teilmodell

Die Differenzialgleichung zur Beschreibung der instationären Strömung eines Fluids in einem porösen Medium ergibt sich aus der Massenerhaltung. In einem infinitesimalen Kontrollvolumen kann die Massenbilanz wie folgt ausgedrückt werden

$$\frac{1}{M}\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{q_F} + \alpha \dot{\varepsilon}_{vol} = Q_F \tag{14}$$

wobei M der Biot Modul, p der Porendruck, $\boldsymbol{q_F}$ der Fluidstrom, α der Biotkoeffizient, $\dot{\varepsilon}_{vol}$ die volumetrische Dehnrate und Q_F ein äußere Zu- bzw. Abflussrate darstellt. Der Biot Modul ist ein Maß der Kompressibilität des porösen Mediums

$$\frac{1}{M} = \frac{n}{K_W} + \frac{\alpha - n}{K_G}, \tag{15}$$

wobei K_W die Kompressibilität des Wassers und K_G die Kompressibilität des Gesteins ist. Der Fluidstrom wird mittels des Darcy-Gesetzes beschrieben

$$\boldsymbol{q_F} = -\frac{\boldsymbol{k}}{\mu_W}(\nabla p - \rho_W g \boldsymbol{g_v}), \tag{16}$$

wobei $\boldsymbol{k}$ die Permeabilitätsmatrix (mit der Einheit $[m^2]$), μ_W die dynamische Viskosität des Wassers, g die Erdbeschleunigung und $\boldsymbol{g_v}$ die Richtung der Erdbeschleunigung ist. Unter der Annahme von transversal isotropen Materialverhaltes des Gesteins ergibt sich die Permeabilitätsmatrix zu

$$\boldsymbol{k} = \begin{pmatrix} k_h & 0 & 0 \\ 0 & k_h & 0 \\ 0 & 0 & k_v \end{pmatrix},$$

wobei k_h und k_v die Permeabilitäten in horizontaler und vertikaler Richtung sind. Treten im Gestein Störungen, wie Risse oder natürliche Trennflächen, auf, wird die Permeabilitätsmatrix im Allgemeinen anisotrop (WILL et al. 2015).

Der dritte Term in Gleichung (14) erfasst den Einfluss von Änderungen des betrachteten infinitesimalen Volumens auf den Porendruck und stellt damit die Kopplung zum mechanische Teilmodell dar. Die Volumenänderungen werden über die volumetrischen Dehnungen erfasst

$$\varepsilon_{vol} = \frac{\Delta V}{V_0} = tr(\boldsymbol{\varepsilon}) = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}, \tag{17}$$

wobei V_0 das Ausgangsvolumen, ΔV die Volumenänderung und $\boldsymbol{\varepsilon}$ der Dehnungstensor ist. Die Rate der Volumendehnung zwischen zwei Zeitschritten wird wie folgt approximiert

$$\dot{\varepsilon}_{vol} = \frac{\Delta\varepsilon_{vol}}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_{vol}^{(t+\Delta t)} - \varepsilon_{vol}^{(t)}}{\Delta \mathrm{t}}. \tag{18}$$

Der Biotkoeffizient α ist ein Maß für das Verhältnis der Kompressibilitäten des porösen Mediums unter drainierten und undrainierten Bedingungen

$$\alpha = 1 - \frac{K_T}{K_G}, \tag{19}$$

wobei K_T der (tangentiale) Kompressionsmodul des drainierten porösen Mediums ist (MERXHANI 2016, SUVOROV & SELVADURAI 2019).

Im Dynardo-Simulator wird die Massenbilanz des hydraulischen Modells mittels des hydraulischen Potentials h formuliert

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{q_F} = Q_F, \tag{20}$$

wobei S_s der spezifische Speicherkoeffizient ist. Das hydraulische Potential ist definiert als

$$h = \frac{p}{\rho_W g} + z. \tag{21}$$

Bei der Definition des hydraulischen Potentials wird davon ausgegangen, dass die Erdbeschleunigung entgegen der z-Achse wirkt

$$\boldsymbol{g_v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}. \tag{22}$$

Durch Vergleich des jeweils ersten Terms in Gleichung (14) und Gleichung (20) ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen der spezifischen Speicherkapazität und dem Biot Modul

$$S_s = \frac{\rho_W g}{M}. \tag{23}$$

Das Darcy Gesetz zur Beschreibung des Fluidstroms kann ebenfalls mittels des hydraulischen Potentials beschrieben werden

$$\boldsymbol{q_F} = -\boldsymbol{K}\nabla h, \tag{24}$$

wobei $\boldsymbol{K}$ die Matrix des Durchlässigkeitsbeiwerts (mit der Einheit $[m/s]$) ist. Es besteht folgender Zusammenhang zwischen der Permeabilität und dem Durchlässigkeitsbeiwert

$$\boldsymbol{K} = \frac{\rho_W g}{\mu_W}\boldsymbol{k}. \tag{25}$$

Um den Einfluss der Volumenänderungen zu erfassen, muss Gleichung (20) um den dritten Term in Gleichung (14) erweitert werden. Da im Simulator die gekoppelten Systeme sequenziell nacheinander gelöst werden, ist die Volumenänderung bei Lösung des hydraulischen Modells bekannt. Entsprechend wird dieser Term auf der rechten Seite als zusätzlicher Zu- bzw. Abflussrate berücksichtigt. Die zugehörige Differentialgleichung kann wie folgt geschrieben werden

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot [\boldsymbol{K}\nabla h] = Q_F - \alpha \dot{\varepsilon}_{vol}. \tag{26}$$

Im Vergleich zur bereits vorhandenen Implementation, stellen die modifizierte Zu- bzw. Abflussrate und die Berechnung der spezifischen Speicherkapazität aus dem Biot-Modul, Gleichung (23), die erforderlichen Erweiterungen dar. Weiterhin wird angemerkt, dass eine Veränderung der Porosität bzw. der Dichte bei der Berechnung der Materialparameter nicht berücksichtigt wird. Die Temperaturabhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes bzw. der dynamischen Viskosität kann dagegen in jedem Zeitschritt durch Anpassung der entsprechenden Parameter berücksichtigt werden.

Analog zum Temperaturproblem, müssen bei der Lösung des instationären Problems neben Randbedingungen auch Anfangsbedingungen definiert werden. Im hydraulischen Modell sind das initiale Porendruckbedingungen

$$p(t_0) = p_{ini}. \tag{27}$$

Unter Verwendung von Gleichung (21) können analoge initiale hydraulische Potentiale definiert werden

$$h_{ini} = \frac{p_{ini}}{\rho_W g} + z. \tag{28}$$

5.4.4 Mechanisches Teilmodell

Das statische Gleichgewicht des porösen Mediums kann mittels der Impulsbilanz ausgedrückt werden

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho g \boldsymbol{g_v} = 0, \tag{29}$$

wobei $\boldsymbol{\sigma}$ der totale Spannungstensor, ρ die effektive Dichte, g die Erdbeschleunigung und $\boldsymbol{g_v}$ die Richtung der Erdbeschleunigung ist. Die effektive Dichte ergibt sich durch Homogenisierung zu

$$\rho = (1-n)\rho_G + n\rho_W, \tag{30}$$

wobei n die Porosität, ρ_G die Dichte des Gesteins und ρ_W die Dichte des Wassers ist. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass Deformationen zu Veränderungen der effektiven Spannungen $\boldsymbol{\sigma}'$ im Gestein führen. In der Biot-Theorie besteht der folgende Zusammenhang zwischen totalen und effektiven Spannungen

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - \alpha p \boldsymbol{I}, \tag{31}$$

wobei α der Biotkoeffizient, p der Porendruck und $\boldsymbol{I}$ die Einheitsmatrix ist. Es wird angemerkt, dass folgende Vorzeichenkonvention für die Spannungen und den Porendruck verwendet werden:

- Druckspannungen: negativ
- Zugspannungen: positiv
- Porendruck: positiv

Die zu betrachtenden Gesteinsschichten sind auch vor der eigentlichen Belastung nicht Spannungsfrei. Im Modell werden diese Spannungen als deformationsfreie Initialspannungen berücksichtigt. Es wird weiterhing angenommen, dass der initiale Spannungszustand mit den äußeren Belastungen im Gleichgewicht steht

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma_{ini}} + \rho g \boldsymbol{g_v} = 0. \tag{32}$$

Damit kann das Gleichgewicht auch über die Spannungsänderung inkrementell definiert werden

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\Delta\sigma} = 0, \tag{33}$$

mit

$$\boldsymbol{\Delta\sigma} = \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma_{ini}} = \boldsymbol{\Delta\sigma}' - \alpha \Delta p \boldsymbol{I}, \quad \Delta p = p - p_{ini}. \tag{34}$$

Alternativ kann das (inkrementelle) Gleichgewicht auch mittels der effektiven Spannungen ausgedrückt werden

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\Delta\sigma}' - \alpha \nabla \Delta \mathrm{p} = 0. \tag{35}$$

Durch Verwendung der Gleichungen (21) und (28) kann Gleichung (35) mittels des Gradienten des hydraulischen Potentials ausgedrückt werden

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\Delta\sigma}' - \alpha \rho_W g \nabla \Delta \mathrm{h} = 0. \tag{36}$$

Setzt man in Gleichung (36) den Biotkoeffizient $\alpha = 1.0$, dann erhält man die im vorhandenen Simulator verwendete Gleichgewichtsbedingung. Da dort die Teilmodelle sequenziell gelöst werden,

ist der zweite Term während der Lösung des mechanischen Teilmodells konstant. Er wird daher auf der rechten Seite des resultierende Gleichungssystems als äußere Strömungskraft berücksichtigt. Die Erweiterung des vorhandenen mechanischen Teilmodells um die Poroelastizität erfordert die Berücksichtigung des Biotkoeffizienten bei der Berechnung der effektiven (initialen) Spannungen und der Strömungskräfte.
Für ein elasto-plastisches Material (unter Annahme linearer Elastizität) und unter Berücksichtigung thermischer Dehnungen ergibt sich die effektive Spannungs-Dehnungsbeziehung zu

$$\boldsymbol{\Delta\sigma'} = \boldsymbol{D}:\boldsymbol{\varepsilon_{el}} = \boldsymbol{D}:\left[\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon_{pl}} - \boldsymbol{\varepsilon_{th}}\right], \tag{37}$$

wobei $\boldsymbol{D}$ die (linear) elastische Materialmatrix, $\boldsymbol{\varepsilon}$ die totalen Dehnungen, $\boldsymbol{\varepsilon_{el}}$ die elastischen Dehnungen, $\boldsymbol{\varepsilon_{pl}}$ die plastischen Dehnungen und $\boldsymbol{\varepsilon_{th}}$ die thermischen Dehnungen sind. Für ein transversal isotropes Material ergibt sich folgende Spannungs-Dehnungsbeziehung

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{el,xx} \\ \varepsilon_{el,yy} \\ \varepsilon_{el,zz} \\ 2\varepsilon_{el,xy} \\ 2\varepsilon_{el,yz} \\ 2\varepsilon_{el,xz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_h} & -\frac{\nu_h}{E_h} & -\frac{\nu_v}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_h}{E_h} & \frac{1}{E_h} & -\frac{\nu_v}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_v}{E_v} & -\frac{\nu_v}{E_v} & \frac{1}{E_h} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1+\nu_h)}{E_h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_v} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\sigma'_{xx} \\ \Delta\sigma'_{yy} \\ \Delta\sigma'_{zz} \\ \Delta\sigma'_{xy} \\ \Delta\sigma'_{yz} \\ \Delta\sigma'_{xz} \end{pmatrix}, \tag{38}$$

wobei E_h und ν_h der E-Modul und die Querdehnzahl in horizontaler Richtung, und E_v, ν_v und G_v der E-Modul, die Querdehnzahl und der Schubmodul in vertikaler Richtung sind. In der obigen Gleichung wurde die Voigt-Notation für die symmetrischen Tensoren verwendet. Die thermischen Dehnungen werden durch Temperaturveränderungen hervorgerufen

$$\boldsymbol{\varepsilon_{th}} = \mathbf{A}_{\boldsymbol{T}}[T - T_0], \tag{39}$$

wobei $\mathbf{A}_{\boldsymbol{T}}$ die Matrix der thermischen Ausdehnungskoeffizienten, T die aktuelle Temperatur und T_0 die Ausgangstemperatur ist. Für ein transversal isotropes Material ergibt sich die Matrix der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu

$$\mathbf{A}_{\boldsymbol{T}} = \begin{pmatrix} \alpha_{Th} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{Th} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{Tv} \end{pmatrix}, \tag{40}$$

wobei α_{Th} und α_{Tv} die Ausdehnungskoeffizienten in horizontaler und vertikaler Richtung sind. Die Berücksichtigung der thermischen Dehnungen bei der Spannungsberechnung, stellt eine weitere Erweiterung des vorhandenen mechanischen Teilmodells dar.

In der Kopplung zum hydraulischen Teilmodell muss neben der bereits vorhandenen Anpassung der Durchlässigkeiten bei Rissbildung (Evolution von plastischen Dehnungen) (WILL et al. 2015) auch die Berechnung der Volumendehnungen nach Gleichung (17) erfolgen.

5.5 Sensitivitätsanalyse

In einer Sensitivitätsstudie wurden Abhängigkeiten der variierenden Responses auf sich veränderliche Inputparameter ermittelt. Die Referenzmodelle aus der T-H-M-Modellierung wurden parametrisch aufgebaut, sodass eine Variantenstudie mit statistisch verteilten Eingabeparametern (Sensitivitätsanalyse) durchgeführt werden konnte. Die gewählten Eingangsparameter für die Sensitivitätsanalyse umfassen sowohl geotechnische und geologische Reservoireigenschaften als auch Betriebsparameter. Dabei wurde der Einfluss sowohl von Materialparametern als auch von Parametern des Betriebes, z. B. Pumprate, auf ausgewählte Ergebnisgrößen, z. B. Pumpendruck, untersucht. Die Variantenberechnungen wurden auf dem einem Linux-Cluster durchgeführt. Sowohl die Parametrisierung als auch die Auswertung der Sensitivitätsstudie erfolgte mit der Software optiSLang. Dieses Programm ermöglicht eine qualitative und quantitative Bewertung der o. g. Abhängigkeiten durch Regressionsanalysen und Korrelationsmodelle. Durch eine stochastische Verteilungsfunktion – Advanced Latin Hypercube Sampling (ALHS) – werden Parameterkombinationen (Designs) in den Parametergrenzen (s. Tabelle 14) generiert. Als Ergebnis der Sensitivitätsstudie wurden sogenannte Ersatz- bzw. Metamodelle generiert, die eine Analyse des Zusammenhangs zwischen Eingangsgrößen und ausgewählten Ergebnisgrößen mittels mathematischer Funktionen mit ausreichender Genauigkeit ermöglichen. Diese sogenannten Ersatzmodelle sind mathematische Funktionen, die den Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und der betrachteten Ergebnisgröße mit ausreichender Genauigkeit beschreiben. Mittels dieser Modelle ist es möglich, Ergebnisse der sehr aufwändigen Simulationen direkt bei Optimierungen, z. B. der Kosten und des Betriebes, zu verwenden, ohne dass erneute Simulationen durchgeführt werden. Mit den Ergebnissen aus der Sensitivitätsanalyse war es möglich, die Einflüsse der wichtigsten Eingangsparameter auf die Ergebnisgrößen zu identifizieren und ein approximiertes Meta- bzw. Zusammenhangsmodell mit optiSLang aufzubauen. Ein solches Ersatzmodel wurde in das Gestehungskostentool integriert, um eine Designvariante zu finden, die allen Anforderungen aus Speicher- und Kosteneffizienz erfüllt. Aus dem Vergleich der berechneten Designvarianten können die Haupteinflussfaktoren auf die Gestehungskosten und den Betrieb eines Aquiferspeichers ermittelt werden.

6 Laborergebnisse (Bohrkernuntersuchungen)

Für die Modellierung geothermaler Prozesse sind die petro- und thermophysikalischen Parameter der Speichergesteine von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Porosität, die Permeabilität, die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität, die Gesteinsdichte sowie der thermische Ausdehnungskoeffizient an Bohrkernmaterial der Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins untersucht. Nachfolgend werden die Testergebnisse für o. g. Gesteinseigenschaften präsentiert. Diese erlauben rechnerische Prognosen über das hydraulisch-mechanische und thermodynamische Speicherverhalten, das sich durch die regelmäßigen bzw. saisonalen Speicherzyklen (Be- und Entladung) als dynamischen Prozess charakterisieren lässt.

6.1 Gesteinsdichte, Porosität und Permeabilität

Der Großteil der untersuchten Sandsteinproben besitzt eine **(Roh-)Dichte** zwischen 2,22 g/cm^3 und 2,36 g/cm^3. An einer Kernprobe der Detfurth-Formation (Fm.) wurde ein niedrigerer Dichtewert von 1,93 g/cm^3 ermittelt, was durch eine erhöhte Porosität von 26,4 % zu erklären ist. Abgesehen von dieser Probe schwankt die **effektive Porosität** der untersuchten Sandsteine überwiegend zwischen 11,2 % und 17,0 % (Abbildung 23). Ein Zusammenhang mit der Tiefe der entnommenen Proben konnte dabei nicht festgestellt werden. Es wurden mehrheitlich **Wasserpermeabilitäten** der Größenordnung < 1 mD festgestellt. Lediglich jeweils eine Probe der Hardegsen- und der Detfurth-Formation aus der Influins-Bohrung bei Erfurt weisen höhere Permeabilitäten um 175 mD unter In-Situ-Bedingungen (Umschließungsdruck P_c = 94,2 bar, entspricht 400 m Tiefe) auf (Abbildung 24).

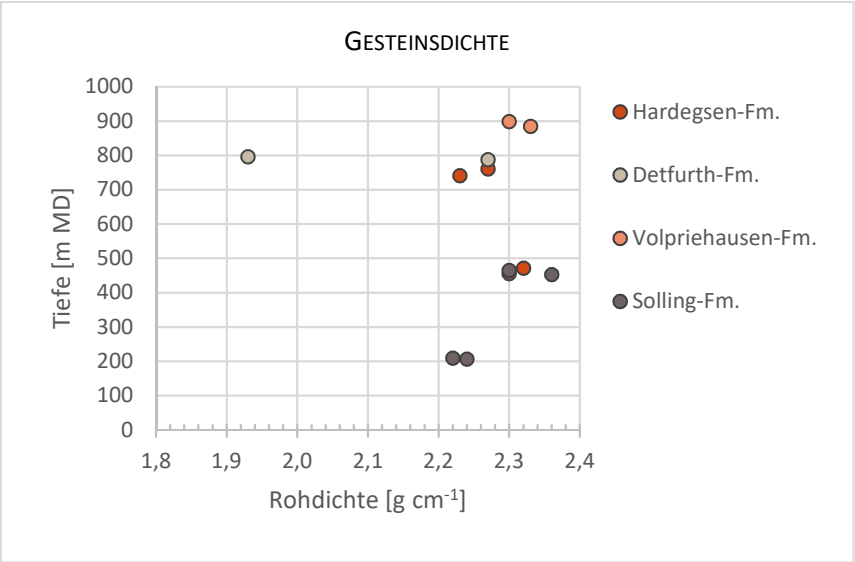


Abbildung 23 Rohdichte der Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins (Fm.: Formation) im Verhältnis zur Entnahmetiefe

Anhand der

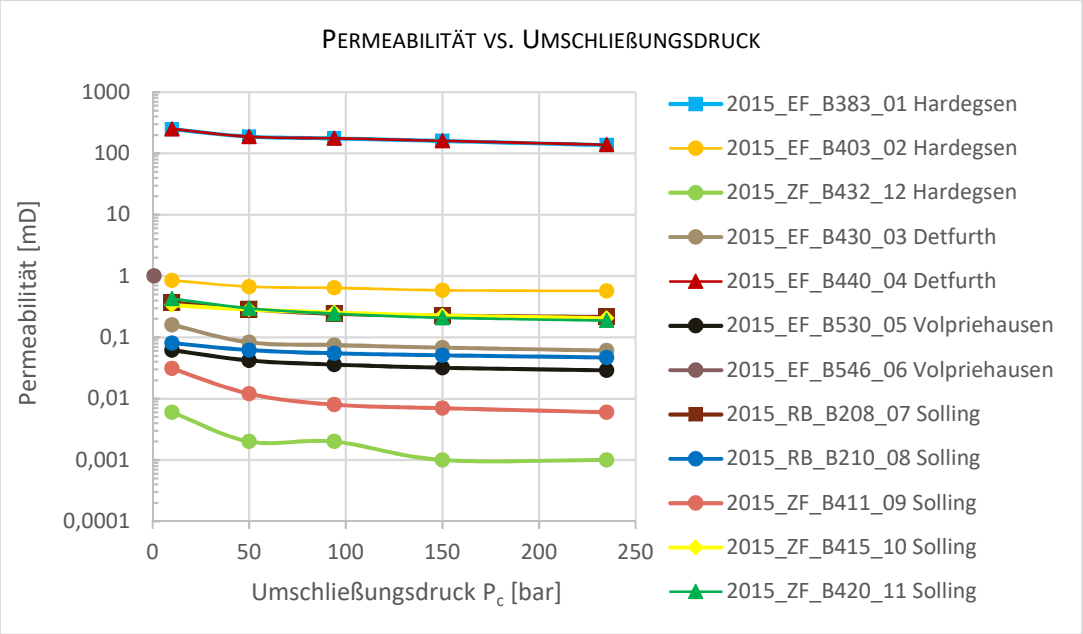


Abbildung 25 wird die Druckabhängigkeit der Permeabilität ersichtlich. Bei steigendem Umschließungsdruck wird das Gestein unter Abnahme des Porenraums komprimiert und damit weniger durchlässig. Es ergibt sich eine Reduktion der Durchlässigkeit um 29 % bis 74 % bzw. 33 % bis 83 % bei einer Erhöhung des Umschließungsdrucks von 10 MPa auf 94,2 MPa bzw. auf 235,4 MPa, was einer Änderung der lithostatischen Druckbedingungen von etwa 40 m auf ca. 400 m bzw. 1000 m Tiefe unter Geländeoberkante entspricht. Demzufolge ist mit zunehmender Tiefe eines potentiellen Speicherhorizontes mit verminderten Permeabilitäten zu rechnen.

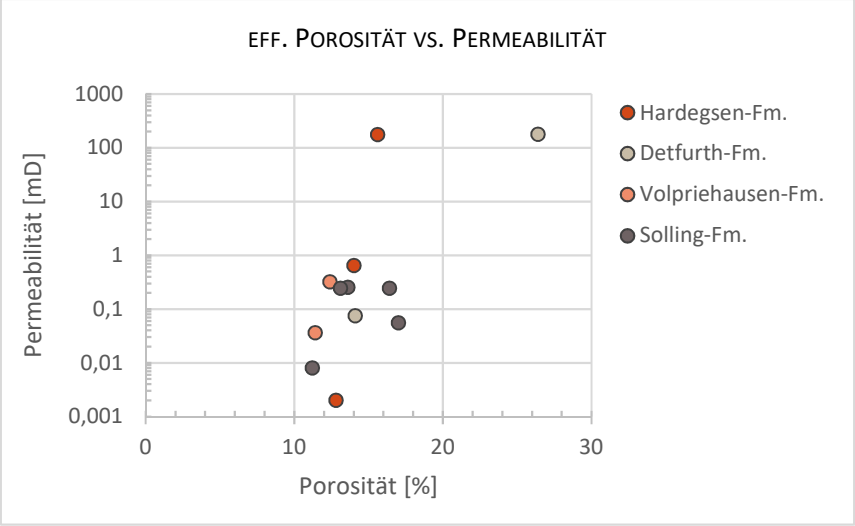


Abbildung 24 Gegenüberstellung der ermittelten effektiven Porosität und der Wasserpermeabilität bei einem Umlagerungsdruck von 94,2 bar (entspricht etwa 400 m u. GOK)

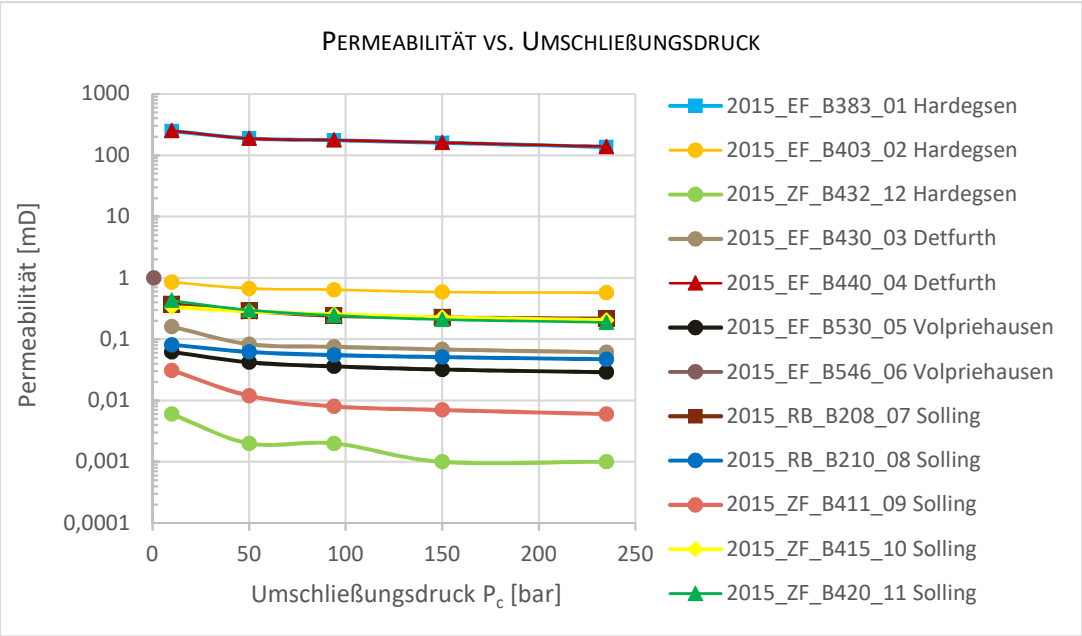


Abbildung 25 Wasserpermeabilität der Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins bei unterschiedlichen Umlagerungsdrücken (P_c = 10 bar ≙ lithostatischem Druck in ca. 40 m Tiefe, P_c = 235 bar ≙ lithostatischem Druck in ca. 1000 m Tiefe. mD: Millidarcy; m MD: Bohrmeter (engl.: meter measured depth)

6.2 Wärmeleitfähigkeit und -kapazität

Die **Wärmeleitfähigkeit** der getesteten Sandsteine liegt im getrockneten Zustand überwiegend im Bereich von 2 W m^{-1} K^{-1} bis 3 W m^{-1} K^{-1} bei einem Mittelwert von etwa 2,5 W m^{-1} K^{-1}. Die Probe EF_B440_04_TL weist dabei den mit Abstand niedrigsten Messwert auf, was durch die relativ hohe Porosität von 26 % zurückzuführen ist, da die in den Poren enthaltene Luft eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt. Für wassergesättigte Proben ist aufgrund der im Vergleich zu Luft höheren Wärmeleitfähigkeit von Wasser mit erhöhten Wärmeleitfähigkeitswerten von etwa 3 W m^{-1} K^{-1} bis 5 W m^{-1} K^{-1} zu rechnen. Mit Hilfe des geometrischen Mischungsgesetzes (s. Kapitel 5.2) wird für die untersuchten Proben auf eine Matrixwärmeleitfähigkeit von ca. 4 W m^{-1} K^{-1} bis 7 W m^{-1} K^{-1} geschlossen.

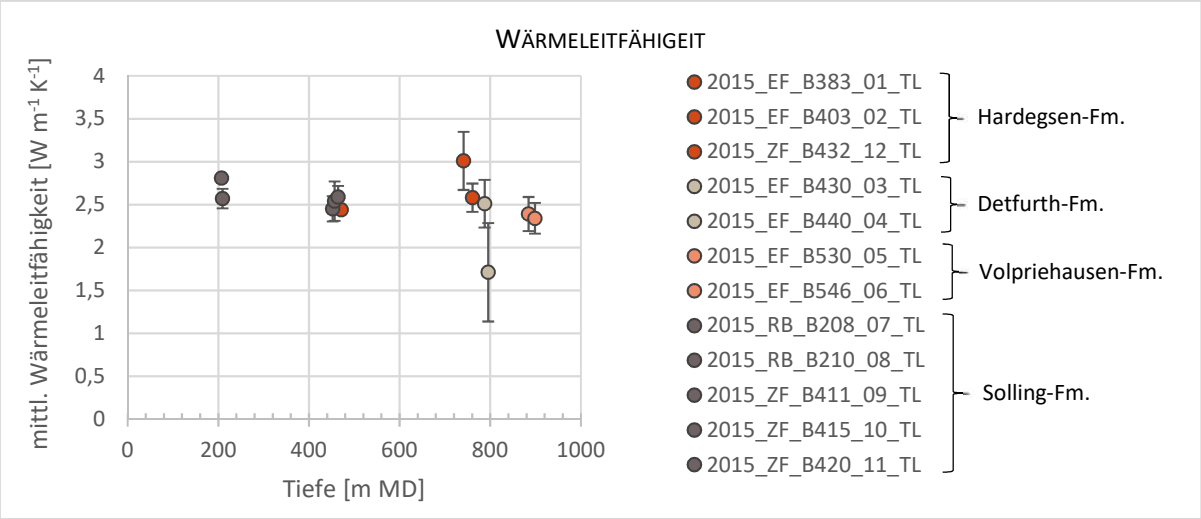


Abbildung 26 Wärmeleitfähigkeit mit Standardabweichung für die Sandsteine des Buntsandsteins. m MD: Bohrmeter (engl.: meter measured depth); Fm: Formation (geol.)

Die erzielten Messergebnisse vereutlichen, dass eine positive Korrelation zwischen der Temperatur und der **Wärmekapazität** besteht, was sich als etwa linearer Zusammenhang herausstellt. Die gemessene spezifische Wärmekapazität liegt bei 35 °C bei 750 J kg^{-1} K^{-1} bis 770 J kg^{-1} K^{-1} und steigert sich für den betrachteten Temperaturbereich (40 °C bis 90 °C) um etwa 15 J kg^{-1} K^{-1} bis 20 J kg^{-1} K^{-1} je 10 °C (siehe Abbildung 27, links). Betrachtet man die Wärmekapazität unter stratigraphischen Gesichtspunkten, so wird aus Abbildung 27 (rechts) ersichtlich, dass die Werte der geologischen Formationen unterschiedlich stark streuen.

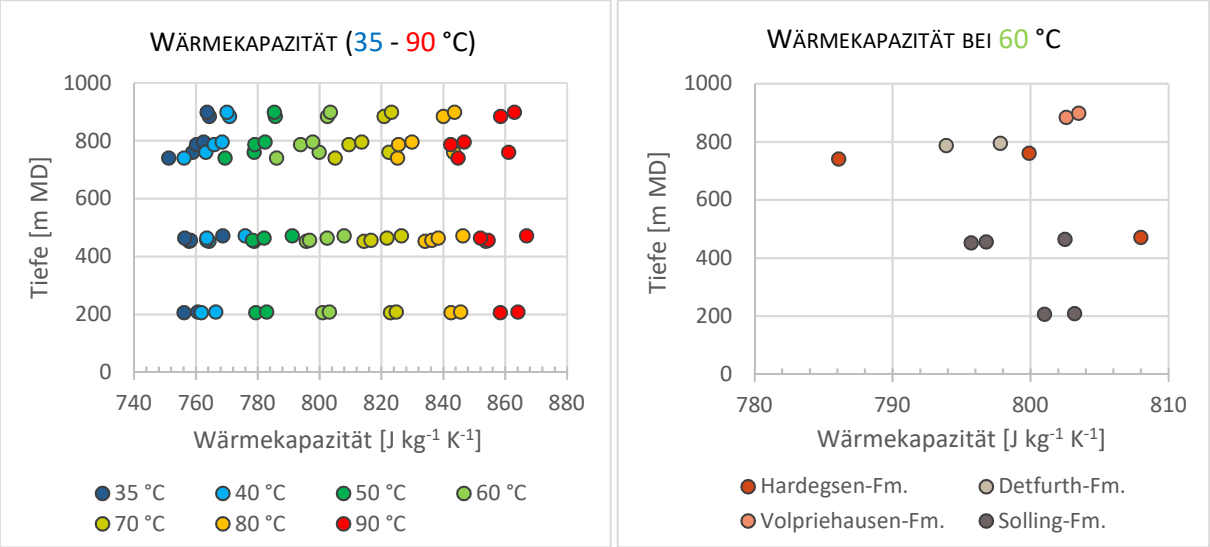


Abbildung 27 Wärmekapazität der Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins für unterschiedliche Temperaturniveaus (links) und nach Stratigraphie bei 60 °C (rechts)

6.3 Wärmeausdehnungskoeffizient

Die Proben weisen nach dem Wässern und noch vor der Erhitzung eine z. T. starke Expansion auf. Diese sogenannte hygrische Dehnung erreicht bei vier Proben einen Wert von > 1 mm/m. Bei der Messung unter trockenen Bedingungen ist bei drei Proben ein Rückgang der Dehnung (Schrumpfung) ab ca. 70 °C trotz fortlaufender Erhitzung bis 80 °C zu beobachten. Zudem weisen diese Proben (neben einer weiteren Probe) eine hohe Restdehnung von > 1 mm/m bei den nassen Messungen auf. Der thermische Ausdehnungskoeffizient α weist für die getrockneten Proben einen Wertebereich von $6{,}6 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} bis $13{,}0 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} auf. Die wassergesättigten Proben zeigten einen wesentlich geringeren Wertebereich von $2{,}9 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} bis $121{,}0 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} (Abbildung 28).

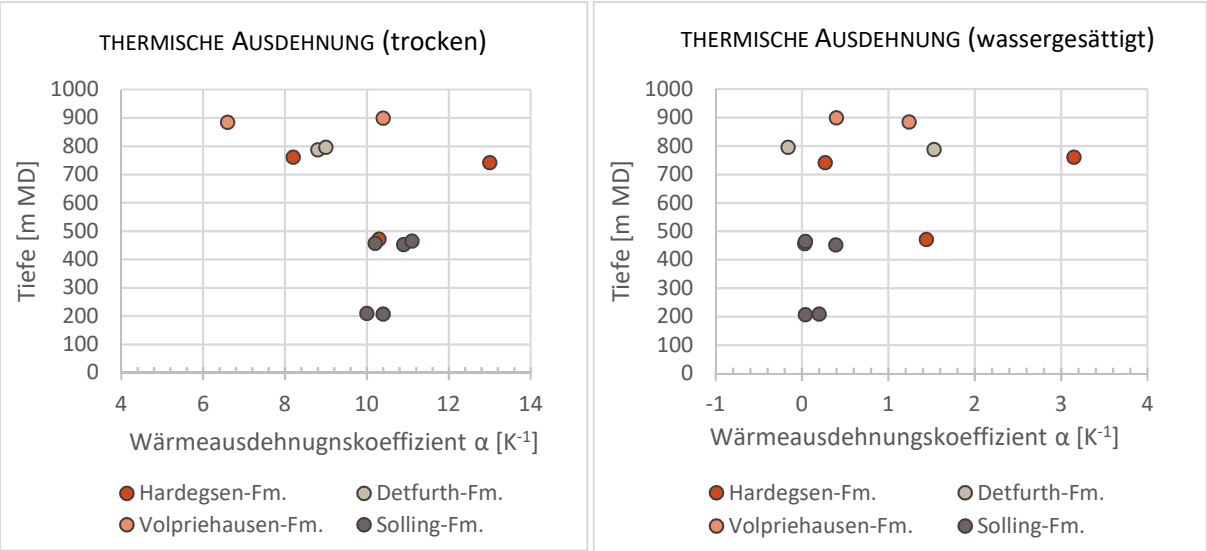


Abbildung 28 Thermische Ausdehnung der untersuchten Sandsteinproben des Buntsandsteins für trockene und wassergesättigte Proben

6.4 Bewertung der hydraulischen und thermophysikalischen Eigenschaften

Um das gesamte Spektrum der für Sandsteine typischen Gesteinseigenschaften aufzuzeigen sind in Tabelle 11 die laboranalytischen Ergebnisse der aktuellen Studie einer Auswahl von Referenzwerten gegenübergestellt.

Insgesamt wurden überwiegend sehr niedrige **Wasserpermeabilitäten** festgestellt. Lediglich zwei Proben der Hardegsen- und der Detfurth-Formation aus der Influins-Bohrung bei Erfurt weisen erhöhte Permeabilitäten auf. Die durchgeführten Durchlässigkeitsmessungen in einer Druckzelle deuten auf eine Abnahme der Permeabilität infolge eines steigenden Überlagerungs-/Umschließungsdruckes. Hinsichtlich der Gesteinspermeabilität eignen sich folglich Aquifere in geringen Tiefen bzw. in (Sediment-)Gesteinen mit geringer Versenkungshistorie.

Die **Wärmeleitfähigkeit** eines Gesteins ist von dessen mineralogischer Zusammensetzung abhängig. Die höheren Werte der ermittelten Matrixwärmeleitfähigkeiten von ca. 7 W m^{-1} K^{-1} werden wahrscheinlich durch einen erhöhten Gehalt an gut wärmeleitfähigem Quarz ($\lambda \approx 7{,}7$ W m^{-1} K^{-1}, SCHÖN 2011) hervorgerufen. Niedrigere Werte sind durch weitere gesteinsbildende Minerale wie Karbonate, Feldspäte, Glimmer oder Tonminerale zu erklären, deren Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von 1,5 W m^{-1} K^{-1} bis 5 W m^{-1} K^{-1} liegen.

Die **spezifische Wärmekapazität** liegt in einem für Sandsteine mit hohem Quarzanteil üblichen Bereich.

Temperaturbedingte **Längenänderungen** bzw. die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Testkörper bewegen sich im für Sandsteine typischen Bereich. Darüber hinaus ist neben deutlichen Expansionsphänomenen bei Wasserzugabe (hygrische Dehnung) mit Werten > 1 mm/m auch ein Rückgang der Dehnung trotz Temperaturerhöhung von 70 °C auf 80 °C aufgetreten. Diese Vorgänge sind vermutlich auf eine Wasseraufnahme und -abgabe der Tonminerale zurückzuführen. Ton und Tonminerale sind sowohl als Schichten als auch fein verteilt innerhalb der Sedimentgesteine des Buntsandsteins weit verbreitet (LANG 2001, BEYER et al. 2014b).

Tabelle 11 Petro- u. thermophysikalische Gesteinseigenschaften der untersuchten Sandsteine des Buntsandsteins aus Thüringen gegenüber Literaturangaben zu Sandsteinen. Werte in Klammern: hochporöser Sandstein der Detfurth-Formation.

	Wertebereich GAIA (thüringischer Buntsandstein) [1]	Sandstein-Referenzwerte
Dichte [kg m^{-3}]	2200 – 2700	2.000 – 2.900 [4, 6]
Porosität [Vol.-%]	11,4 – 17,0 (26,4)	1 – 27 [5, 6]
Permeabilität [mD]	0,01 – 0,8 (251,5) (P_c = 10 bar)	0,01 – 3.000 [6]
therm. Ausdehnungskoeff. [K^{-1}]	$2{,}90 \cdot 10^{-6} – 1{,}21 \cdot 10^{-4}$	$0{,}5 \cdot 10^{-5} – 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ [6, 8]
Wärmeleitfähigkeit [W m^{-1} K^{-1}]	(1,7) 2,3 – 3,0	1,5 – 3,5 [2, 3]
Wärmekapazität [J kg^{-1} K^{-1}]	750 – 770	700 – 1.000 [6, 7]
therm. Ausdehnungskoeff. [K^{-1}]	$2{,}90 \cdot 10^{-6} – 1{,}21 \cdot 10^{-4}$	$0{,}5 \cdot 10^{-5} – 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ [6, 8]

[1] Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns: 2015/2016 Poro-Perm und Wärmekennwerte GAIA – Abschlussbericht, [2] Fuchs & Förster (2010), [3] Franz, C. & Schulze (2016), [4] Müller 2009, [5] Kunkel (2016), [6] Schön (2011), [7] Stober & Bucher (2020), [8] Hannoschöck (2018)

7 Ergebnisse der T-H-M-Modellierungen

7.1 Implementation der T-H-M-Kopplung

In AP 2.4 wurde zunächst damit begonnen die in AP 1.5 hergeleiteten Zusammenhänge und Gleichungen prototypenhaft zu implementieren und den vorhandenen Simulator zu erweitern. Die Einführung des thermischen Teilmodells wird in Abschnitt 7.1.1 beschrieben. Abschnitt 7.1.2 stellt die Erweiterung des vorhandenen H-M Simulators um die Aspekte der Poroelastizität dar. Sowohl für das thermische Teilmodell als auch für den erweiterten H-M Simulator wurden erste Testsimulationen durchgeführt. Insbesondere bei kleinen Testrechnungen mit dem poroelastischen Modell (Simulation von drainierten und undrainierten Triaxialversuchen) zeigte sich, dass die prototypenhafte Implementation sowohl aus Gründen der Performanz (die Erweiterung der Kopplung erfordert entweder sehr kleine Zeitschritte oder mehrere Iterationen pro Zeitschritt) als auch aus Stabilitätsgründen (in den Teilmodellen konnte es zu nicht physikalischen Oszillationen der Ergebnisgrößen kommen) nicht für die im Projekt geplante Simulation eines Wärmespeichers ausreichend ist.

Daher wurde untersucht, ob eine direkte Kopplung mittels der in Ansys vorhandenen CPT (gekoppelte hydraulisch-thermisch-mechanische) Elemente die erforderlichen Zusammenhänge ausreichend genau abbildet. Abschnitt 7.1.3 stellt diese Elemente kurz vor und beschreibt das daraus abgeleitete Simulationsmodell. Im Ergebnis zeigte sich, dass diese Elemente die Theorie poröser Medien auf Basis der Poroelastizität abbilden. Im Vergleich zum geplanten T-H-M Simulator, fehlt in diesen Elementen vor allem die Rückkopplung aus Rissentstehung auf die hydraulische Durchlässigkeit. Da in der geplanten Anwendung eine Rissbildung unerwünscht ist, konnte dieser Effekt vernachlässigt werden. Außerdem können die entsprechenden nichtlinearen Materialmodelle mit den Elementen verwendet werden, so dass ein Versagen des Materials dennoch erkannt wird. Im weiteren Verlauf des Projektes wurden daher ein auf den CPT-Elementen basierendes Modell verwendet.

7.1.1 Thermische Teilmodell

Bei der Simulation des T-H-M-Systems kommt die auf der finiten Elemente Methode basierende Simulationsumgebung Ansys Mechanical APDL zum Einsatz. Für das thermische Teilmodell wird auf das in Ansys vorhandene Element SOLID70 zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um ein drei-dimensionales thermisches Brick-Element mit 8 Knoten. Dieses Element kann die Wärmeausbreitung in einem homogenen Material sowohl infolge Wärmeausbreitung als auch infolge Massentransports abbilden. In (RANJAN 2015) wurden diese Elemente bereits zur Simulation der Wärmegewinnung durch petrothermale Geothermie mittels des Hot-Dry-Rock Verfahrens, z.B. STOBER et al. (2009), erfolgreich eingesetzt.

