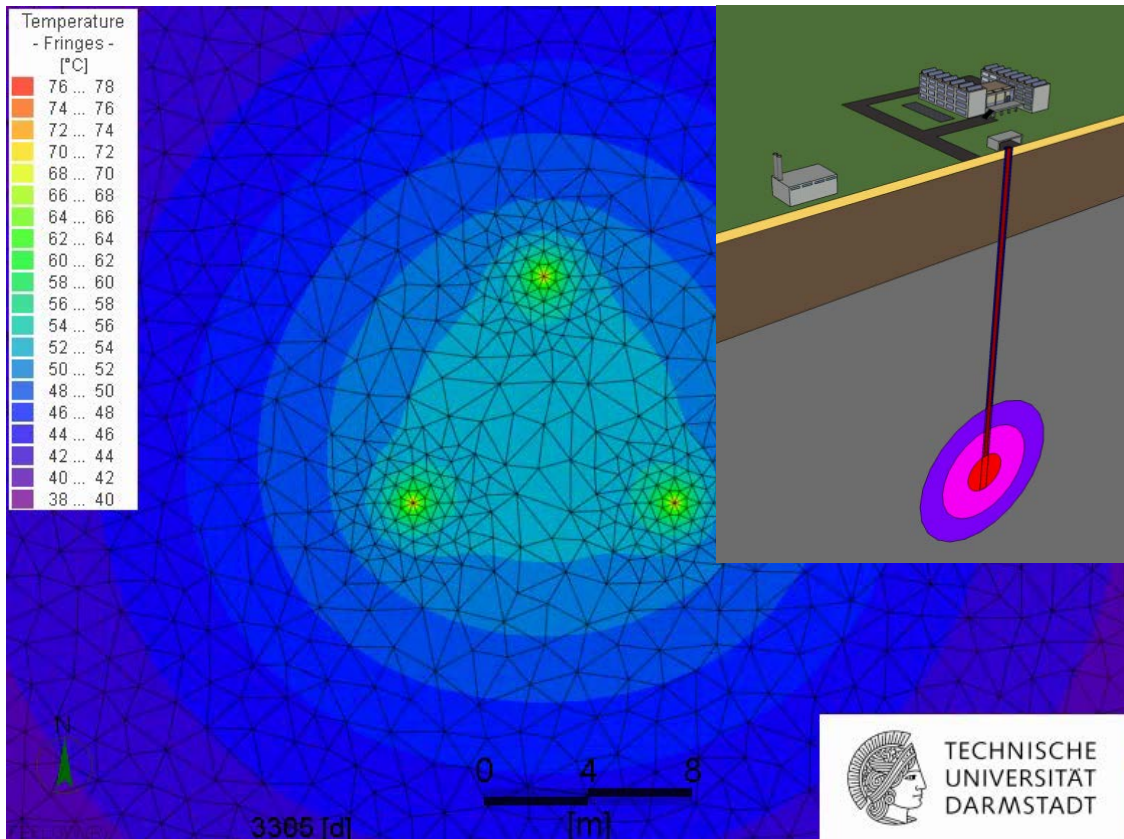


Mitteltiefe Geothermie – Standortanforderungen, Technik und Praxisbeispiele



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

NATUR PUR
INSTITUT



Fachgespräch

Erdwärmennutzung in Hessen

Prof. Dr. Ingo Sass

Technische Universität Darmstadt
Institut für Angewandte Geowissenschaften
Fachgebiet für Angewandte Geothermie

Idstein, 17. September 2013

- **Wie funktionieren Hochtemperaturspeicher?**
 - Gekoppelte Systeme (Solarthermie, BHKW-Abwärme, Geothermie)
 - Technische Rahmenbedingungen (Bohrverfahren, Vorstudien, Modellierung)