Durch das Element werden die poroelastischen Aspekte, wie z.B. das 2 Phasensystem, nicht direkt abgebildet. Sie können aber durch entsprechende Anpassung der Elementparameter berücksichtigt werden. Die dem Element zugrundeliegende Differentialgleichung der Energieerhaltung bei Wärmeausbreitung kann wie folgt geschrieben werden

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot [\boldsymbol{\Lambda} \nabla \mathrm{T}] + \rho C \boldsymbol{v} \cdot \nabla T = Q_T, \tag{41}$$

wobei $\boldsymbol{v}$ die Strömungsgeschwindigkeit darstellt. Gleichung (41) unterscheidet sich von Gleichung (10) im Transport-Term (jeweils der dritte Term). Es kann folgender Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem Darcy-Durchfluss hergestellt werden

$$\boldsymbol{v} = \frac{\rho_W C_W}{\rho C} \boldsymbol{q_H}. \tag{42}$$

Weiterhin wird angemerkt, dass es sich bei den Materialparametern ρC und $\boldsymbol{\Lambda}$ um homogenisierte Werte handelt, welche nach Gleichung (2) bzw. Gleichung (6), aus den Dichten, spezifischen Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten des Gesteins und des Wassers berechnet werden. Außerdem kann es zur Stabilisierung des Transportproblems zu einer Anpassung der Wärmeleitfähigkeiten kommen. Die erforderliche Erhöhung der Leitfähigkeiten wird auf Basis von Gleichung (13) berechnet. Dabei wird die Elementgröße L vereinfachend über folgende Gleichung abgeschätzt

$$L = \max\{ l_{eq,h} \,;\, l_{eq,v}\}, \tag{43}$$

mit

$$l_{eq,h} = \sqrt{\frac{V_e}{l_{eq,v}}}, \tag{44}$$

wobei V_e das Elementvolumen und $l_{eq,v}$ die Elementhöhe ist. In diesem Zusammenhang wird angemerkt, dass mit der aktuellen Version Ansys 2021 R2 das thermisches Element SOLID278 zur Verfügung steht, welches die Stabilisierung des Transport-Problems mittels der SUPG Methode realisiert. Es wird empfohlen, dieses Element in zukünftigen Projekten dieser Art einzusetzen, da eine künstliche (nicht physikalische) Erhöhung der Leitfähigkeit bei hohen Transportgeschwindigkeiten dann nicht mehr notwendig ist.

Im vorhandenen H-M Simulator werden unterschiedliche Vernetzungen für das mechanische und das hydraulische Teilmodell eingesetzt. Zur Abbildung der starken Porendruckgradienten in Bereichen mit um mehrere Größenordnungen unterschiedlichen Durchlässigkeiten, ist die Vernetzung im hydraulischen Modell wesentlich feiner. Bei der Erstellung des hydraulischen Netzes wird ein mechanisches Element jeweils durch 8 hydraulische Elemente ersetzt. Im thermischen Teilmodell wird ebenfalls die feinere Vernetzung des hydraulischen Modells verwendet, da es über die Strömungsgeschwindigkeit eine sehr starke Kopplung zwischen beiden Teilmodellen gibt. Bei der Erstellung des thermischen Teilmodells wird zunächst das hydraulische Teilmodell kopiert und die hydraulischen Elemente durch die entsprechenden thermischen Elemente ersetzt. Weiterhin werden die Elementparameter entweder direkt als Materialparameter (Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit) oder als so genannte Real-Konstanten (Strömungsgeschwindigkeiten) definiert. Diese Real-Konstanten können während der Simulation im Rahmen eines Restarts angepasst werden. Dies stellt dann die Kopplung zum hydraulischen Modell dar. Der Darcy-Durchfluss wird als Ergebnis der hydraulischen Analyse in jedem Zeitschritt extrahiert. Unter Verwendung von Gleichung (42) werden die skalierten Strömungsgeschwindigkeiten berechnet und auf das thermische Element übertragen. Da in beiden Modellen identische Vernetzungen verwendet werden, kann dies als 1:1 Mapping direkt über die Elementnummer realisiert werden.

Zusätzlich müssen im thermischen Teilmodell noch die initialen Temperaturen, die Randbedingungen und die Belastung definiert werden. Das initiale Temperaturfeld wird als lineare Funktion über eine Referenztemperatur an der Oberfläche (z=0) und einen Gradienten definiert. Mit dieser Funktion kann für jeden Knoten mittels der z-Koordinate die jeweilige Anfangstemperatur berechnet werden. Diese werden dann mittels des IC-Kommandos auf die Knoten aufgebracht. In der Simulation wird nur ein Ausschnitt des Untergrundes betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass der Ausschnitt so groß ist, dass sich die Temperaturen auf dem Rand des Ausschnitts während der Simulation nicht ändern. Entsprechend werden auf den Randknoten die initialen Temperaturen als feste Randbedingungen mittels des D-Kommandos definiert. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass diese Annahme in der Auswertung der Simulation relativ einfach durch Betrachtung der Wärmeströme in den Randknoten überprüft werden kann. Kommt es zu nennenswerten Wärmeströmen, ist der Simulationsbereich zu klein. Wird Wasser mit einer bestimmten Temperatur in das Reservoir eingebracht, wird diese Temperatur an den entsprechenden Knoten (das sind Knoten, welche im hydraulischen Modell die Brunnen repräsentieren) ebenfalls als Randbedingung definiert. Diese Temperaturen können als Funktionen der Zeit definiert werden. Wird Wasser aus dem Reservoir entnommen, dann werden an den entsprechenden Knoten keine Temperaturrandbedingungen definiert bzw. vorhandene Randbedingungen gelöscht.
In der Auswertung des thermischen Teilmodells werden primär die Temperaturen betrachtet. Dabei kann sowohl die räumliche Verteilung als auch der zeitliche Verlauf am Brunnen ausgewertet werden. Weiterhin werden die Knotentemperaturen für die Kopplung an das mechanische Modell extrahiert.
Die in dem Abschnitt prototypenhaft erfolgten Implementationen wurden in der von Ansys bereitgestellten Programmiersprache APDL realisiert.

7.1.2 Poroelastizität

Zusätzlich zu der Einführung des thermischen Teilmodells, wurde die vorhandene H-M Kopplung um Aspekte der Poroelastizität erweitert. Im mechanischen Teilmodell wurde dazu der Biotkoeffizient bei der Berechnung der effektiven Spannungen eingeführt. Dies betraf einerseits die Berechnung der initialen effektiven Spannungen nach Gleichung (31) und die Anpassung der Strömungskräfte nach Gleichung (36). Diese Änderungen wurden direkt in den Berechnungsmakros mittels der Skriptsprache APDL prototypenhaft eingeführt.

Im hydraulischen Teilmodell wurde der zusätzliche Einfluss der Volumenänderung auf den Porendruck berücksichtigt. Die Volumenänderung wird über die Volumendehnungen, welche ein Ergebnis der mechanischen Analyse sind, beschrieben. Dazu wurde prototypisch in C++ eine Ansys-Userfunction implementiert, welche die Dehnungen an den Integrationspunkten (diskrete Punkte, an denen die Spannungen berechnet werden) extrahiert, die Volumendehnungen berechnet und den entsprechenden hydraulischen Elementen zuordnet. Diese Daten werden dann für die Kopplung zum hydraulischen Modell in eine ASCII-Datei geschrieben. Im hydraulischen Modell werden die Volumendehnungen eingelesen und die Dehnraten berechnet. Diese werden dann nach Gleichung (26) als zusätzliche Quell- bzw. Senkterme auf das jeweilige Element mittels des BFE Kommandos aufgebracht. Die prototypische Anpassung erfolgte wieder mittels APDL direkt in den Berechnungsmakros des hydraulischen Modells.

Eine weitere Anpassung im hydraulischen Modell betraf den spezifischen Speicherkoeffizienten S_s. Im ursprünglichen H-M Modell wurde dieser Parameter mittels der Volumenbilanz an das Risswachstum angepasst. Im poroelastischen Modell ist dieser Parameter an den Biot-Modul gekoppelt, Gleichung (23). Dieser ist eine Funktion der Porosität und der Kompressionsmodule, Gleichung (15).

Die Porosität des Gesteins und die Kompressionsmodule des Gesteins und des Wassers werden wie der Biotkoeffizient als zusätzliche Eingangsparameter in das Modell eingeführt. Der Biot-Modul und der spezifische Speicherkoeffizient werden am Beginn der Simulation aus diesen Parametern berechnet. Diese Berechnung erfolgt direkt bei der Definition der Eingangsparameter mittels der Skriptsprache APDL.

In ersten Testrechnungen mit dem an die Poroelastizität angepassten H-M Modell, kam es zu numerischen Instabilitäten. Dabei wurden einfache Triaxialversuche unter drainierten und undrainierten Bedingungen simuliert. Die Instabilitäten zeigten sich in Oszillationen der Ergebnisgrößen. Als Ursache wurde der im Vergleich zum Originalmodell deutlich geringere spezifische Speicherkoeffizient und die explizite Kopplung (eine Kopplungsiteration pro Zeitschritt) vermutet. Durch deutliche Verringerung der Zeitschrittweite, konnten diese Instabilitäten reduziert werden. Da diese Zeitschrittweiten für die Simulation eines Wärmespeichers unrealistisch klein waren, wurde versucht durch Iterationen zwischen den beiden Teilmodellen innerhalb eines Zeitschrittes die Kopplung ins Gleichgewicht zu bringen und die Schrittweiten wieder zu erhöhen. Diese Änderungen im Berechnungsablauf wurde ebenfalls prototypisch mittels APDL in die Berechnungsmakros eingeführt. Im Ergebnis führten diese Anpassungen nicht zu einer wesentlichen Verbesserung. Daher war eine Simulation des Betriebes eines Wärmespeichers über 30 Jahre mittels des angepassten H-M Modells und sequenzieller Kopplung nicht möglich. Als Alternative wurde eine direkte Kopplung (die Teilmodelle und die zugehörigen Kopplungen werden gleichzeitig gelöst) untersucht.

7.1.3 Ansys CPT Elemente

Das nicht-lineare FEM-Programmsystem Ansys bietet zur Lösung des Strömungsproblems in porösen Medien so genannte CPT-Elemente (coupled pore-pressure-thermal elements) an. Mit diesen Elementen können mechanisch-hydraulisch-thermisch gekoppelte Probleme simuliert werden. Grundlage dieser Elemente ist die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellte Biot-Theorie, (BIOT 1941). In Ansys erfolgt die Lösung der poroelastischen Differentialgleichungen mit Standard (Galerkin) Finiten Elementen (ZIENKIEWICZ et al. 1990). Dabei wird eine direkte implizite Kopplung verwendet. Dies bedeutet, dass die entsprechenden Teilmodelle und die zugehörigen Kopplungen gleichzeitig gelöst werden. In jedem Zeitschritt wird das Gleichgewicht iterative mittels des Newton-Raphson Verfahrens bestimmt.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung unterstützten diese Elemente nur Wärmeausbreitung infolge Wärmeleitung (ANSYS INC. 2018). Da im Wärmespeicher ein wesentlicher Teil der Wärmeausbreitung durch den Transport der Wärme durch das Fluid erfolgt, wurden diese Elemente für die Simulation zunächst nicht vorgesehen. Ein weiterer Aspekt ist, dass mit diesen Elementen nichtlineare Materialformulierungen, z.B. zur Beschreibung von Rissbildung, zwar verwendet werden können, aber eine Rückkopplung auf das hydraulische Teilmodell, z.B. Erhöhung der Durchlässigkeiten infolge von Rissen, nicht vorgesehen ist.

Auf Grund der Probleme mit der Stabilität und der Performanz der prototypenhaften Erweiterung des vorhandenen H-M-Simulators, wurde im Projektverlauf untersucht, ob die CPT Elemente trotz der oben beschriebenen Limitationen verwendet werden können. Dabei wurde festgestellt, dass diese Elemente inzwischen von Ansys so weiterentwickelt wurden, dass bei der Wärmeausbreitung auch der Wärmetransport berücksichtigt werden kann (ANSYS INC. 2022a). Damit sind diese Elemente für die Simulation des Wärmespeichers geeignet. Die Kopplung des Materialversagens mit der Durchlässigkeit ist auch weiterhin nicht möglich. Da ein Materialversagen bei der Simulation des Betriebes des

Wärmespeichers nicht gewollt ist, wird dieser Effekt im Weiteren als sekundär betrachtet. Durch den Einsatz nichtlinearer Materialformulierungen ist es dennoch möglich Materialversagen während der Simulation zu erkennen und entsprechende Parameterkombinationen als ungeeignet zu identifizieren. Im weiteren Verlauf des Projektes wurden die CPT Elemente für die Simulation des Speichers eingesetzt.

Bei den eingesetzten CPT-Elementen handelt es sich ebenfalls um drei-dimensionale Brick-Elemente mit 8 Knoten. Da eine direkte Kopplung vorliegt, sind neben den drei Verschiebungsfreiwerten des mechanischen Teilmodells auch der Porendruck (hydraulisches Teilmodell) und die Temperatur (thermisches Teilmodell) als Freiwerte am Knoten definiert. Analog zur ursprünglichen Modellierungs-strategie, wird ein parametrisches Modell mittels APDL aufgebaut. Bei der Geometrieerstellung und Vernetzung wird von einer horizontalen Schichtung des Speichers ausgegangen. Die Vernetzung erfolgt zunächst zwei-dimensional in der Horizontalebene. Die Volumenvernetzung des Speichers wird dann durch Aufziehen des 2D-Netzes in vertikaler Richtung erzeugt. Mit diesem Ansatz kann in horizontaler Richtung ein unstrukturiertes Netz und in vertikaler Richtung eine sich an der Schichtung orientierende strukturierte Vernetzung erzeugt werden. Diese stellt in der Regel einen guten Kompromiss zwischen Abbildungsgenauigkeit (Netzfeinheit) und Rechenaufwand (Gesamtanzahl an Elementen) dar.

Die Simulation mit CPT Elementen erfordert in Ansys einen besonderen Berechnungsablauf. Dieser ist notwendig um den Einfluss der Erdbeschleunigung konsistent, sowohl im mechanischen Teilmodell bei der Definition des Gleichgewichtes im totalen Spannungsraum als auch im hydraulischen Teilmodell bei der Definition der Massenbilanz auf Basis der Porendrücke, zu berücksichtigen. Ansys stellt dafür einen eigenen Analysetyp (ANTYPE, SOIL) bereit. Zusätzlich muss die Richtung der Erdbeschleunigung definiert werden (SSOPT, SFSW). Die Magnitude der Erdbeschleunigung kann einerseits direkt als Parameter des porösen Mediums (TB, PM, …, …, …, GRAV) definiert werden, oder andererseits indirekt über die Wichten bei der Definition der Materialparameter des Wassers (TB, PM, …, …, …, FP) und des Gesteins (TB, PM, …, …, …, SP) berücksichtigt werden. Da sowohl im hydraulischen Teilmodell als auch im thermischen Teilmodell instationäre Zustände betrachtet werden, müssen zu Beginn der Rechnung die initialen Porendrücke und Temperaturen definiert werden (IC, …, PRES bzw. IC, …, TEMP). Zusätzlich kann im mechanischen Teilmodell ein initialer Spannungszustand definiert werden (INISTATE). Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den initialen Spannungen um effektive Spannungen handelt. Nach der Definition das Ausgangszustandes, ist es sinnvoll diesen in einem ersten Berechnungsschritt ins Gleichgewicht zu bringen und das gekoppelte System damit konsistent zu initialisieren. Dafür bietet Ansys eine so genannten geostatischen Berechnungsschritt an (SSOPT, GEOSTATIC). Dabei werden die transienten Effekte vernachlässigt und eine stationäre Lösung für den Ausgangszustand berechnet. In den folgenden Berechnungsschritten wird dann das instationäre Problem gelöst. Dazu müssen die transienten Effekte wieder aktiviert werden (SSOPT, CONSOLIDATION).

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Simulation mit CPT Elementen ist die Definition der Materialparameter. Da es sich um ein gekoppeltes Problem handelt, müssen mehrere Materialdefinitionen miteinander kombiniert werden:

- Basisparameter des porösen Mediums (TB, PM):

  - Erdbeschleunigung (GRAV)
  - Hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte (PERM)
  - Biotkoeffizient und Biot-Modul (BIOT)
  - Wichte und Kompressibilität des Gesteins (SP)
  - Wichte und Kompressibilität des Wassers sowie die Porosität (FP)
- Thermische Eigenschaften (TB, THERM)
  - Wärmeleitfähigkeiten (COND)
  - Spezifische Wärmekapazität des Gesteins (SPHT)
  - Spezifische Wärmekapazität des Wassers (FLSPHT)
- Thermische Ausdehnungskoeffizienten (TB, CTE)
  - Gestein (Standarddefinition)
  - Wasser (FLUID)
- Mechanische Eigenschaften (die genaue Definition hängt vom verwendeten Modell ab)
  - Elastizitätsparameter, z.B. E-Modul und Querdehnzahl
  - Parameter des nichtlinearen Materialverhaltens, z.B. Zugfestigkeit od. Reibungswinkel

Es ist zu beachten, dass nicht notwendigerweise alle oben genannten Parameter definiert werden müssen. Einige können aus anderen Parametern abgleitet werden, z.B. der Biot-Modul aus den Kompressibilitäten. Für eine genauere Beschreibung der Materialparameter und ihrer Verwendung wird auf die entsprechenden Kapitel in der „Material Reference“ (ANSYS INC. 2022b) und die entsprechenden Beispiele in den „Technology Showcases“ (ANSYS INC. 2022c) der Ansys Dokumentation verwiesen. Die CPT Elemente erlauben es für die Beschreibung des mechanischen Materialverhaltens selbst definierte Materialgesetze zu verwenden (TB, USER). Damit ist es möglich, die bereits im vorhandenen H-M Simulator verwendeten Materialgesetze für Fels weiterhin einzusetzen. Diese auf der Mehrflächenplastizitätstheorie basierenden nichtlinearen Materialbeschreibungen sind in der von Dynardo bereitgestellten Bibliothek multiPlas verfügbar (DYNARDO GMBH 2019).

7.2 Bewertung der thermischen Funktionalität

In AP 2.5 wurden Verfahren zur Auswertung der T-H-M Simulation und zur Bewertung der thermischen Funktionalität des Speichers entwickelt. Einfache Darstellungen primärer Ergebnisgrößen, z.B. Temperatur, Porendruck oder Spannungen, können direkt in Ansys erfolgen. Für komplexere Visualisierungen wurde das bei Dynardo entwickelte Visualisierungstool Tamino verwendet. Dazu wurde das Netz (Knoten und Elemente) und die folgenden Ergebnisgrößen aus der Ansys Ergebnisdatenbank extrahiert und in ASCII Dateien exportiert:

- Mechanisches Teilmodell
  - Verschiebungen
  - Totale, elastische, plastische und thermische Dehnungen
  - Totale und effektive Spannungen
- Hydraulisches Teilmodell
  - Porendruck
  - Volumenstrom des Fluids (Filtergeschwindigkeit)
- Thermisches Teilmodell
  - Temperatur
  - Wärmestrom

Die einzelnen Ergebnisgrößen werden in separaten ASCII-Dateien abgelegt. Außerdem wird für jeden Zeitschritt eine neue ASCII Datei erstellt. Der jeweilige Dateiname setzt sich aus einem Basisnamen (Ergebnisgröße) und einem Zeitstempel zusammen.
Zusätzlich wurde an den Brunnen der zeitliche Verlauf der Temperaturen, des Porendrucks und des Fluidstroms extrahiert und ebenfalls in ASCII Dateien exportiert. Aus diesen skalaren Daten können dann die ein- bzw. ausgetragenen Wärmeströme berechnet werden und die Speichereffizienz abgeleitet werden. Weiterhin kann aus der Veränderung des Porendrucks am Brunnen die erforderliche Pumpleistung abgeleitet werden. Sowohl für die Visualisierung in Ansys als auch für den Export der Daten aus Ansys wurden prototypenhaft Makros in der von Ansys bereitgestellten Skriptsprache APDL implementiert.
Für die Weiterverarbeitung der Daten müssen diese zunächst in das Tamino Format konvertiert werden. Dabei erfolgt auch eine Komprimierung der Daten. Sowohl für die Konvertierung als auch für die späterer Darstellung der Daten in Tamino ist eine abstrakte Beschreibung der vorliegenden Daten erforderlich. Diese erfolgt für jede Ergebnisgröße in einer so genannten Layout Datei. Diese Dateien verwenden das XML-Format zur Beschreibung der Daten in den aus Ansys exportierten ASCII Dateien. Wesentliche Bestandteile dieser XML-Dateien sind:

- Basisname der ASCII-Datei (ohne Zeitstempel)
- Name der Ergebnisgröße, z.B. effektive Spannungen
- Name und Reihenfolge der Komponenten der Ergebnisgrößen, z.B. σ'_{xx}, σ'_{yy}, …
- Einheit der Komponenten, z.B. MPa
- Zuordnung der Ergebnisgröße zum Element (Spannungen, Dehnungen, Volumenstrom oder Wärmestrom) oder zum Knoten (Verschiebungen, Porendruck, Temperatur)

Für die oben genannten Ergebnisgrößen wurden die entsprechenden XML-Dateien erstellt. Die eigentliche Konvertierung der Daten erfolgt dann mit einem von Tamino bereitgestellten Konvertierungstool.
In Tamino wird die eigentliche Visualisierung mittels einer graphischen Programmierung definiert. Dieser so genannt Workflow beschreibt den Datenfluss vom Einlesen der Daten bis zur ihrer finalen Darstellung. Ein wesentlicher Bestandteil des Workflows sind Knoten. An diesen werden Operationen auf den Daten durchgeführt. Ein Knoten besteht im Allgemeinen aus Ein- und Ausgangsdaten, welche durch die entsprechende Operation miteinander verknüpft sind. Einzelne Knoten können jeweils so miteinander verbunden werden, dass die Ausgangsdaten des einen Knoten die Eingangsdaten des nächsten Knoten sind. In Tamino stehen folgende Knoten zur Verfügung:

- Einlesen des Datensatzes einer Simulation
- Selektion von Ergebnisgrößen zu einem bestimmten Zeitpunkt
- Player – Schleife über die Zeitschritte
- Mathematische Operationen, z.B. können mehrere Ergebnisgrößen miteinander kombinieren
- Selektion von Elementen auf Basis von Ergebnisgrößen oder daraus berechneter Größen
- Visualisierung der Daten auf den selektierten Elementen
- Export berechneter Größen

Durch die Kombination und Verbindung unterschiedlicher Knoten können sehr komplexe Visualisierungen erstellt werden.
Für den Wärmespeicher wurde prototypenhaft ein Workflow implementiert, welcher die Veränderung der Temperaturen bzw. des Porendrucks zum jeweiligen Initialzustand darstellt. Weiterhin können auf

Basis dieser Relativgrößen Elemente selektiert werden, bei denen die Veränderung einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Diese Darstellung ermöglicht die Identifizierung eines thermischen Kurzschlusses. Dieser tritt ein, wenn in der Selektion die beiden Brunnen miteinander verbunden sind. Eine wichtige skalare Größe zur Bewertung der Funktionalität des Wärmespeichers ist die Speichereffizienz bzw. die thermische Rückgewinnung. Nach SOMMER (2015) berechnet sich die Speichereffizienz η einer Betriebsperiode aus dem Verhältnis zwischen extrahierter Wärmeenergie E_{ex} und eingetragener Wärmeenergie E_{in}

$$\eta = \frac{E_{ex}}{E_{in}}. \tag{45}$$

Die innerhalb eines Zeitbereiches $[t_1, t_2]$ eingelagerte bzw. ausgelagerte Wärmeenergie ergibt sich für einen Brunnen zu

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \rho_W c_W Q_{Pump} [T(t) - T_0] \mathrm{d}t, \tag{46}$$

wobei ρ_W die Dichte des Wassers, c_W der spezifische Speicherkoeffizient des Wassers, Q_{Pump} die Pumprate, $T(t)$ die Temperatur des Wassers am Brunnen zum Zeitpunkt t und T_0 die initiale Temperatur ist. Wird die Effizienz eines Systems mit mehreren Brunnen betrachtet, dann werden die einzelnen Wärmeenergien addiert.

7.3 Verifizierung und Kalibrierung des T-H-M-Modells

In AP 3.2 wurde das in AP 2.4 entwickelte T-H-M-Modell verifiziert. In einem ersten Schritt erfolgte die Verifikation für Teilaspekte des Modells anhand von in Laborversuchen bestimmten experimentellen Daten. In diesem Zusammenhang kamen bei der Nachrechnung der Laborversuche reduzierte Modelle zum Einsatz. Die Simulation zeigte das in den Laborversuchen prognostizierte Verhalten.
In einem zweiten Schritt wurde das T-H-M-Modell an einem vom Projektpartner JENA-GEOS bereitgestellten Modell (STEFFAHN et al. 2019) verifiziert. Die Simulation mit den CPT-Elementen zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen einer vergleichbaren Simulation mit dem Programm FEFLOW (DHI 2022, DIERSCH 2014).

7.4 Nachrechnung Laborversuche

Für die Laboruntersuchungen wurden von JENA-GEOS 18 Festgesteinsproben aus Buntsandsteinformationen zur Verfügung gestellt. Die Durchführung der Versuche zur technischen Bestimmung der Materialkennwerte erfolgte im Unterauftrag durch das Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns, Heiligenstadt. Die Ergebnisse dieser Laborversuche sind in (LOUIS 2020) zusammengefasst.
Die ermittelten Materialkennwerte der Proben zeigten zum Teil große Streuungen. Mit Unterstützung von JENA-GEOS wurden die Daten selektiert und aufbereitet. Grundlegend wurde festgelegt, dass die gemittelten tabellarischen Daten für die Untersuchung mit vollständiger Sättigung verwendet werden sollten. Die in (Louis, 2020) ermittelt Standardabweichungen und Streubereiche wurden für die

statistische Auswertung in der Sensitivitätsanalyse verwendet. Tabelle 12 fasst die aus (Louis, 2020) entnommen Kennwerte zusammen.

Tabelle 12 In Laborversuchen ermittelte Materialkennwerte für Bundsandstein (LOUIS 2020)

Bezeichnung	Symbol	Einheit	min	max
Dichte	ρ	kg/m³	1930	2360
Permeabilität	K	mD	136,7	248,2
Porosität	n	-	0,112	0,264
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(m*K)	1,71	3,01
Wärmeausdehnungskoeffizient	α_T	1/K	2,9e-06	121,0e-06
Wärmekapazität Gestein	C	J/(kg*K)	751,2	909,3

Zur Verifizierung der Funktionalität der zuvor gezeigten Wärmeausbreitung sowie der mechanischen Interaktion im T-H-M Simulationsmodell wurden zwei Laborversuche nachgerechnet. Es wurden die Experimente zur Wärmeleitfähigkeit und der thermischen Ausdehnungen numerisch nachvollzogen. Abbildung 29 zeigt das für die Nachrechnungen verwendete vereinfachte numerische Modell. Die Modellgeometrie entspricht der in (Louis, 2020) präparierten Probengröße.

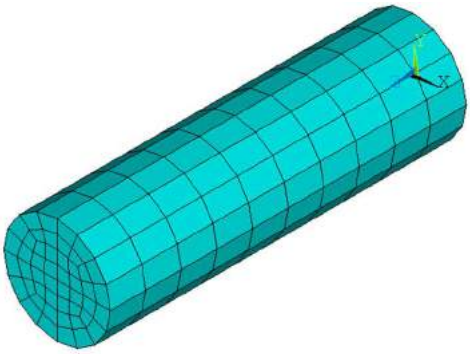


Abbildung 29: Numerisches Modell zur Bestimmung und Kalibrierung von Materialkennwerten

7.4.1 Thermische Ausdehnung

Bei der Nachrechnung der thermischen Ausdehnung wurde die Längenänderung bestimmt, die sich bei einer Temperaturänderung von 60 K bei der 5 cm langen zylindrischen Probe mit einem Durchmesser von 1,5 cm einstellt. Die Temperatur wurde auf die Außenkontur aufgebracht. Die Temperatur-Zeit-Kurve ist in Abbildung 30 dargestellt.

Wie in LOUIS (2020) beschrieben, wurde zusätzlich eine Federkraft von 1 N an einer Stirnseite der Probe aufgebracht, die die Einspannung der Probe in die Prüfapparatur berücksichtigt. Für die Probe EF_B383_01_TE wurde in der Simulation eine maximale Längenänderung von 0.037 mm berechnet. Die sich daraus ergebende Axialdehnung von 0.74 ‰ entspricht den Laborergebnissen dieser Probe im trockenen Zustand. Im Ergebnis zeigt sich, dass mit dem numerischen Modell die Wärmeausdehnung sehr gut nachvollzogen werden kann.

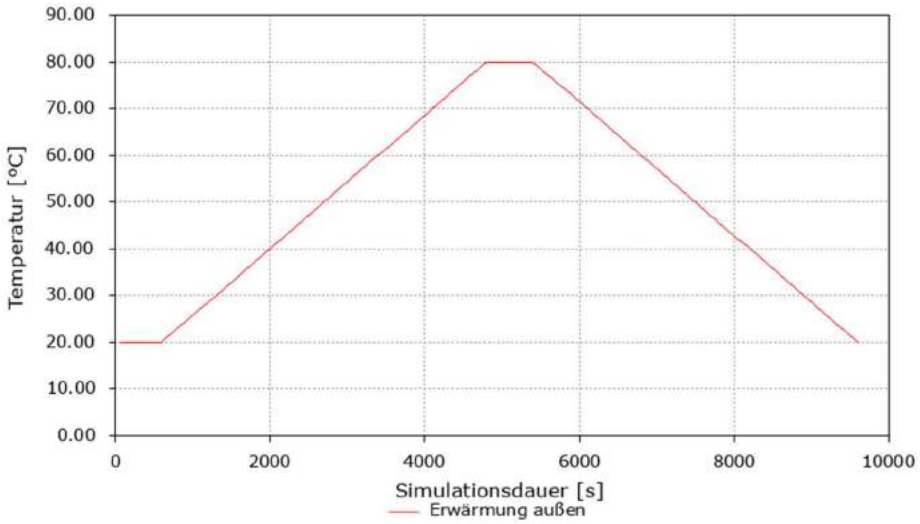


Abbildung 30 Temperaturkurve zur Aufwärmung und Abkühlung der Probe

7.4.2 Wärmeleitfähigkeit

Bei der Nachrechnung der Wärmeleitfähigkeit wurden die Temperaturreaktionen gemessen, die sich bei der Aufprägung konstanter Wärmeleistungen auf den Probenquerschnitten einstellen. Dabei wurde sowohl eine einseitige als auch eine beidseitige Belastung betrachtet. Für eine einseitige Belastung (linker Querschnitt) mit einer Wärmeleistung von 0.1 W ergeben sich die in Abbildung 31 gezeigten zeitlichen Temperaturverläufe. Dabei wurden verschiedene Punkte entlang der Zylinderachse betrachtet. Für alle drei Punkte stellt sich nach kurzer Zeit der zu erwartende lineare Anstieg der Temperatur mit der Zeit. Nach 1800 s ist die Temperatur auf dem linken Querschnitt 31 °C und auf dem rechten Querschnitt 26 °C. Die Wärmeleitfähigkeit kann mittels der folgenden Formel berechnet werden

$$\lambda = \frac{\dot{Q} \cdot L}{A \cdot \Delta T}. \tag{47}$$

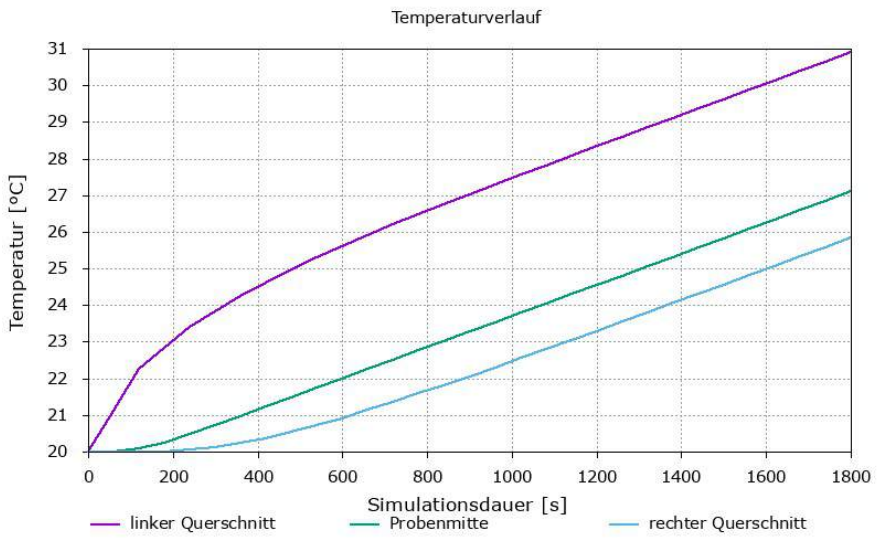


Abbildung 31 Temperaturverlauf bei der Nachrechnung der Wärmeleitfähigkeit an der Probe

Bei einer Probenlänge von $L = 5\ cm$ und einem Probenquerschnitt von $A = 1.77\ cm^2$ sowie einem mittleren Wärmestrom $\dot{Q} = 0.1\ W/2 = 0.05\ W$ ergibt sich folgende Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda = \frac{0.05\ W \cdot 5\ cm}{1{,}77\ cm^2 \cdot [31°\mathrm{C} - 26°\mathrm{C}]} = 0.028 \frac{W}{cm \cdot K} = 2.8 \frac{W}{m \cdot K}.$$

Dies entspricht der vorgegebenen thermischen Leitfähigkeit und zeigt gute Übereinstimmung mit der für Probe RB_B208_07_TL experimentell bestimmte Wärmeleitfähigkeit von $2.81 \frac{W}{m \cdot K}$.

7.5 T-H-M Kopplung

Für die Verifikation der T-H-M Kopplung wurde die in STEFFAHN et al. (2019) dokumentierte numerische Simulation eines Aquiferspeichers mit dem Programmsystem FEFLOW verwendet. Diese wurde mit dem auf Basis der CPT-Elemente entwickelten T-H-M-Modell nachvollzogen. Die in STEFFAHN et al. (2019) publizierten Modellierungsgrundlagen und Modellparameter wurden übernommen sowie die mit dem Berechnungsprogramm FEFLOW erstellten Ergebnisse wurden zur Verifikation hinzugezogen. Die Ergebnisgrößen wurden extrahiert, visualisiert und auf Plausibilität hin untersucht. Wenn nicht anders angegeben wurde im Folgenden das SI-Einheitensystem verwendet.

7.5.1 Simulationsmodell

In der Simulation wurde ein Wärmespeicher mit zwei Brunnen in 600 m Tiefe betrachtet. Dabei konnte der Speicher sowohl aus einem als auch aus mehreren Grundwasserleitern (Aquifer) bestehen. Abbildung 32 zeigt den in der Simulation gewählten Halbraum. Im Modell sind die Aquifere von Grundwassergeringleitern (Aquitard), die eine wesentlich geringere Strömungsgeschwindigkeit (hydraulische Permeabilität) haben, umgeben. Im Falle mehrere Aquifere sind diese zusätzlich durch Aquitarde getrennt.

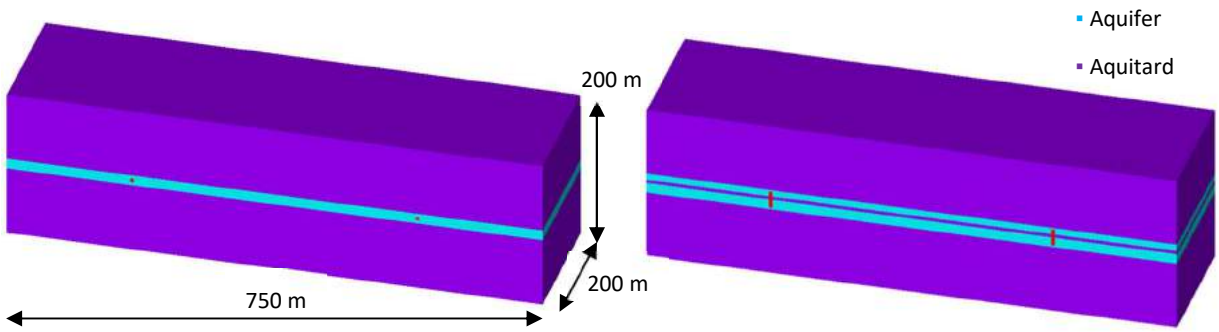


Abbildung 32 Simulierte Halbräume im Boden mit einem Aquifer (links) und zwei Aquiferen (rechts)

Um Simulationszeit zu sparen, wurde ein Symmetriemodell erstellt. Das Modell stellt einen Ausschnitt im Boden dar. Der Halbraum ist an den Modellgrenzen orthogonal gegen Verschieben gehalten. An der oberen Modellkante ist eine freie Verschiebung möglich und ersatzweise eine Flächenlast für das Eigengewicht des darüberliegenden, nicht modellierten Erdreichs aufgeprägt. Auf alle modellierten Elemente des Erdreichs wirkt Eigengewicht. Die Randbedingungen sind in Abbildung 33 dargestellt.

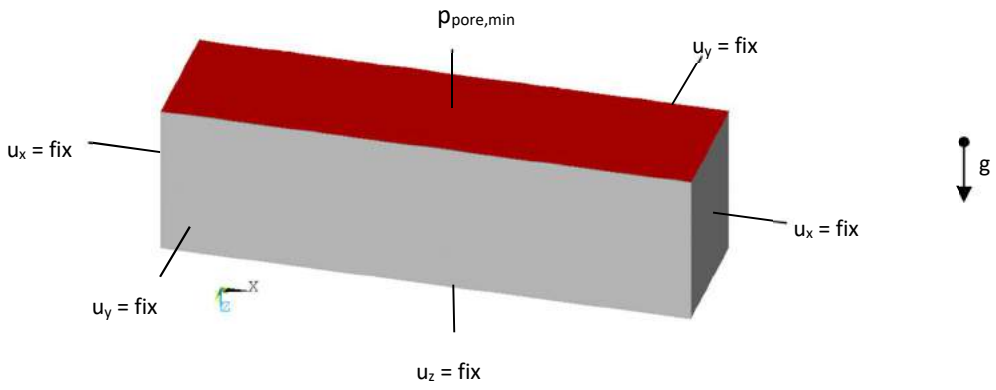


Abbildung 33 Randbedingungen

Für das gesamte Erdreich wurde eine vollständige Wassersättigung angenommen. Der Porenwasserdruck ist im Modell berücksichtig und steht im Gleichgewicht zu den äußeren Lasten. Dazu wurde zu Beginn der Simulation ein initialer Spannungszustand auf die Elemente aufgebracht. Die initiale Spannung eines jeden Elements ist beeinflusst durch den Porenwasserdruckgradienten, die Dichte und Porosität des Bodens sowie durch die Dichte des Fluids. In Abbildung 34 ist die Verteilung des initialen Porenwasserdrucks im Modell dargestellt.

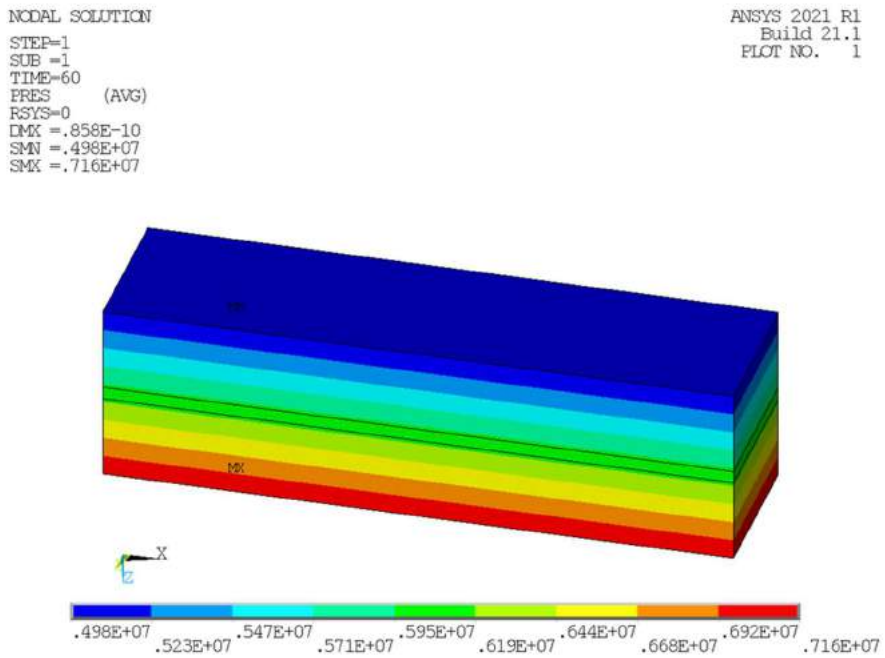


Abbildung 34 Verteilung des Porenwasserdrucks eines ungestörten Systems [Pa]

Die Vernetzung mit den CPT215 Elementen ist in Abbildung 35 dargestellt. Im Bereich der Brunnen sind Elementkanten von 2,5 m gewählt. Für die nummerische Stabilität wurden die Brunnen über zwei Elementreihen modelliert.

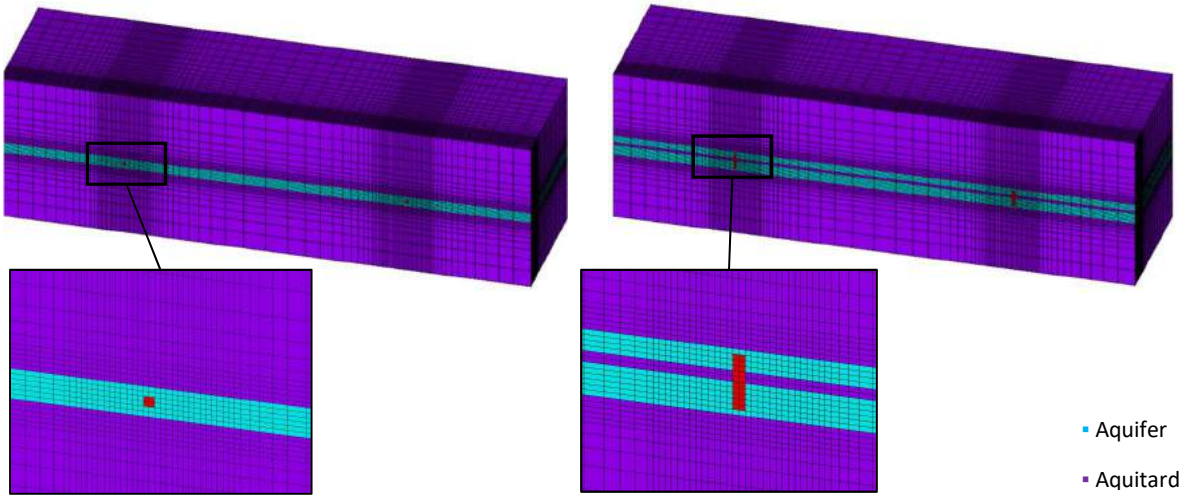


Abbildung 35 Vernetzung der Halbräume und Auswahl der Elemente der Brunnen

Zur Bestimmung der mittleren Temperatur im Aquifer wurde ein Temperaturgradient von 3 K/100 m und eine Oberflächentemperatur von 10 °C angenommen. Um keine Strömungseffekte im Simulationsmodell, die aufgrund von Temperaturdifferenzen in Tiefenrichtung auftreten können, zu verursachen, wurde die mittlere Temperatur im Aquifer für den gesamten betrachteten Halbraum als konstant angenommen.

Tabelle 13 Materiaparameter für die Nachrechnung der FEFLOW Simulation

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Wert
E-Modul	E	kN/m²	100.000
Querdehnzahl	μ	-	0,1
Dichte	ρ	kg/m³	2230
Permeabilität	K	mD	100
Porosität	n	-	0,25
Dichte Fluid	ρ_F	kg/m³	1034
Viskosität Fluid	η_F	Pa*s	0.001
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(m*K)	3,01
Wärmeausdehnungskoeffizient	α_T	1/K	1,85e-05
spez. Wärmekapazität Gestein	C	J/(kg*K)	760
spez. Wärmekapazität Fluid	C_F	J/(kg*K)	3936

Materialmodell

In Tabelle 13 sind die für eine erste Untersuchung verwendeten Materialparameter angegeben. Die Permeabilität (üblicherweise in Darcy) wurde in ein für den FE-Solver verarbeitbares Format (SI) konvertiert und in einen Durchlässigkeitsbeiwert umgerechnet. Dabei wurde die Abhängigkeit der Dichte und die Viskosität des Fluids/Grundwassers berücksichtigt:

$$K\left[\frac{1}{m^2}\right] = \frac{K[mD]}{1000} \cdot 9{,}87 \cdot 10^{-13},$$

$$k_f = K \cdot \frac{\rho_F}{\eta_F} \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2}.$$

7.5.2 Ein-/Ausspeisung und Strömung im Gestein

In Anlehnung an (Steffahn, et al., 2019) wurde ein typischer Wärmetauscher simuliert, bei dem ein Brunnen heißes Fluid in den Grundwasserleiter einspeist und der gegenüberliegende Brunnen Grundwasser mit Umgebungstemperatur wieder ausspeist. Im Simulationsmodell wurde der Ein- und Ausspeisevorgang mit einem konstanten Volumenstrom umgesetzt, so dass immer die gleiche Menge an Wasser im System vorhanden ist.

Durch die Interaktion der Volumenströme der Brunnen strömt das Wasser durch das Gestein. Abhängig von der Fähigkeit des Gesteins zum Fluidtransport, was durch die Permeabilität ausgedrückt wird, stiegen die Porenwasserdrücke bei Einspeisung an und, äquivalent dazu, senkten sich die Porenwasserdrücke auf der Entnahmeseite ab.

Im Simulationsmodell speisten alle Elemente eines jeweiligen Brunnens richtungsunabhängig den geteilten Volumenstrom ein bzw. aus. Es wurde an dieser Stelle vernachlässigt, dass die Brunnen in der Realität ober- bzw. unterhalb der modellierten Brunnenelemente kein Fluid einbringen oder entnehmen können. Die Modellannahme wird als hinreichend genau angenommen, da der Volumenstrom durch die Aquitarde mittelbar begrenzt wird und das Fluid hauptsächlich im Aquifer leitet.

Wieviel Wasser in Realität im Brunnen bei einer Entnahme zur Verfügung steht, wird in der Hydrogeologie mit dem hydraulischen Potential ausgedrückt. Im Simulationsmodell wird das hydraulische Potential über den Porenwasserdruck ausgegeben. Eine Absenkung des Porenwasserdrucks unter null wäre physikalisch nicht plausibel und wurde deshalb vermieden und wird folgend diskutiert.

7.5.3 Zyklische Belastungen in Warm-/Kaltzeiten

Wie in STEFFAHN et al. (2019) beschrieben, wird bei Wärmetauschern zwischen Warm- und Kaltzeiten unterschieden, die halbjährlich wechseln. Die Warm- und Kaltzeiten beeinflussen die Temperatur des Fluids, dass in das System eingespeist wird. So wird in Warmzeiten, zur Kühlung des angeschlossenen Betriebes, kaltes Grundwasser gefördert, durch Wärmetauschprozesse erwärmt und als heißes Fluid wieder in den Boden eingespeist. In Kaltzeiten wird, zur Beheizung des angeschlossenen Betriebes, das erwärmte Grundwasser wieder zurückgefördert, durch Wärmetauschprozesse abgekühlt und als kühleres Fluid wieder in den Boden eingespeist.

In Bezug auf das Simulationsmodell wurde in den Warmzeiten 90 °C heißes Fluid in das System eingespeist und am gegenüberliegenden Brunnen Grundwasser mit Umgebungstemperatur wieder ausspeist. Durch die Einspeisung des heißen Fluids erwärmte sich das umliegende Grundwasser und Gestein. Der Brunnen, der das heiße Fluid einspeist wird folgend als „heißer“ Brunnen/Seite und der andere als „kalter“ Brunnen/Seite bezeichnet.

In den Kaltzeiten werden die Volumenströme getauscht. Das aufgeheizte Grundwasser am heißen Brunnen wurde wieder ausgespeist und kälteres Fluid (40 °C) in das System am kalten Brunnen wieder eingespeist.

In Abbildung 35 befindet sich auf der linken Seite des gezeigten Halbraums der heiße Brunnen und auf der rechten Seite des Halbraums der kalte Brunnen.

7.5.4 Bestimmung und Visualisierung der Ergebnisse

Für die Validierung der thermischen Funktionalität des Speichers sind Porenwasserdrücke, Hydraulische Leitfähigkeit und thermische Ausbreitung untersucht worden. Die Auswertungen zeigen, dass das Modell unter den gegebenen Voraussetzungen und Einschränkungen plausibel ist. Die Ableitung der Kenngrößen zu Wärmeverlust und Risiko zur Rissbildung sind ebenfalls plausibel.

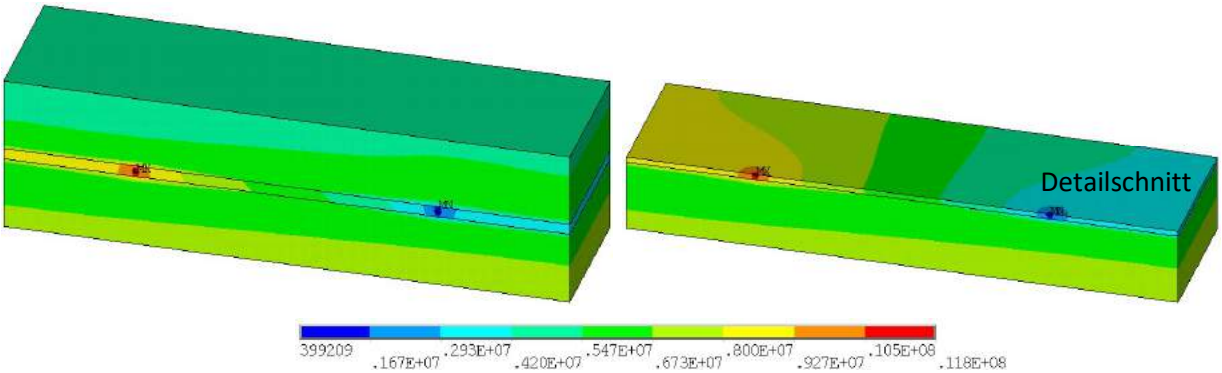


Abbildung 36 Verteilung des Porenwasserdrucks [Pa] mit Längsschnitt durch den Aquifer (rechts) nach 180 Tagen

Porenwasserdrücke

Die Verteilung des Porenwasserdrucks nach Ende der Warmzeit nach 180 Tagen (Abbildung 36) zeigt, dass das Druckgefälle im Aquitard nur gering beeinflusst ist. Im Aquifer hingegen stellt sich aufgrund der höheren Durchlässigkeiten ein stärkeres Druckgefälle ein. Die Porenwasserdrücke sind alle positiv und damit plausibel.
Eine Pfadauswertung des Porenwasserdrucks zwischen den Brunnen (Abbildung 37) zeigt ein nahezu konstantes Druckgefälle. In der Nähe der Brunnen sind die Druckgradienten steiler. Dieses Verhalten ist ebenfalls plausibel.

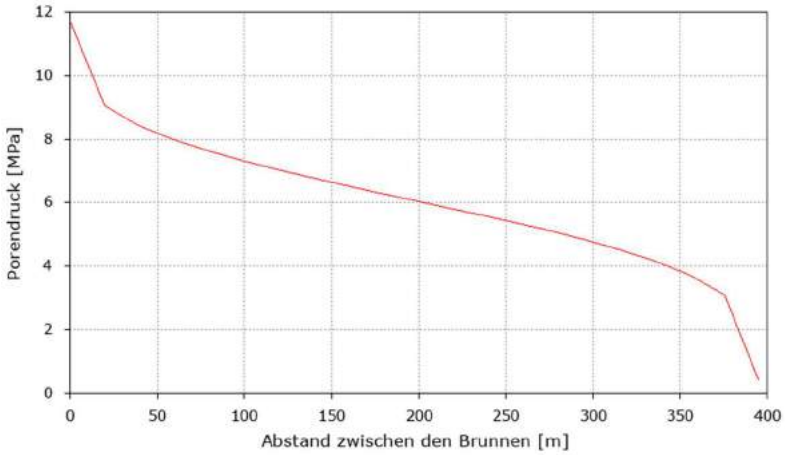


Abbildung 37 Pfadauswertung des Porenwasserdrucks [MPa] zwischen den Brunnen

Neben den absoluten Porenwasserdrücken zeigen die Verteilungen der Veränderung der Porendrücke (Abbildung 38) zum ungestörten Zustand (Abbildung 34) die gegenseitige hydraulische Interaktion der Brunnen. Es zeigt sich ein kontinuierlicher Anstieg des Druckfeldes um die Brunnen, der sich

fortlaufend in die Randbereiche ausbreitet. Die zwiebelförmige Ausbreitung, die in den Abbildungen ab 90 Tagen klar zu sehen ist, stellt eine Folge der Interaktion der Porendruckfelder dar.
Weiterhin ist nach 180 Tagen im Aquifer in der Symmetrieebene ein keilförmiges zulaufen der Druckfronten zu erkennen, was die räumliche Komplexität der Porenwasserdrücke sehr gut darstellt.
Die zeitlichen Verläufe der Porenwasserdrücke am Brunnen und in den Randbereichen (Abbildung 38; Punkte A, B & C) sind in Abbildung 39 dargestellt. Es zeigen alle Verläufe ein asymptotisches Verhalten, die nahezu den Grenzfall nach 180 Tagen erreicht haben. Die Differenzen der Verläufe in den Randbereichen (B & C) sind mit dem Abstand zum Brunnen (175 m und 200 m) und in der zwiebelförmigen Ausbreitung der Porenwasserdruckfelder begründet.

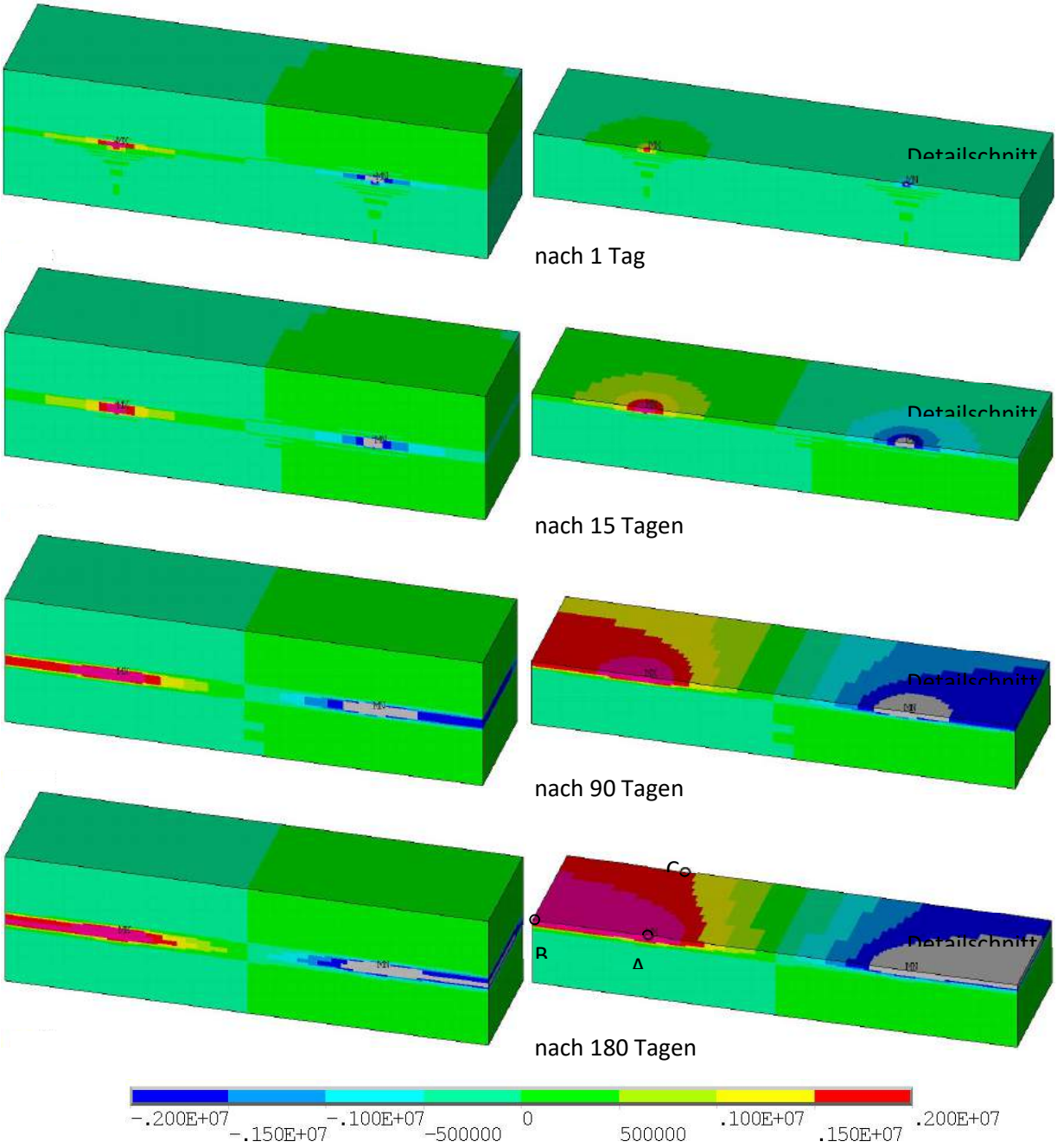


Abbildung 38 Verteilung der Änderung des Porenwasserdrucks [Pa] mit Längsschnitt durch den Aquifer (rechts); Über-/Unterschreitung der Skala mit Magenta/Grau

Zusatzrechnungen haben gezeigt, dass die gewählte Größe des Halbraums einen Einfluss auf den asymptotischen Verlauf hat. Da größere Modelle jedoch mit enormen Rechenzeiten verbunden sind, wurde aus pragmatischen Gründen an dieser Stelle das gezeigte Modell weiterverwendet. Um den Einfluss in den Variantenrechnungen so gering wie möglich zu halten, wurden die Abstände zwischen den Modellrändern und Brunnen konstant modelliert, so dass die Überhöhungen ähnlich sind.

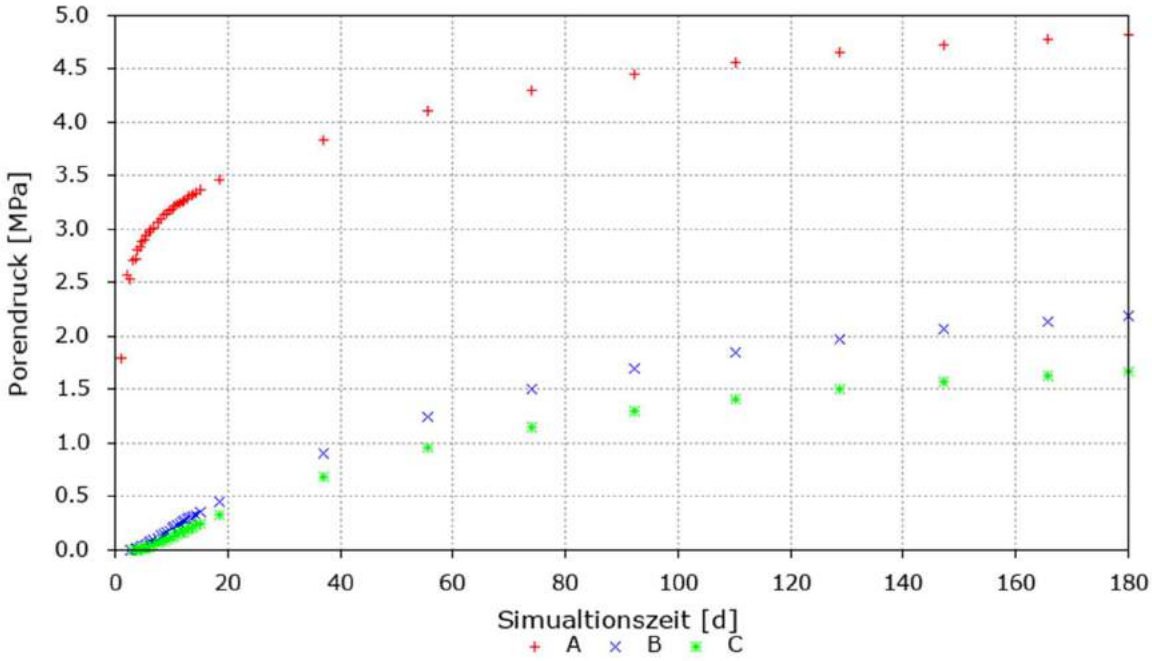


Abbildung 39 Elementauswertung zur Änderung des Porenwasserdrucks [MPa] am Brunnen (A) und in Randbereichen (B & C)

Hydraulische Leitfähigkeit

Durch das Einspeisen des Fluids auf der einen Brunnenseite und das Ausspeisen des Grundwassers auf der anderen entsteht ein unterschiedliches hydraulischen Potential und Strömungen im Gestein (Abbildung 40). Die Strömung im Aquitard ist um den Faktor 1000 geringer. Die Ausrichtung der Vektoren zeigt die Fließrichtung des Grundwassers und ist damit plausibel zum hydraulischen Gefälle (Abbildung 38).

Thermische Ausbreitung

Neben der Verteilung des Fluids, was ein Ergebnis des hydraulischen Teilmodells ist, lieferte das thermische Teilmodell als Ergebnis die Ausbreitung der Temperatur im gesättigten Gestein. Durch den Transport des Grundwassers vom ein- zum ausspeisenden Brunnen verteilte sich das warme Fluid im System (Abbildung 41). Der Wärmtransport wurde durch den höheren Fluidstrom im Aquifer beeinflusst, was zu einer ovalen Ausbreitungsform der Temperatur im Aquifer führte (Abbildung 41, oben).

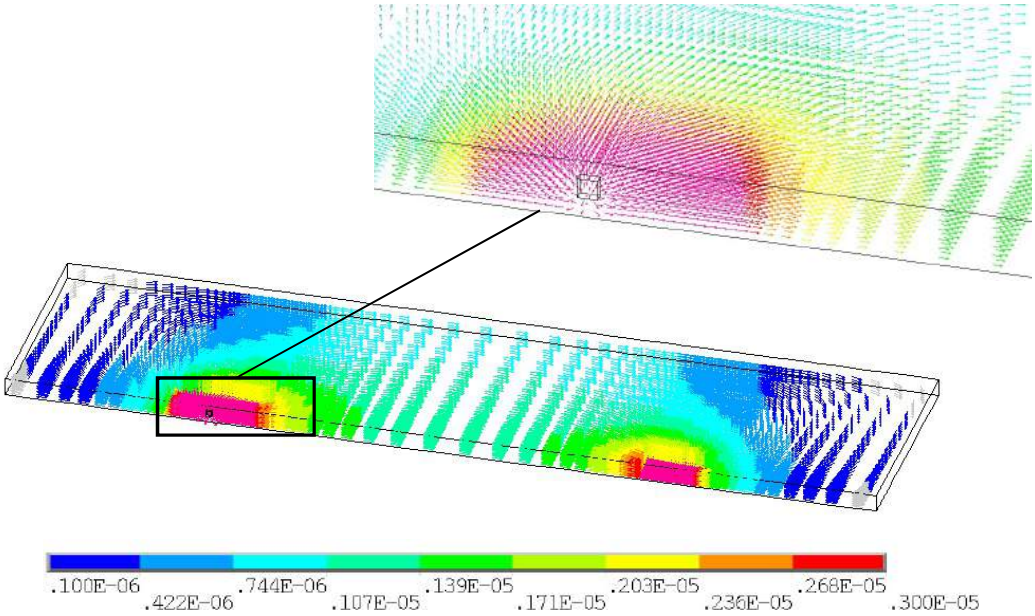


Abbildung 40 Strömung des Fluids im Aquifer nach 180 d [m/s]; Über-/Unterschreitung der Skala mit Magenta/Grau

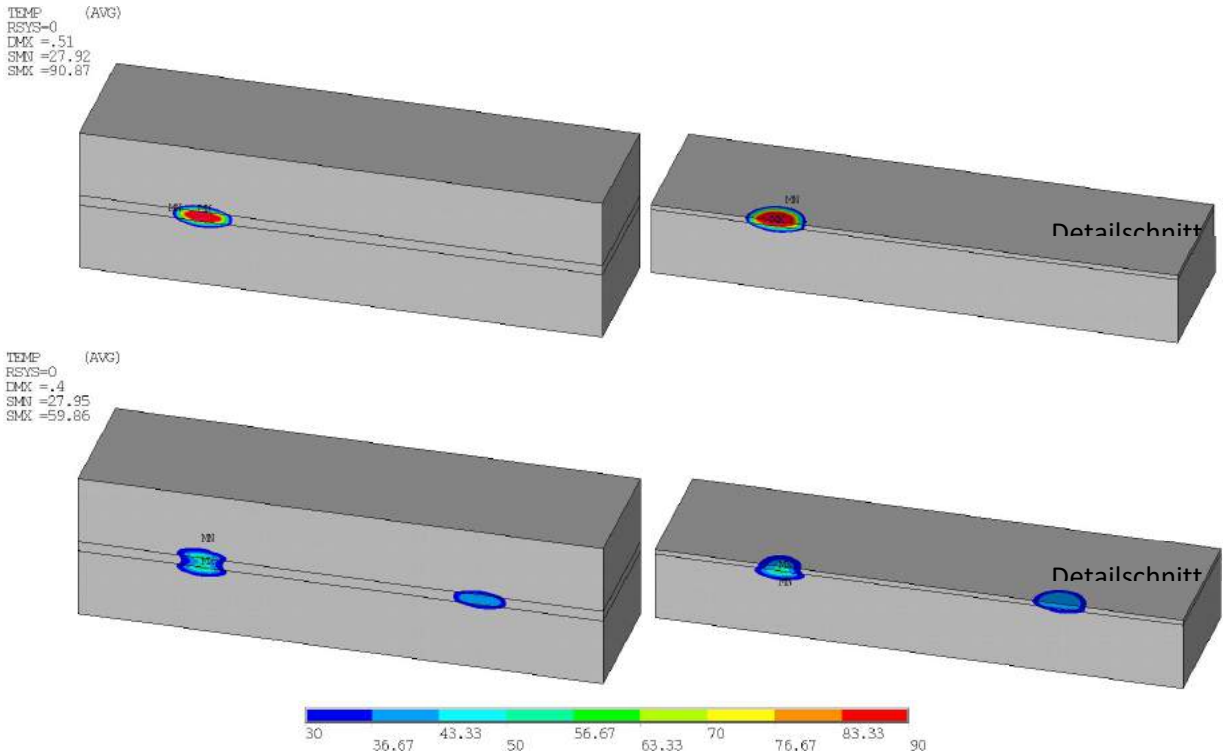


Abbildung 41 Temperaturausbreitung nach 180 d (oben) und 360 d (unten) [K]; Unterschreitung der Skala mit Grau

Vergleichsrechnungen zeigten dagegen, dass die Wärmeleitung einen geringen Einfluss auf die Wärmeausbreitung hatte. Im Detailschnitt durch den Aquifer zeigt sich ein gleichmäßiger ausgebildeter Temperaturverlauf um den Brunnen (Abbildung 41, rechts). Am Ende der Kaltzeit nach

360 Tagen (Abbildung 41, unten) zeigte sich in der Temperaturausbreitung um den kalten Brunnen ein ähnliches Verhalten trotz geringer, eingespeister Temperatur.
Das thermische Teilmodell zeigte weiterhin die Speicherung von Wärme im Gestein und Grundwasser. Der Wärmeübergang des heißen Fluids lagerte diese Wärme in die Umgebung ein. Dies zeigt sich am Ende der Kaltzeit auf der heißen Seite durch eine Restwärme im Gestein.

Speichereffizienz

Mit der Bestimmung der Speichereffizienz können Aussagen über die Wirksamkeit des Wärmetauschers getroffen werden. Die Berechnung der Speichereffizienz wird, in Anlehnung an (Steffahn, et al., 2019), über die ein- und ausgespeicherten Wärmemengen berechnet. Eine hohe Wirksamkeit des Wärmetauschers liegt demnach vor, wenn in der Kaltzeit die eingelagerte Wärme am heißen Brunnen wieder ausreichend zurückgefördert werden kann. Je höher die verbleibende Restwärme ist, desto höher ist auch die geförderte Wärmemenge, welche dem Betrieb zur Verfügung steht. Dem entgegenwirkend wird die Wirksamkeit geringer, wenn die Förderung des Grundwassers am kalten Brunnen zu den Warmzeiten mit einer hohen Restwärme erfolgt. Ist die geförderte Wärmemenge zu hoch, verringert sich die Effizienz des Kühlungsprozesses im Betrieb.
Zur Bestimmung der ein- und ausgespeicherten Wärmemengen wurde der Temperaturverlauf an den Brunnen aus dem Simulationsmodell extrahiert. In Abbildung 42 ist der Temperaturverlauf an den Brunnen dargestellt. Die Wärmemengen wurden jeweils für Warm- und Kaltzeit getrennt bestimmt. Die Wärmemenge ermittelt sich über die Dichte ρ und spez. Wärmekapazität ρ des Fluids sowie über den Wärmeeintrag $T_E(t)$ bzw. den Wärmeaustrag $T_A(t)$ der geförderten Fluidmenge q:

$$Q_{E,A} = \rho_F \cdot C_F \cdot q_{pump} \cdot \int T_E(t) - T_A(t)\,\mathrm{d}t. \tag{48}$$

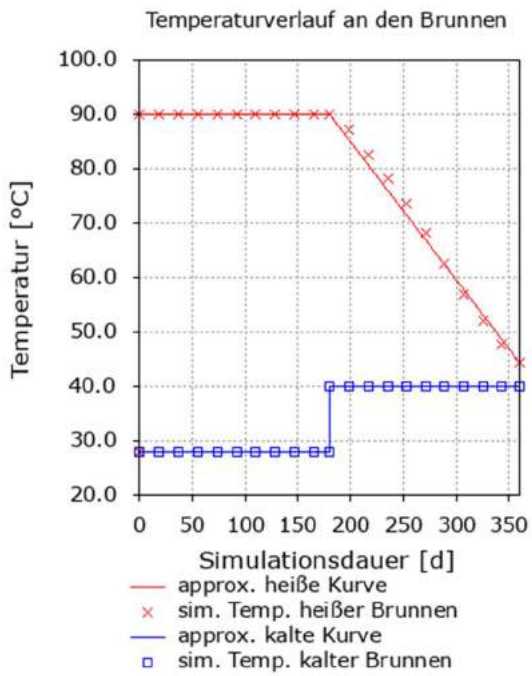


Abbildung 42 Temperaturverlauf an den Brunnen [°C]

Die ein- und ausgespeisten Wärmemengen eines Zyklus wurden gegeneinander verrechnet (Netto-Wärmemenge). Es zeigt sich, dass in den Warmzeiten ein Überschuss an Wärme im System verbleibt und in der Kaltzeit ein Defizit an Wärme entsteht. Abbildung 43 zeigt die in das System eingespeiste Netto-Wärmemenge zur Warmzeit sowie die dem System entnommen Netto-Wärmemenge zur Kaltzeit.

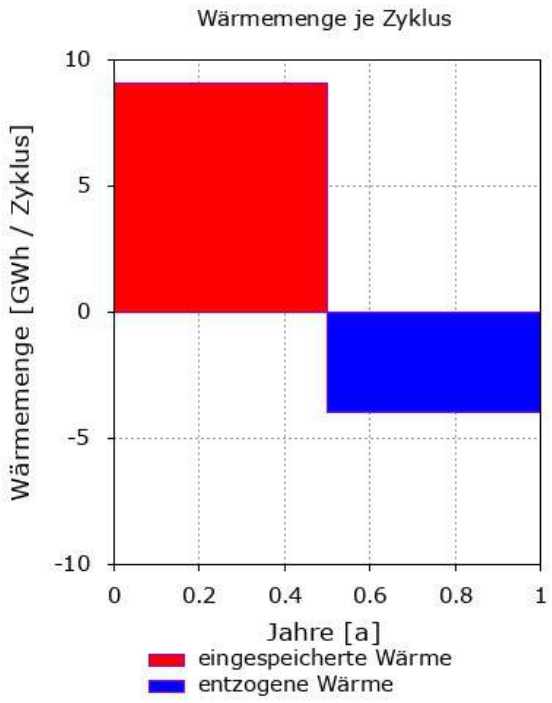


Abbildung 43 ein- bzw. ausgelagerte Wärmemengen [GWh/Zyklus]

Im betrachteten Zyklus wurden im ersten Halbjahr ca. 9 GWh eingelagert. Im zweiten Halbjahr wurden dem Speicher ca. 4 GWh entzogen. Diese Werte liegen im Bereich der Ergebnisse der FEFLOW Simulation.

Die Speichereffizienz des Wärmetauschers kann nun durch das Verhältnis zwischen eingespeicherter Wärmemenge und entzogener Wärmemenge bestimmt werden. Sie beträgt für den ersten Zyklus 44%. Zusätzlich liefert die Differenzen der Netto-Wärmemenge eine Information über den Wärmeverlust pro Jahr. Im ersten Zyklus betrug der Wärmeverlust im Speicher 5 GWh. Die geringe Speichereffizienz und die sehr hohen Wärmeverluste sind dadurch zu erklären, dass es sich um den initialen Belastungszyklus des Speichers handelt. Dadurch das nach diesem initialen Zyklus Wärme im Speicher verblieben ist (d.h. der Speicher hat sich etwas aufgeheizt), werden die Wärmeverluste im Speicher in den kommenden Zyklen reduziert werden und die Speichereffizienz steigt.

Des Weiteren zeigt Abbildung 42 in den Temperaturkurven eine nahezu linearen Temperaturgradienten innerhalb eines Zyklus. Deshalb wurden zur Ermittlung der Wärmemengen die approximierten Kurven verwendet. Dies ermöglichte eine Reduzierung der zu herausschreibenden Datenmengen, da nur die Werte am Ende der Zyklen berechnet werden mussten.

Risikobewertung

Zur bodenmechanischen Risikobewertung wurde zwei Versagenskriterien untersucht. Beim Grundbruch wurde das Verhältnis zwischen Scherfestigkeit des Bodens und den thermisch-hydraulisch-mechanischen Beanspruchungen untersucht. Beim Hauptspannungskriterium wurde geprüft, ob Zugspannungen im Boden entstehen.

Grundbruch

In der Bodenmechanik wird die Scherfestigkeit R_S mit dem Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb quantifiziert, die die bodenmechanischen Kennwerte der Kohäsion c und den inneren Reibungswinkel φ des Bodens enthält. Zur Berechnung der Beanspruchung S im Boden stehen die maximalen Schubspannungen τ_{max} und die zugehörigen effektiven Normalspannungen $\sigma_{N,eff}$ im Simulationsmodell zur Verfügung (Abbildung 44). Diese Spannungskomponenten können aus den Hauptspannungskomponenten σ_1 und σ_3 berechnet werden:

$$\tau_{max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$$
$$\sigma_{N,eff} = \sigma_N - p_{pore} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} - p_{pore}. \quad (49)$$

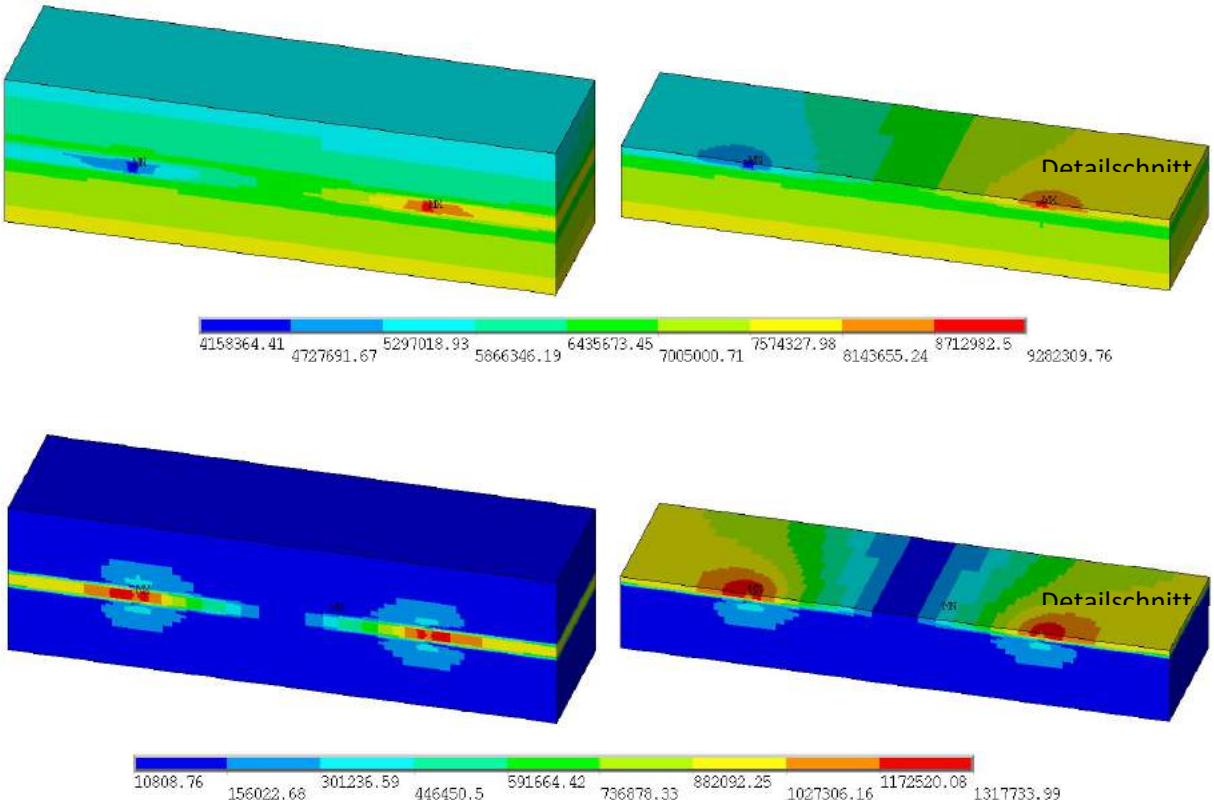


Abbildung 44 Effektive Hauptnormalspannungen (oben) und Hauptschubspannungen (unten) [Pa] nach 180 d

Für das Bruchkriterium gilt:

$$\begin{aligned} S &< R_S \\ \tau_{max} &< \sigma_{N,eff} \cdot \tan(\varphi) + c \\ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} &< \left(\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} - p_{pore}\right) \cdot \tan(\varphi) + c. \end{aligned} \tag{50}$$

Dabei ist die Kohäsion mit größeren Ungenauigkeiten behaftet und daher in bodenmechanischen Untersuchungen zu ermitteln. An dieser Stelle wurde die Beanspruchbarkeit für zwei Grenzfälle der Kohäsion untersucht; für ungestörten Fels (15 MPa) und für undrainierte, schluffig-tonige Böden (~0 MPa). Besonders die Berücksichtigung des zweiten Grenzfalls kann aufgrund des sinken Grundwasserspiegels in Aquifer und Aquitard oder als äquivalent zu niedrigen Festigkeiten aufgrund von Orthotropie oder Trennflächen im Gestein einen Extremfall darstellen. Weiterhin wurde ein innerer Reibungswinkel von Felsgesteinen von 30° angenommen.

Abbildung 45 zeigt das Verhältnis n zwischen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit für beide Fallunterscheidungen. Für ausreichende Sicherheit gegenüber Grundbruch gilt:

$$n = \frac{S}{R_S} \ll 1 \tag{51}$$

Die Fallunterscheidung ohne Kohäsion zeigt in Abbildung 45 sehr gut die Interaktion zwischen steigendem Porenwasserdruck und fallenden effektiven Hauptnormalspannungen im Bereich um den Brunnen sowie die damit einhergehenden höhere Versagenswahrscheinlichkeit. Im geothermischen Kontext sind grundsätzlich keine Risse erlaubt, daher sind beide Betrachtungen in die Ergebnisdiskussion eingeflossen.

Hauptspannungskriterium

Die zweite Versagenswahrscheinlichkeit prüft, ob Zugspannungen im Gestein, die zu Zugrissen führen können, entstehen. Zur Bewertung wurde das Hauptspannungskriterium hinzugezogen, dass die erste effektive Hauptspannung gegen Null bewertet. Ist die erste effektive Hauptspannung kleiner als Null, wird davon ausgegangen, dass der Boden vollständig überdrückt ist und sich keine Zugrisse einstellen. Abbildung 46 zeigt kein überschreiten des Hauptspannungskriterium gegenüber den effektiven Hauptspannungen nach 180 Tagen.

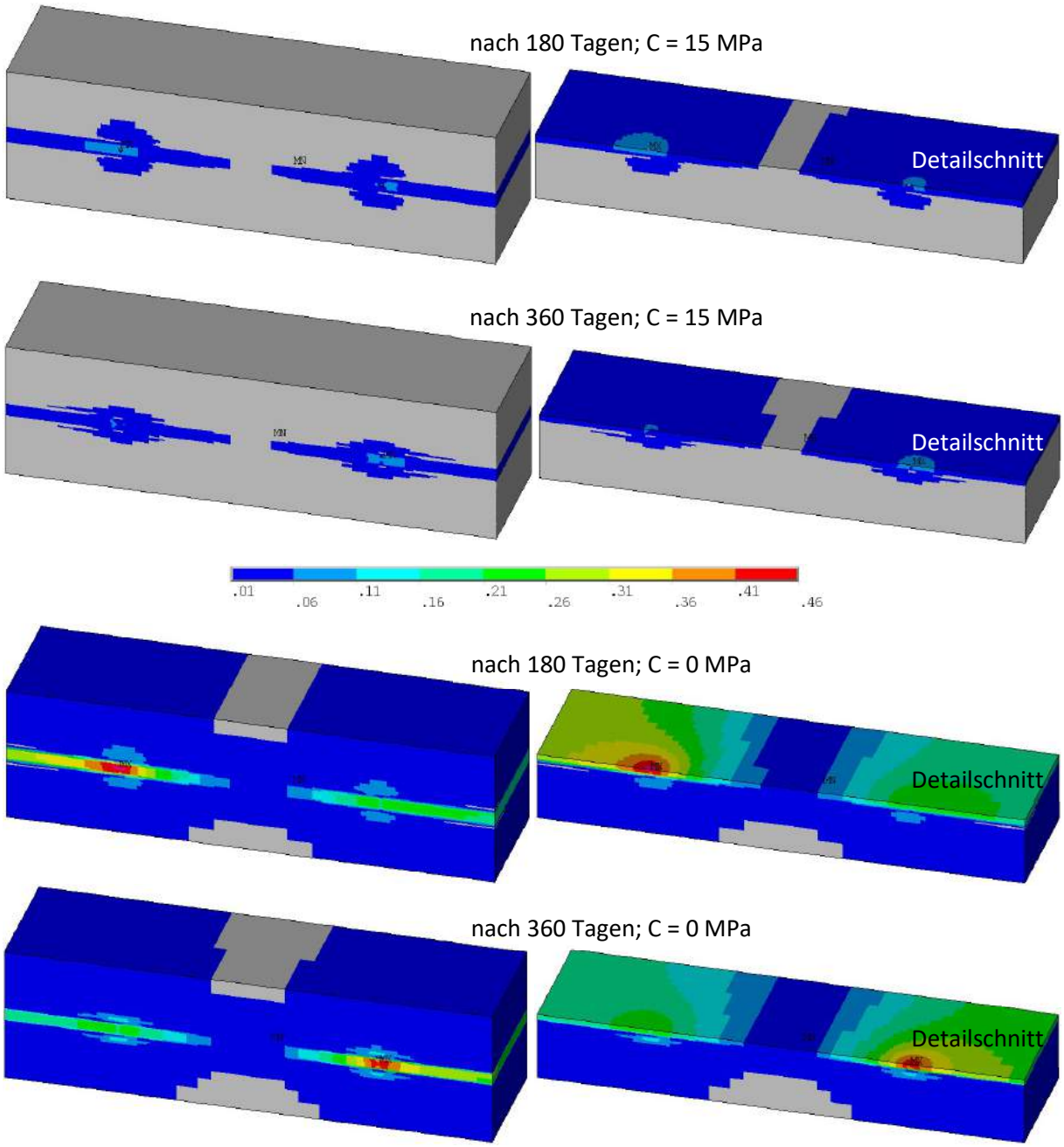


Abbildung 45 Sicherheit gegen Schubversagen nach Mohr-Coulomb [-]

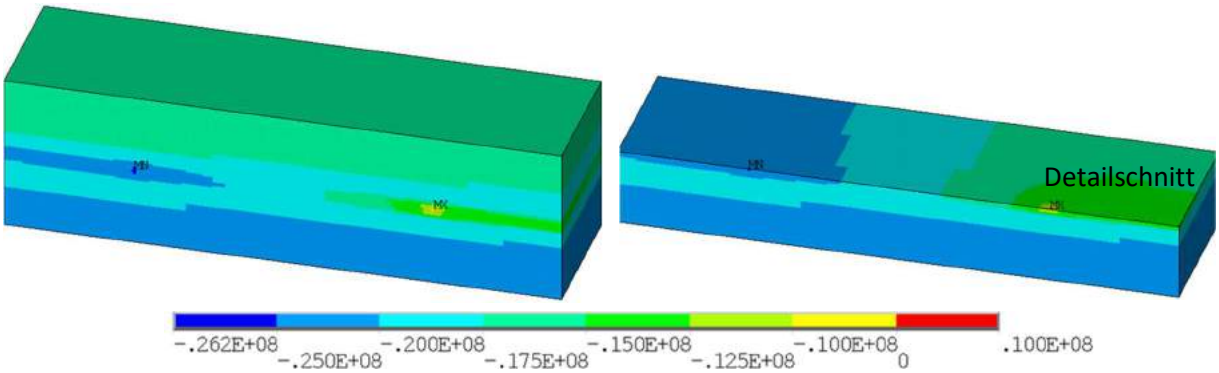


Abbildung 46: Effektive Hauptspannungen [Pa] nach 180 d

7.6 Einfluss der Temperatur und der Salinität auf Materialparameter

Ergänzend zu den Laborwerten stellte JENA-GEOS Datenblätter zur Verfügung, die eine Temperaturabhängigkeit der Kennwerte sowie die Abhängigkeit durch den Anteil des gelösten Natrium-Chlorids im Grundwasser (Salinität) berücksichtigte. In Abbildung 47 ist die temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität des Gesteins abgebildet. Daten unterhalb von 35 °C lagen nicht vor und sind durch den letzten Datenpunkt berücksichtigt.