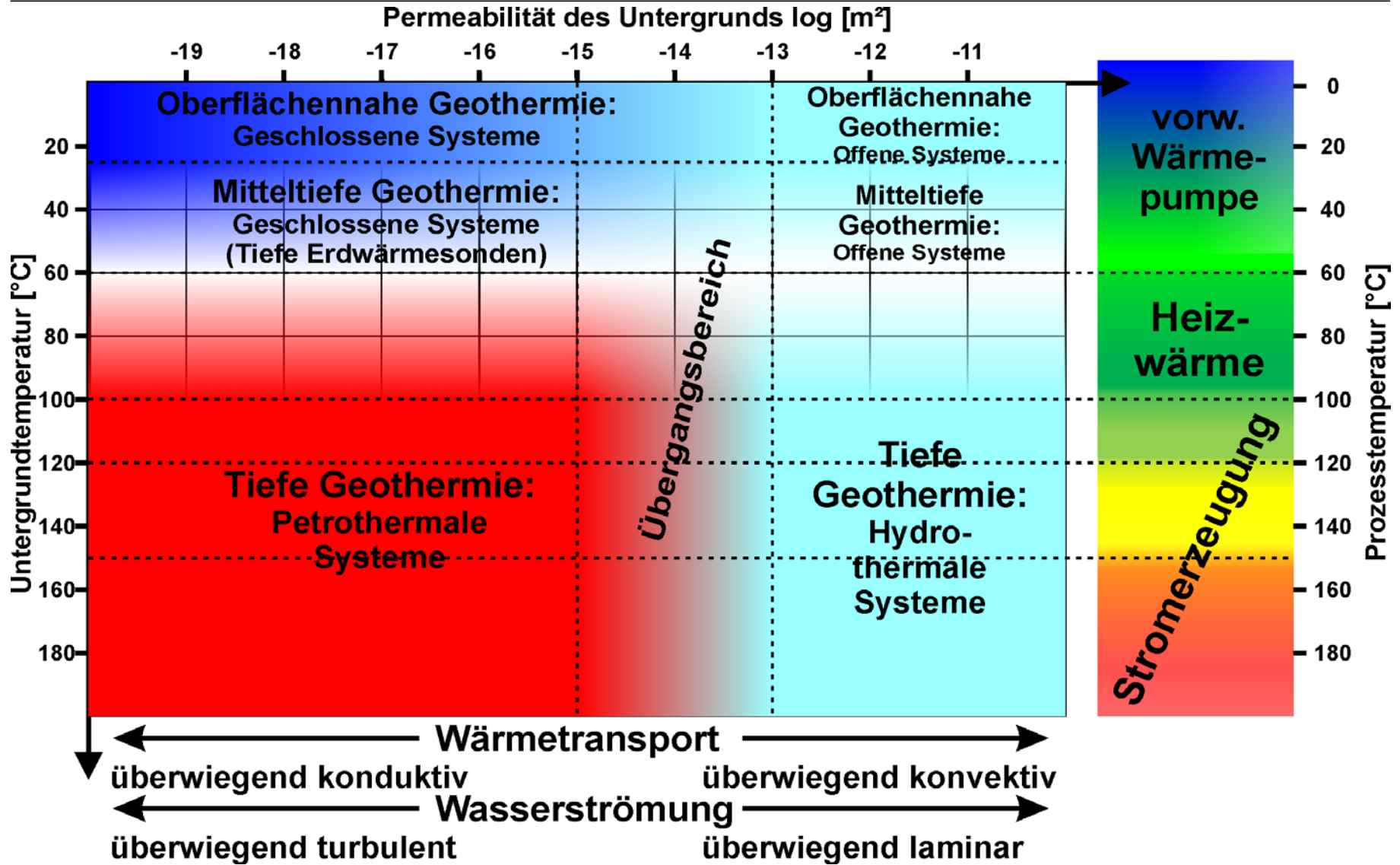
- **Warum sind Hochtemperaturspeicher interessant?**
 - konventionelles Heizsystem (Radiatoren mit hohen Vorlauftemperaturen)
 - bestehende Infrastruktur (Nah-/Fernwärmenetz) verwendbar
 - geringerer Wärmeverlust da geringeres ΔT

- **Warum ist das Kristallin interessant?**
 - geringe Durchlässigkeit, Wärmepool
 - petrothermale Systeme im nORG

- **Was wissen wir über die mitteldeutsche Kristallinschwelle?**

- **Welche Untersuchungen liefern wichtige Eingangsdaten für Dimensionierung und Modellierung eines Hochtemperaturspeichers sowie für petrothermale Systeme?**