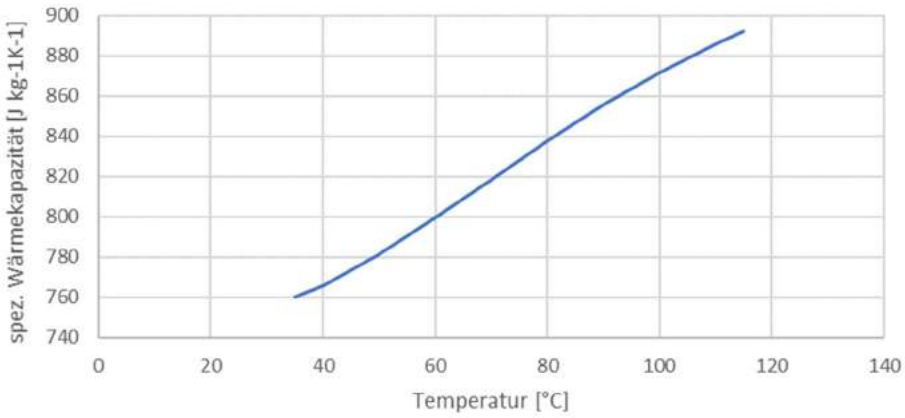


Abbildung 47: Spez. Wärmekapazität des Gesteins [J / (kg K)] in Abhängigkeit von Temperatur

In Abbildung 48 sind die temperatur- und gesamtlösungsabhängigen Kennwerte für die spezifische Wärmekapazität, dynamische Viskosität und Dichte des Grundwassers abgebildet. Es wurden ein Gesamtlösungsinhalt von bis zu 6g/mol berücksichtigt, was in etwa 350 g Salz pro Liter entspricht.
Durch die Abhängigkeit des Grundwassers von Temperatur und Salinität ist folglich der Parameter der hydraulischen Leitfähigkeit resp. die hydraulische Durchlässigkeit k_f direkt beeinflusst.
Die Kennwerte für E-Modul und Querdehnzahl wurden entsprechend Tabelle 12 festgelegt. Besonders der E-Modul unterliegt im natürlichen Vorkommen großen Schwankungen. Porosität, Sättigungsgrad, Klüfte und Einschlüsse können Festigkeiten erheblich herabsetzen. Durch einen höheren E-Modul werden an dieser Stelle die Spannungen überschätzt, was in der späteren Diskussion berücksichtigt wird.

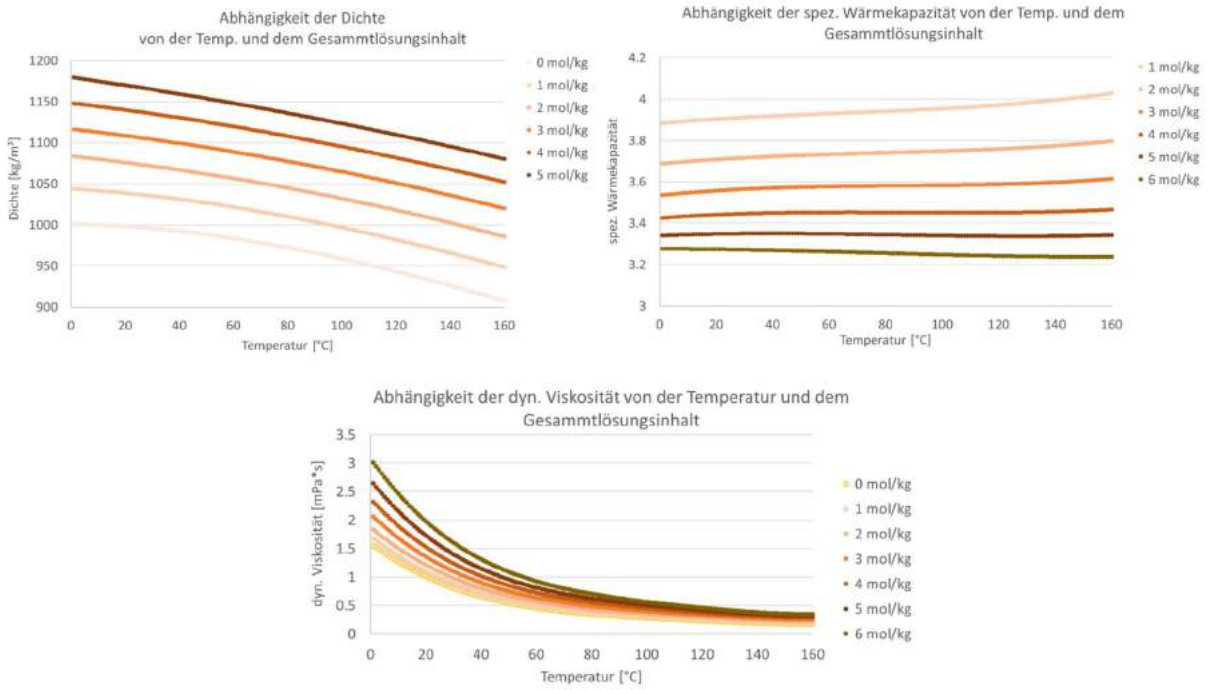


Abbildung 48 Spez. Wärmekapazität [J / (kg K)], Viskosität [mPa s] und Dichte [kg/m³] des Grundwassers in Abhängigkeit von Temperatur und Salinität

7.7 Simulation zweier Speichertypen und Evaluierung der Ergebnisse

Im AP 3.5 wurden die in AP 3.2 gezeigten Modelle weiter ertüchtigt und die Ergebnisse unter zyklischer Beanspruchung (halbjährige Ein-/Auslagerung) bei konstanter Pumprate für einen Dauerbetrieb von 30 Jahren ermittelt. Folgend wurden die Referenzmodelle parametrisch aufgebaut und mit den Erkenntnissen aus AP 3.2 sowie mit Hilfe JENA-GEOS die Parameterräume für eine Sensitivitätsanalyse festgelegt. Die Sensitivitätsstudie wurde dann mittels des Programms optiSLang (DYNARDO GMBH 2021) durchgeführt und ausgewertet.

Mit den Ergebnissen aus der Sensitivitätsanalyse war es möglich die Einflüsse der wichtigsten Eingangsparameter auf die Ergebnisparameter zu identifizieren und Korrelationsmodelle (MOPs) mit optiSLang aufzubauen. Die MOPs dienten als Solver zur schnellen Ermittlung von weiteren Designvarianten ohne tagelange Rechenzeiten des T-H-M-Simulators zu berücksichtigen. Durch das Anschließen des Gestehungskostentools von JENA-GEOS an den MOP-Solver war es möglich, unter Berücksichtigung kostenrelevanter Einflussfaktoren, eine Designvariante zu finden, die allen Anforderungen aus Speicher- und Kosteneffizienz erfüllt.

7.7.1 Ergebnisse der Referenzmodelle

Die Ermittlung der Ergebnisse für einen Dauerbetrieb von 30 Jahren erfolgte unter Berücksichtigung des Festplatten-Speicherplatzes mit reduzierter Ergebnisausgabe. Somit wurden nur die Daten am Ende eines Zyklus der Kalt- bzw. Warmzeit gespeichert. Die Datenausgabe beschränkte sich zudem auf Temperaturen, Spannungen und Porendrücke.

Vorab wurden Referenzmodelle erstellt und ausgewertet. Für das Mehrschichtmodell wurde die mittlere Tiefe der Aquifere auf 500 m geändert, um negative Porendrücke bei der Entnahme zu vermeiden.

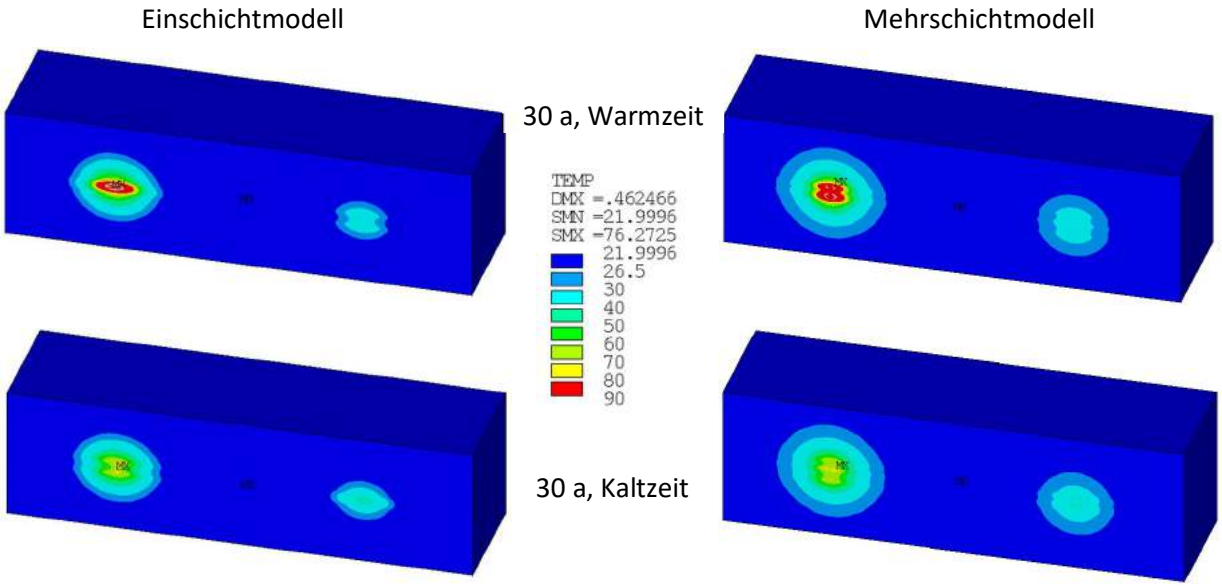


Abbildung 49 Referenzdesigns - Temperaturausbreitung [°C]

Abbildung 49 zeigt die Temperaturfelder der Referenzmodelle nach 30 Jahren Simulationszeit. Die Temperaturverläufe an den Brunnen sind über den Betrachtungszeitraum in Abbildung 50 dargestellt. Durch die kontinuierliche Einlagerung der Wärme in das Gestein ist zu erkennen, dass die Abkühlung in den Phasen der Ausspeisungen immer geringer werden. Betrachte man dieses Phänomen über die 30 Jahre verlaufen diese Temperaturen asymptotisch.

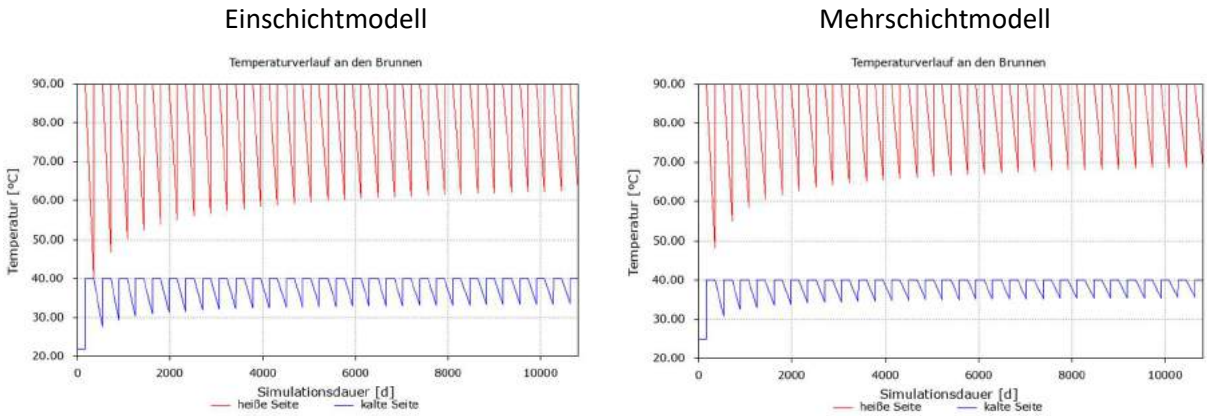
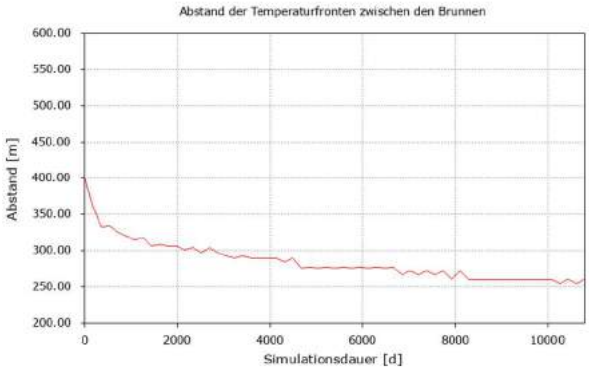


Abbildung 50 Referenzdesigns – Temperaturverlauf an den Brunnen [°C]

Die Temperaturfelder, in denen die Wärme im Gestein um die Brunnen gespeichert wurde, vergrößerten sich mit jedem Zyklus. Die Fronten der Temperaturfelder zwischen den Brunnen näherten sich kontinuierlich an. Zur Bestimmung der Abstände der Temperaturfronten wurden die Elemente zwischen den Brunnen selektiert, in denen keine Wärme eingelagert wurde, und deren Länge

bestimmt. Die daraus ermittelten Abstandsverläufe zwischen den Temperaturfronten sind über den Betrachtungszeitraum in Abbildung 51 dargestellt.

Einschichtmodell



Mehrschichtmodell

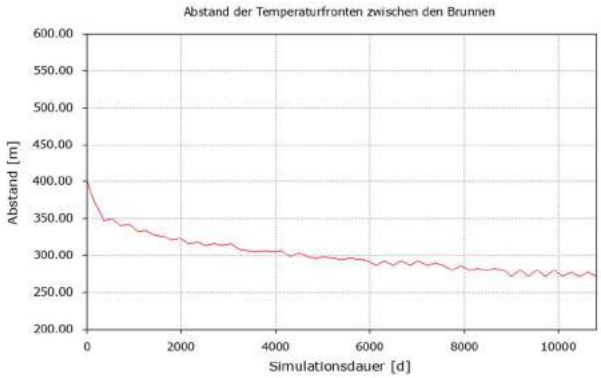
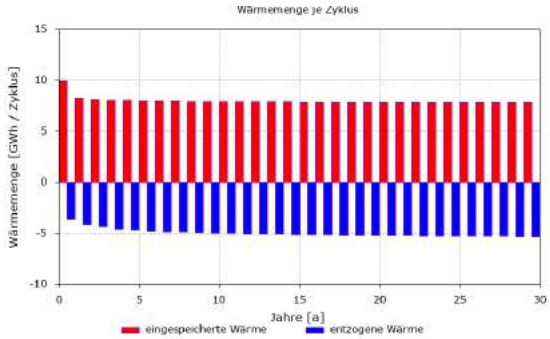


Abbildung 51: Referenzdesigns –Annäherung der Temperaturfronten [m]

Zur Bestimmung der Speichereffizienz wurden die ein- und ausgespeisten Netto-Wärmemengen über den gesamten Betrachtungszeitraum ausgegeben. Abbildung 52 zeigt die Wärmemengen getrennt nach Warm- und Kaltzeiten. In Abbildung 53 ist der Wärmemengenverlust je Jahr und der sich daraus ermittelte Verlauf der Speichereffizienz dargestellt.

Einschichtmodell



Mehrschichtmodell

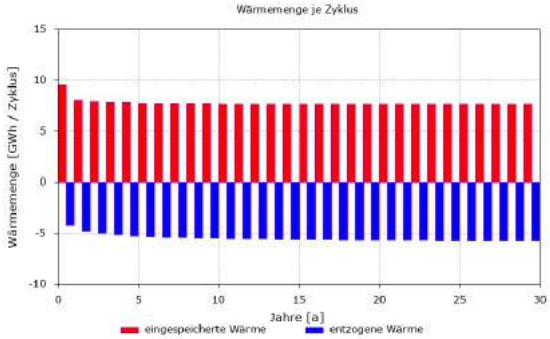
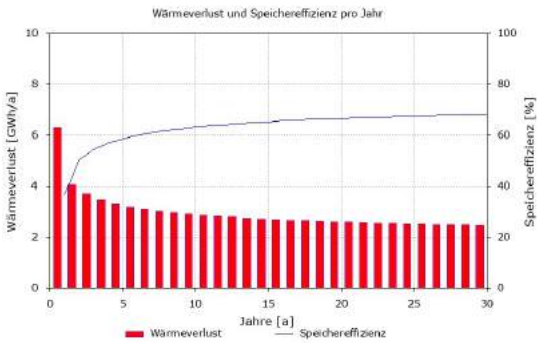


Abbildung 52 Referenzdesigns – Wärmemengen je Warm- und Kaltzeiten [GWh/Zyklus]

Einschichtmodell



Mehrschichtmodell

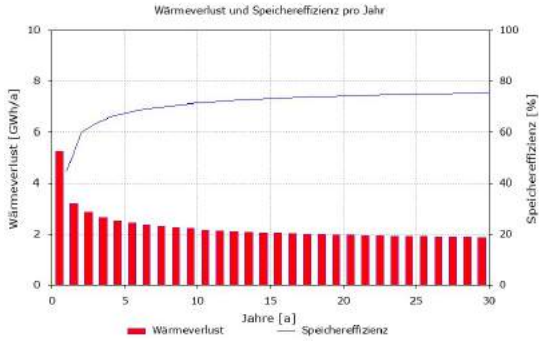


Abbildung 53 Referenzdesigns - Wärmemengenverluste [GWh/a] und Speichereffizienz [%]

7.7.2 Parametrische Modellbeschreibung

In Tabelle 14 sind die für die Sensitivitätsanalyse verwendeten abhängigen und unabhängigen Inputparameter sowie die festgelegten Parameterräume angegeben. Die aufgeführten Parameter ohne Kurzbezeichnung sind abhängige Modellparameter, die sich aus den jeweiligen Inputparameter ergeben und schon vor der FE-Analyse ermittelt werden konnten. Die 15 unabhängigen Parameter umfassen:

- Geometrieparameter (3)
- Materialparameter des Gesteins (7)
- Strömungsparameter des Grundwassers (2)
- Fluidparameter bei Ein- und Ausspeisung (3)

Die oberen und unteren Grenzen ergaben sich durch die Beschränkungen aus den Laborversuchen oder aus Erfahrungswerten für typische Wärmetauscher. Für die Variation der Wärmekapazität des Gesteins wurde zusätzlich zur Temperaturabhängigkeit ein Faktor eingeführt, der die Streuung der in den Laboruntersuchungen (Louis, 2020) festgestellten 3 % widerspiegeln sollte.

Tabelle 14 Parameterräume für die Sensitivitäts-Analyse

Parameter	Kurz-bezeichnung	Einheit	Referenz-wert	Untere Grenze	Obere Grenze
Tiefenlage TVD	dadepth	m	400	400	1000
- Mittlere Temperatur d. Bodens		°C	22	22	40
Reservoir-Mächtigkeit	dathick	m	25	15	35
Brunnenabstand	dadist	m	400	300	500
E-Modul	daEmodu	N/m²	1,00E+08	9,00E+07	1,10E+08
Querdehnzahl	dapoiss	-	0,10	0,09	0,11
Dichte	dadensi	kg/m³	2230	1900	2400
Porosität	daporou	-	0,156	0,110	0,270
th. Ausdehnungskoeffizient	daTexpa	1/K	1,85E-05	3,00E-06	1,00E-04
Wärmeleitfähigkeit	daTcond	W/(m K)	3,01	1,70	3,00
Faktor Wärmekapazität	daTcapa_fac	-	1,00	0,97	1,03
- Wärmekapazität Gestein		J/(kg K)	759,9	737,1	788,9
Permeabilität	daHperm	mD	175,7	100,0	250,0
- hydraulische Leitfähigkeit		m/s	1,676E-06	9,904E-07	2,148E-06
Salinität	daFL_salin	g/l	50	0	350
- Dichte des Grundwassers		kg/m³	1034	994	1163
- Wärmekapazität des GW		J/(kg K)	3932	4182	3337
- Viskosität des Grundwassers		mPa*s	1,050	0,972	1,311
Förderrate	daFL_pump	l/s	8,33	8,33	16,67
Temperatur heißer Brunnen	dahot	°C	90	60	90
Temperatur kalter Brunnen	dacold	°C	40	30	50

Ergebnisgrößen (Responses)

In Tabelle 15 sind die für die Sensitivitätsanalyse ausgewählten Ergebnisparameter (Responses) angegeben. Aus der FE-Analyse wurden dazu skalare Werte der zuvor dargestellten Ergebnisbilder extrahiert. Die Werte wurden weiterführend für das Gestehungskostentool von JENA-GEOS exportiert.

Tabelle 15 Ergebnisgrößen der Sensitivitätsstudie

Responses	Kurzbezeichnung	Einheit	Ref. Abbildung
Temperatur am heißen Brunnen nach 30 a	t_hot_end	°C	Abbildung 50
Temperatur am kalten Brunnen nach 30 a (Halbjahr)	t_cold_end_1	°C	Abbildung 50
Abstand der Temperaturfronten zwischen den Brunnen nach 30 a	d_well_end	m	Abbildung 51
Porendruckabsenkung im Brunnen nach 30 a	ppres_loss_end	bar	Abbildung 39
Eingespeiste Wärmemenge Warmzeiten über 30 a	heat_nett_in_30	GWh	Abbildung 52
Entzogene Wärmemenge Kaltzeiten über 30 a	heat_nett_out_30	GWh	Abbildung 52
Wärmeverlust über 30 a	heat_loss_end	GWh	Abbildung 53
Speicheneffizienz	stor_eff_end	-	Abbildung 53
Versagenswahrscheinlichkeit	max_failure	-	Abbildung 45

Nebenbedingungen (Constraints)

Zur Sicherstellung der Realisierbarkeit des Wärmetauschers wurden physikalische Anforderungen definiert, die als notwendige Bedingungen (constraints) die Plausibilität des Modells bewerteten. Verletzungen von Constraints führten für das jeweilige Design zu einer ungültigen Parameterkombination (infeasible design). Es wurden zwei Constraints festgelegt.
Constraint 1 (constr_mWS_loss): Bei einer Bewertung der zulässigen Porendruckabsenkung im jeweiligen Entnahmebrunnen wurde die äquivalente Wasserspiegelhöhe im Brunnen zu Grunde gelegt. Eine Unterschreitung der Differenz von Porendruckabsenkung zur äquivalenter Wasserspiegelhöhe, die im Modell der Verteufung entspricht, führte zu einem infeasible Design.
Constraint 2 (constr_max_failure): Bei einer Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit des Gesteins führte eine Überschreitung der Response „max_failure“ zu einem infeasible Design.

7.7.3 Sensitivitätsstudie

In einer Sensitivitätsstudie wurden Abhängigkeiten der variierenden Responses auf sich veränderliche Inputparameter ermittelt. Die Auswertung der Sensitivitätsstudie wurde mit optiSLang von Dynardo (Dynardo GmbH, Ansys optiSLang 2021 R1, 2021) durchgeführt. Das Programm optiSLang ermöglicht eine qualitative und quantitative Bewertung dieser Abhängigkeiten durch Regressionsanalysen und Korrelationsmodelle. Das Ziel war es, mittels Korrelationsmodellen – Metamodell optimaler Prognosefähigkeit (MOP) - die beste Vorhersagewahrscheinlichkeit von Responses auf sich

veränderliche Parameter zu bestimmen, was mit dem Maß der Prognosegüte - Coefficient of Prognoses (CoP) – quantifiziert wurde.
Durch eine stochastische Verteilungsfunktion – Advanced Latin Hypercube Sampling (ALHS) – wurden mit optiSLang Parameterkombinationen (Designs) in den Parametergrenzen (s. Tabelle 14) generiert. Nach 43 berechneten Designs zeigten die CoPs der approximierten Antwortflächen der MOPs eine hohe Prognosegüte. Folgen dazu wurde mit den Untersuchungen an den MOPs fortgefahren.

7.7.3.1 Metamodelle des T-H-M-Simulators

Der CoP in Abbildung 54 weist aus, dass die Variation der Temperatur am heißen Brunnen nach 30 Jahren mittels des bestmöglichen Korrelationsmodell von 98 % durch die Variation der Eingangs-parameter erklärt werden kann. Dabei ist der Einfluss der eingespeisten Temperatur am heißen Brunnen am wichtigsten. Geringe Einflüsse auf die Gesamterklärbarkeit der Variation haben die Verteufung der Brunnen und die Porosität des Gesteins.

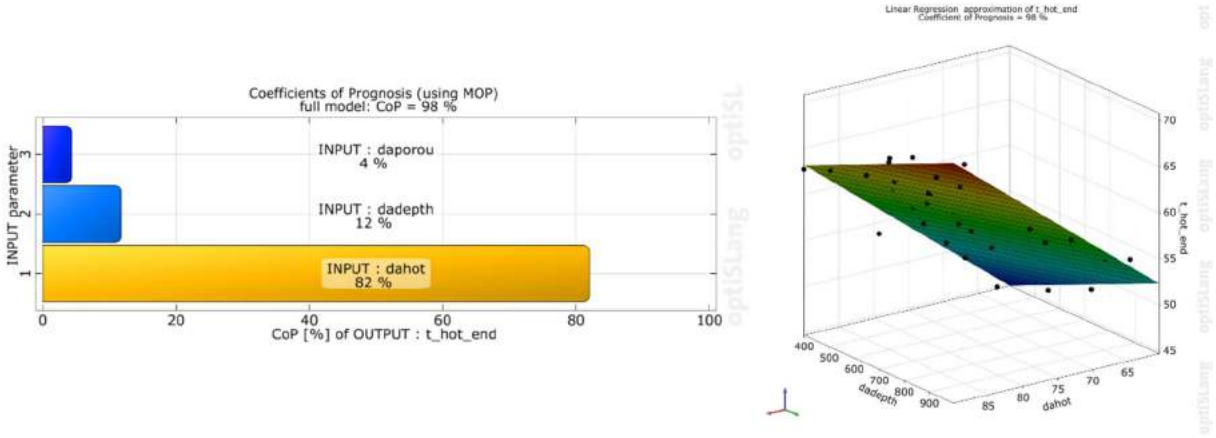


Abbildung 54 Einschichtmodell - Temperatur am heißen Brunnen (nach 30 a)

Die Variation der Temperatur am kalten Brunnen nach 30 Jahren kann mit der gleichen Genauigkeit (CoP 98 %, Abbildung 55) erklärt werden. Analog hierzu ist der Eingangsparameter der eingespeisten Temperatur am kalten Brunnen am wichtigsten. Einen weiteren Einfluss auf die Gesamterklärbarkeit der Variation hat die Verteufung der Brunnen.

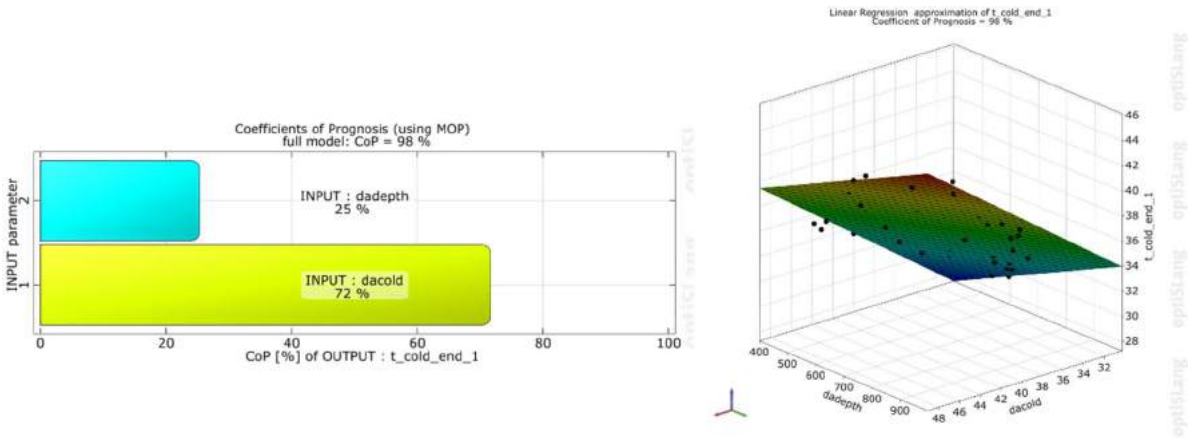


Abbildung 55 Einschichtmodell - Temperatur am kalten Brunnen (nach 30 a, Halbjahr)

Durch die Darstellungen beider Regressionsmodelle (Abbildung 54 u. Abbildung 55) über die jeweils wichtigsten Eingangsparameter kann plausibel gezeigt werden, dass die konvergierten Ausspeisetemperaturen (entsp. Abbildung 50) mit zunehmender Verteufung der Brunnen bzw. mit zunehmender mittlerer Aquifertemperatur, sowie mit höherer Einspeisetemperaturen ebenso steigen.

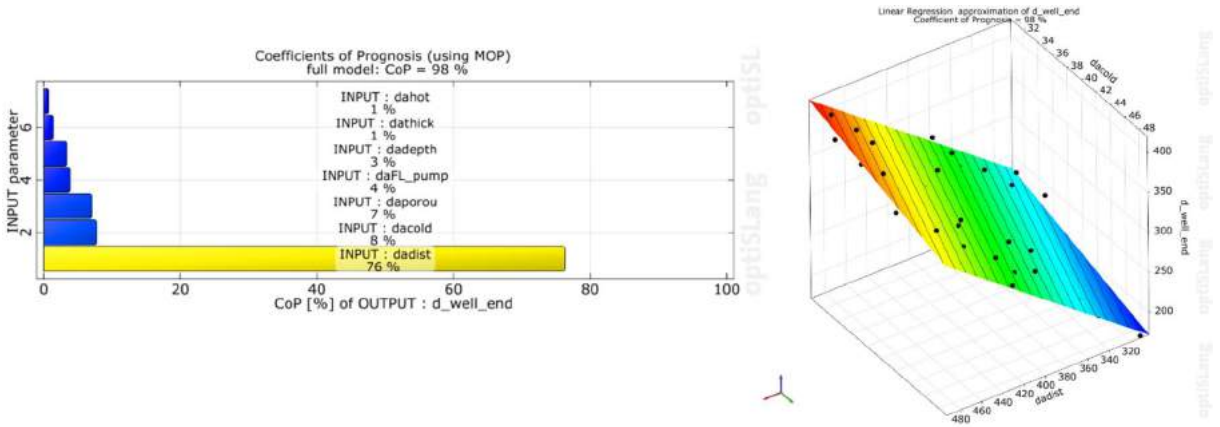


Abbildung 56 Einschichtmodell - Abstand der Temperaturfronten (nach 30 a)

Abbildung 56 zeigt die Auswertung für den Abstand der Temperaturfronten zwischen den Brunnen. Die Annäherungen der Temperaturfronten beider Brunnenseiten kann mit einer hohen Erklärbarkeit (CoP 98 %) auf den ursprünglichen Brunnenabstand zurückgeführt werden. Weitere, aber geringere Einflüsse auf die Variation der Ergebnisgröße sind die Einspeisetemperatur an der kalten Brunnenseite (8 %) und die Porosität des Gesteins (7 %).

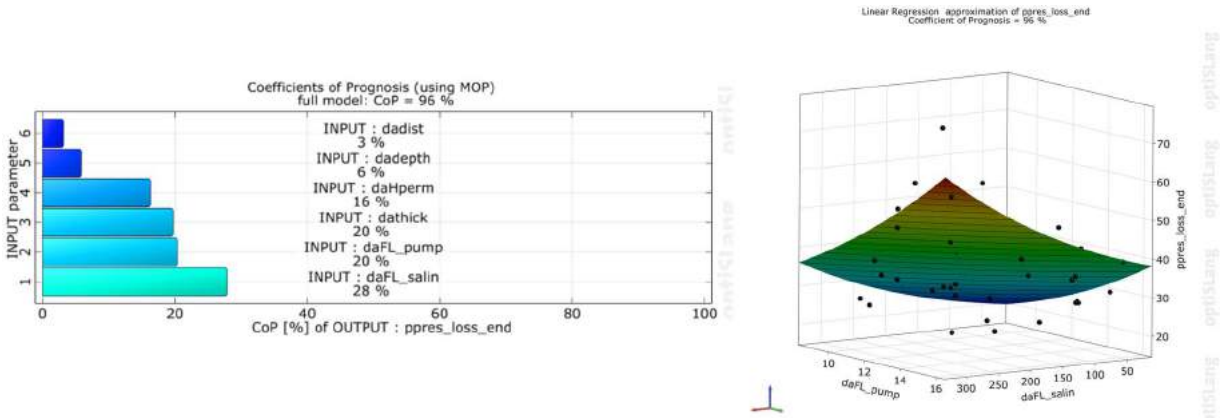


Abbildung 57 Einschichtmodell - Porendruckabsenkung im Brunnen (nach 30 a)

Die Variation der Porendruckabsenkung kann mit einem CoP von 96 % hauptsächlich durch die Variation der Eingangsparameter von Salinität (28 %), Förderrate (20 %), Aquifermächtigkeit (20 %) und Permeabilität (16 %) erklärt werden. Grundsätzlich zeigen die Modelle (Abbildung 57) das zu erwartende Verhalten. Eine geringere Absenkung des Porendrucks zeigt sich bei geringerer Salinität und Förderrate. Aquifermächtigkeit und Permeabilität verhalten sich hingegen indirekt proportional zur Porendruckabsenkung.

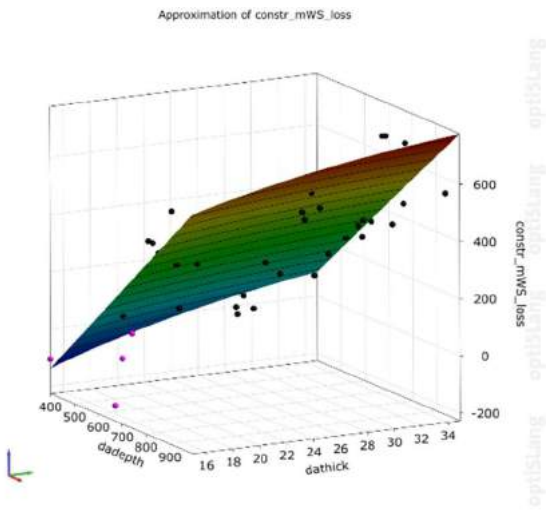


Abbildung 58 Einschichtmodell – MOP Druckabsenkung über Verteufung und Aquifermächtigkeit, unzulässige Designs in Magenta

Durch die Bewertung einer zulässigen Druckabsenkung (constr_mWS_loss) konnten vier Designs mit einer unzulässigen Parameterkombination gefunden werden. Die höchsten linearen Korrelationen zur Constraint bestanden zwischen der Verteufung (R = 0.85) und der Aquifermächtigkeit (R = 0.34). Das Regressionsmodell (Abbildung 58) zeigt bei geringerer Verteufung und geringerer Aquifermächtigkeit eine Unterschreitung des Kriteriums.

Die Variation der Speichereffizienz kann mit einem CoP von 96 % hauptsächlich durch die Variation der Eingangsparameter der Einspeisetemperaturen (kalter Brunnen 49 % und heißer Brunnen 27 %) und der Verteufung (38 %) erklärt werden (Abbildung 59).

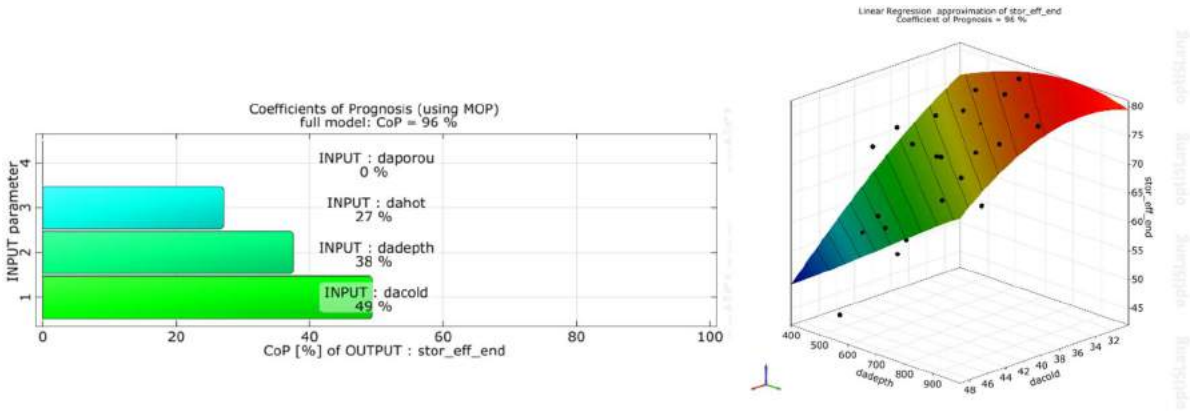


Abbildung 59: Einschichtmodell – Speichereffizienz (nach 30 a)

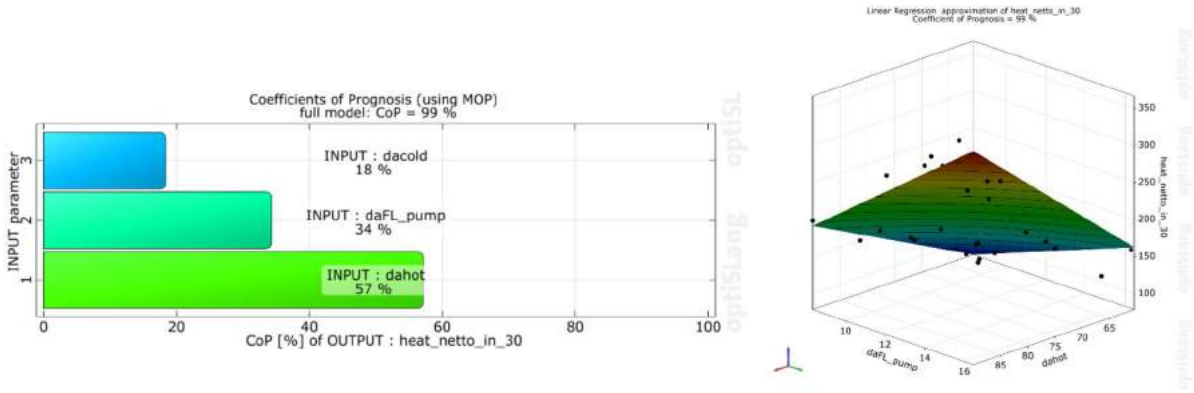


Abbildung 60 Einschichtmodell - Eingespeiste Wärmemenge Warmzeiten (Summe über 30 a)

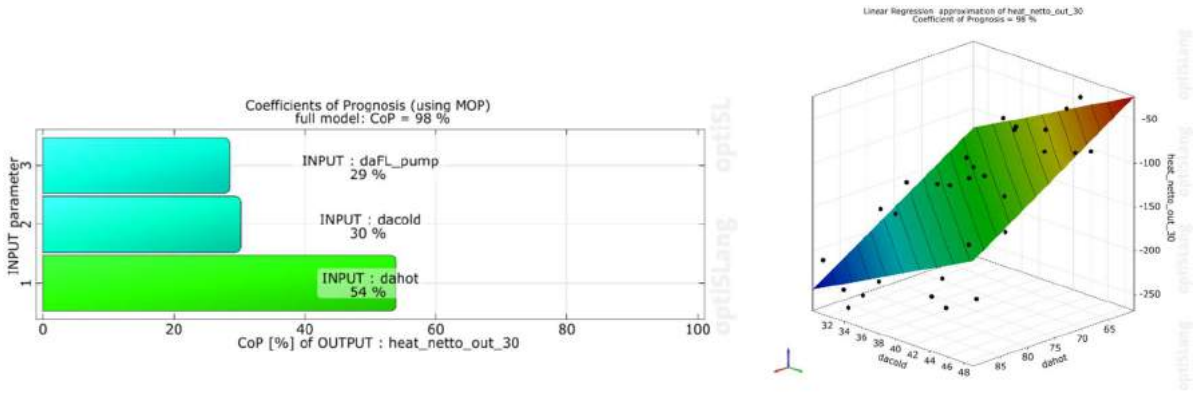


Abbildung 61 Einschichtmodell – Entzogene Wärmemenge Kaltzeiten (Summe über 30 a)

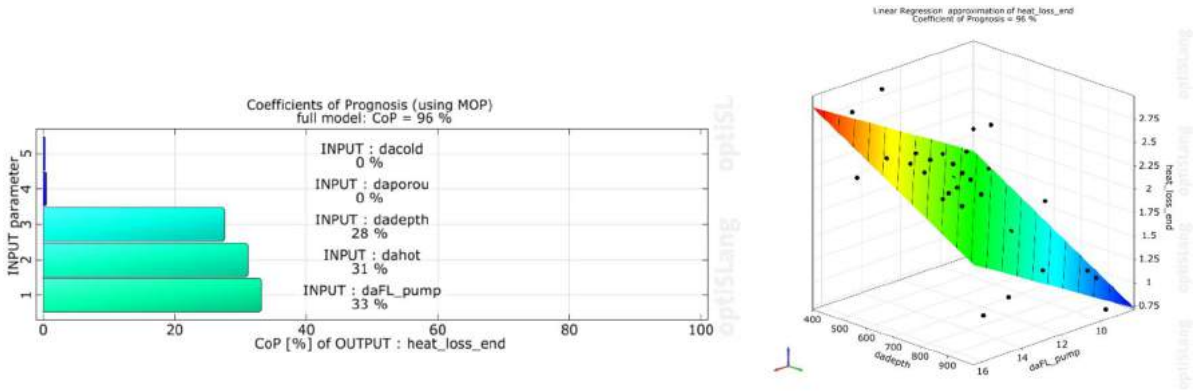


Abbildung 62 Einschichtmodell – Wärmeverlust (Summe über 30 a)

Betrachtet man die Komponenten des Verhältnisses gegenüber den Regressionsmodellen von Ein- und Ausgespeister Wärmemengen (Abbildung 60 und Abbildung 61) sowie vom Regressionsmodell des daraus resultierenden Wärmeverlustes (Abbildung 62) entfällt der Einfluss der Förderrate auf die Speichereffizienz. Grundlegend steigt die Speichereffizienz mit zunehmender Verteufung der Brunnen und geringerer Einspeisetemperatur an der kalten Brunnenseite.