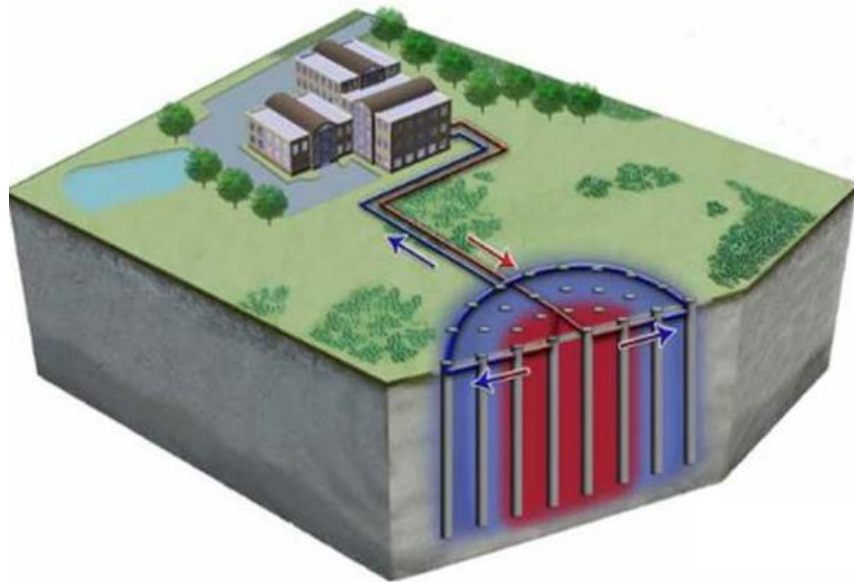
Einordnung Mitteltiefe Geothermie



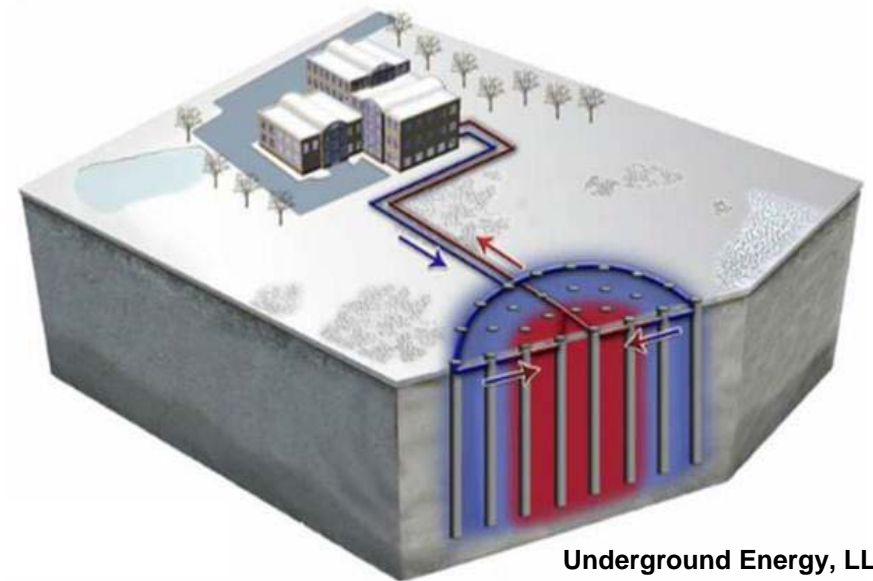
Merkmale Mitteltiefe Geothermie

- **Kein Tiefenkriterium**
- **Erschlossenes Temperaturniveau erlaubt Betrieb ohne Wärmepumpe**
- **Betrieb konventioneller Heizsysteme möglich**
- **Speicherung oder direkte Nutzung tieferer Bereiche**
- **Anwendung und Erweiterung bekannter Techniken (Bohrung und Ausbau) aus der Oberflächennahen und Tiefen Geothermie**
- **Temperaturbedingt andere Ausbaumaterialien als in der Oberflächennahen Geothermie üblich (nur bedingt Einsatz von PE-Rohren)**
- **Flachbohrtechnologien nur begrenzt einsetzbar**
- **Erhöhte Anforderungen an Bemessung und Überwachung**
- **Operative Temperatur im Reservoir größer als ungestörte Gebirgstemperatur (Speicherung)**