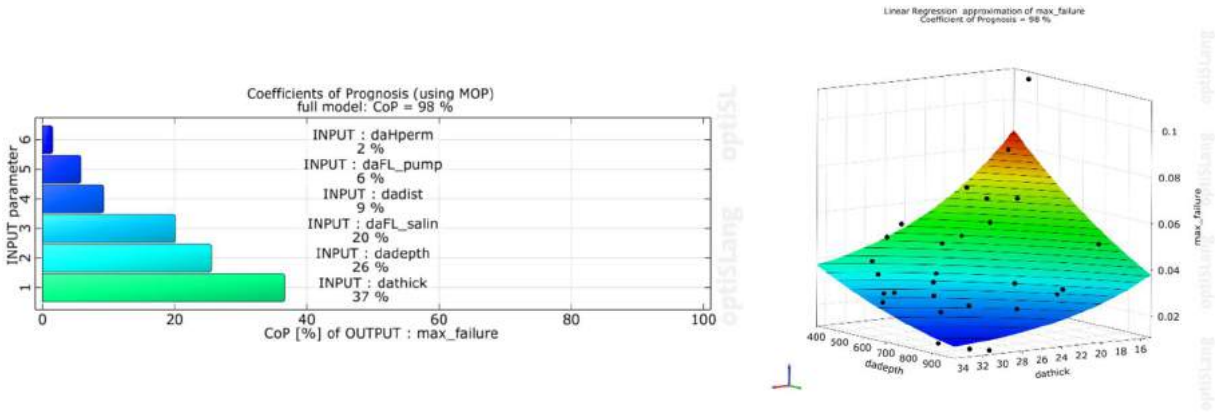


Abbildung 63 Einschichtmodell – Versagenswahrscheinlichkeit (nach 30 a)

Die Variation der Versagenswahrscheinlichkeit kann mit einem CoP von 98 % hauptsächlich durch die Variation der Eingangsparameter von Aquifermächtigkeit (37 %), Verteufung (26 %), Salinität (20 %) und Brunnenabstand (9 %) erklärt werden (Abbildung 63). Das Verhältnis von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit fällt bei den gewählten Parametergrenzen gering aus. Im Vergleich zum Grenzfall ohne Berücksichtigung der Kohäsion (Abbildung 64) verlieren alle anderen Eingangsparameter gegenüber der Aquifermächtigkeit und der Verteufung an Bedeutung. Anhand beider MOPs kann gezeigt werden, dass höhere Werte der Versagenswahrscheinlichkeit bei geringeren Verteufungen und geringeren Aquifermächtigkeiten zu erwarten sind.

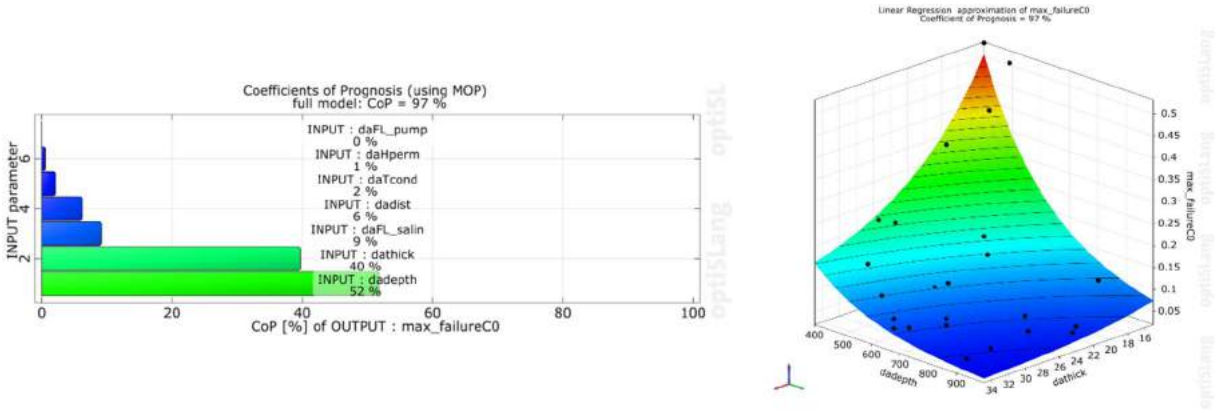


Abbildung 64 Einschichtmodell – Versagenswahrscheinlichkeit ohne Berücksichtigung der Kohäsion (nach 30 a)

Im Vergleich zu den Regressionsmodellen der Porendruckabsenkung haben die Variationen der Eingangsparameter von Förderrate und Permeabilität einen geringeren Einfluss auf die Variation der Ergebnisgröße der Versagenswahrscheinlichkeit, was sich scheinbar durch eine Interaktion der Hauptnormal- und Hauptschubspannung zugunsten der Beanspruchung auswirkt.

7.7.3.2 Anschluss der Metamodelle an das Gestehungskostentool

Die mathematischen Funktionen der Metamodelle wurden, mit Hilfe eines Plug-Ins, in Excel importiert. Durch eine weitere Funktion des Plug-Ins (MoP-Solver) konnten auf Basis der Metamodelle weitere Designvarianten berechnet werden.

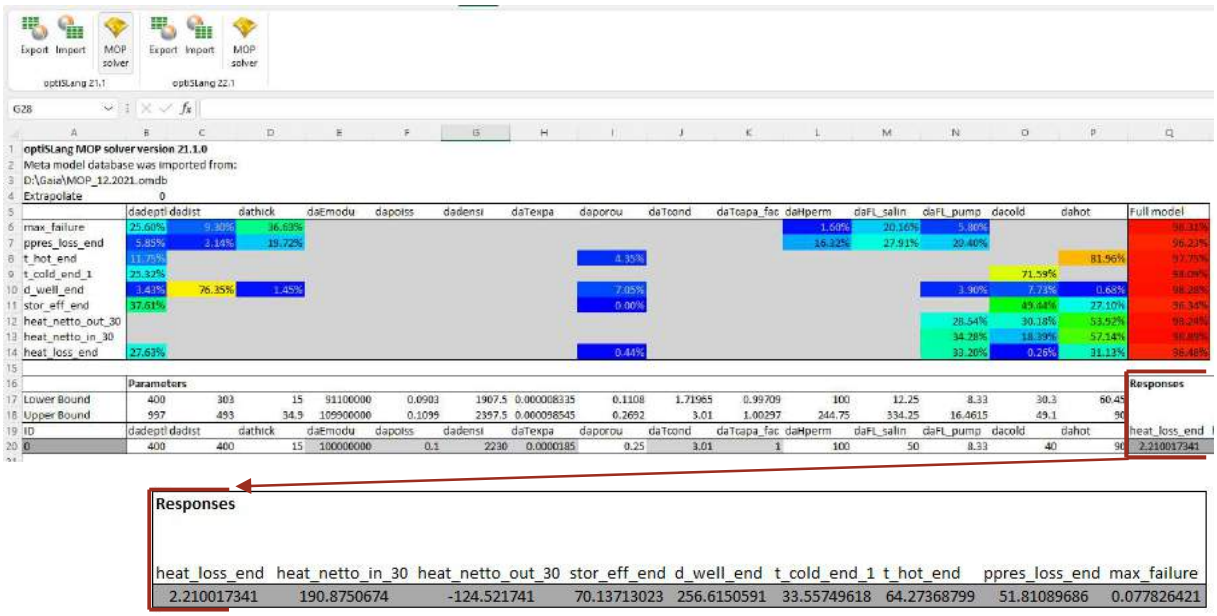


Abbildung 65: MoP-Solver in Excel

Abbildung 65 zeigt die Oberfläche des MoP-Solvers in Excel mit allen Eingangsparametern (Zeile 5) und Responses (Spalte A). Die linearen Korrelationen der Metamodelle (Zeile 6-14) sind in den Spalten B-P für die jeweiligen Eingangsparameter angegeben. Der Spalte Q können die Gesamterklärbarkeiten CoPs entnommen werden. Die grau melierten Zellen zeigen keine Erklärbarkeiten der Eingangsparameter auf die Responses.

In den Zeilen 17 und 18 sind die Parametergrenzen der berechneten 43 Designs angegeben. In Zeile 20 können neue Parameterkombinationen eingeben werden. Jeder Parameterkombination verändert die Responses ab Spalte Q in Zeile 20. Die Zellen der Eingabeparameter können mit beliebigen Zellen verknüpft werden. Dadurch konnte das Gestehungskostentools von JENA-GEOS angeschlossen und weitere Untersuchungen auf Basis der Metamodelle durchgeführt werden.

8 Standortidentifizierung und -bewertungen

8.1 Geologische Speicherkomplexe

Derzeit konzentriert sich die Nutzung tiefer Speichergesteine in Thüringen auf die Förderung bzw. Speicherung von Erdöl und Erdgas. Es handelt sich hierbei hauptsächlich um poröse, klüftige Sandsteine und Karbonate. Als **potentielle Speichergesteine sind im Thüringer Becken** insbesondere die Sandsteine des Buntsandsteins, das geklüftete Staßfurtkarbonat und die Oberrotliegend-Sandsteine bekannt (HESSE et al. 2014).

Haupt-Auswahlkriterien bei der Suche nach geeigneten Speicherhorizonten sind zunächst lithostratigraphische Merkmale wie Mächtigkeit und räumliche Verbreitung inkl. Tiefenlage. Die weitere Eignung potentieller Speicherhorizonte wird anhand von petro-/thermophysikalischen Gesteinseigenschaften festgelegt. Im Ergebnis aktueller Recherchen und der o. g. Untersuchung zum Potential der Untergrundspeicherung in Thüringen von HESSE et al. (2014) waren für die aktuelle Studie vier stratigraphische Horizonte des Übergangs- und Deckgebirges für eine Speichernutzung in Thüringen prinzipiell von Interesse (Tabelle 16):

A. Poröse Sandsteine des Oberrotliegenden in variablen Mächtigkeiten bis 230 m.

B. Der Untere Buntsandstein im Südthüringischen Raum mit einer Mächtigkeit bis etwa 310 m.

C. Der Mittlere Buntsandstein der Solling-, Hardegsen- bis Detfurth-Folge als zusammenhängender Speicherhorizont mit schwankenden Mächtigkeiten von ca. 70 m bis 140 m.

D. Lockergesteinshorizonte des Quartärs mit Mächtigkeiten bis max. 150 m.

Tabelle 16 Stratigraphie der Speicher- und Barrieregesteine des Untergrundes in Thüringen, (modifiziert nach HESSE et al. 2014 und HUCKRIEDE & ZANDER 2011)

Stratigraphie: Periode / Epoche		Formation		Potentielle Speicherkomplexe	Potentielle Barrierekomplexe
Quartär	Holozän, Pleistozän			**X**	
Trias	Buntsandstein	so	Röt-Folge		X Rötsteinsalz
		sm	Solling-Folge	**X**	
			Hardegsen-Folge	**X**	
			Detfurth-Folge	**X**	
			Volpriehausen-Folge	(X)	
		su	Bernburg-Folge	**X** (nur Südthüringen)	
			Calvörde-Folge	**X** (nur Südthüringen)	
Perm	Rotliegend	ro	Oberrotliegend (Saxon)	**X**	
		ru	Unterrotliegend (Autun)		

Eine hinreichende Mächtigkeit und geeignete hydraulische Eigenschaften werden als grundlegend erforderliche Speichereigenschaften definiert. Die Gegenwart eines effektiven Abdeckers (z. B. Rötsalz, Zechsteinsalze) und Fallenstrukturen sind im Gegensatz zur Speicherung von Kohlenwasserstoffen (KW) und Wasserstoff nicht zwingend erforderlich. So umfassen die nachfolgenden Angaben zum Rotliegenden und Buntsandstein voraussichtlich nur einen Teil der potentiell als Aquiferspeicher nutzbaren Abschnitte des Buntsandsteins. Jedoch konnten diese Strukturen aufgrund der guten Datengrundlage und Erfahrungen aus der KW-Exploration/-Produktion bereits als geeignete geologische Speicherformationen identifiziert werden.

8.1.1 Oberrotliegend

Diese Sandsteine, die als Aquiferstrukturen geeignet sein könnten, sind in Thüringen auf das Mühlhäuser Rotliegendbecken und den Saale-Trog bei Erfurt im zentralen Thüringer Becken beschränkt (vgl. Anlage 2.1). In Tabelle 17 sind für diese Bereiche die Antiklinalstrukturen der Schichtgrenze Rotliegend/Zechstein erfasst, die grundsätzlich als Speichergesteine geeignet sein könnten. Aufgrund der Ausprägung und der geringen Nutzporosität von durchschnittlich 4 % bis 5 % (BROSIN 2013) sollten die Strukturen eine Amplitude von mindestens 200 m und eine Mächtigkeit von über 100 m besitzen. Insbesondere die Strukturen *Sprötauer Sattel* und *Fahner Sattel* erfüllen die vorgenannten Kriterien. Darüber hinaus wären aber auch noch die *Kirchheilinger Struktur* und der *Ettersberg-Sattel* als bedingt geeignet anzusehen. Die Speicherkapazitäten für diese Strukturen betragen überschlägig 0,5 Mrd. m³N bis 3,5 Mrd. m³N, wobei die Produktivtäten aufgrund der zu erwartenden hydraulischen Eigenschaften der Speicherhorizonte als niedrig einzustufen sind (HESSE et al. 2014). Im höheren Oberrotliegend sind jedoch auch relativ gut sortierte Sandsteine bekannt, die teilweise eine Nutzporosität von mehr als 10 % besitzen. Das *Mühlhäuser Rotliegendbecken* zeichnet sich durch eine bis zu 230 m mächtige Abfolge braunroter, gut sortierter Fein- bis Mittelsandsteine („*Altengottener Sandstein*“) aus. Die Sandsteine des Oberrotliegend im *Saale-Trog* sind bis etwa 100 m mächtig und ähneln in ihrer Ausprägung dem Altengottener Sandstein, weisen jedoch meist eine etwas schlechtere Sortierung und höhere Bindemittelgehalte auf. Porositäten und Permeabilitäten sind entsprechend heterogen ausgeprägt. So erreichen die Werte von Porositätsmessungen 4 % bis 15 %. Die wenigen bekannten Permeabilitätsmessungen liegen im Bereich von 0,002 mD bis 147 mD. Die Aquifertemperaturen erreichen maximal 50 °C (TLUBN 2020).

Tabelle 17 Vorauswahl tektonischer Antiklinalstrukturen im Oberrotliegenden von Thüringen als potentiell geeignete Untergrundspeicher-Struktur (SEIDEL, G. 2004)

tektonische Elemente (SEIDEL, G. 2004)	Höhe Scheitelpunkt [mNN]	Amplitude [m]	Mächtigkeit
Sprötauer Sattel	-1160	200	ca. 1000 m
Ettersberg-Sattel	-860	40 (160)	< 500 m
Fahner Sattel	-880	200	ca. 250 m
Neudietendorfer Sattel	-1060	40	ca. 500 m
Tannrodaer Sattel	-140	300	< 250 m

8.1.2 Buntsandstein

Der Buntsandstein bildet stratigraphisch den unteren Abschnitt der Trias und wird im thüringischen Raum in sieben Folgen untergliedert. Die Gesamtmächtigkeit beträgt hier etwa 500 m bis 720 m. Die sandig-tonigen, vorwiegend fluviatilen Sedimente zeichnen sich durch einen zyklischen Aufbau aus. Basale, z. T. grobkörnige, bankige Sandsteine gehen dabei zum Hangenden in feinkörnigere Wechsellagerungen aus Tonsiltsteinen und Sandsteinen über. Insgesamt ist in Thüringen davon auszugehen, dass alle Sandsteinhorizonte mehr oder weniger hydraulisch miteinander verbunden sind (TLUBN 2020). Tabelle 18 zeigt die stratigraphische Gliederung des Mittleren und Unteren Buntsandsteins, die aufgrund ihrer Lithologie mit zahlreichen Geröll- und Sandsteinschichten prinzipiell für die thermische Aquiferspeicherung in Frage kommen. Zudem erweisen sich insbesondere die Gesteine des Mittleren Buntsandsteins als potentielle Zielhorizonte, da diese großflächig in geeigneten Tiefenlage zwischen etwa 50 m und 500 m unter GOK vorkommen (s. Anlage 2.3), wodurch die Aquifertemperatur meist auf 20 °C bis 30 °C begrenzt ist.

Tabelle 18 Stratigraphische Gliederung des Mittleren und Unteren Buntsandsteins (BS) in Thüringen (nach SEIDEL, G. 1995). Fett gedruckt: Grobklastische bzw. Sandsteinhorizonte, die voraussichtlich für eine Wärmespeicherung von Interesse sind.

Stufe	Folge	Untergliederung in lokale Schichtenfolgen (mit Mächtigkeiten in m)					
		Südthüringen		Thüringer Senke		Ostthüringen	
Mittlerer Buntsandstein 140–240 m	Solling	Thür. Chiroth. Ton. Zwischensch. **Basissandstein**	3 – 10 bis 4 2 – 7	**Thür. Chiroth.** Ton. Zwisch.Sch. **Basissandstein**	5 – 14 5 1 – 14	**Chiroth.-Platten** Ton. Zwischenschichten **Basissandstein**	8 – 15
	Hardegsen	Sst.-Tonst-Wechselfolge **Geröllsandstein**	40 – 80 6 – 12	**Thür. Bausandstein** **Basissandstein**	40 – 80	**Thür. Bausandstein**	50 – 55
	Detfurth	**Feinschichtige Sandsteine** **Konglom. Sandstein**	20 – 35 18 – 20	**Lavendelfarbene Sandsteine** **Brauner Grobsandstein**	15 – 42 15–20	Rothensteiner Schichten **Rothenst. Geröllhoriz.**	35 6
	Volprie-hausen	Volp. Wechsellag. **Volp.-Sandstein** **Konglom. Sandstein**	40 20 – 25 20 – 25	**Avicula Schichten** Rotweiße Wechselfolge **Basissandstein**	28 – 45 33 – 50 17	**Avicula Schichten** **Kaolinschichten**	35 60
Unterer Buntsandstein 200–310 m	Bernburg	Feinschicht. Sandst. m. Tonst.-Lagen (Werragebiet gesamt **Konglom. Sandstein**	bis 80 135–160) 30 – 40	Obere Sst. Tonst. Wechsellagerung **Oolith-Sst.Schichten** Untere Sst.-Tonst.-Wechsellagerung	bis 70 bis 40 25 – 66	Dolom. Sandstein Obere Wechsellagerung **Kraftsdorfer Sandstein bzw. Basissandstein**	0–30 30 30
	Calvörde	Feinschicht. Sandst. mit Tonst.-Lagen **Konglom. Sandstein**	30 – 60 50 – 60	Sandige Tonst.Sch. Tonst.-Sst.-Wechsell. Tonst.-Sandst.Sch.	40 110 35	Sandige Tonsteinsch. **Untere Sandsteinsch.** **Randkonglomerat**	30 – 60 bis 70 bis 12

8.1.2.1 Unterer Buntsandstein

Die Datenlage zur Ausprägung des Unteren Buntsandsteins (200 m bis 310 m mächtig) ist im Vergleich zum Mittleren Buntsandstein wesentlich überschaubarer, da dieser für die KW-Exploration bzw. Gasspeicherung nur eine geringe Relevanz besitzt. Aus Abbildung 66 geht hervor, dass der Untere Buntsandstein innerhalb des Thüringer Beckens von pelitischen Gesteinen dominiert wird. Potentielle Aquifere im Beckenzentrum werden von lakustrinen Sandsteinen mit einem erhöhtem Feinkornanteil

gebildet, die geringe Permeabilitäten um 4 mD besitzen (BEYER et al. 2014a). Allerdings ist anhand des Profils der Bohrung Billeben bei Ebeleben (im Bereich der Struktur Allmenhausen, nordwestlich von Erfurt) zumindest in Teilbereichen des Thüringer Beckens das Vorkommen sanddominierter Fazies anzunehmen. Entlang des südlichen und südöstlichen Beckenrandes sowie südlich des Thüringer Waldes bilden dagegen großflächige, konglomeratische Sandsteine mit Mächtigkeiten zwischen 30 m und 60 m die Basis der Calvörde- und der Bernburg-Formation. Die Anlage 2.2 beinhaltet eine Kartendarstellung zur Tiefenlage (Isobathen) der Oberfläche des Unteren Buntsandsteins, welche etwa der Verbreitung der geröllführenden Sandsteine in Südthüringen (siehe Abbildung 66) entspricht. Größere sandsteindominierte Bereiche des Unteren Buntsandsteins streichen mit der Calvörde-Formation südwestlich des Thüringer Waldes oberflächlich aus. Da zum Zeitpunkt der Berichterstellung keine Daten zur Tiefenlage dieser Schichten vorlagen, kann keine weiterführende Bewertung zu deren potentieller Eignung als Wärmespeicher getroffen werden.

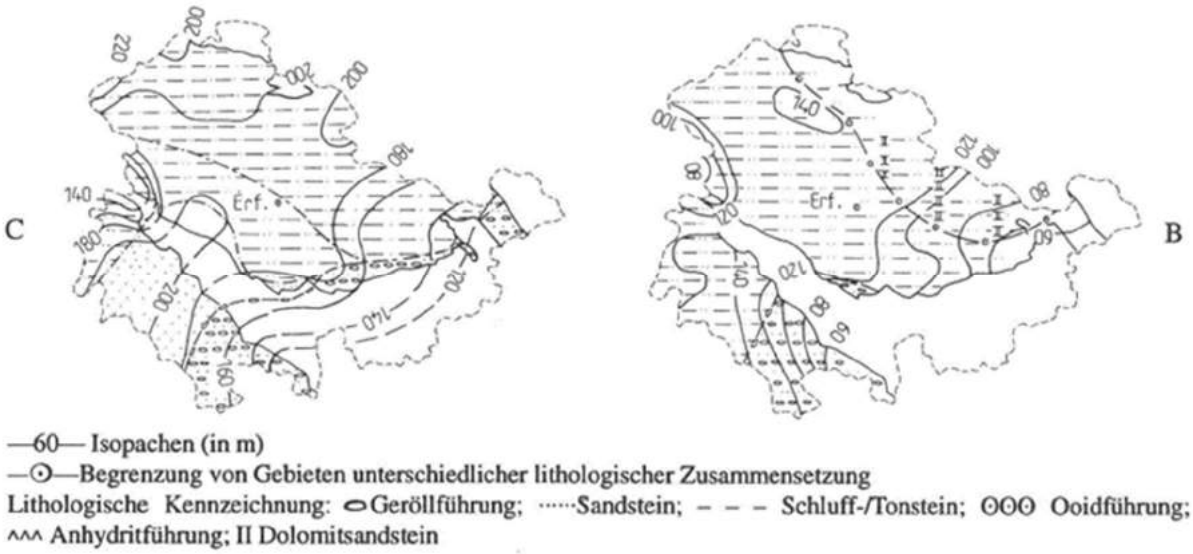


Abbildung 66 Lithologische Ausprägung des Unteren Buntsandsteins in Thüringen mit Mächtigkeitsangaben. Erf: Erfurt; Formationen: C–Calvörde, B–Bernburg (nach PUFF & RADZINSKI 1976)

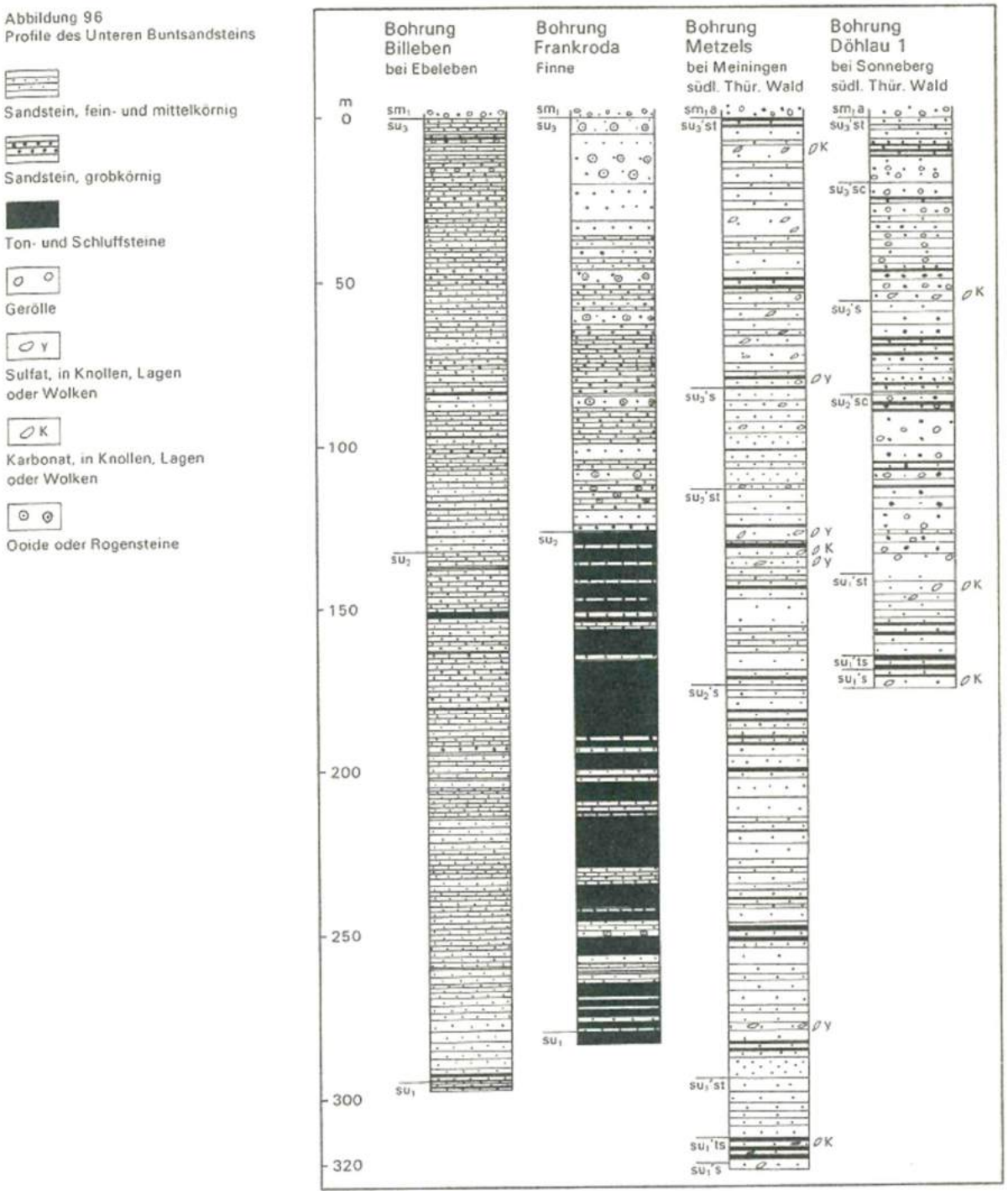


Abbildung 67 Bohrungsprofile des Unteren Buntsandsteins. su_1: Übergangsfolge (Zechstein), su_2: Calvörde-Folge, su_3: Bernburg-Folge (HOPPE & SEIDEL, G. 1974)

8.1.2.2 Mittlerer Buntsandstein

Die nachfolgenden Ausführungen basieren im Wesentlichen auf den Angaben von SEIDEL, G. (2014) zur Bewertung der Speicherpotentiale im Thüringischen Raum, welche die Eignung von geologischen Strukturen für die Speicherung von Synthese-/Erdgas und Druckluft als Energieträger betrachtet. Dies stellt für die aktuelle Studie eine fundierte Datengrundlage dar, um eine Nutzung des Buntsandsteins als thermischen Aquiferspeicher bewerten zu können. Die potentiellen Speicherstrukturen des hier betrachteten Mittleren Buntsandsteins sind in Tabelle 19 erfasst und in Anlage 2.3 kartographisch dargestellt.

Tabelle 19 Vorauswahl Thüringer Antiklinalstrukturen des Mittleren Buntsandsteins als potentiell geeignete Untergrundspeicher-Struktur (aus SEIDEL, G. 2014)

Antiklinalstrukturen Basis Oberer Buntsandst. nach SEIDEL 2014 [unveröffentlicht]	Erdgasspeicher/ -lagerstätte	Höhe Scheitelpunkt [mNN]	Amplitude [m]	Mächtigkeit Speicherhorizont im Mittleren Buntsandstein [m]
Struktur Allmenhausen	x	-40	100	85
Struktur Straußfurt		-260	40	113
Struktur Griefstedt		-280	40	122
Struktur Roldisleben		-220	100	135
Struktur Sprötau		-220	60	139
Struktur Buttelstedt		-140	40	125
Struktur Ettersberg		40	220	ca. 110
Struktur Forstberg		0	40	65 – 70
Struktur Kirchheilingen	x	-80	60	79
Struktur Langensalza	x	-140	60	75 – 90
Struktur Fahner Höhe	x	60	60	92
Struktur Steiger		-	0	ca. 110
Struktur Tannroda		-	0	ca. 110
Struktur Neudietendorf		-100	40	ca. 110
Struktur Alter Berg		240	120	ca. 75
Struktur Krahnberg		20	60	74 – 80
Struktur Wiegleben	x	-	0	80
Struktur Mechterstädt		-	0	ca. 80

LANGE (1962) berichtet von Vorarbeiten für die Untergrundgasspeicherung durch einige Bohrungen in Westthüringen aus den Jahren 1956 und 1957. Neben sedimentpetrographischen Untersuchungen wurden auch Porositäts- und Permeabilitätsbestimmungen an den Sandsteinen des Buntsandsteins durchgeführt. Man erzielte auch neue Ergebnisse hinsichtlich der Wasser- und Gasführung. Nach mündlicher Mitteilung von Herrn Dipl.-Geol. Lange brachten die Untersuchungen insgesamt positive Ergebnisse (SEIDEL, G. 2014).

Vom Mittleren Buntsandstein ist die ca. 100 m mächtige *Volpriehausen-Formation* vorwiegend stark von Tonsteinen durchsetzt und daher voraussichtlich nicht für die Speicherung geeignet. Eine Studie zum geothermischen Potential Thüringens (TLUBN 2020) bewertet hingegen die mehrere 10er Meter mächtigen Sandsteine der Volpriehausen-Formation als potentiell nutzbar für geothermische Anwendungen. Diese **gegensätzlichen Angaben** signalisieren weiteren **Forschungsbedarf**. Die *Detfurth-*, *Hardegsen-* und *Solling-Formation* sind vorwiegend mittel- bis grobkörnig ausgebildet (Abbildung 68) und erscheinen zunächst für einen Speicherbetrieb als grundsätzlich nutzbar. Abbildung 69 zeigt die Profile des Mittleren Buntsandsteins von der Eichsfeldschwelle (Profil Scharfenstein) bis zu den Profilen Ballstedt und Frankroda in der Thüringischen Senke (RADZINSKI & SEIDEL, G. 1997). Insgesamt erreicht die Gesamtmächtigkeit der Detfurth-, Hardegsen- und Solling-Formation bei Mühlhausen zusammen 65 m bis 70 m, bei Langensalza 75 m bis 90 m (LANGE 1962) und bei Ballstedt und Frankroda über 100 m. Abbildung 69 zeigt die Gesamtmächtigkeit des Mittleren Buntsandsteins und den Ausfall der Detfurth- und Hardegsen-Formation auf der Eichsfeldschwelle (SEIDEL, G. 2012). Daraus ergibt sich, dass im Gebiet der Eichsfeldschwelle Teile vom Speicherhorizont ausfallen bzw. geringmächtig entwickelt sind. Etwa ab 160 m Gesamtmächtigkeit ist der obere Teil des Mittleren Buntsandsteins nach derzeitiger Einschätzung als Speicher gut geeignet (LANGE 1962). Besonders in der Thüringischen Senke (s. Profile Ballstedt und Frankroda, Abbildung 69) erweist sich der obere Teil des Mittleren Buntsandsteins als günstig. So wurde in den Strukturen Kirchheilingen-Allmenhausen (DREYER 1965), Langensalza, Fahner Höhe und Wiegleben (BROSIN 2013) auch Erdgas erkundet.

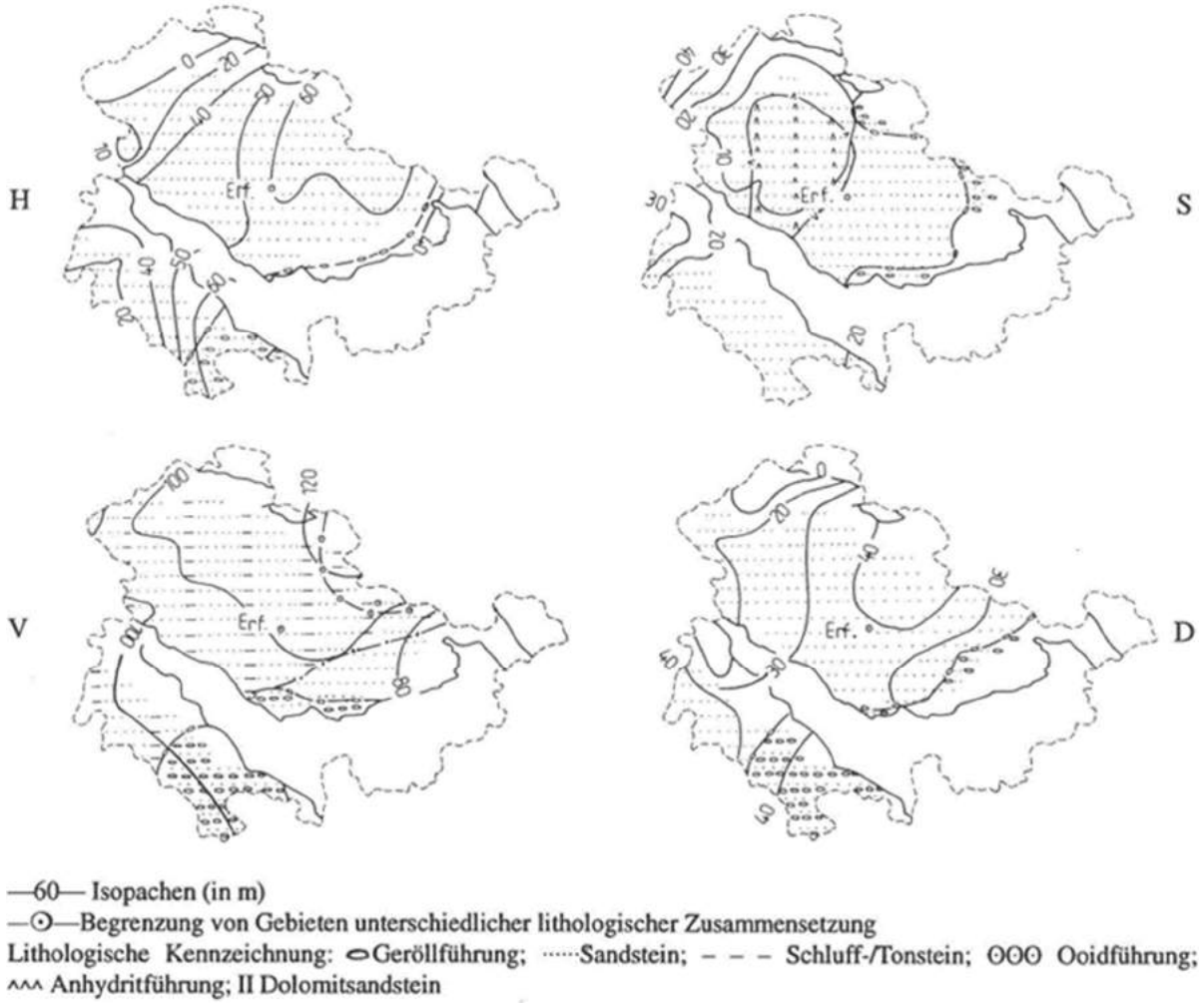


Abbildung 68 Lithologische Kartendarstellung des Mittleren Buntsandsteins in Thüringen mit Mächtigkeitsangaben. Erf: Erfurt; Formationen: H–Hardegsen, S–Solling, V–Volpriehausen, D–Detfurth (nach PUFF & RADZINSKI 1976)

RASEMANN (1972) ermittelte aus einer eng beprobten Bohrung bei Langensalza in der Hardegsen- und Solling-Formation eine durchschnittliche Nutzporosität von 7 % und eine Durchlässigkeit zwischen 2 mD und 800 mD. BEYER et al. (2014a) ermittelten für Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins im Thüringer Becken (Faziestypen Sandebene, fluviatil, äolisch) eine moderate Permeabilität von 27 mD bis 108 mD.

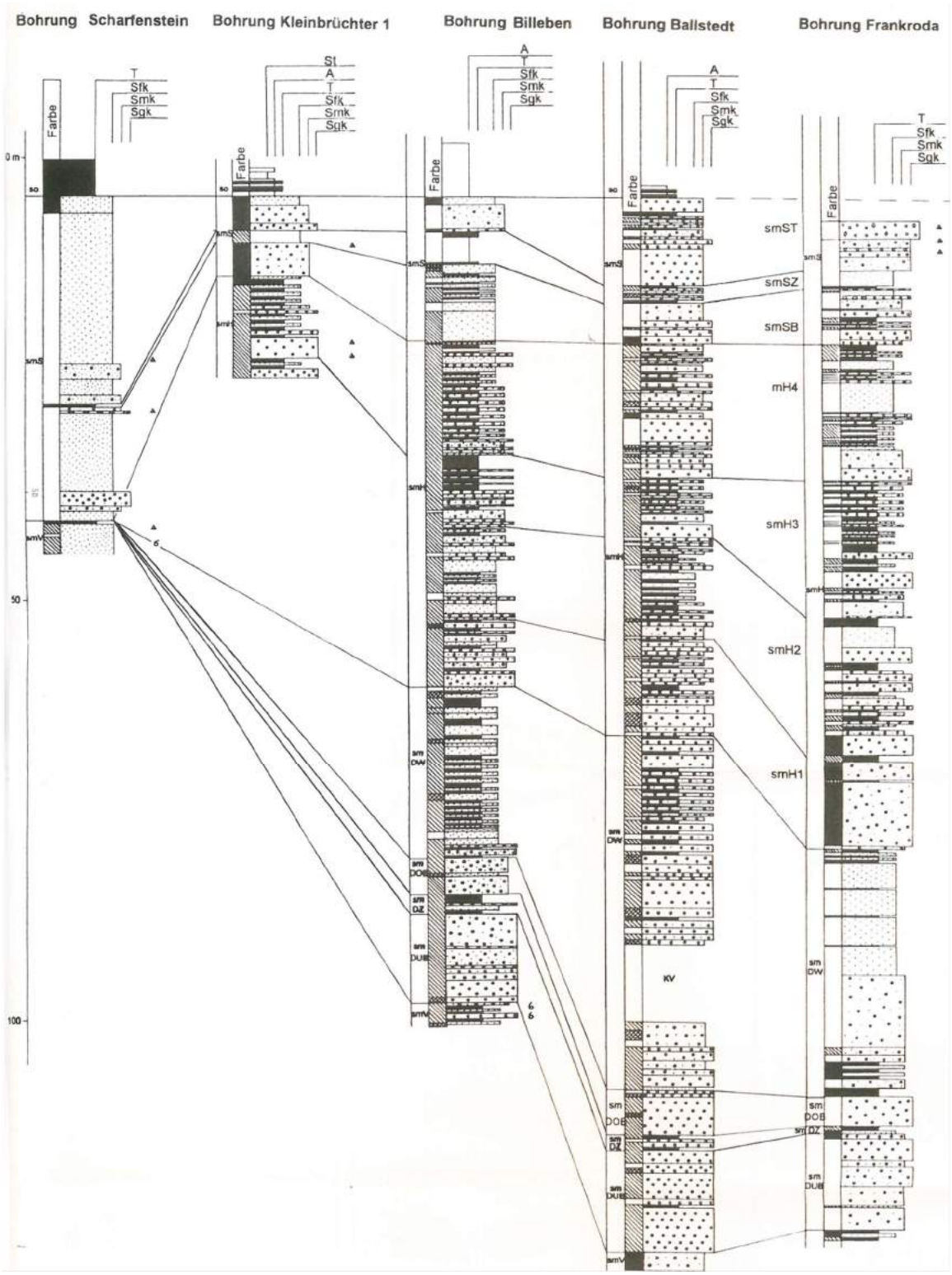


Abbildung 69 Bohrprofile des Mittleren Buntsandsteins von der Eichsfeldschwelle (Bohrung Scharfenberg) bis zur Thüringischen Senke (LANGE 1962)

Nachfolgend soll auf die Ausbildung der oben aufgelisteten Speicherstrukturen näher eingegangen werden.

Die Struktur Allmenhausen liegt nordöstlich des Schlotheimer Grabens. Sie besitzt eine Länge von ca. 2 km. Die Höhe der Struktur beträgt etwa 100 m (nach DREYER 1965). Der Speicherhorizont von Detfurth-, Hardegsen- und Solling-Formation besitzt eine Mächtigkeit von 85 m. Verwerfungen sind nachgewiesen. Nach DREYER (1965) traf man in einigen Bohrungen im Mittleren Buntsandstein **Erdgas** an (SEIDEL, G. 2014).
Die Struktur Straußfurt besitzt eine Länge von 3 km und eine Breite von 2 km. Ihre Höhe beträgt ca. 30 m. Der Speicherhorizont (Detfurth-, Hardegsen- und Solling-Formation) erreicht 113 m.
Die Struktur Griefstedt zeigt eine Länge von 2,7 km und eine Breite von 1,3 km. Die Höhe beträgt 20 m. Der Speicherhorizont besitzt 122 m Mächtigkeit (SEIDEL, G. 2014).
Die Struktur Roldisleben besitzt eine Länge von ca. 15 km und eine Breite von ca. 2 km bis 4 km. Sie erreicht eine Höhe von ca. 100 m. Der Speicherhorizont weist eine Mächtigkeit von 135 m. Nordöstlich der Struktur Roldisleben verläuft die Finnestörung. Nach den Aufschlüssen der ICE-Neubaustrecke traf man die Finnestörung mit mehreren steil nach NNE einfallenden Verwerfungen an (SEIDEL, G. 2014).
Die Struktur Sprötau zeigt eine Länge von 12 km und eine Breite von 5 km. Sie weist eine Höhe von ca. 40 m auf. Vielleicht besteht eine Verbindung zur Ettersberg-Struktur. Der Speicherhorizont besitzt eine Mächtigkeit von 139 m. Eine Verwerfung bei Sömmerda ist nachgewiesen (SEIDEL, G. 2014).
Die Struktur Buttelstedt besitzt eine Länge von ca. 3 km und eine Breite von ca. 2 km. Sie hat eine Höhe von ca. 20 m. Der Speicherhorizont erreicht eine Mächtigkeit von 125 m (SEIDEL, G. 2014).
Die Struktur Ettersberg besitzt eine Länge von etwa 16 km und eine Breite von ca. 5 km. Der Speicherhorizont weist eine Mächtigkeit von ca. 110 m auf (SEIDEL, G. 2014). Die W-E streichende, südvergente Antiklinale schließt nordöstlich der Weimarer Störungszone an (KOBER & VOIGT 2009). Es werden Amplituden von 220 m (SEIDEL, G. 2014) und 300 m (KOBER & VOIGT 2009) angegeben.
Die Forstberg-Struktur besitzt eine Ausdehnung von 3 km bzw. 1,5 km. Ihre Höhe beträgt 49 m. Der Speicherhorizont weist 65 m bis 70 m Mächtigkeit auf (LANGE 1962). Verwerfungen wurden nachgewiesen.
Die Struktur Kirchheilingen liegt südwestlich des Schlotheimer Grabens. Sie hat eine Länge von ca. 9 km und eine Breite von ca. 2,5 km. Die Höhe beträgt ca. 50 m (DREYER 1965). Der Speicherhorizont besitzt 79 m Mächtigkeit. Verwerfungen wurden auch im Speicherhorizont nachgewiesen. Nach DREYER (1965) soll auch in dieser Struktur **Erdgas** im Mittleren Buntsandstein nachgewiesen worden sein.
Die Struktur Langensalza zeigt eine Länge von 12 km und eine Breite von ca. 2 km. In der Höhe erreicht sie ca. 40 m. Der Speicherhorizont ist 75 m bis 90 m mächtig. In der Struktur Langensalza tritt **Erdgas** im Mittleren Buntsandstein auf.
Die Struktur Fahner Höhe besitzt eine nutzbare Länge von ca. 12 km und eine Breite von ca. 3 km. In der Höhe erreicht sie ca. 65 m. Der Speicherhorizont umfasst 92 m Mächtigkeit. Das auftretende Rötsalz dürfte sich bis ca. 3 km östlich von Bienstädt ausdehnen. Von dort bis nach Erfurt, wo die Fahner Struktur endet, sprechen Auslaugungssenken für das Fehlen des Rötsalzes. Im Schaderoder Grund versinkt wahrscheinlich Wasser in den auftretenden Trochitenkalk, das im Geratal in Salzquellen wieder zu Tage tritt. Die im Zechstein durch Geophysik nachgewiesenen Störungen im Westteil der Fahner Höhe, wurden bei feinstratigraphischen Kartierungen im Muschelkalk und Keuper nicht nachgewiesen. Im höheren Teil der Struktur Fahner Höhe tritt **Erdgas** auf.
Die Struktur Alter Berg ist ca. 5 km lang, bei einer Breite von etwa 3 km und einer Mächtigkeit des Speicherhorizontes von ca. 75 m.
Die Struktur Wiegleben befindet sich östlich der Struktur Alter Berg und enthält im Speicherhorizont des Mittleren Buntsandsteins Erdgas. Sie hat eine Ausdehnung von 9 km in der Länge und ca. 1 km in der Breite. Der Speicherhorizont erreicht 80 m Mächtigkeit und es treten Verwerfungen auf.

Die gleichen Ausmaße zeigt auch die Struktur Mechterstädt.
Die kreisförmige Struktur Krahnberg besitzt einen Durchmesser von ca. 4 km. In der Höhe erreicht sie ca. 40 m. Der Speicherhorizont weist 74 m bis 80 m Mächtigkeit auf und Verwerfungen wurden nachgewiesen.

Vergleicht man die Abmessungen der Strukturen sowie das Auftreten von Verwerfungen, so erscheinen folgende Strukturen im Buntsandstein für eine geplante Speichernutzung besonders geeignet: Struktur Roldisleben, Struktur Allmenhausen, Struktur Fahner Höhe (Westteil) und Struktur Langensalza. Die Gasspeicherkapazitäten schwanken für diese Strukturen überschlägig von 1,3 Mrd. m^3N bis 14 Mrd. m^3N (Normkubikmeter).

Es wird angenommen, dass vornehmlich in Speicherstrukturen, die als KW-Lagerstätte identifiziert werden konnten, mit günstigen petrophysikalischen Gesteinseigenschaften zu rechnen ist. Die Abwanderung von CO_2 aus dem Muttergestein in die Fallenstruktur/Lagerstätte während des KW-Reifeprozesses, wie sie von GAUPP, R. & OKKERMAN (2011) anhand der niederländischen Rotliegend Sandsteine beschrieben wurde, wird hierfür als Erklärung herangezogen. Diese Anreicherung von CO_2 im Vorfeld der eigentlichen KW-Migration könnte durch eine Herabsetzung des pH-Wertes Lösungsprozesse und die Bildung einer Sekundärporosität bewirkt haben. Abseits der oben beschriebenen geologischen Strukturen ist die Eignung des Buntsandsteins für Speicherzwecke daher als fraglich einzustufen, was die überwiegend mäßigen hydraulischen Kennwerte der im Rahmen der vorliegenden Studie untersuchten Proben erklären könnte (siehe Kapitel 6.1).

8.1.3 Quartär

Lockergesteinshorizonte mit einer hinreichenden Verbreitung und Mächtigkeit liegen in Thüringen räumlich nur begrenzt vor. Das größte Potential für eine Wärmespeicherung in unkonsolidierten Grundwasserleitern besitzt nach derzeitigem Kenntnisstand der Raum Artern (Goldene Aue, Unstrut-Helme-Aue). Nach PRATSCHKO & TRESCHER (1984) erreichen die hier anstehenden Terrassensedimente verhältnismäßig großflächig bis etwa 100 m Mächtigkeit (Abbildung 70, vgl. Anlage 2.4). Kleinräumigere quartäre Lockergesteinsaquifere von bedeutender Mächtigkeit befinden sich in der Werra-Aue zwischen Bad Salzungen und Schmalkalden. Hier besitzen diese Schichten nach SCHREIBER & HAUTHAL (1984) überwiegend bis 20 m, lokal bis 100 m Mächtigkeit (Abbildung 71, vgl. Anlage 2.5).

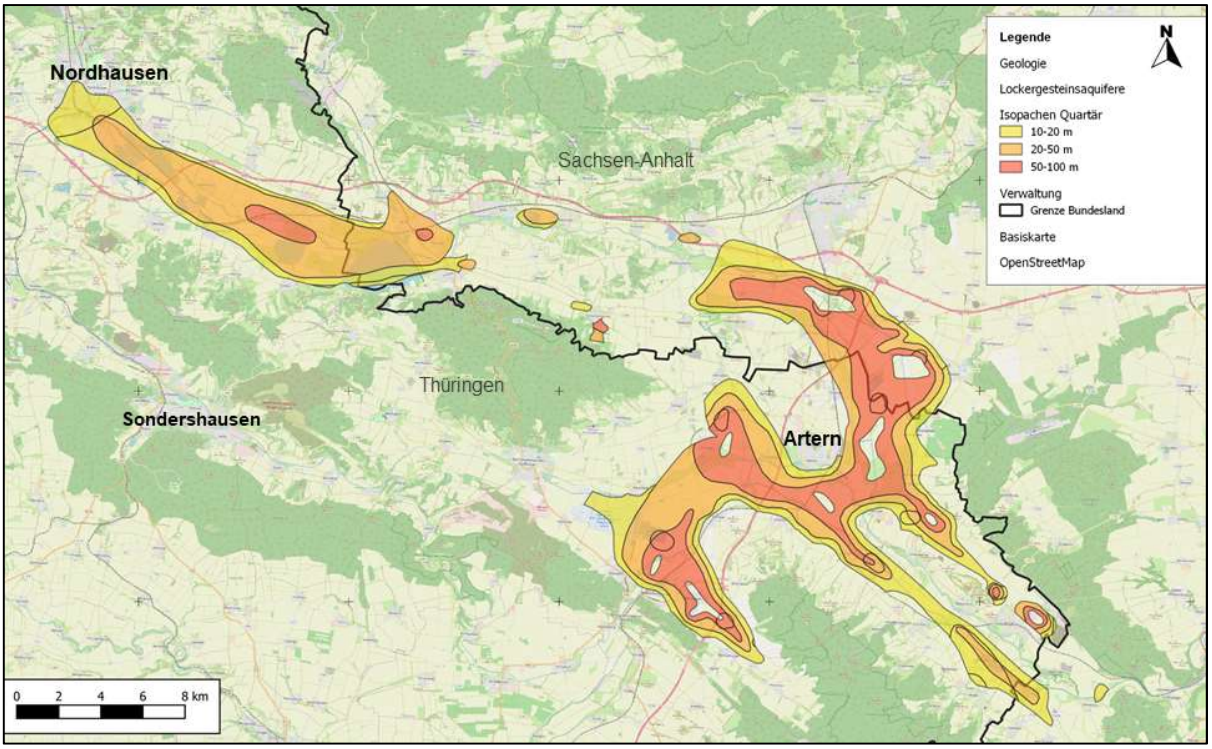


Abbildung 70 Mächtigkeitsverteilung von quartären Grundwasserleitern bei Artern u. Nordhausen

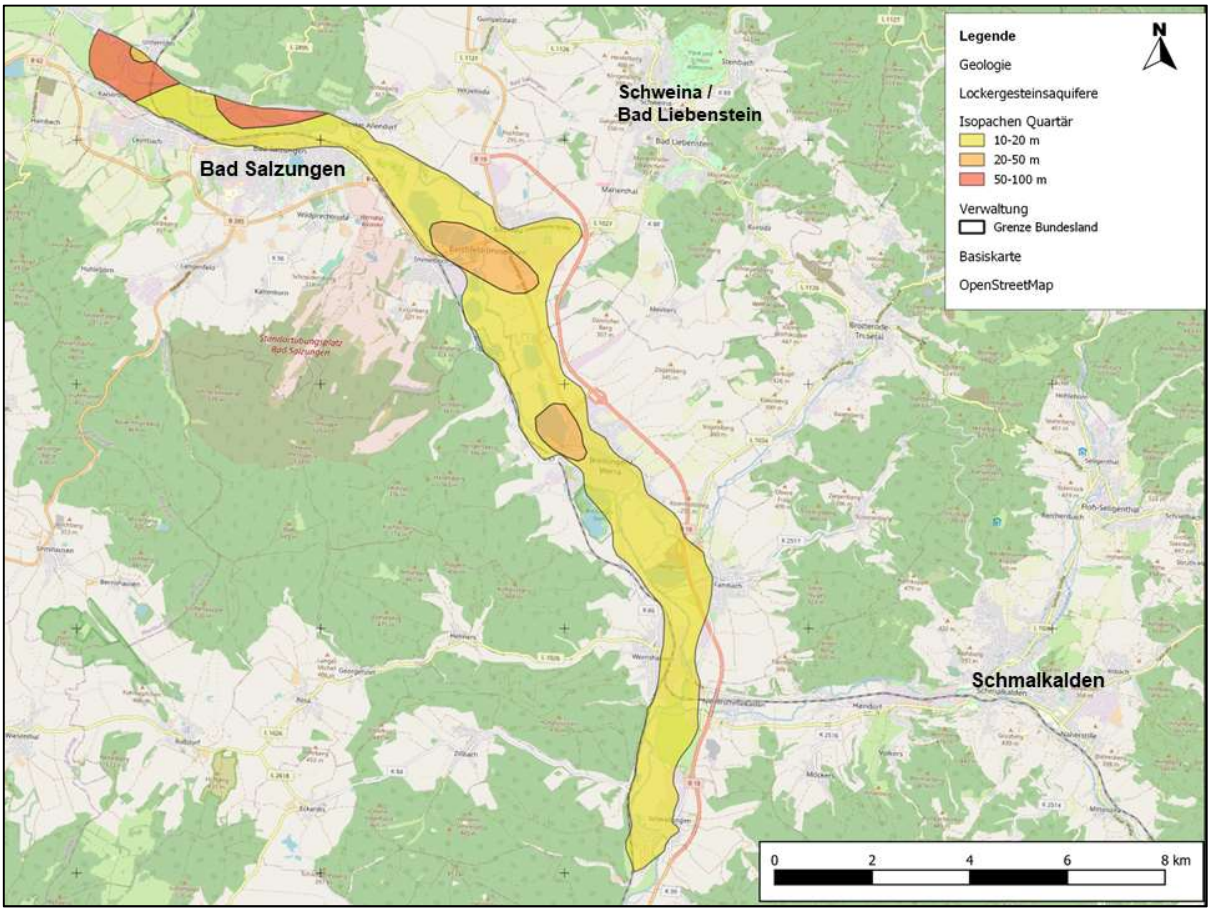


Abbildung 71 Mächtigkeitsverteilung von quartären Grundwasserleitern in der Werra-Aue

8.2 Raumwiderstände ausgewählter Standorte

In Tabelle 20 sind ausgewählte Standorte in Bezug auf deren Raumwiderstände dargestellt und bewertet. Vorhandene Raumwiderstände (rot markiert) stellen jedoch nicht zwangsläufig ein Ausschlusskriterium dar. Häufig, wie bei den Wasserschutzzonen, sind zum Beispiel bei den Bohrarbeiten Auflagen zu beachten. Den stärksten Einfluss der Raumwiderstände üben dabei bestehende Bergbauberechtigungen aus. Der Raumwiderstand des Überschwemmungsschutzgebietes der potentiellen Salzkaverne in Griefstedt kann zudem mit einer geeigneten Wahl des Standortes entgegengewirkt werden.

Tabelle 20 Übersicht zu den vorhandenen Raumwiderständen potentieller Speicherstandorte (HESSE et al. 2014)

Potentielle Speicherstruktur	Wasserschutzzone	Überschwemmungs-schutzgebiet	Nationalpark	Naturschutzgebiet	Landschaftsschutz-gebiet	Naturpark	Vogelschutzgebiet	Bergbau-berechtigungen
Sprötau (ro)	-	+	+	+	+	+	-	+
Fahner (ro) und Fahner Höhe (sm)	+	+	+	o	-	+	-	ENGIE (ehem. GDF SUEZ E&P)
Roldisleben (sm)	+	+	+	+	+	+	+	+
Kirchheilingen	+	+	+	o	+	+	+	+
Kirchheilingen-Süd	-	+	+	+	+	+	+	ENGIE
Allmenhausen	+	+	+	o	+	+	+	+
Langensalza	-	+	+	o	+	+	+	ENGIE
Mühlhausen	-	+	+	-	+	+	+	ENGIE
Behringen	-	+	+	+	+	+	-	ENGIE
Krahnberg	+	+	+	+	+	+	+	ENGIE
Thüringer Pforte	o	+	+	+	+	+	+	+
Griefstedt	+	-	+	+	+	+	+	+

Legende:

+	kein Raumwiderstand
o	angrenzender Raumwiderstand
-	Raumwiderstand partiell oder flächig erwartet

ro: Oberrotliegend, sm: Mittlerer Buntsandstein

8.3 Synopsis von Geologie und Abwärme

Nachfolgend werden die verfügbaren Daten zu Abwärmequellen unter der Berücksichtigung ihrer räumlichen Nähe zu bekannten Speicherstrukturen betrachtet. In Anlage 4 sind hierzu synoptische Kartendarstellungen zu finden.

Die Sandsteine des **Oberrotliegend** sind aufgrund ihrer relativ großen Tiefenlage in bis 1700 m unter GOK sowie zu erwartender hydraulischer Eigenschaften für eine Nutzung als Wärmespeicher nur mäßig geeignet. Der verfügbare Datenumfang zu den petrophysikalischen Eigenschaften ist jedoch als gering einzuschätzen und weist eine breite Streuung auf. So wurden auch teilweise moderate Speichereigenschaften in den Bereichen des *Mühlhäuser Rotliegendbeckens* und des *Saale-Troges* festgestellt. Sowohl im Mühlhäuser Rotliegendbecken als auch im Saale-Trog einschließlich der hier befindlichen Speicherstrukturen in den Rotliegend-Sandsteinen konzentrieren sich eine Reihe von Abwärmequellen. Hervorzuheben sind dabei der Neudietendorfer Sattel, welcher sich in ca. 6 km Entfernung zu den Stadtwerken Arnstadt (Abwärmemenge: ca. 24.000 MWh/a) befindet. Mit der Gotha Druck GmbH (Abwärmemenge: ca. 22.000 MWh/a) befindet sich eine weitere bedeutende Abwärmequelle in unmittelbarer Nähe zu den Rotliegendsandsteinen des Saale-Troges.

Die Datenlage zur untertägigen Verbreitung von Sedimentgesteinen des **Unteren Buntsandsteins**, die sich potentiell für den Betrieb eines Wärmespeichers eignen, beschränkt sich auf den südthüringischen Raum. Die Oberfläche des Unteren Buntsandsteins befindet sich hier in einer Tiefenlage zwischen etwa 300 m bis 1.000 m unter GOK. Mehrere kleinere Betriebe mit Abwärmemengen bis ca. 7.000 MWh/a konnten für das Umfeld der Ballungszentren Meiningen, Schleusingen, Hildburghausen und Grabfeld registriert werden (Anlage 3.2). Weitere Sandsteinvorkommen wurden für das südliche bis südwestliche Vorland des Thüringer Waldes beschrieben (vgl. Kapitel 8.1.2.1). Als nennenswerte Abwärmequelle (Abwärmemenge: 14.255 MWh/a) in unmittelbarer Nähe zum Buntsandstein ist hier das Werk Werra der K+S KALI GmbH am Standort Unterbreizbach hervorzuheben. Des Weiteren ist der Betrieb Werra Papier Wernshausen GmbH bei Schmalkalden mit einer jährlichen Abwärmemenge von annähernd 30.000 MWh von Interesse.

Die Sandsteine des **Mittleren Buntsandsteins** sind weitgehend flächendeckend im Thüringer Becken und im südlichen Vorland des Thüringer Waldes anstehend (Anlage 2.3). Nach gegenwärtiger Datenlage ist vor allem innerhalb bekannter KW-Lagerstätten wie der Strukturen *Fahner Höhe*, *Langensalza*, *Wiegleben*, *Kirchheilingen* oder *Allmenhausen* mit geeigneten Reservoireigenschaften zu rechnen. Für die Sandsteine abseits der genannten Strukturen konnten im Rahmen der aktuellen Studie überwiegend keine geeigneten Gesteinseigenschaften nachgewiesen werden, wobei andere Datenquellen zumindest Teilen des Mittleren Buntsandsteins eine potentielle Eignung zur thermischen Speicherung ausstellen (siehe Kapitel 8.1.2.2). Nutzbare Abwärmequellen konzentrieren sich dabei vor allem innerhalb des Thüringer Beckens, wobei wiederum die o. g. Stadtwerke Arnstadt und die Gotha Druck GmbH als bedeutende industrielle Abwärmequellen dienen können.

Für den Betrieb von Aquiferspeichern in Sedimenten des **Quartärs** stehen in der Region Nordhausen/Artern eine Reihe kleinerer Abwärmequellen zur Verfügung. In der Werra-Aue bietet sich ein vergleichbares Bild, wobei hier insbesondere der o. g. Betrieb Werra Papier Wernshausen GmbH zu nennen ist.

8.4 Entscheidungsmatrix

Die Auswahl eines geeigneten Standortes für die Errichtung eines thermischen Aquiferspeichers stellt eine besondere Herausforderung dar und ist von einer Reihe von Faktoren abhängig, die in den vorangegangenen Kapiteln teilweise bereits Gegenstand dieser Studie waren und in Abbildung 72 schematisch zusammengefasst sind. Hierzu zählen u. a. die verfügbaren Abwärmequellen (Kapitel 2.4), geologische Rahmenbedingungen (Kapitel 4 und 8.1) sowie genehmigungsrechtliche Aspekte (Kapitel 3.2 und 8.2). Die thüringische Arbeitshilfe zur Nutzung oberflächennaher Geothermie (THÜRINGER LANDESVERWALTUNGSAMT, REFERAT 440 WASSERWIRTSCHAFT 2013) umfasst weitere rechtliche und insbesondere wasserrechtliche Anforderungen für die Zulassung einer Bohrung.

Abbildung 72 Entscheidungsbaum zum Standortauswahlverfahren eines Aquiferspeichers

9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Die Kalkulation von Gestehungskosten für ein Aquiferspeicherprojekt erfordert die Berücksichtigung einer Vielzahl von Faktoren, um zuverlässige Aussagen zur Wirtschaftlichkeit eines Projektes treffen zu können. Grundsätzlich werden die Gestehungskosten zur Herstellung und dem Betrieb eines Aquiferspeichers von den **geologischen und geotechnischen Rahmenbedingungen** vorgegeben. Zu diesen zählen u. a. petro-/physikalische Eigenschaften des Speichergesteins und des Grundwassers, die Bohrteufe, die Aquifermächtigkeit, die Produktionsrate oder die thermische Nettoleistung der Anlage.

Weitere wesentliche Eingangsparameter ergeben sich aus den Investitions- und den Betriebskosten. **Investitionskosten** entstehen einerseits durch Erkundung und Erschließung des Untertageteils bzw. des Aquifers. Hierzu zählen die Exploration und bohrtechnische Erschließung eines geeigneten Speicherhorizontes. Zur Feststellung der strukturgeologischen Lagerungsverhältnisse ist der Einsatz von geophysikalischen Messungen (Seismik, Geoelektrik, u. a.) im Vorfeld von Bohrungen möglich. Bei hinreichenden Kenntnissen zur Geologie, z. B. aus der KW-Exploration oder Archivmaterial, kann sich gegebenenfalls auf die Durchführung von Vorbohrungen beschränkt werden. Hydraulische Tests dienen im Allgemeinen zur Untersuchung der Produktivität des potentiellen Speichergesteins. Die Herstellung der übertägigen Anlagenteile für ein ATES-System umfassen im Wesentlichen die Installation einer Thermalwasserpumpe, eines Wärmetauschers, einer Wärmepumpenanlage, eines Blockheizkraftwerkes, einer Elektrischen Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (EMSR-Technik), eines Maschinenhauses, weiterer Anlagentechnik. Für die Nutzung von anthropogen induzierter Abwärme wird im Fall der aktuellen Studie des Weiteren eine Fernwärmeleitung benötigt. Sowohl zu den über- als auch untertägigen Investitionen kommen schließlich Kosten für Planung, Überwachung und fachtechnische Gutachten hinzu.

Zu den **Betriebskosten** zählen in erster Linie energetische Aufwendungen, um den Betrieb der einzelnen Anlagenteile aufrechtzuerhalten. Für deren Kalkulation sind aktuelle Energie-/ Brennstoffpreise in Verbindung mit der Effizienz der Anlagenteile (Brennstoff-/Stromverbrauch, Wirkungsgrad, etc.) und nicht zuletzt die Auslastung des ATES-Systems ausschlaggebend. Hinzu kommen Kosten für die Wartung des Thermalwasserkreislaufes und des Kraftwerkes sowie Versicherungskosten.

Als Einflussfaktoren für die Variabilität der Gestehungskosten wurden die **Bohrteufe, die Grundwassersalinität, die Aquifermächtigkeit und -permeabilität, die Förderrate sowie die Speichertemperatur** als Eingabeparameter eruiert. Typische und auf Thüringen anwendbare Wertebereiche dieser Parameter wurden anhand von Laborergebnissen sowie Literatur- und Erfahrungswerten festgelegt. Mit den Ergebnissen aus der Sensitivitätsanalyse war es möglich, die Einflüsse der wichtigsten Eingangsparameter auf die Ergebnisgrößen zu identifizieren und ein approximiertes Meta- bzw. Ersatzmodell (Zusammenhangsmodell) mit der Software optiSLang aufzubauen.

Neben der Speichereffizienz wurden Wärmemengen und Absenktemperaturen ermittelt, damit diese zu Planungszwecken weiterverwendet werden konnten. Durch das Anschließen des Gestehungskostentools an die oben beschriebenen Ersatzmodelle war es möglich, unter Berücksichtigung kostenrelevanter Einflussfaktoren eine Designvariante zu finden, die allen Anforderungen aus Speicher- und Kosteneffizienz erfüllt.

Für die Wichtung des Einflusses dieser Eigenschaften auf die gewählten Ausgabeparameter (**Gestehungskosten, Speichereffektivität und Gesteinsversagen)** wurde mit Hilfe der Software

optiSLang eine Sensitivitätsanalyse für 100 Designvarianten über einen Simulationszeitraum von 30 Jahren durchgeführt. In Abbildung 73 sind die gewählten Eingabe- und Ausgabeparameter für diese Designs in Form von Graphen gegenübergestellt. Die Gestehungskosten wurden dabei dem Kostentool entnommen. Die Speichereffektivität und das Gesteinsversagen gehen aus der FE-Simulation hervor.

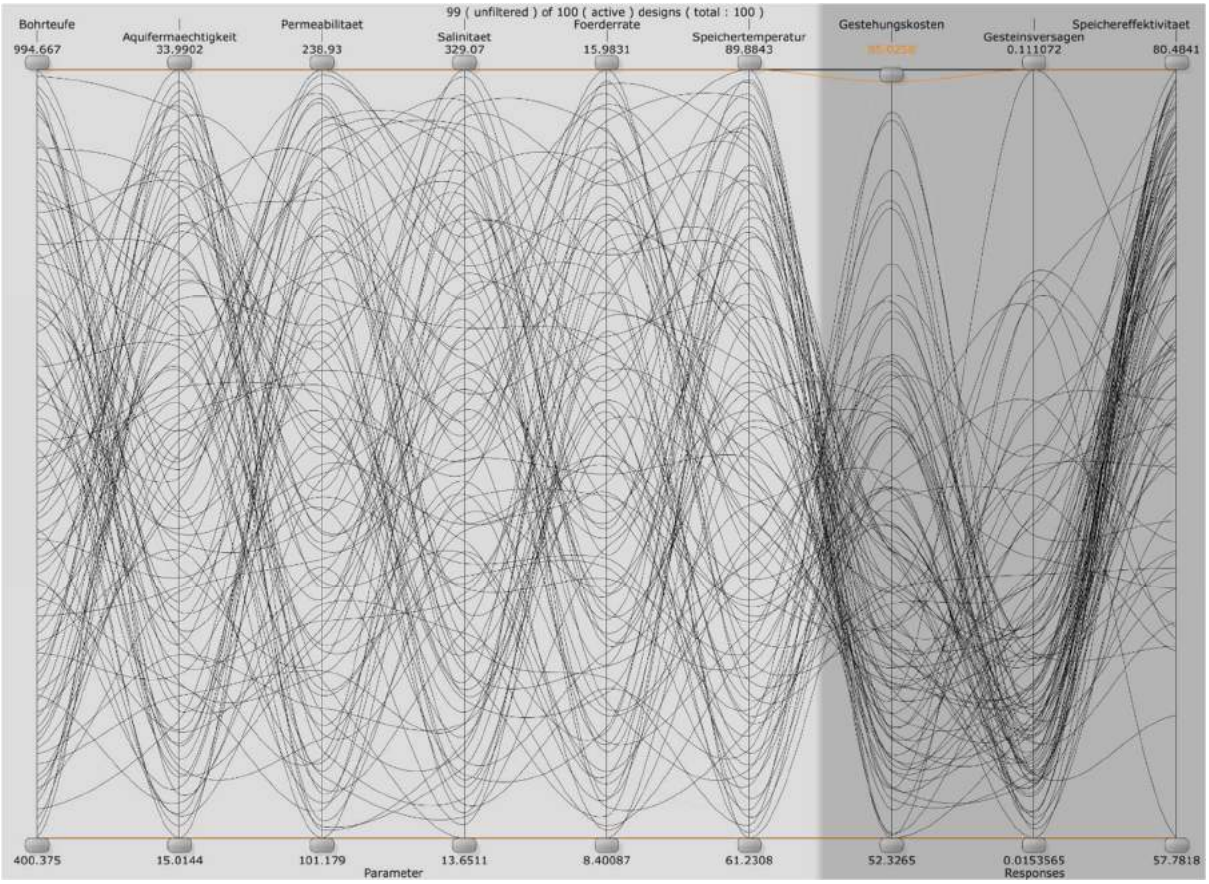


Abbildung 73 Gegenüberstellung der Eingabeparameter (hellgrau) und der Ergebnisgrößen (dunkelgrau) für 100 Designvarianten

Im Ergebnis der Sensitivitätsanalyse wurde festgestellt, dass die Gestehungskosten unter Berücksichtigung der o. g. Eingangsparameter innerhalb des Simulationszeitraums von 30 Jahren im Wesentlichen von der **Speichertemperatur** und der **Förderrate** abhängen. Die Speichereffektivität wird durch höhere **Bohrteufen** (bzw. Aquifertiefen) begünstigt. Das Zusammenspiel dieser drei Parameter beeinflusst demnach entscheidend sowohl die Gestehungskosten als auch die Speichereffektivität. Das Gesteinsversagen und damit ein sicherer Betrieb des Aquifers hängt grundlegend von der Permeabilität des Speichergesteins und der Förderrate ab. Diese Zusammenhänge sind anhand der generierten Antwortflächen in Abbildung 74 veranschaulicht. Hierbei stellt jeder Datenpunkt eine Designvariante dar.

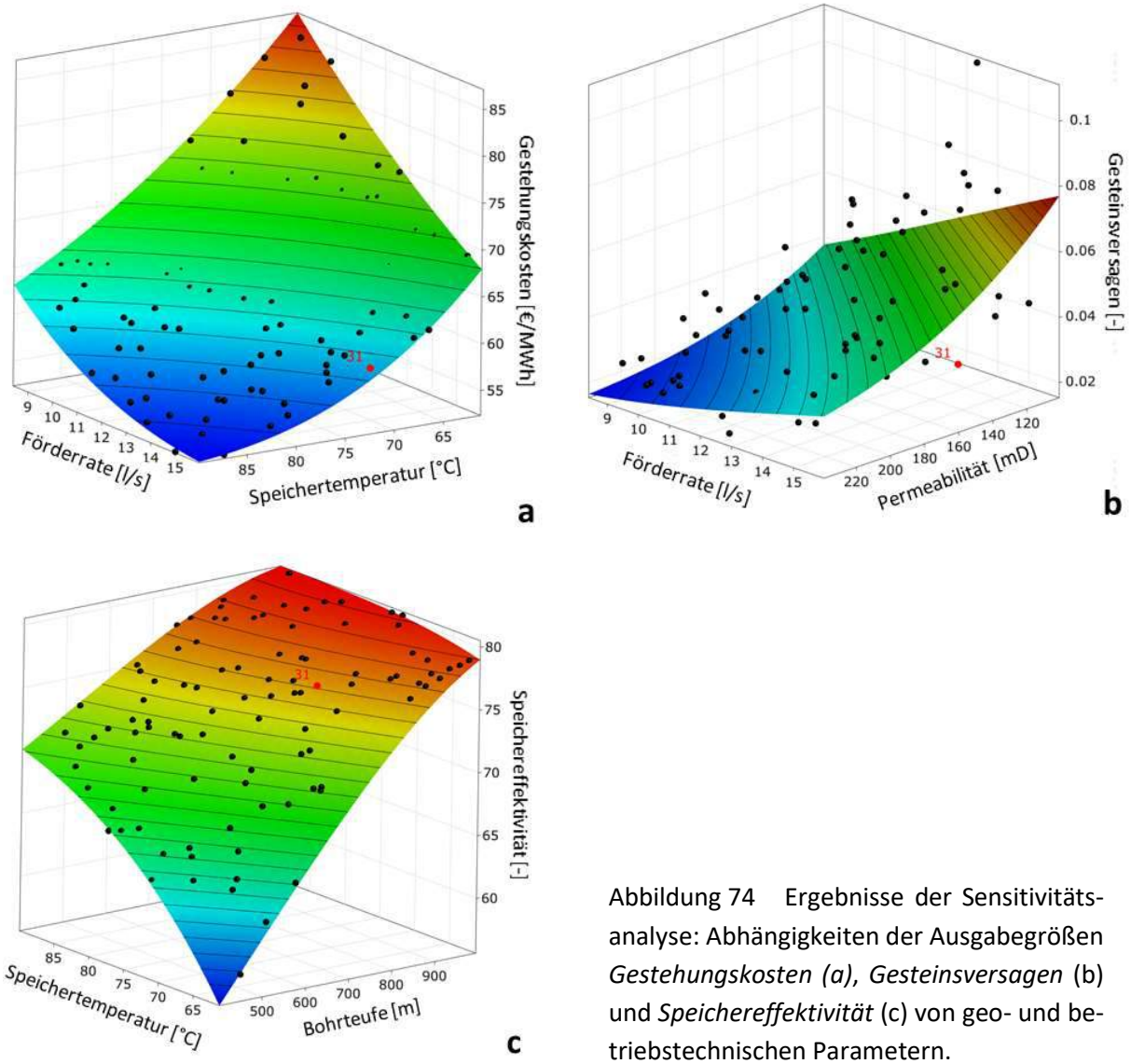


Abbildung 74 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse: Abhängigkeiten der Ausgabegrößen *Gestehungskosten (a)*, *Gesteinsversagen* (b) und *Speichereffektivität* (c) von geo- und betriebstechnischen Parametern.

10 Schlussfolgerungen

Die großmaßstäbliche, industrielle Wärmespeicherung spielt in Thüringen bislang nur eine untergeordnete Rolle. Nach aktuellem Kenntnisstand werden momentan lediglich zwei Speicher (Erfurt, Jena) für (Fern-)Wärmespeicherung betrieben. Da es sich hierbei um Behälterspeicher handelt, wird das thermische Speicherpotential des Untergrundes nicht ausgenutzt. Darüber hinaus existieren gegenwärtig deutschlandweit nur sehr wenige und in Thüringen keine Projekte, die die thermische Aquiferspeicherung zum Ziel haben.

Für die Planung eines Aquiferspeichers sind ausschließende ('nicht möglich') und restriktive ('nur mit Einzelfallprüfung möglich') Raumwiderstände zu berücksichtigen, die im Wesentlichen den Wasser-, Natur- und Landschaftsschutz umfassen. Darüber hinaus sind Vorgaben aus den Bereichen Bergrecht und Bauplanung zu berücksichtigen und im Vorfeld eines geplanten Speichervorhabens zu prüfen.

Sowohl im Mühlhäuser Rotliegendbecken als auch im Saale-Trog, einschließlich der hier befindlichen Speicherstrukturen in den **Rotliegend**-Sandsteinen, konzentrieren sich eine Reihe von Abwärmequellen. Hervorzuheben sind dabei der *Neudietendorfer Sattel*, welcher sich in ca. 6 km Entfernung zu den Stadtwerken Arnstadt befindet. Mit der Gotha Druck GmbH befindet sich eine weitere bedeutende Abwärmequelle in unmittelbarer Nähe zu den Rotliegendsandsteinen des *Saale-Troges*. Als limitierende Faktoren für eine Wärmespeicherung in den Sandsteinen des Rotliegenden werden die relativ großen Tiefenlage in bis 1700 m unter GOK sowie zu erwartende, mäßige hydraulische Eigenschaften eingeschätzt.
Der Vergleich der durchgeführten Laboruntersuchungen am Bohrkernmaterial mit Literaturangaben lässt darauf schließen, dass im Mittleren **Buntsandstein** zur Wärmespeicherung geeignete Sandsteine voraussichtlich in den Bereichen bekannter KW-Lagerstätten zu finden sind. Vergleicht man für die Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins die Abmessungen der Strukturen sowie das Auftreten von Verwerfungen sowie natürlich angereicherten Kohlenwasserstoffen, so erscheinen die Speicherstrukturen bei *Roldisleben*, *Allmenhausen*, *Wiegleben*, *Kirchheilingen*, *Fahner Höhe* (Westteil) und *Langensalza* zunächst als besonders geeignet. Darüber hinaus ist es jedoch möglich, dass zumindest regional relativ gute Speichereigenschaften für eine Nutzung des Buntsandsteins zur Wärmespeicherung vorliegen könnten. Potentiell nutzbare Sandsteine des Unteren Buntsandsteins befinden sich nach derzeitigem Kenntnisstand im südthüringischen Raum.
Aufgrund der mangelnden bzw. eingeschränkten Verfügbarkeit von petrophysikalischen Daten und geeignetem Bohrkernmaterial besteht für eine umfassende Einschätzung des Wärmespeicherpotentials in Thüringen weiterer Forschungsbedarf für die Sandsteine des Rotliegenden und des Buntsandsteins. Insbesondere lithofazielle und petrophysikalische Untersuchungen können hier einen Beitrag zum besseren Verständnis dieser fluviatil abgelagerten Sedimente liefern.

Quartäre Lockergesteinsschichten eignen sich grundsätzlich für eine Nutzung als Wärmespeicher. Vorkommen mit geeigneten sedimentologischen bzw. hydraulischen/petrophysikalischen Eigenschaften und hinreichenden Mächtigkeiten bis etwa 100 m wurden jedoch nur regional für die Goldene Aue, die Unstrut-Helme-Aue und die Werra-Aue identifiziert.

Grundsätzlich werden die **Gestehungskosten** zur Herstellung und dem Betrieb eines Aquiferspeichers von den geologischen und geotechnischen Rahmenbedingungen vorgegeben. Zu diesen zählen u. a. die Bohrstrecke, die Produktionsrate, die Aquifermächtigkeit oder die Speichertemperatur. Weitere wesentliche Eingangsparameter ergeben sich aus den Investitions- und den Betriebskosten.

Im Rahmen der aktuellen Studie wurden anhand einer Sensitivitätsanalyse verschiedene Designvarianten einer Aquiferspeicheranlage für einen Simulationszeitraum von 30 Jahren untersucht, um die Haupteinflussfaktoren auf die Speicher- und Kosteneffizienz zum Betrieb des Speichers zu bestimmen. Es wurde festgestellt, dass die Gestehungskosten entscheidend von der Speichertemperatur bzw. den Temperaturen des ein- und ausgespeisten Fluids und der Förderrate abhängen. Die Speichereffektivität wird durch höhere Bohrteufen bzw. Aquifertiefen begünstigt. Das Zusammenspiel dieser drei Parameter beeinflusst demzufolge sowohl die Gestehungskosten als auch die Speichereffektivität enorm. Das Gesteinsversagen (Rissbildung) und damit ein sicherer Betrieb des Aquifers hängt grundlegend von der Permeabilität des Speichergesteins und der Förderrate ab. Die Optimierung dieser Variablen kann entscheidend zu einer erfolgreichen Umsetzung eines Aquiferspeicherprojektes beitragen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie ermöglichen eine standortspezifische Bewertung der Umsetzbarkeit eines Aquiferspeicherprojektes für den Thüringischen Raum. Für den Erfolg eines Aquiferspeicherprojektes sind die Speichertemperatur, die Förderrate, die Bohrteufe (Aquifertiefe) und die Gesteinspermeabilität maßgeblich entscheidend. Für eine thermische Speicherung geeignete Gesteine sind nach derzeitigem Kenntnisstand in bekannten KW-Speicherstrukturen der Sandsteine des Rotliegenden und des Mittleren Buntsandsteins zu verorten. Defizite in Umfang und Verfügbarkeit von petrophysikalischen Eigenschaften sowie der lithofaziellen Ausprägung / Verbreitung potentieller Speichergesteine (abseits KW-Lagerstätten, Oberrotliegend, Mittlerer und Unterer Buntsandstein) sowie im bestehenden Wärmespeicher-Anlagenbestand offenbaren weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

11 Literaturverzeichnis

ANDERSSON, O. (2009): The ATES project Stockholm Arlanda Airport - Tectinical design and environmental assessment. In: GEHLIN, S., IEA PROGRAMME FOR ENERGY CONSERVATION THROUGH ENERGY STORAGE & SWEDVAC. (Hrsg.). Effstock Proceedings, 207–215.

ANDERSSON, O., J. EKKESTUBBE & A. EKDAHL (2013): UTES (Underground Thermal Energy Storage) - Applications and Market Development in Sweden. – J Energy and Power Eng, 7, 669–678.

ANDERSSON, O., G. HELLSTRÖM & B. NORDELL (2003): Heating and Cooling with UTES in Sweden - Current Situation and Potential Market Development. In: DOMAŃSKI, R., M. JAWORSKI & M. REBOW (Hrsg.). Futurestock 2003: proceedings of the 9th International Conference on Thermal Energy Storage.

ANSYS INC. (2018): Ansys Mechanical APDL 19.2 - Theory Reference (Stand: 2018).

ANSYS INC. (2022a): Mechancial APDL 2022 R1 - Theory Reference (Stand: 2022).

ANSYS INC. (2022b): Mechanical APDL 2022 R1 - Material Reference (Stand: 2022).

ANSYS INC. (2022c): Mechanical APDL 2022 R1 - Technology Showcase: Example Problems (Stand: 2022).

BAEHR, H. D. & S. KABELAC (2016): Thermodynamik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg.

BAKEMA, G., A. SNIJDERS & B. NORDELL (1995): Underground Thermal Energy Storage: State of the art 1994. Arnheim, The Netherlands.

BAUER, M., W. FREEDEN, H. JACOBI & T. NEU (Hrsg.) (2014): Handbuch Tiefe Geothermie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg.

Bericht zur Lage der Natur in Thüringen (2019) (Stand: 2019).

BEYER, D., C. KUNKEL, M. AEHNELT, D. PUDLO, T. VOIGT, G. NOVER & R. GAUPP (2014a): Influence of depositional environment and diagenesis on petrophysical properties of clastic sediments (Buntsandstein of the Thuringian Syncline, Central Germany). – Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 165, 345–365.

BEYER, D., C. KUNKEL, M. AEHNELT, D. PUDLO, T. VOIGT, G. NOVER & R. GAUPP (2014b): Influence of depositional environment and diagenesis on petrophysical properties of clastic sediments (Buntsandstein of the Thuringian Syncline, Central Germany). – Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 2014, 163, 345–365.

BINE INFORMATIONSDIENST (2013): Aquiferspeicher für das Reichstagsgebäude, BINE Projektinfo 13/03. Karlsruhe, Bonn (2013).

BIOT, M. A. (1941): General Theory of Three-Dimensional Consolidation. – Journal of Applied Physics 12, 2, 155–164.

BROOKS, A. N. (1981): A Petrov-Galerkin Finite Element Formulation for Convection Dominated Flows. Pasadena, California.

BROOKS, A. N; T. J. R. HUGHES (1982): Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations. – Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 32, 1, 199–259.

BROSIN, P. (2013): Die Erdölgewinnung in Thüringen - Von Anfang des 20. Jahrhunderts bis in die 1970er Jahre. – Sonderheft der Beiträge zur Geologie von Thüringen.

BUNDESVERBAND GEOTHERMIE E.V. (2021): Der Bundesrat empfiehlt eine Änderung des Bundesberggesetzes zugunsten der Nutzung von Geothermie, <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>.

CABEZA, L. F. (Hrsg.) (2015): Advances in thermal energy storage systems: Methods and applications. Woodhead publishing series in energy 66. Amsterdam: Elsevier/Woodhead Publ.

CERMAK, V; L. RYBACH (1982): Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of mmerals and rocks. In: ANGENHEISTER, G., K.-H. HELLWEGE, V. CERMAK & H. LANDOLT (Hrsg.). Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik: Neue Serie: = Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology: New Series. Berlin: Springer Verlag, 305–343.

CHRISTIDIS, A., E. MOLLENHAUER, G. TSATSARONIS, G. K. SCHUCHARDT, S. HOLLER, D. BÖTTGER & T. BRUCKNER (2017): EnEff-Wärme: Der Einsatz von Wärmespeichern und Power-to-Heat-Anlagen in der Fernwärmeversorgung. Berlin.

DAHASH, A., F. OCHS, M. B. JANETTI & W. STREICHER (2019): Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems. – Applied Energy 239, 296–315.

DESMEDT, J., H. HOES & N. ROBEYN (2007): Experiences on sustainable heating and cooling with an aquifer thermal energy storage system at a Belgian hospital. In: FINVAC RY. (Hrsg.). Clima 2007 WellBeing Indoors.

DHI (2022): FEFLOW, <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow> (Zugriff: 2022-02-22).

DIERSCH, H.-J. G. (2014): FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin / Heidelberg.

DOORNENBAL, H. & A. STEVENSON (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. Houten: EAGE.

DREYER, D. (1965): Über die Geologie der Struktur Kirchheilingen-Allmenhausen. – Zeitschrift für angewandte Geologie, 11, 423–430.

DRIJVER, B; B. GODSCHALK (2018): Important Criteria for ATES Legislations. In: 14th International Conference on Energy Storage.

DRIJVER, B., M. VAN AARSEN & B. de ZWART (2012): High-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) - sustainable and multi-usable. In: Proceedings of the 12th international conference on energy storage.

DYNARDO GMBH (2019): multiPlas ANSYS - elastoplastic material models for ANSYS, Version 5.6.0. (Stand: 2019).

DYNARDO GMBH (2021): Ansys optiSLang 2021 R1 (Stand: 2021).

FLEUCHAUS, P. (2020): Global application, performance and risk analysis of Aquifer Termal Energy Storage (ATES). Karlsruhe.

FLEUCHAUS, P., B. GODSCHALK, I. STOBER & P. BLUM (2018): Worldwide application of aquifer thermal energy storage-A review. – Renewable and Sustainable Energy Reviews 94, 861–876.

FLEUCHAUS, P., S. SCHÜPPLER, R. STEMMLE, K. MENBERG & P. BLUM (2021): Aquiferspeicher in Deutschland. – Grundwasser - Zeitplan der Fachsektion Hydrogeologie 2021, 26, 123–134.