Konventionelle saisonale thermische Erdwärmespeicher



Sommerbetrieb: Kühlung

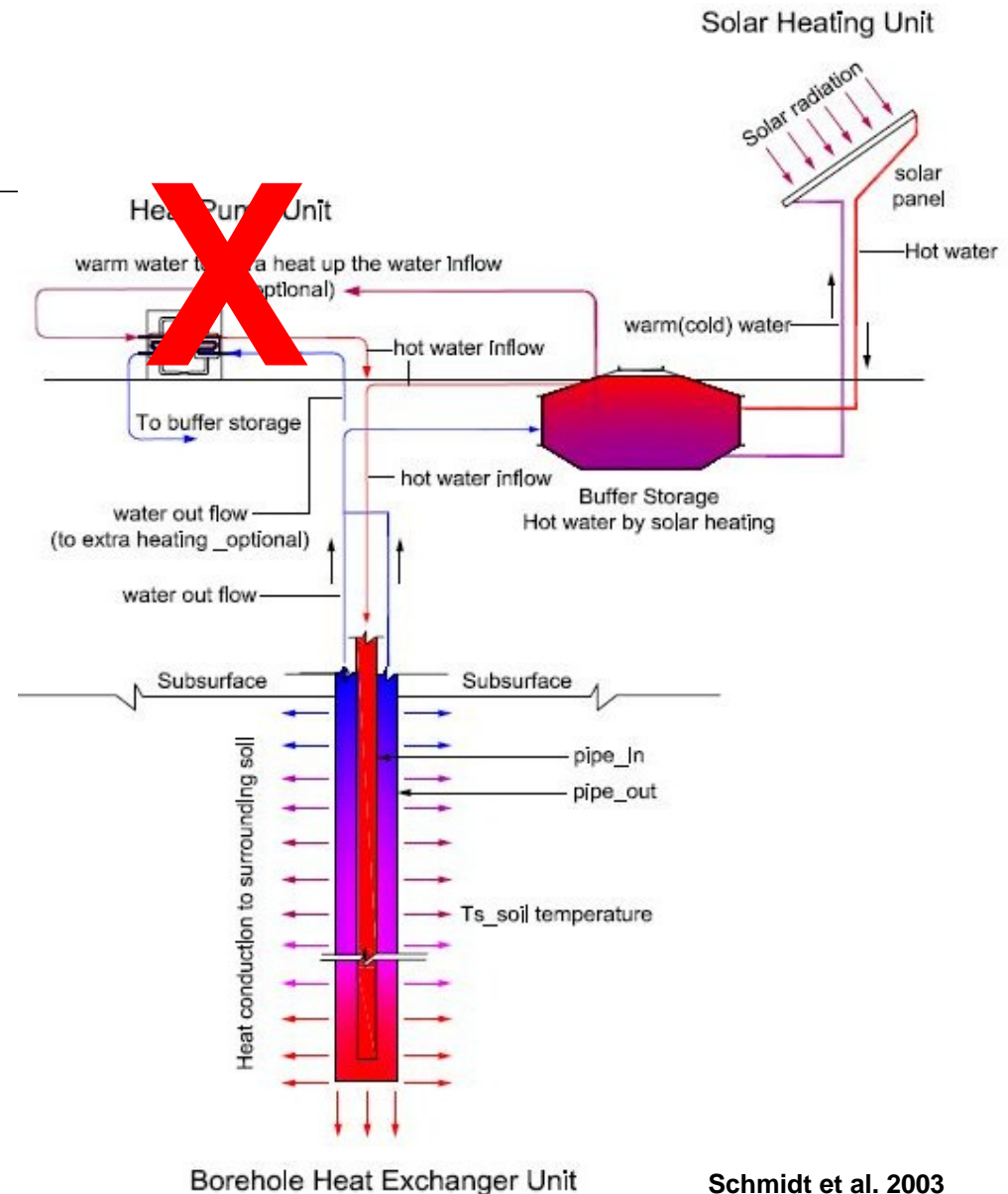


Underground Energy, LLC

Winterbetrieb: Heizung

Gekoppelte Systeme

- Die Koppelung von unterschiedlichen regenerativen Energien mit bestehender Infrastruktur ist über die Speichertechnologie möglich
- Besonders wetterabhängige Technologien wie Solarthermie und Windkraft sind auf Speicher angewiesen.
- Kopplung mit industrieller Abwärme, Prozesswärme gewährleistet Grundlastfähigkeit
- Kopplung mit BHKW's ermöglicht stromgeführten Betrieb im Sommer



Hochtemperaturspeicher

- **Wenige, dafür mitteltiefe Bohrungen (500 – 1500 m)**
- **Vergleichsweise hohe Einspeisetemperaturen 70 - 110°C**
- **Bohrtiefen von über 1000 m erreichen höhere Untergrundtemperaturen → geringere
Temperaturspreizung zwischen Reservoirtemperatur und Einspeisetemperatur
→ geringerer Wärmeverlust als bei oberflächennahen Speichern**
- **Hohe Vorlauftemperaturen können ausgespeist werden (55-65°C)**
- **Erhöhung des Wirkungsgrades durch Verzicht auf Wärmepumpe → geringerer
Primärenergieeinsatz**
- **Energetische Optimierung von bestehender Infrastruktur**
- **Kostengünstiges Bohrverfahren einsetzbar (hydraulisches Imlochhammer-
Bohrverfahren)**