FRANZ, C; M. SCHULZE (2016): Bestimmung thermischer Eigenschaften der Gesteine des Unteren und Mittleren Buntsandsteins. – Grundwasser 21, 1, 47–58.

FUCHS, S; A. FÖRSTER (2010): Rock thermal conductivity of Mesozoic geothermal aquifers in the Northeast German Basin. – Geochemistry 70, 13–22.

GAO, Q., M. LI, M. YU, J. SPITLER & Y. Y. YAN (2009): Review of development from GSHP to UTES in China and other countries. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 1383–1394.

GAUPP, R; J. A. OKKERMAN (2011): Diagenesis and Reservoir Quality of Rotliegend Sandstones in the Northern Netherlands - A review. In: GRÖTSCH, J. & R. GAUPP (Hrsg.). The Permian Rotliegend of The Netherlands 98 98. SEPM Society for Sedimentary Geology, 193–226.

GEHLIN, S., IEA PROGRAMME FOR ENERGY CONSERVATION THROUGH ENERGY STORAGE & SWEDVAC. (Hrsg.) (2009): International Conference on Thermal Energy Storage 19. Energi- och Miljötekniska Föreningen / EMTF Förlag.

Geothermie-Atlas der Deutschen Demokratischen Republik (1984). Berlin, Ost.

Geothermisches Potential tiefliegender Aquifere: Potentialkarten und erläuternde Texte für Hydrothermale Systeme in Thüringen (2020), <http://www.tlug-jena.de/geothermie/docs/aquifere.pdf> (Stand: 2020).

GODSCHALK, M. S; G. BAKEMA (2009): 20,000 ATES systems in the Netherlands in 2020-Major step towards a sustainable energy supply. In: GEHLIN, S., IEA PROGRAMME FOR ENERGY CONSERVATION THROUGH ENERGY STORAGE & SWEDVAC. (Hrsg.). Effstock Proceedings.

GÖRKE, U.-J., T. VIENKEN, O. KOLDITZ, P. DIETRICH & S. BAUER (Hrsg.) (2017): Auswirkungen der Nutzung des geologischen Untergrundes als thermischer, elektrischer oder stofficher Speicher – Dimensionierung, Risikoanalysen und Auswirkungsprognosen.

GRESHO, P. M; R. L. LEE (1981): Don't suppress the wiggles - They're telling you something! – Computers & Fluids 9, 2, 223–253.

GRIEBLER, C., C. KELLERMANN, D. KUNTZ, S. WALKER-HERTKORN, C. STUMPP & F. HEGLER (2014): Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften: Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung (Stand: 2014).

HAEHNLEIN, S., P. BAYER & P. BLUM (2010): International legal status of the use of shallow geothermal energy. – Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 9, 2611–2625.

HAENEL, R. (1971): Heat flow measurements and a first heat flow map of Germany. – Z. Geophys 37, 975–992.

HAHN, F., G. BUSSMANN, F. JAGERT, R. IGNACY, R. BRACKE & T. SEIDEL (2018): Reutilization of mine water as heat storage medium in abandoned mines. In: WOLKERSDORFER, C., L. SARTZ, A. WEBER, J. BURGESS & G. TREMBLAY (Hrsg.). Proceedings of International Mine Water Association 2018, 1057–1062.

HANNOSCHÖCK, N. (2018): Wärmeleitung und -transport: Grundlagen der Wärmeübertragung. Berlin: Springer Verlag.

HESSE, G., J. HORLBECK, S. RICHARDS, A. SCHAUBS, M. SEHER, C. KLEINICKEL, H.-J. KRETZSCHMAR & S. SCHMITZ (2014): Potenzialstudie Untergrundspeicher in Thüringen: Systemkomponenten zur Verbesserung der Grundlastfähigkeit Erneuerbarer Energien (Stand: 2014).

HOLSTENKAMP, L., M. MEISEL, P. NEIDIG, O. OPEL, J. STEFFAHN, N. STRODEL, J. LAUER, M. VOGEL, H. DEGENHART, D. MICHALZIK, T. SCHOMERUS, J. SCHÖNEBECK & T. NÖVIG (2017): Interdisciplinary Review of Medium-deep Aquifer Thermal Energy Storage in North Germany. – Energy Procedia, 135, 327–336.

HOPPE, W. & G. SEIDEL (Hrsg.) (1974[1]): Geologie von Thüringen. Leipzig: VEB Herrmann Haack, Geographisch-Kartographische Anstalt Gotha/Leipzig.

HUCKRIEDE, H; I. ZANDER (2011): Geologische Charakterisierung der Speicher- und Barrieregesteine im tiefen Untergrund des Freistaates Thüringen (Deutschland). In: MÜLLER, C. & K. REINHOLD (Hrsg.). Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland - Speicher-Kataster-Deutschland. Schriftenreihe der Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften 74. Hannover: Schweizerbart, 188–204.

HURTER, S. & R. HAENEL (Hrsg.) (2002): Atlas of geothermal resources in Europe. EUR 17811. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

HURTIG, E., V. CERMAK, R. HAENEL & V. ZUI (1992[1]): Geothermal atlas of Europe. Publication / Geoforschungszentrum Potsdam 1. Gotha: Haack.

JAGERT, F., R. IGNACY, G. BUSSMANN & R. BRACKE (2018): Mine water of abandoned coal mines for geothermal heat storage: Hydrogeochemical modeling and predictions. In: WOLKERSDORFER, C., L. SARTZ, A. WEBER, J. BURGESS & G. TREMBLAY (Hrsg.). Proceedings of International Mine Water Association 2018.

KAPPELMEYER, O; R. HAENEL (1974): Geothermics with special reference to application. – Berlin Gebrueder Borntraeger Geoexploration Monographs Series 4.

KÄSTNER, H. (1994): Zur Kenntnis der Kohlendioxidlagerstätten in der Vorderrhön. – Geowissenschaftliche Mitteilungen 2 (1994), 73–96.

KOBER, M; T. VOIGT (2009): Untegrundmodell der Thüringer Mulde. – Beitr. Geol. Thüringen, NF, 16, 51–83.

KUNKEL, C. (2016): Facies and Aquifer Characterization of the German Triassic Buntsandstein in Central Germany. Jena.

KUZMIN, D. (2010): A Guide to Numerical Methods for Transport Equations, <http://www.mathematik.tu-dortmund.de/~kuzmin/Transport.pdf> (Zugriff: 2022-03-18).

LANG, S. (2001): Zur Sedimentologie der Solling-Formation (Trias, Buntsandstein) im Thüringer Becken. Jena.

LANGE, W. (1962): Zur Kenntnis der Stratigraphie des Mittleren Buntsandsteins in Westthüringen. – Zeitschrift für angewandte Geologie, 8, 531–537.

LOUIS, S. (2020): 2015/2016 Poro-Perm und Wärmekennwerte GAIA - Abschlussbericht (Stand: 2020).

MERXHANI, A. (2016): An introduction to linear poroelasticity: arXiv:1607.04274 (physics).

MÜLLER, C. (2009): Charakterisierung des hydromechanischen Verhaltens der Gesteine des Mittleren Buntsandsteins im Hinblick auf eine geothermische Nutzung: Strukturgeologische Geländeaufnahmen, gesteinsmechanische Untersuchungen und numerische Modellierungen. Göttingen.

NORDEN, B; A. FÖRSTER (2006): Thermal conductivity and radiogenic heat production of sedimentary and magmatic rocks in the Northeast German Basin. – AAPG Bulletin 90, 6, 939–962.

NUSSBICKER, J., W. HEIDEMANN & MUELLER (2006): Monitoring results an operational results experiences for a central solar district heating system with borehole thermal energy storage in Neckarsulm (Germany). In: RICHARD STOCKTON COLLEGE OF NEW JERSEY (Hrsg.). Proceedings of the 10th International Conference on the Thermal Energy Storage.

Nutzung oberflächennaher Geothermie: Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung (2013) (Stand: 2013).

OPEL, O., N. STRODEL, K. F. WERNER, A. GEFFKEN & W. RUCK (2017): Climate-neutral and sustainable campus Leuphana University of Lueneburg. – Energy, 141, 2628–2639, <https://www.leuphana.de/fileadmin/user_upload/forschung/nachhaltigkeitsforschung/Opel_et._al._2017_Climate-neutral_and_sustainable_campus_Leuphana_mst_20180907.pdf>.

PAKSOY, H., A. SNIJDERS & L. STILES (2009): Aquifer thermal energy storage at Richard Stockton College. In: GEHLIN, S., IEA PROGRAMME FOR ENERGY CONSERVATION THROUGH ENERGY STORAGE & SWEDVAC. (Hrsg.). Effstock Proceedings.

PEHNT, M. (2010): Energieeffizienz. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg.

POPOV, Y. A. (1997): Optical scanning technology for nondestructive contactless measurements of thermal conductivity and diffusivity of solid matters. In: EDIZIONI ETS (Hrsg.). Proceedings of the 4th world Conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics, 109–116.

POPOV, Y. A., D. PRIBNOW, J. H. SASS, C. F. WILLIAMS & H. BURCKHARDT (1999): Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. – Geothermics, 28(2), 253–276.

PRATSCHKO, S; G. TRESCHER (1984[1]): Hydrogeologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik: Karte der hydrogeologischen Kennwerte. Halle (Saale): Zentrales Geologisches Institut.

PUFF, P; K.-H. RADZINSKI (1976): Zur Paläogeographie und lagerstättenkundlichen Bedeutung des tieferen und mittleren Buntsandsteins im südlichen und mittleren Teil der DDR. – Zeitschrift für geologische Wissenschaften, 4, 1483–1503.

RABENSTEIN, D. (2018): Saisonale Wärmespeicher in Niedertemperatur-Sekundärnetzen in Hamburg: Nutzung eines Aquiferspeichers in einem Sekundärnetz, <https://www.hamburg.de/contentblob/11198822/1f38184f510de02113811e8f706c8a7d/data/

d-8-top-5-c-antrag-zu-wa%CC%88rmespeichern-und-sekunda%CC%88rnetzen-in-hamburg.pdf> (Stand: 2018).

RADMANN, K.-J. & C. HANSEN (2019): Erneuerbare Wärme in Hamburg - Installation eines Aquifer-Wärmespeichers, <https://www.energietage.de/fileadmin/user_upload/2019/Vortraege/4.07_Radmann_Erneuerbare_Waerme_Hamburg.pdf> (Stand: 2019).

RADZINSKI, K.-H; G. SEIDEL (1997): Regionaler Vergleich der Profile des Unteren und Mittleren Buntsandsteins zwischen dem Thüringer Becken und dem nordöstlichen Harzvorland. – Geowissenschaftliche Mitteilungen, 5, 117–132.

RANJAN, A. (2015): Determination of Production Characteristics and Determination of Production Characteristics and Temperature Distribution of a Hot Dry Rock Geothermal Reservoir.

RASEMANN, W. (1972): Optimale Pronahme in Bohrungen auf der Basis des Grenzwertes für abhängige Zufallsgrößen. – Zeitschrift für angewandte Geologie, 18, 570–574.

ROCKEL, W; H. SCHNEIDER (1992): Die Möglichkeiten der Nutzung thermischer Energie in Nordostdeutschland und der Bearbeitungsstand geplanter Vorhaben. In: SCHULZ, R., R. WERNER, J. RUHKAND, W. BUSSMANN & C. J. WINTER (Hrsg.). Geothermische Energie – Forschung und Anwendung in Deutschland. Karlsruhe, 87–98.

ROTHE, P. (2005): Die Geologie Deutschlands: 48 Landschaften im Portrait. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

SCHMIDT, M; D. MANGOLD (2009): Status of solar thermal energy seasonal storage in Germany. In: GEHLIN, S., IEA PROGRAMME FOR ENERGY CONSERVATION THROUGH ENERGY STORAGE & SWEDVAC. (Hrsg.). International Conference on Thermal Energy Storage 19. Energi- och Miljötekniska Föreningen / EMTF Förlag.

SCHMIDT, T., D. MANGOLD & H. MÜLLER-STEINHAGEN Seasonal thermal energy storage in Germany. In: 2003.

SCHMIDT, T., T. PAUSCHINGER, P. A. SØRENSEN, A. SNIJDERS, R. DJEBBAR, R. BOULTER & J. THORNTON (2018): Design aspects for large-scale pit and aquifer thermal energy storage for district heating and cooling. – Energy Procedia, 149, 585–594.

SCHÖN, J. (2011): Physical properties of rocks: A workbook. Handbook of petroleum exploration and production 8. Oxford: Elsevier.

SCHREIBER, D; U. HAUTHAL (1984[1]): Hydrogeologische Karte der Deutschen Demokartischen Republik: Karte der hydrogeologischen Kennwerte. Halle (Saale): Zentrales Geologisches Institut.

SCHÜPPLER, S., P. FLEUCHAUS & P. BLUM (2019): Techno-economic and environmental analysis of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) in Germany. – Geothermal Energy 7, 1, <https://geothermal-energy-journal.springeropen.com/articles/10.1186/s40517-019-0127-6> (Zugriff: 2021-04-19).

SEIBT, P; F. KABUS (2006): Aquifer Thermal Energy Storage - Projects Implemented in Germany. In: RICHARD STOCKTON COLLEGE OF NEW JERSEY (Hrsg.). Proceedings of the 10th International Conference on the Thermal Energy Storage.

SEIDEL, G. (1995[1]): Geologie von Thüringen: Mit 36 Tabellen. Stuttgart: Schweizerbart.

SEIDEL, G. (2004): Zur Lage und Entwicklung der Zechsteinbasis in Thüringen. – Geowissenschaftliche Mitteilungen 11 (2004), 63–69.

SEIDEL, G. (2012): Zum Verlauf der Eichsfeld- und Spessart-Schwelle in Thüringen. – Beiträge zur Geologie von Thüringen, 19, 77–96.

SEIDEL, G. (2014): Buntsandstein-Speicherstrukturen. In: Potenzialstudie Untergrundspeicher in Thüringen: Systemkomponenten zur Verbesserung der Grundlastfähigkeit Erneuerbarer Energien, 48–54.

SILVERMAN, J. (Hrsg.) (1980): Energy Storage: A Vital Element in Mankind's Quest for Survival and Progress.

SNIJDERS, A. (2000): Lessons from 100 ATES projects - The development of aquifer storage in the Netherlands. In: BENNER, M. (Hrsg.). Proceedings: TERRASTOCK 2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage University of Stuttgart, Germany, August 28th until September 1st, 2000. Stuttgart, 147–152.

SOMMER, W. T. (2015): Modelling and monitoring of Aquifer Thermal Energy Storage: impacts of soil heterogeneity, thermal interference and bioremediation. Wageningen.

STEFFAHN, J., M. MEISEL, D. MICHALZIK, L. HOLSTENKAMP, O. OPEL, N. STRODEL, P. NEIDIG & ET AL. (2019): Entwicklung der Einsatzfelder für mitteltiefe Aquifer-Wärmespeicher in Norddeutschland unter wirtschaftlichen, geologisch-technischen, umweltchemischen und rechtlich/ förderpolitischen Aspekten. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Aquiferspeicher (Stand: 2019).

STOBER, I. & K. BUCHER (2020[3]): Geothermie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

STOBER, I., T. FRITZER, K. OBST & R. SCHULZ (2009): Nutzungsmöglichkeiten der tiefen Geothermie in Deutschland (Stand: 2009).

STOLZE, C., L. GOLLMER, M. D. HAGER, M. STELTER, U. S. SCHUBERT, J. LIEBE, M. EHRICH, B. JELINEK, M. AMMON & L. FAHMY (2019[1]): Forschungs- und Entwicklungspotenziale der Thüringer Energiespeicherbranche: Energiespeicherstudie für das Bundesland Thüringen (Stand: August 2019).

STROHMEYER, D. (2003): Gefügeabhängigkeit technischer Gesteinseigenschaften. Göttingen.

SUVOROV, A. P; A. P. S. SELVADURAI (2019): The Biot coefficient for an elasto-plastic material. – International Journal of Engineering Science, 145, <doi:10.1016/j.ijengsci.2019.103166>.

THEGA THÜRINGER ENERGIE- UND GREENTECH-AGENTUR (2018): Abwärme besser nutze: Erste Thüringer Abwärmestrategie (Stand: 2018).

THÜRINGER ERNEUERBARE ENERGIEN NETZWERK E.V. (2021): Geothermie in Thüringen, <https://www.theen-ev.de/de/geothermie.html>.

THÜRINGER LANDESAMT FÜR UMWELT, BERGBAU UND NATURSCHUTZ (2020): Thüringer Informationssystem Tiefe Geothermie: Terrestrische Wärmestromdichte (Stand: 2020).

UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2009): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen.

VAN LOON, L. J. M. & VAN DER HEIDE (1992): High-Temperature ATES at the University of Utrecht, the Netherlands (Stand: 1992).

VDI-GESELLSCHAFT ENERGIE UND UMWELT (2010): Thermische Nutzung des Untergrundes: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte (2010), VDI 4640 Blatt 1.

WAGENBRETH, O. & W. STEINER (1990[4]): Geologische Streifzüge: Landschaft und Erdgeschichte zwischen Kap Arkona und Fichtelberg. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.

WALDHOFF, C. & M. RECKZÜGEL (2014): ReWIn (Regionales Wärmekataster Industrie) - Strukturkonzept für ein regionales Abwärmekataster Industrie im Landkreis Osnabrück. Osnabrück: Hochschule Osnabrück.

WERNER, D; W. KLEY (1977): Problems of heat storage in aquifers. – Journal of hydrology, 34, 35–43.

WILL, J., T. BAI, S. ECKARDT & D. CHANG (2015): Dynardo Technology and Applications to Well Completion Optimization for Unconventionals (Stand: 2015).

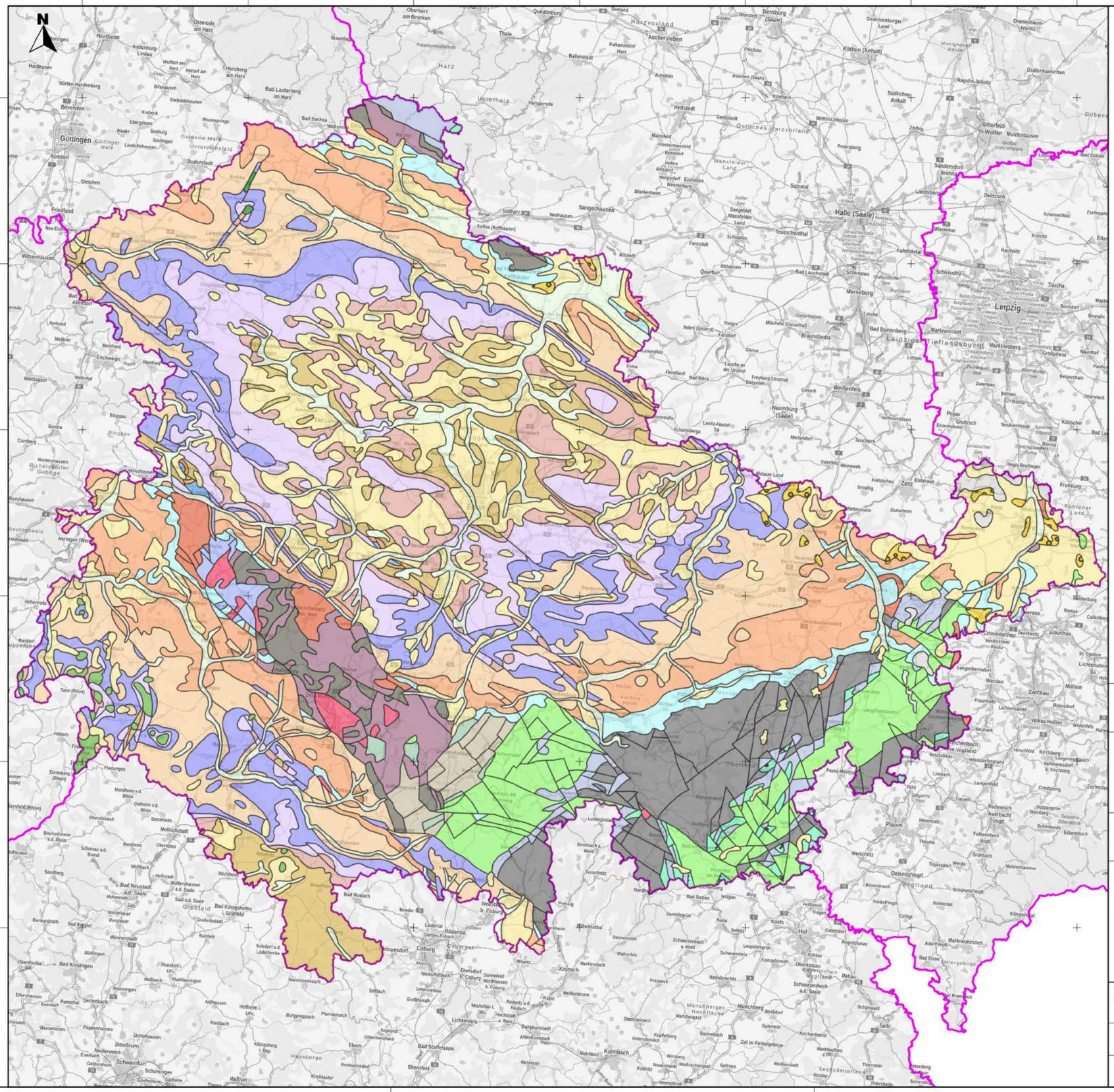
WILL, J; S. ECKARDT (2017): Optimization of Hydrocarbon Production from Unconventional Shale Reservoirs Using Numerical Modelling. – International Journal of Petroleum Technology, 4, 14–32.

WILL, J., S. ECKARDT & A. RANJAN (2017): Numerical Simulation of Hydraulic Fracturing Process in an Enhanced Geothermal Reservoir Using a Continuum Homogenized Approach (Stand: 2017).

WOLFGRAMM, M., M. FRANZ & T. AGEMAR (2014): Explorationsstrategie tiefer geothermischer Ressourcen am Beispiel des Norddeutschen Beckens. In: BAUER, M., W. FREEDEN, H. JACOBI & T. NEU (Hrsg.). Handbuch Tiefe Geothermie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 463–505.

WU, X; X. OUYANG (2019): Successful Application of ATES/Groundwater Source Heat Pump in China. – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 12023.

ZIENKIEWICZ, O. C., A. H. C. CHAN, M. PASTOR, D. K. PAUL & T. SHIOMI (1990): Static and dynamic behaviour of soils a rational approach to quantitative solutions. I. Fully saturated problems: Proceedings of the Royal Society of London. – Mathematical and Physical Sciences 429, 1877, 285–309, <285-309. doi:10.1098/rspa.1990.0061>.



Legende

Geologie

GÜK800

- qh - Holozän
- qhy - anthropogene Ablagerungen (Aufschüttung, Auffüllung)
- qp - Pleistozän
- tB - tertiäre basische Vulkanite (Basalt etc.), ungegliedert
- tS - tertiäre Sedimente, ungegliedert
- kr - Kreide
- j - Jura
- ko - Oberer Keuper
- km - Mittlerer Keuper
- ku - Unterer Keuper
- mo - Oberer Muschelkalk
- mu+mm - Unterer und Mittlerer Muschelkalk
- sm+so - Mittlerer und Oberer Buntsandstein
- su - Unterer Buntsandstein
- z - Zechstein
- ro - Oberrotliegend
- co/ruS - Sedimente des Oberkabon und Rotliegend
- co/ruV - Vulkanite, Gangesteine und Intrusiva des Oberkabon bis Unterrotliegend
- coP - Plutonite des Oberkarbon
- cd - Unterkabon (Dinantium)
- doG - Görkwitz-Formation
- d+si - Devon und Silur
- o - Ordovizium
- ocb - Kambro-Ordovizium
- pzKr - Metamorphite, mesozonal
- np - Neoproterozoikum

Verwaltung

- Grenze Bundesland

Basiskarte

WebAtlasDE Graustufen

Quelle: Lage der Bohrungen - Datenlieferung des TLUBN

Auftraggeber

Auftragnehmer

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

Objekt

GAIA

Projekt

Geologische Übersichtskarte

© TLUBN

0 10.000 20.000 30.000 40.000 50.000 m

Ausgabe DIN A3 EPSG:25833, UTM 33, Ellipsoid: NONE

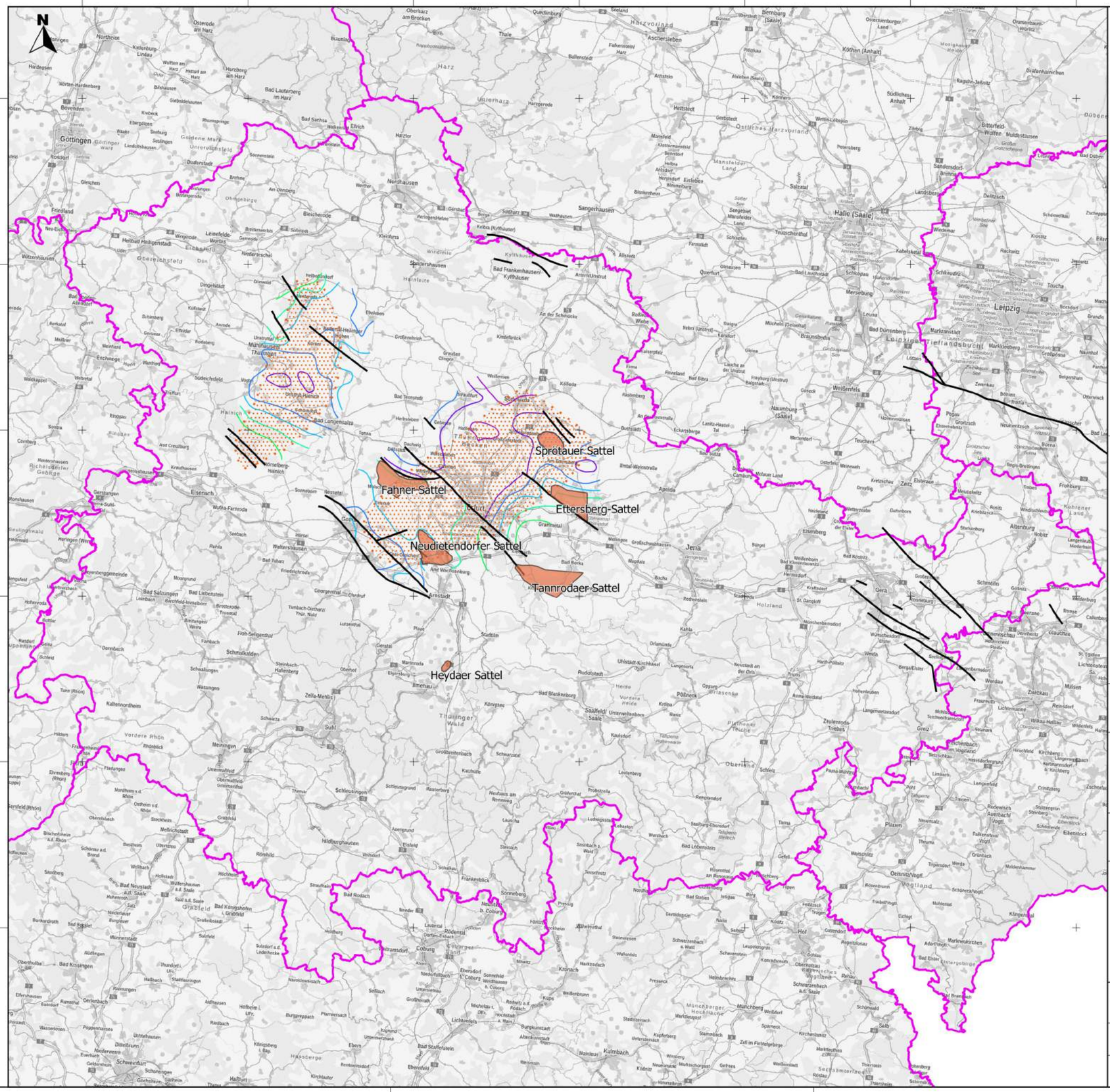
Maßstab 1 : 730.000

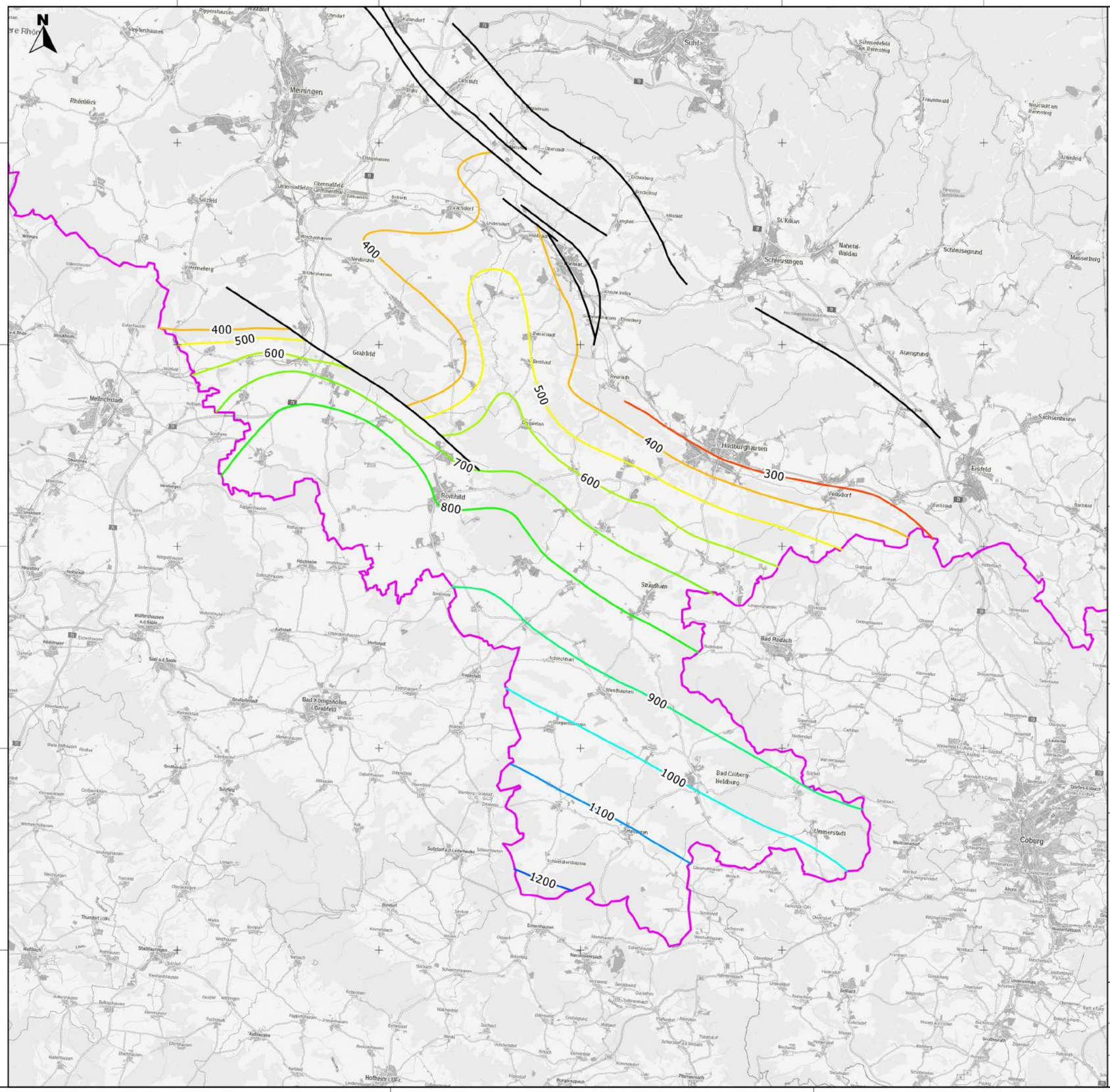
Anlage 1

Autor: Stefan Klapperer

Projekt-Nr.: 7534
Datum: 20.10.2021 Version 1

S:\Projekte\7000\7534_KR_GAIA FuE\03 Projektbearbeitung\QGIS\01_project\7534_MM_SK_AP_GAIA_3.10.6_20210909.qgz
01_Geologie etc_Thür gesamt


150000
180000
210000
240000
270000
300000
330000
5730000
5700000
5670000
5640000
5610000
5580000
N
Sprötauer Sattel
Fahner Sattel
Ettersberg-Sattel
Neudietendorfer Sattel
Tannrodaer Sattel
Heydaer Sattel
Göttingen
Northeim
Nordhausen
Sangerhausen
Halle (Saale)
Leipzig
Merseburg
Weißenfels
Naumburg (Saale)
Jena
Gera
Zeitz
Altenburg
Zwickau
Eisenach
Gotha
Erfurt
Arnstadt
Ilmenau
Suhl
Meiningen
Coburg
Bad Kissingen
Schweinfurt
Bad Hersfeld
Fulda
Hildburghausen
Sonneberg
Bad Rodach
Kronach
Hof
Selb
Plauen
Bad Frankenhausen/Kyffhäuser
Bad Langensalza
Bad Tennstedt
Bad Berka
Bad Sulza
Bad Dürrenberg
Bad Lauchstädt
Bad Düben
Bad Elster
Bad Brambach
Bad Steben
Bad Lobenstein
Bad Salzungen
Bad Liebenstein
Bad Sachsa
Bad Lauterberg im Harz
Bad Harzburg
Bad Gandersheim
Bad Karlshafen
Bad Oeynhausen
Bad Nauheim
Bad Homburg v.d.H.
Bad Kissingen
Bad Königshofen i. Grabfeld
Bad Neustadt a.d. Saale
Bad Salzungen
Bad Tabarz
Bad Langensalza
Bad Frankenhausen/Kyffhäuser
Bad Sulza
Bad Dürrenberg
Bad Lauchstädt
Bad Düben
Bad Elster
Bad Brambach
Bad Steben
Bad Lobenstein
Bad Salzungen
Bad Liebenstein
Bad Sachsa
Bad Lauterberg im Harz
Bad Harzburg
Bad Gandersheim
Bad Karlshafen
Bad Oeynhausen
Bad Nauheim
Bad Homburg v.d.H.
Bad Kissingen
Bad Königshofen i. Grabfeld
Bad Neustadt a.d. Saale



Legende

Geologie

Unterer Buntsandstein

Störungen

Isobathe Top Unterer Buntsandst.

- 300 m
- 400 m
- 500 m
- 600 m
- 700 m
- 800 m
- 900 m
- 1000 m
- 1100 m
- 1200 m

Verwaltung

Grenze Bundesland

Basiskarte

WebAtlasDE Graustufen

Quelle: Lage der Bohrungen - Datenlieferung des TLUBN

Auftraggeber

Auftragnehmer

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

Objekt

GAIA

Projekt

Oberfläche Unterer Buntsandstein, Südthüringen

0 3.000 6.000 9.000 12.000 15.000 m

Ausgabe DIN A3

EPSG:25833, UTM 33, Ellipsoid: NONE

Maßstab 1 : 200.000

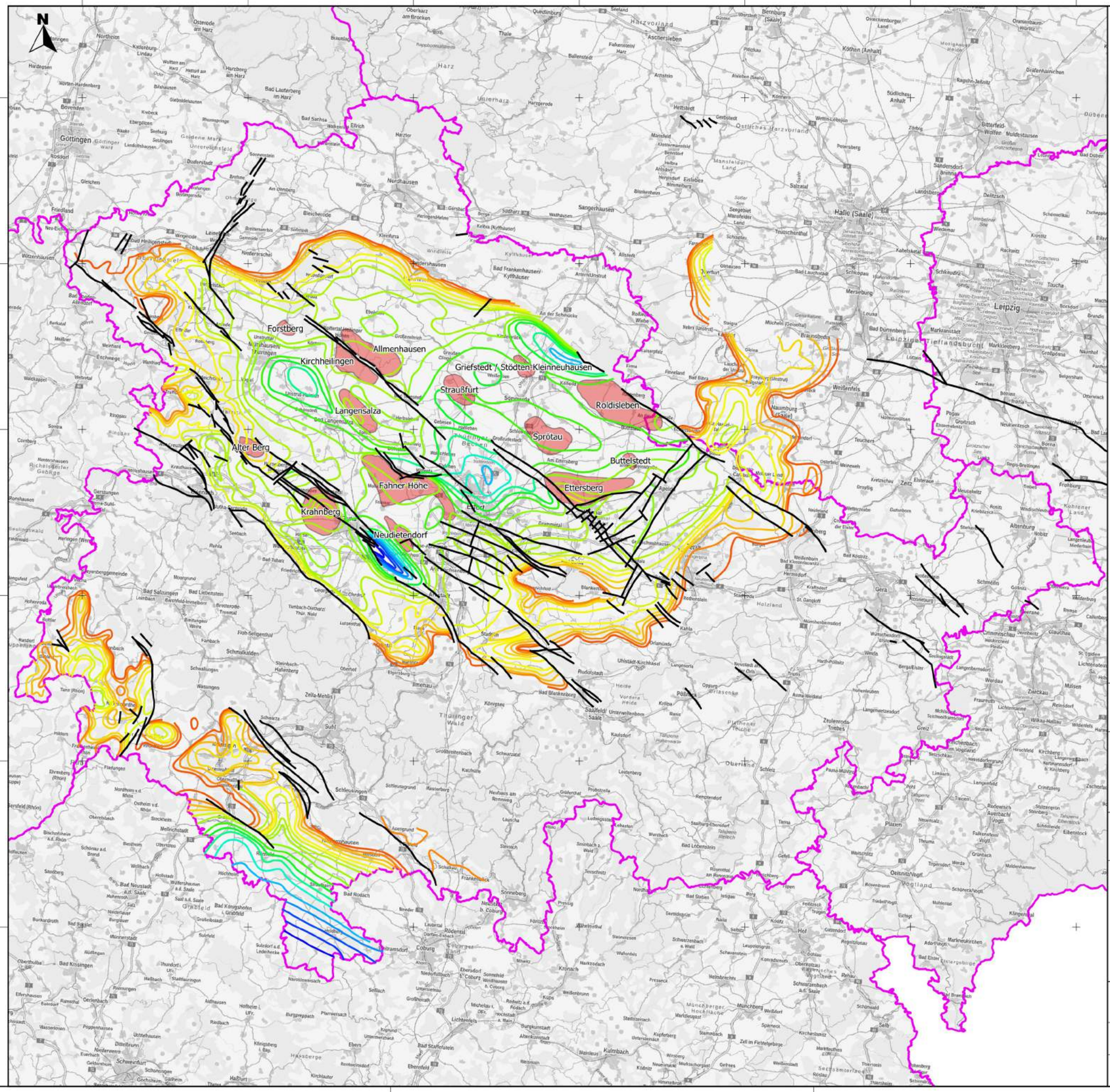
Anlage 2.2

Autor: Stefan Klapperer

Projekt-Nr.: 7534
Datum: 20.10.2021

Version 1

S:\Projekte\7000\7534_KR_GAIA FuE\03 Projektbearbeitung\QGIS\01_project\7534_MM_SK_AP_GAIA_3.10.6_20210909.qgz
06_Unterer Buntsst



Legende

Geologie

Buntsandstein

Mittlerer Buntsandstein

Störungen

Isobathe Top Mittl. Buntsandst.