Auswirkungen auf die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden



- konventionelle Heizsysteme (Radiatoren mit höheren Vorlauf-temperaturen als Flächenelemente) können weiter genutzt werden

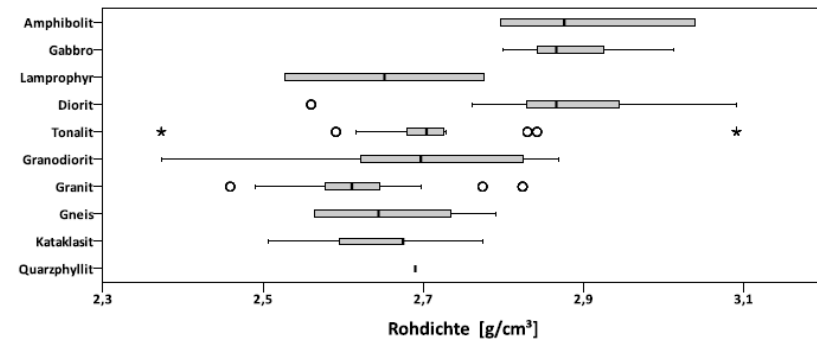
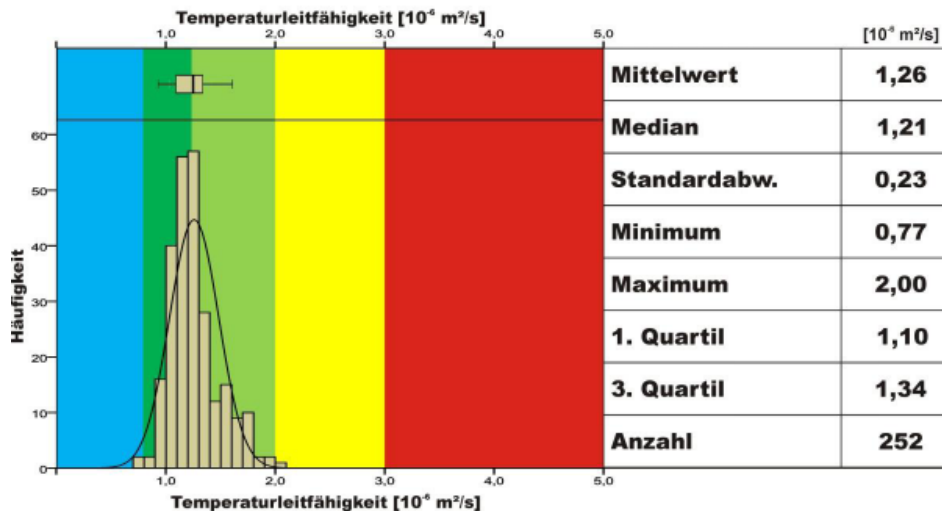
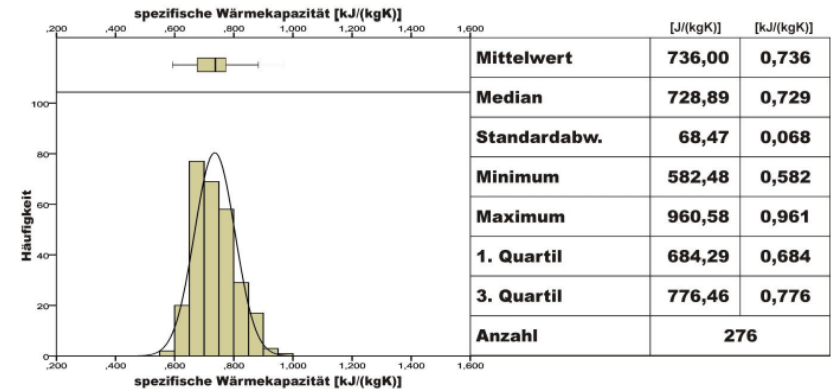
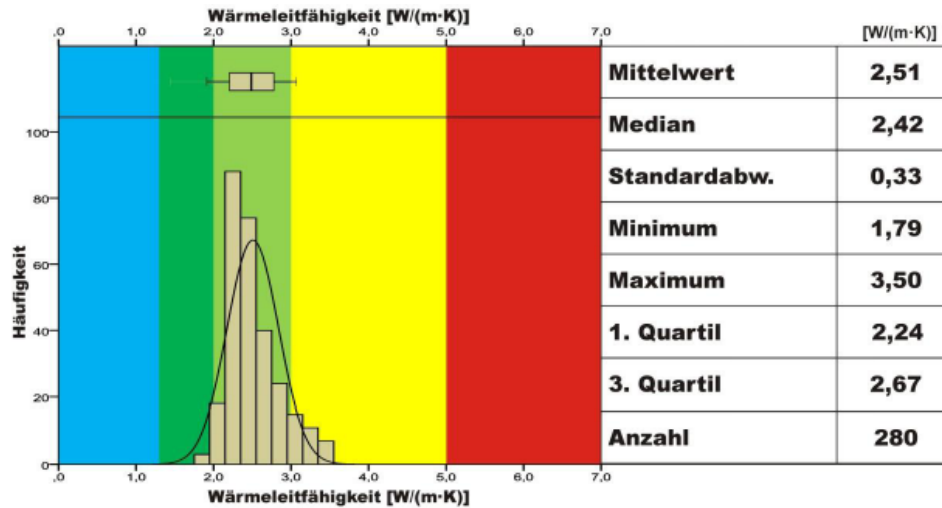