- 50 m
- 100 m
- 150 m
- 200 m
- 250 m
- 300 m
- 350 m
- 400 m
- 450 m
- 500 m
- 550 m
- 600 m
- 650 m
- 700 m
- 750 m
- 800 m
- 850 m
- 900 m

Speicherstrukturen_Attribute

Speicherstruktur_Buntsandstein_AP

Verwaltung

Grenze Bundesland

Basiskarte

WebAtlasDE Graustufen

Quelle: Lage der Bohrungen - Datenlieferung des TLUBN

Auftraggeber

Auftragnehmer

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

Objekt

GAIA

Projekt

Oberfläche Mittlerer Buntsandstein mit Speicherstrukturen

© TLUBN

0 10.000 20.000 30.000 40.000 50.000 m

Ausgabe DIN A3

EPSG:25833, UTM 33, Ellipsoid: NONE

Maßstab 1 : 730.000

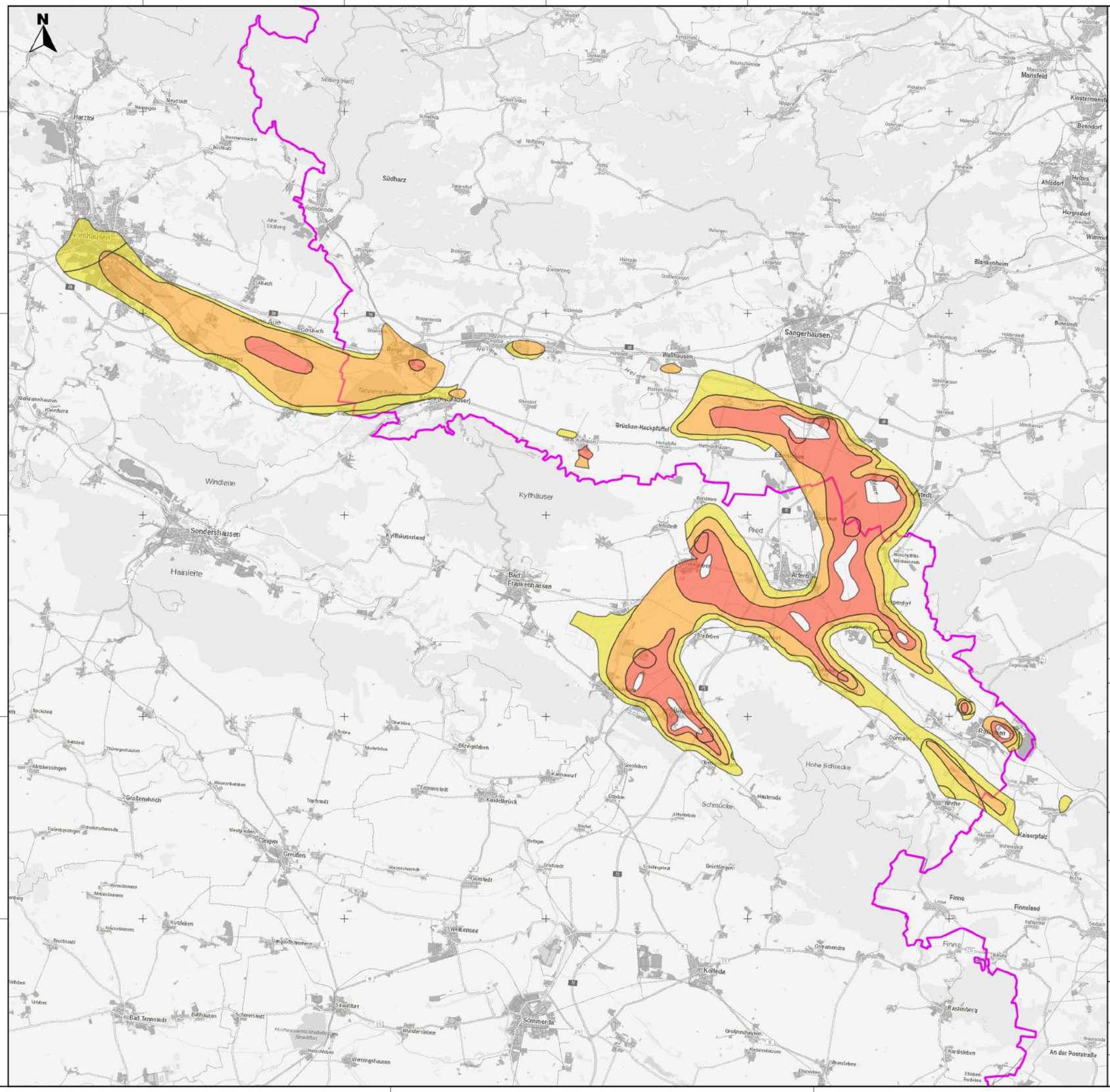
Anlage 2.3

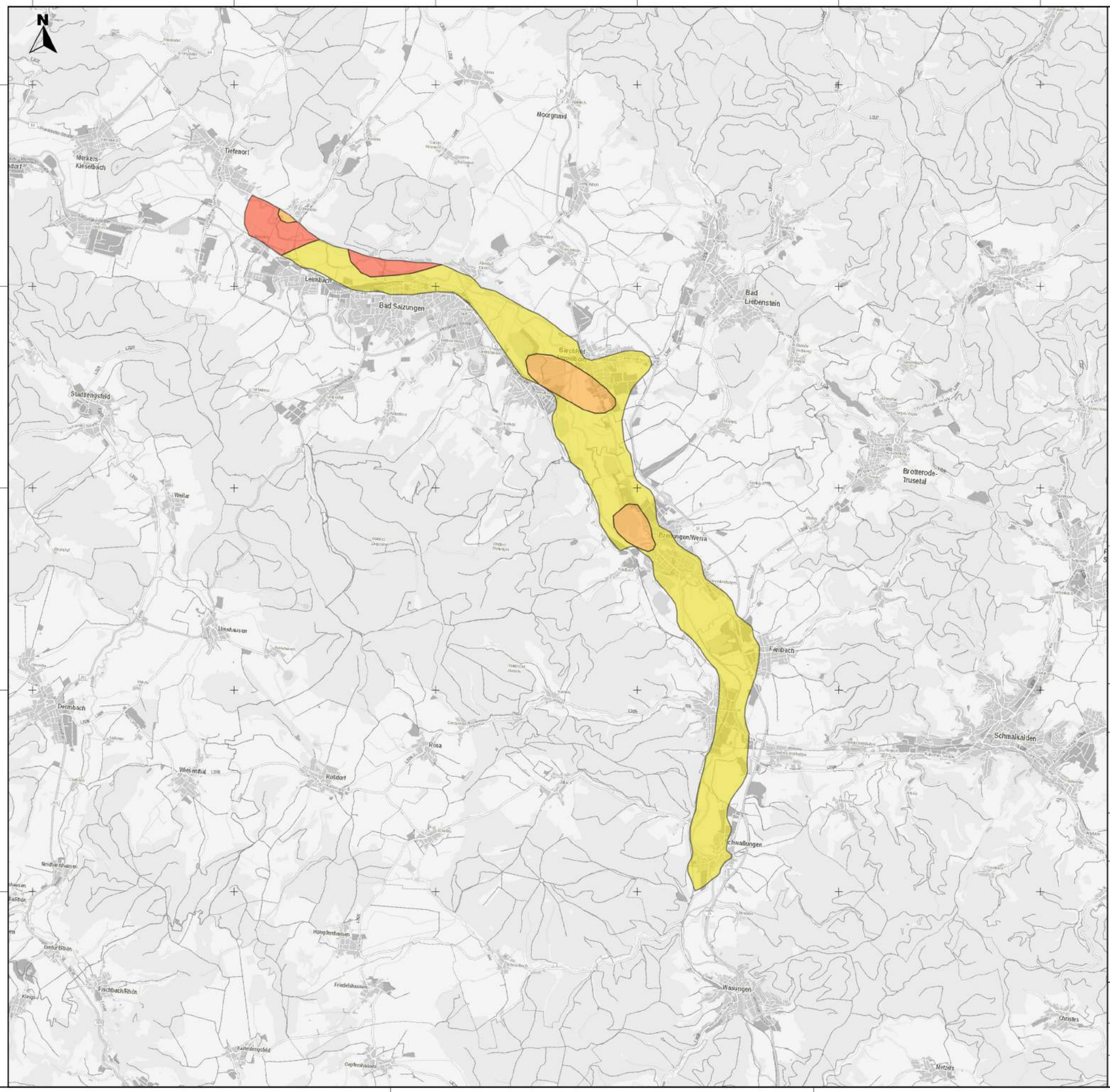
Autor: Stefan Klapperer

Projekt-Nr.: 7534
Datum: 20.10.2021

Version 1

S:\Projekte\7000\7534_KR_GAIA FuE\03 Projektbearbeitung\QGIS\01_project\7534_MM_SK_AP_GAIA_3.10.6_20211020.qgz
01_Geologie etc_Thür gesamt


210000
220000
230000
240000
250000
5720000
5710000
5700000
5690000
5680000
N
Nordhausen
Sangerhausen
Wallhausen
Brücken-Hackpfüffel
Sondershausen
Kyffhäuser
Bad Frankenhausen
Artern
Roßleben
Kölleda
Sömmerda
Bad Tennstedt
Kaiserpfalz
Finne
Finneland
Rastenberg
Mansfeld
Blankenheim
Südharz
Hainleite
Windleite
Hohe Schrecke
Schmücke
Weißensee
Greußen
Großenehrich
Kindelbrück
Bad Langensalza
Mühlhausen
Bad Berka
Weimar
Erfurt
Gotha
Eisenach
Ilmenau
Suhl
Meiningen
Sonneberg
Coburg
Bad Salzungen
Eisenach
Fulda
Kassel
Göttingen
Hildesheim
Braunschweig
Magdeburg
Halle (Saale)
Leipzig
Dessau-Roßlau
Bitterfeld-Wolfen
Zeitz
Naumburg (Saale)
Weißenfels
Merseburg
Bad Lauchstädt
Bad Dürrenberg
Leuna
Schkeuditz
Delitzsch
Eilenburg
Torgau
Bad Liebenwerda
Elsterwerda
Ortrand
Großenhain
Riesa
Meißen
Dresden
Pirna
Freital
Dippoldiswalde
Altenberg
Zittau
Görlitz
Bautzen
Hoyerswerda
Cottbus
Spremberg
Forst (Lausitz)
Guben
Lübben
Lübben (Spreewald)
Luckau
Calau
Senftenberg
Hoyerswerda
Bad Muskau
Weißwasser
Spremberg
Cottbus
Forst (Lausitz)
Guben
Lübben
Luckau
Calau
Senftenberg
Bad Liebenwerda
Elsterwerda
Ortrand
Großenhain
Riesa
Meißen
Dresden
Pirna
Freital
Dippoldiswalde
Altenberg
Zittau
Görlitz
Bautzen
Hoyerswerda
Cottbus
Spremberg



Legende

Geologie

Lockergesteinsaquifere

Isopachen Quartär

- 10-20 m
- 20-50 m
- 50-100 m

Verwaltung

- Grenze Bundesland

Basiskarte

WebAtlasDE Graustufen

Quelle: Lage der Bohrungen - Datenlieferung des TLUBN

Auftraggeber

Auftragnehmer

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

Objekt

GAIA

Projekt

Quartäre Grundwasserleiter, Werra-Aue

0 1.800 3.600 5.400 7.200 9.000 m

Ausgabe DIN A3

EPSG:25833, UTM 33, Ellipsoid: NONE

Maßstab 1 : 100.000

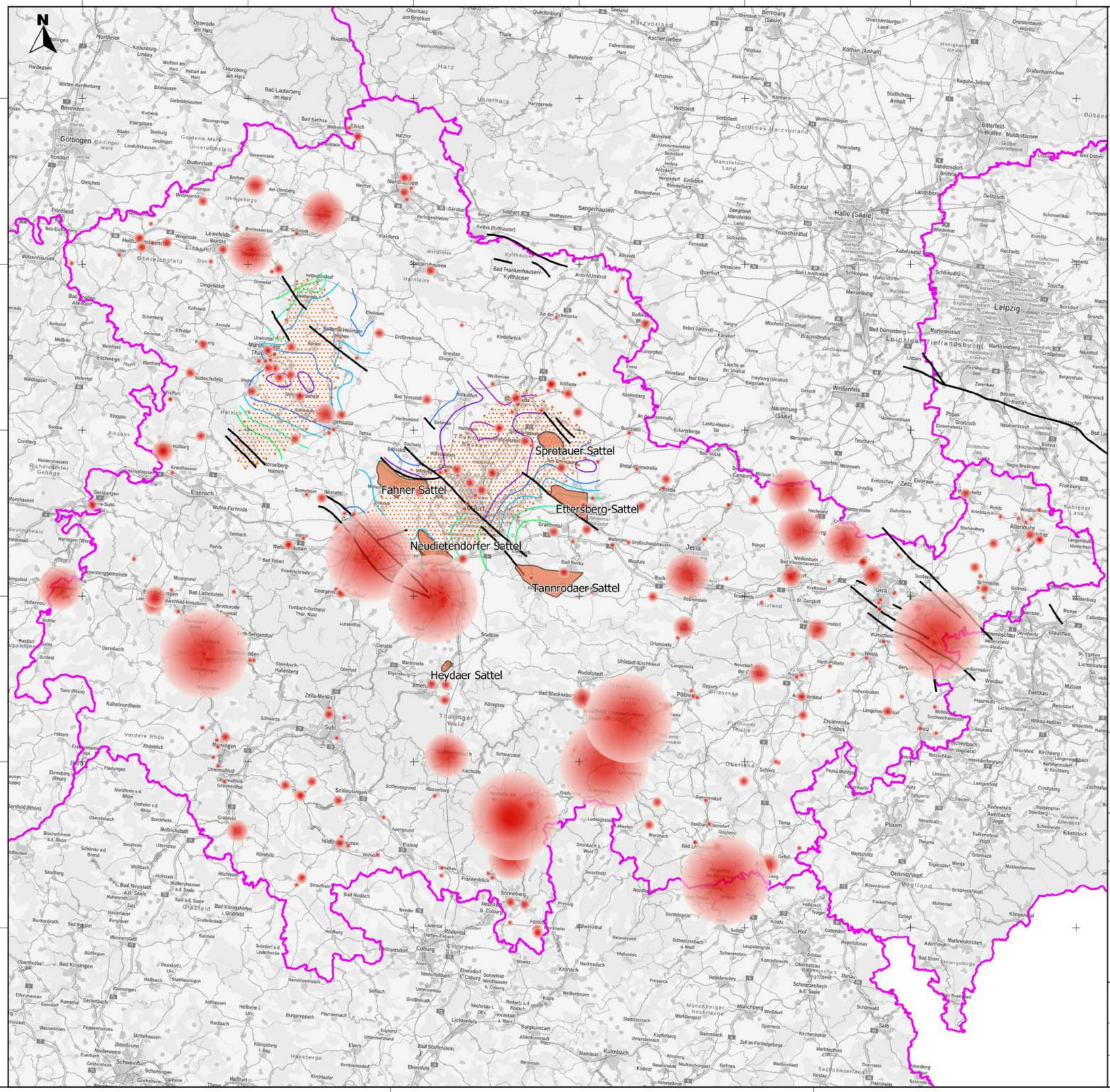
Anlage 2.5

Autor: Stefan Klapperer

Projekt-Nr.: 7534
Datum: 20.10.2021

Version 1

S:\Projekte\7000\7534_KR_GAIA FuE\03 Projektbearbeitung\QGIS\01_project\7534_MM_SK_AP_GAIA_3.10.6_20211020.qgz
05_GWL Werra-Aue



Legende

Abwärmekataster (Stand 2016)
- Abwaermequellen

Geologie

Permokarbon
- Speicherstruktur Rotliegend
- Störungen
- Verbreitung Rotliegend-Sandsteine

Isobathe Oberfläche Rotliegend (m unter GOK)
- 1700 m
- 1600 m
- 1500 m
- 1400 m
- 1300 m
- 1200 m

Verwaltung
- Grenze Bundesland

Basiskarte

WebAtlasDE Graustufen

Quelle: Lage der Bohrungen - Datenlieferung des TLUBN

Auftraggeber

Auftragnehmer
JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH
Saalbahnhofstraße 25c, 07743 Jena
Tel.: +49 3641 4535-0; Fax: +49 3641 442806
E-Mail: info@jena-geos.de

Objekt
GAIA

Projekt

Oberfläche Rotliegend mit Speicherstrukturen und Abwärmequellen

0 10.000 20.000 30.000 40.000 50.000 m

Ausgabe DIN A3 EPSG:25833, UTM 33, Ellipsoid: NONE

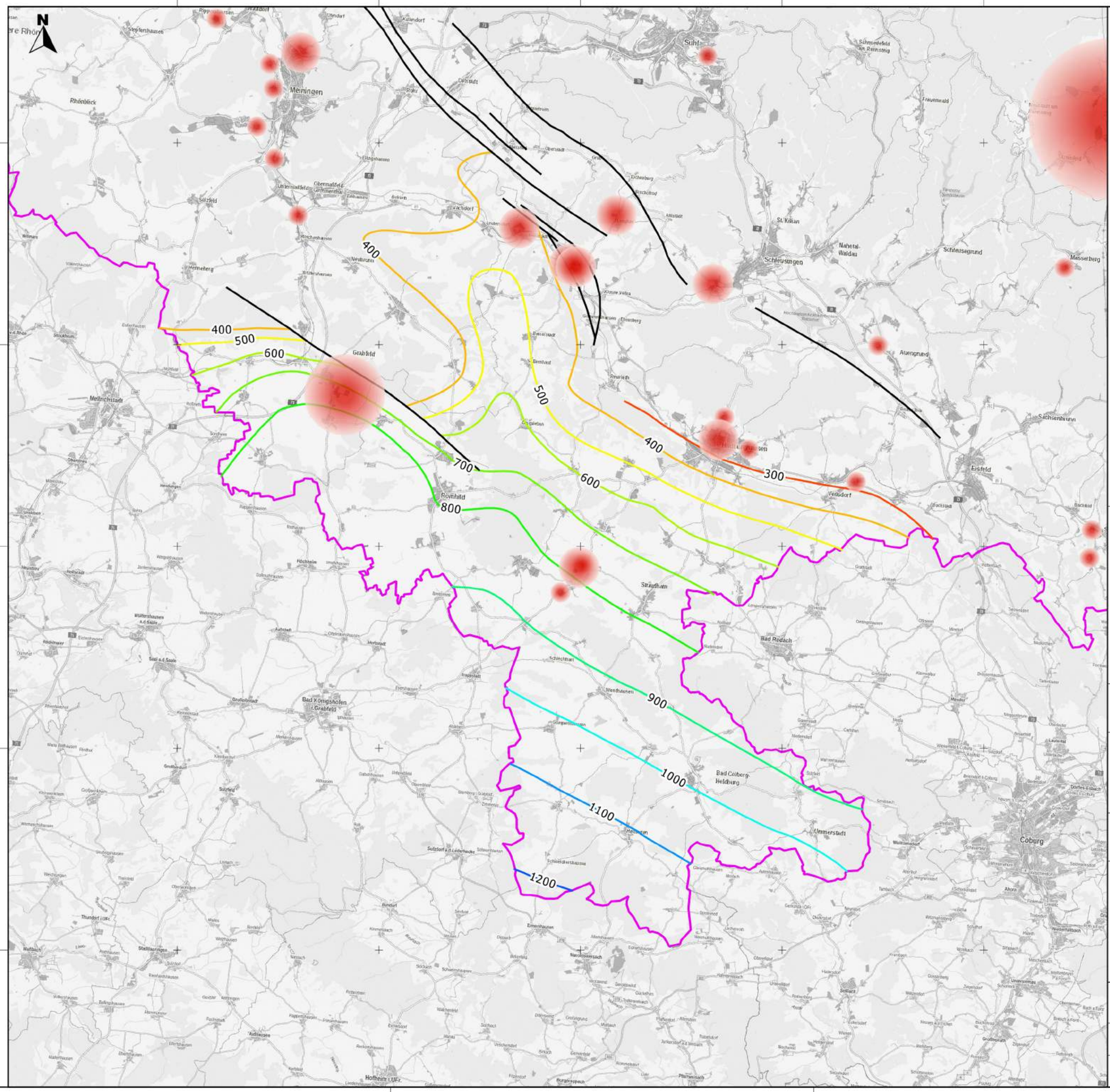
Maßstab 1 : 730.000

Anlage 3.1

Autor: Stefan Klapperer

Projekt-Nr.: 7534
Datum: 20.10.2021
Version 1

S:\Projekte\7000\7534_KR_GAIA FuE\03 Projektbearbeitung\QGIS\01_project\7534_MM_SK_AP_GAIA_3.10.6_20211020.qgz
01_Geologie etc_Thür gesamt



Legende

Abwärmekataster (Stand 2016)
- Abwaermequellen

Geologie

Buntsandstein

Unterer Buntsandstein
- Störungen

Isobathe Top Unterer Buntsandst.
- 300 m
- 400 m
- 500 m
- 600 m
- 700 m
- 800 m
- 900 m
- 1000 m
- 1100 m
- 1200 m

Verwaltung
- Grenze Bundesland

Basiskarte

WebAtlasDE Graustufen

Quelle: Lage der Bohrungen - Datenlieferung des TLUBN

Auftraggeber

Auftragnehmer
JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH
Saalbahnhofstraße 25c, 07743 Jena
Tel.: +49 3641 4535-0; Fax: +49 3641 442806
E-Mail: info@jena-geos.de

Objekt
GAIA

Projekt

Oberfläche Unterer Buntsandstein und Abwärmequellen, Südthüringen

0 3.000 6.000 9.000 12.000 15.000 m

Ausgabe DIN A3

EPSG:25833, UTM 33, Ellipsoid: NONE

Maßstab 1 : 200.000

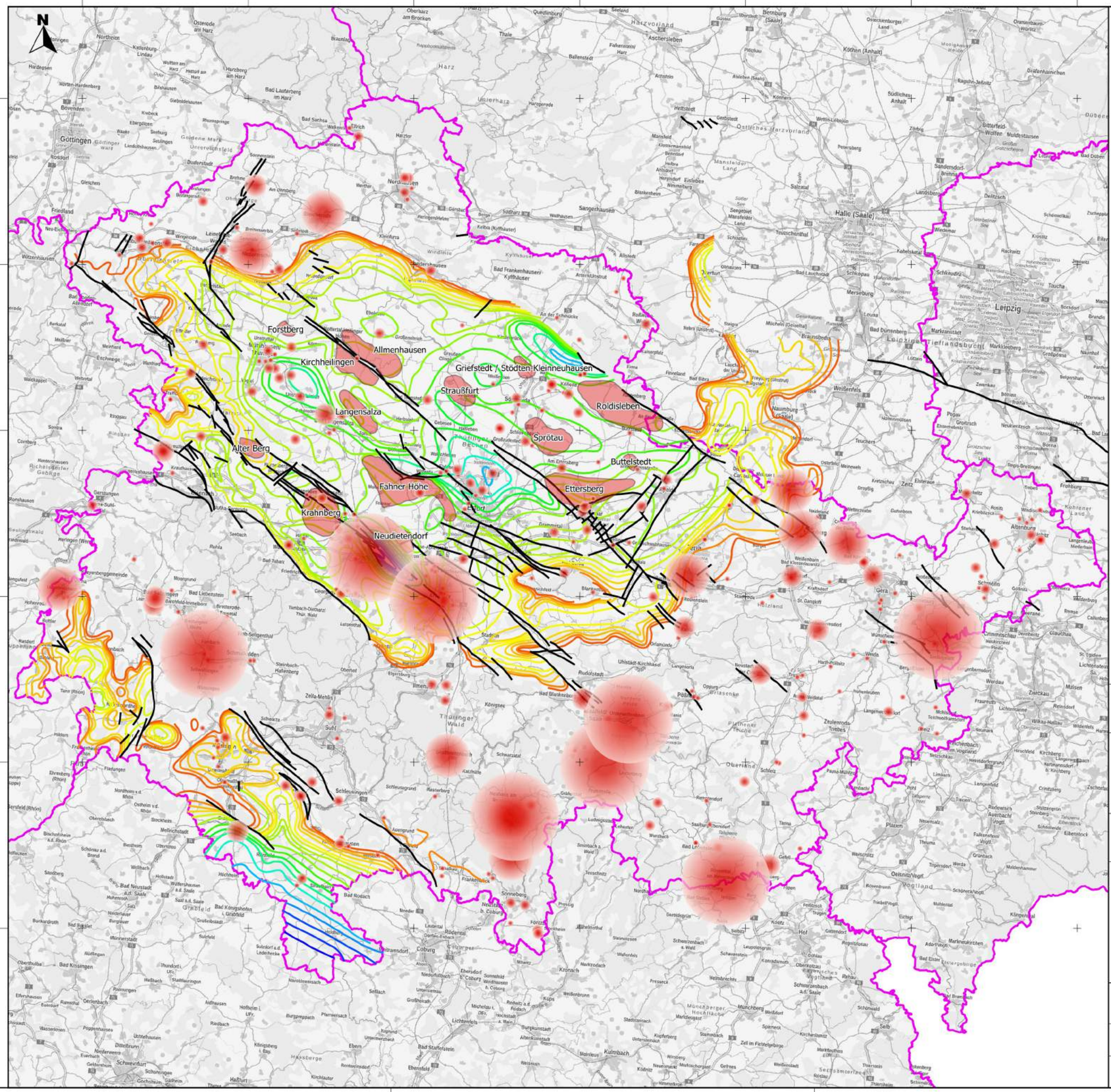
Anlage 3.2

Autor: Stefan Klapperer

Projekt-Nr.: 7534
Datum: 20.10.2021

Version 1

S:\Projekte\7000\7534_KR_GAIA FuE\03 Projektbearbeitung\QGIS\01_project\7534_MM_SK_AP_GAIA_3.10.6_20211020.qgz
06_Unterer Buntsst



Legende

Abwärmekataster (Stand 2016)
- Abwaermequellen

Geologie

Buntsandstein
- Speicherstruktur_Buntsandstein

Mittlerer Buntsandstein
- Störungen

Isobathe Top Mittl. Buntsandst.
- 50 m
- 100 m
- 150 m
- 200 m
- 250 m
- 300 m
- 350 m
- 400 m
- 450 m
- 500 m
- 550 m
- 600 m
- 650 m
- 700 m
- 750 m
- 800 m
- 850 m
- 900 m

Verwaltung
- Grenze Bundesland

Basiskarte

WebAtlasDE Graustufen

Quelle: Lage der Bohrungen - Datenlieferung des TLUBN

Auftraggeber

Auftragnehmer

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

Objekt
GAIA

Projekt

Oberfläche Mittlerer Buntsandstein mit Speicherstrukturen und Abwärmequellen

0 10.000 20.000 30.000 40.000 50.000 m

Ausgabe DIN A3 — EPSG:25833, UTM 33, Ellipsoid: NONE

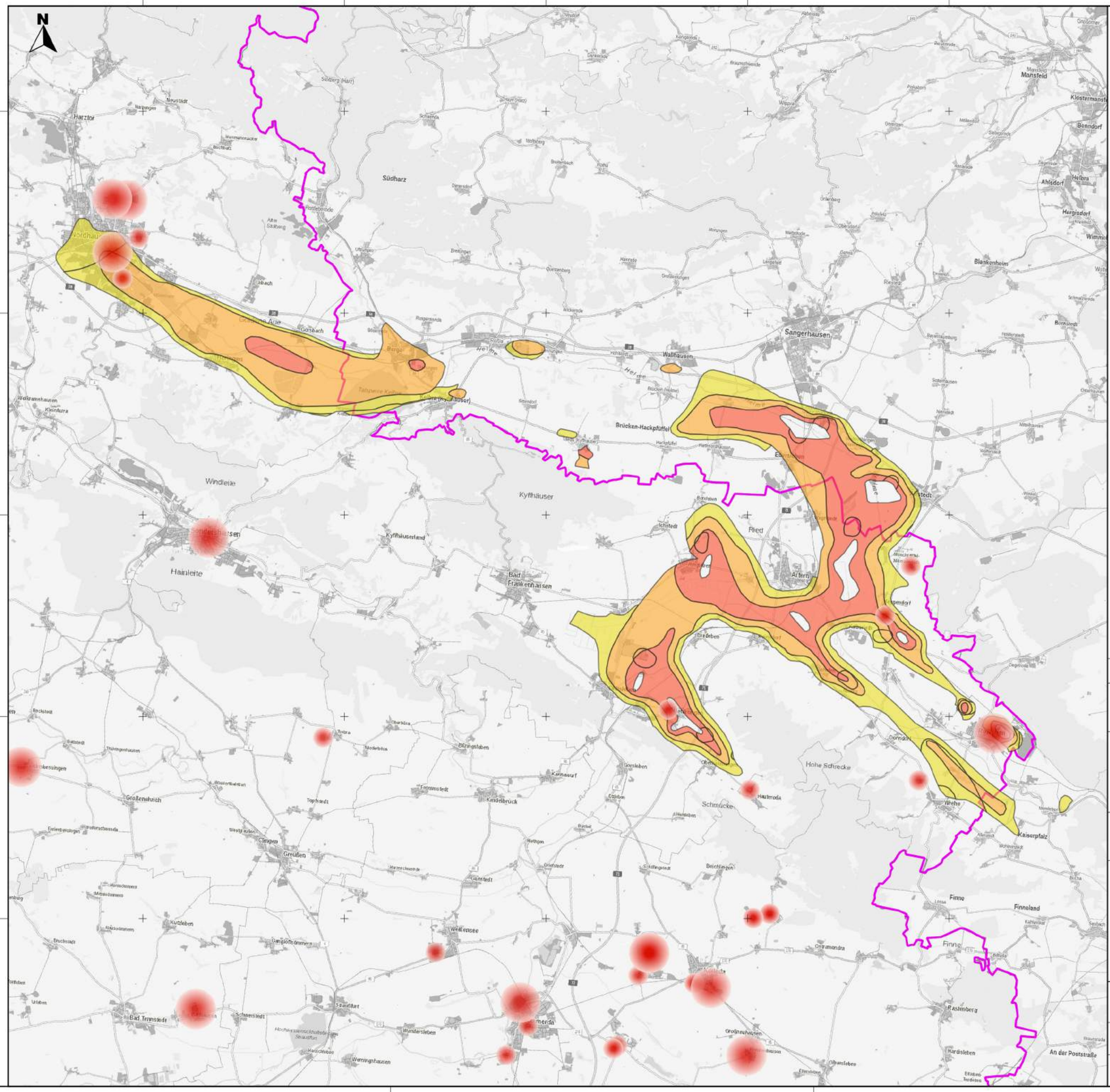
Maßstab 1 : 730.000

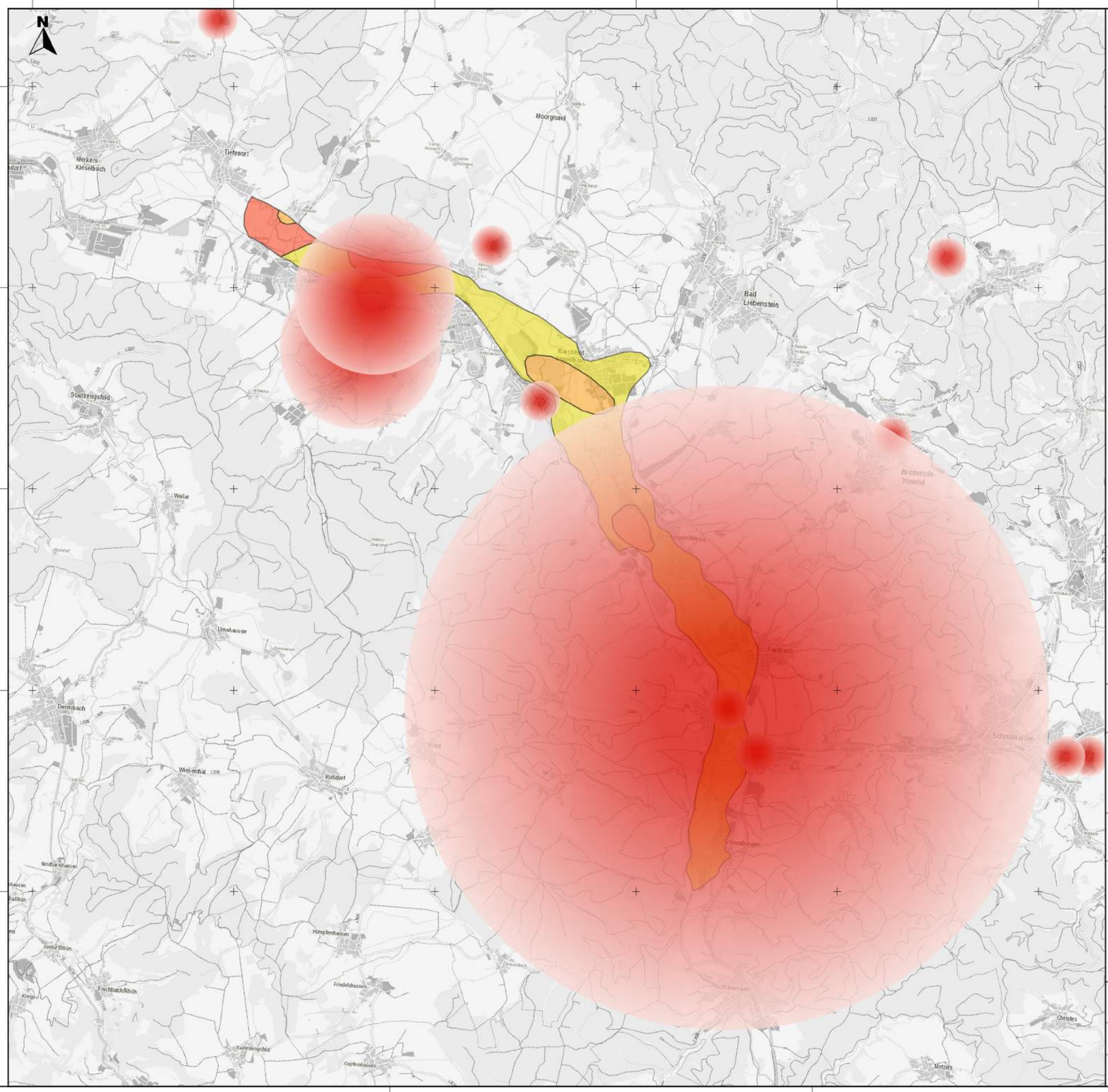
Anlage 3.3

Autor: Stefan Klapperer

Projekt-Nr.: 7534
Datum: 20.10.2021
Version 1

S:\Projekte\7000\7534_KR_GAIA FuE\03 Projektbearbeitung\QGIS\01_project\7534_MM_SK_AP_GAIA_3.10.6_20211020.qgz
01_Geologie etc_Thür gesamt


210000
220000
230000
240000
250000
5720000
5710000
5700000
5690000
5680000
N
Nordhausen
Sangerhausen
Wallhausen
Brücken-Hackpfüffel
Kyffhäuser
Kyffhäuserland
Sondershausen
Hainleite
Bad Frankenhausen
Artern
Fred
Heldrungen
Bad Tennstedt
Kaiserpfalz
Finne
Finneland
Rastenberg
Hohe Schrecke
Schmücke
Hauteroda
Wehe
Kindelbrück
Großenehrich
Clingen
Greußen
Weißensee
Sömmerda
Ostramondra
Südharz
Harztor
Mansfeld
Blankenheim
Bennstedt
Ahlsdorf
Hergisdorf
Helbra
Wimmelburg
Kleinfurra
Windleite
Bad Tennstedt
Werningshausen
Wundersleben
Gangloffsömmern
Kutzleben
Bruchstadt
Urbach
Gonsbach
Bösenburg
Helme
Tonne
Bergen
Tetzner Kuhle
Rottleberode
Stolberg (Harz)
Neustadt
Wernigerode
Braunschweig
Kleinmonra
Großmonra
Olbersleben
Ichstedt
Bretleben
Ringleben
Bilzingsleben
Tonndorf
Gorsleben
Karnsdorf
Topfstedt
Tonndorf
Ballstedt
Thüringenhausen
Rockstedt
Bad Bellingen
Bad Frankenhausen
Ebeleben
Ichstedt
Bretleben
An der Poststraße
Hardisleben
Ellersleben
Tonndorf
Oldisleben
Wiedeborn
Bellstedt
Bellingen
Gorsleben
Ringleben
Bilzingsleben
Tonndorf
Ichstedt
Bretleben
Ebeleben
Ingersleben
Ichstedt
Bretleben
Ebeleben
Ingersleben
Ichstedt
Bretleben
Ebeleben
Ingersleben



Legende

Abwärmekataster (Stand 2016)

- Abwaermequellen

Geologie

Lockergesteinsaquifere

Isopachen Quartär

- 10-20 m
- 20-50 m
- 50-100 m

Basiskarte

WebAtlasDE Graustufen

Quelle: Lage der Bohrungen - Datenlieferung des TLUBN

Auftraggeber

Auftragnehmer

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

Objekt

GAIA

Projekt

Quartäre Grundwasserleiter und Abwärmequellen, Werra-Aue

0 1.800 3.600 5.400 7.200 9.000 m

Ausgabe DIN A3

EPSG:25833, UTM 33, Ellipsoid: NONE

Maßstab 1 : 100.000

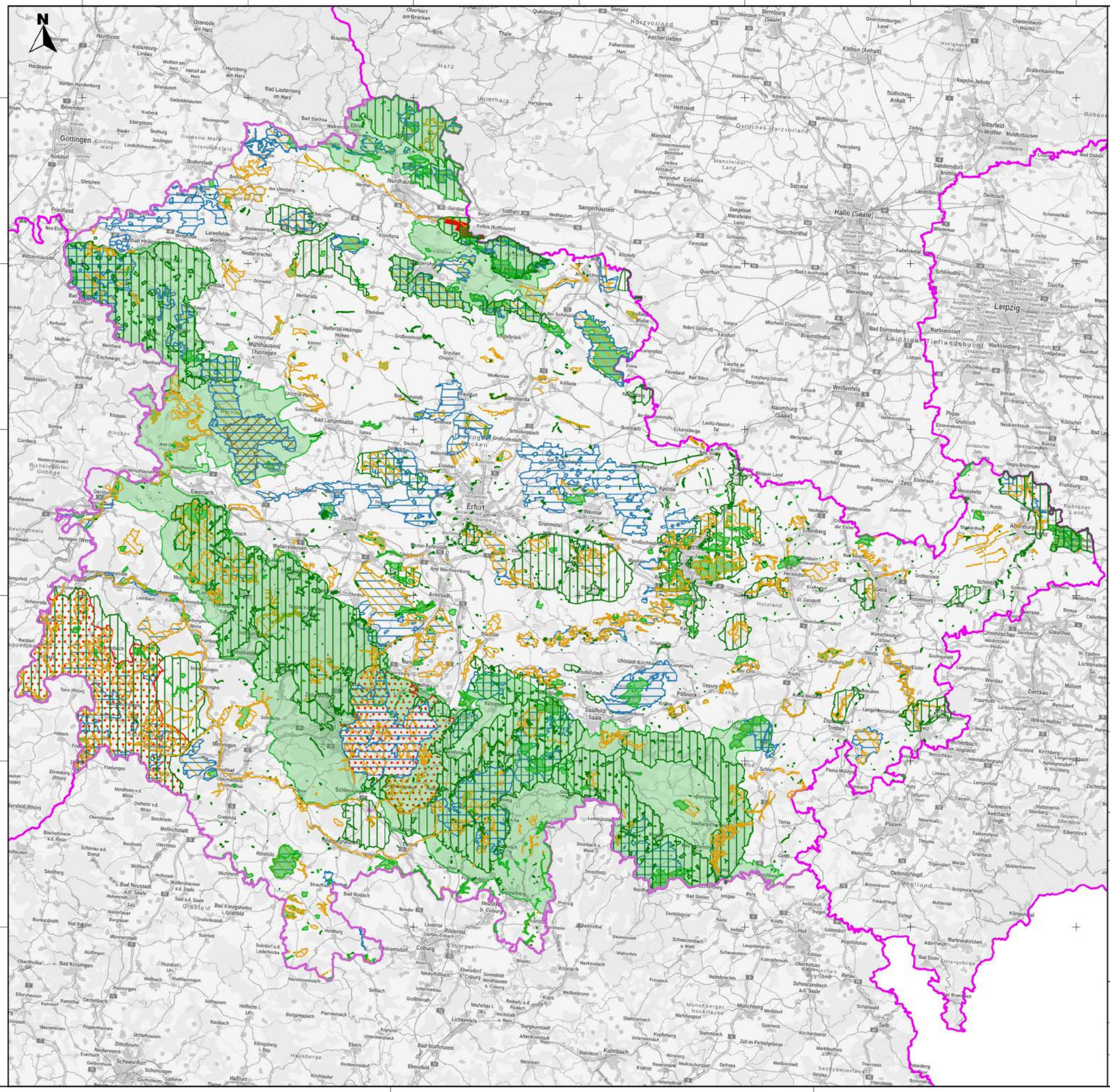
Anlage 3.5

Autor: Stefan Klapperer

Projekt-Nr.: 7534
Datum: 17.05.2022

Version 1

S:\Projekte\7000\7534_KR_GAIA FuE\03 Projektbearbeitung\QGIS\01_project\7534_MM_SK_AP_GAIA_3.10.6_20211020.qgz
05_GWL Werra-Aue



Legende

Schutzgebiet-Flächen
- Landschaftsschutzgebiete
- Vogelschutzgebiete
- Nationalpark
- FFH-Gebiete
- Biosphärenreservate
- Feuchtgebiete internationaler Bedeutung
- Schongebiete
- Nationales Naturmonument
- Naturpark
- Naturschutzgebiete
- FND/GLB/flächige ND/geschützte Gehölze

Verwaltung
- Grenze Bundesland

Basiskarte

WebAtlasDE Graustufen

Quelle: Lage der Bohrungen - Datenlieferung des TLUBN

Auftraggeber

Auftragnehmer

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

Objekt
GAIA

Projekt

Schutzgebiete

0 10.000 20.000 30.000 40.000 50.000 m

Ausgabe DIN A3 — EPSG:25833, UTM 33, Ellipsoid: NONE

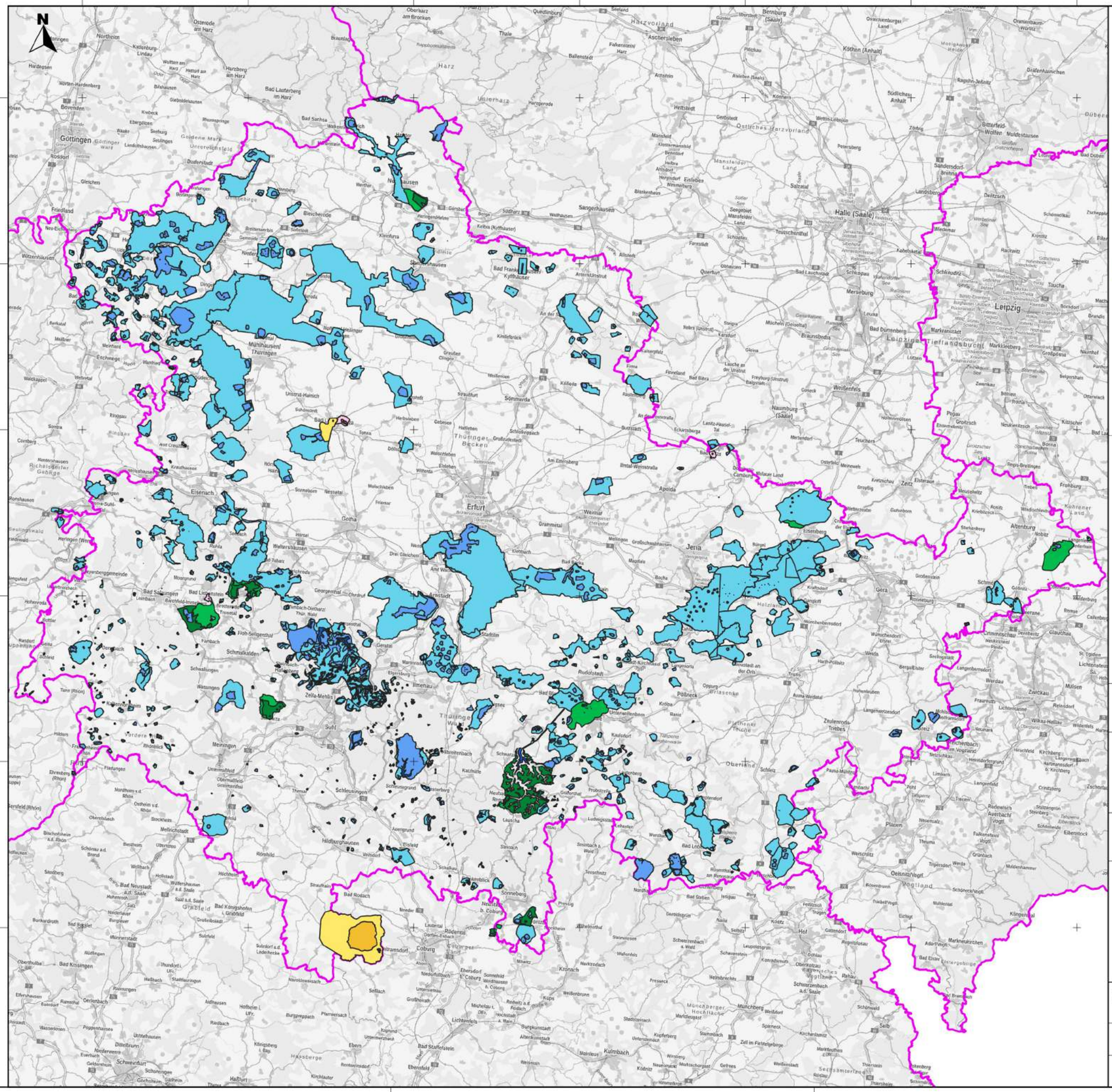
Maßstab 1 : 730.000

Anlage 4.1

Autor: Stefan Klapperer

Projekt-Nr.: 7534
Datum: 20.10.2021
Version 1

S:\Projekte\7000\7534_KR_GAIA FuE\03 Projektbearbeitung\QGIS\01_project\7534_MM_SK_AP_GAIA_3.10.6_20211020.qgz
01_Geologie etc_Thür gesamt



Legende

Wasser- und Heilquellenschutzgebiete

- WSG, Schutzzone I
- WSG, Schutzzone II
- WSG, Schutzzone III
- WSG, Schutzzone IIIA
- WSG, Schutzzone IIIB
- WSG, Schutzzone IIIC
- HQSG, Schutzzone I
- HQSG, Schutzzone II
- HQSG, Schutzzone III
- HQSG, qualitative Schutzzone A
- HQSG, qualitative Schutzzone B

Verwaltung

- Grenze Bundesland

Basiskarte

WebAtlasDE Graustufen

Quelle: Lage der Bohrungen - Datenlieferung des TLUBN

Auftraggeber

Auftragnehmer

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

Objekt

GAIA

Projekt

Wasser- und Heilquellenschutzgebiete

0 10.000 20.000 30.000 40.000 50.000 m

Ausgabe DIN A3

EPSG:25833, UTM 33, Ellipsoid: NONE

Maßstab 1 : 730.000

Anlage 4.2

Autor: Stefan Klapperer

Projekt-Nr.: 7534
Datum: 20.10.2021

Version 1

S:\Projekte\7000\7534_KR_GAIA FuE\03 Projektbearbeitung\QGIS\01_project\7534_MM_SK_AP_GAIA_3.10.6_20211020.qgz
01_Geologie etc_Thür gesamt