- Einsparung von Sanierungskosten
- Bestehende Nah-/Fernwärmenetze können gespeist werden
- Einspeisung ins Wärmenetz oder direkte Gebäudeversorgung möglich
- Bei direkter Gebäudeversorgung ist eine energetische Sanierung des Bestandes Voraussetzung

Gesteinskennwerte der Mitteldeutschen Kristallinschwelle

Gesteinsarten	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	n	Temperaturleitfähigkeit [10^{-6} m ² /s]	n	Spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]	n
Amphibolit	1,88 ± 0,21	24	0,81 ± 0,14	24	813 ± 92	24
Gabbro	2,10 ± 0,19	218	1,01 ± 0,09	120	764 ± 53	120
Diorit	2,23 ± 0,18	152	1,03 ± 0,10	152	760 ± 59	152
Tonalit	2,36 ± 0,17	130	1,14 ± 0,13	130	770 ± 67	130
Granodiorit	2,51 ± 0,33	280	1,26 ± 0,22	252	736 ± 68	276
Granit	2,58 ± 0,38	185	1,33 ± 0,25	182	753 ± 98	182
Gneis	2,59 ± 0,25	113	1,33 ± 0,24	88	762 ± 106	25
GESAMT		1.102		948		909

Geothermische Kennwerte: Granodiorit

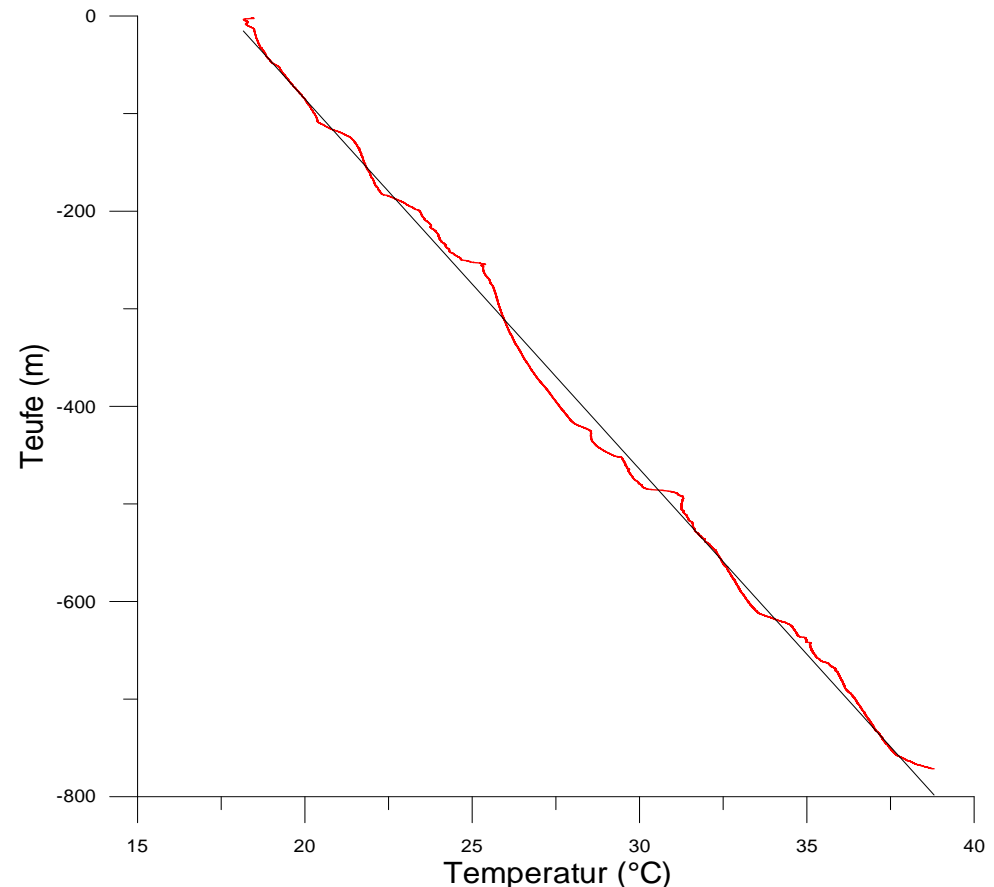


- **Grundgebirge: Fluidtransport erfolgt in der Regel entlang des Trennflächengefüges bzw. größerer Störungszonen (Stober & Bucher 2007).**
- **Für die Abschätzung der Ergiebigkeit sind Kenntnisse des Trennflächengefüges, die Lage und Ausbildung größerer Störungszonen sowie durch hydraulische Tests ermittelte Gebirgspermeabilitäten von großer Bedeutung.**
- **Korrelation mit anderen Bohrungen, die das Grundgebirge erschließen:**
 - **Bohrung Urach 3 Gneisgebirge: Durchlässigkeit von $k_f = 1,32 \cdot 10^{-8}$ m/s ermittelt.**
 - **KTB-VB Metabasite (Amphibolit, Metagabbro): Durchlässigkeit $k_f = 4,07 \cdot 10^{-6}$ m/s.**
 - **Für die durchflusswirksamen Hohlraumgehalte wurde $n = 0,5$ % (Urach 3) und $n = 0,7$ % (KTB-VB) berechnet (Stober 1995, Tenzer 1997, Stober & Bucher 2000, 2005, 2007).**
 - **Heubach-Bohrung**
- **Korrelation mit Aufschlussanalogstudien und abgeleiteten Prognosewerten und Pumptests aus Erschließungsbohrungen des Hochtemperaturspeichers**

Geothermischer Gradient

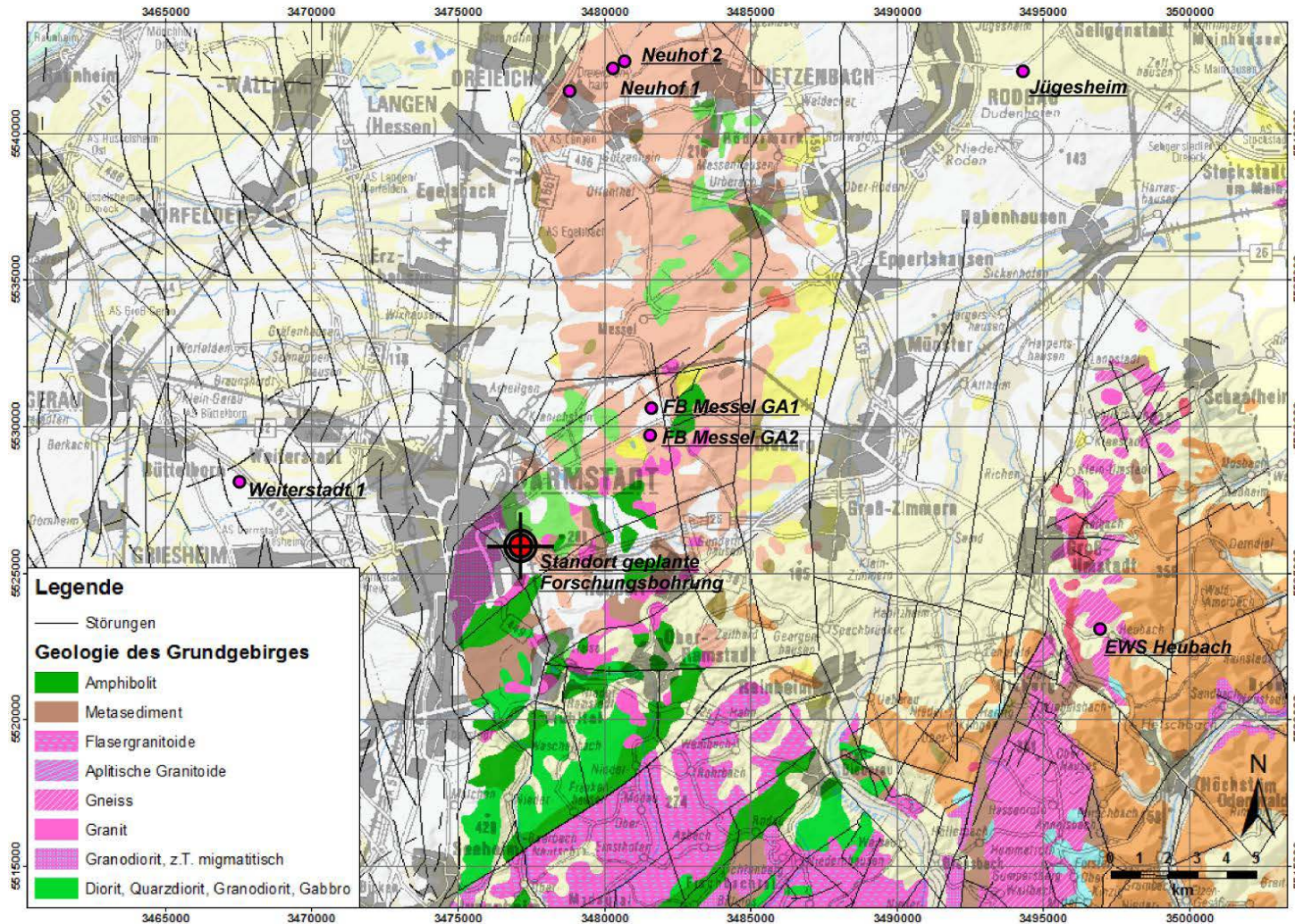
- Kann zwischen 2,6 und 3,7 °C/100m liegen, abhängig von Nähe und Lage zum Grabenrandstörungssystem
- Geothermischer Gradient hat großen Einfluss auf Temperaturfeld
- Es wird am Vorhabenstandort derzeit versucht über Temperaturlogs in Grundwassermessstellen den geothermischen Gradient abzuschätzen
- Bestimmung des Gradienten in Bohrungen des Hochtemperaturspeichers

Temperaturlog aus EWS-Bohrung Heubach (gestört)



H. Anger's Söhne Bohr- und Brunnenbaugesellschaft mbH, 2012

Lage des geplanten Hochtemperaturspeichers



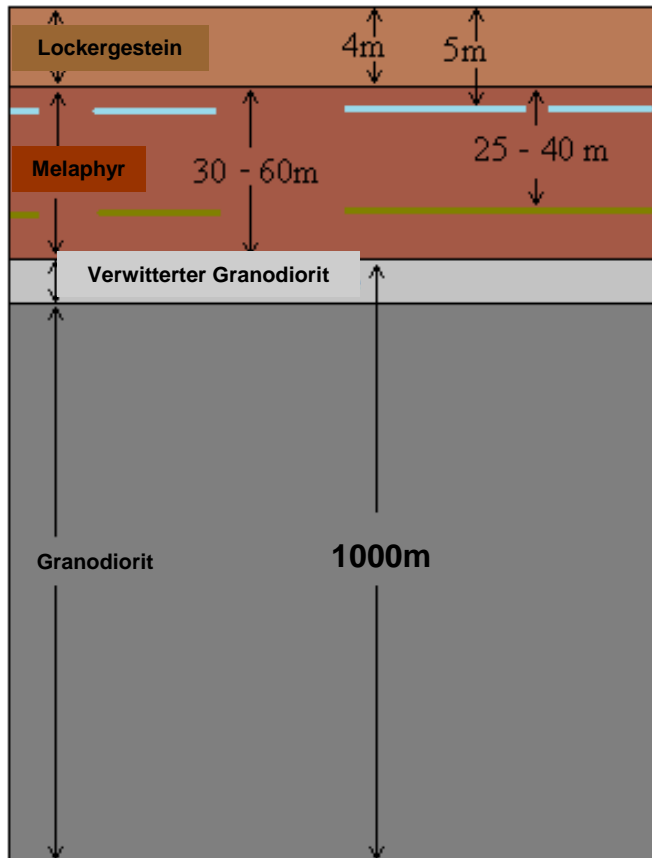
- Lageplan des geplanten Hochtemperaturspeichers inklusive Angabe der Lokation der bestehenden Bohrungen ins kristalline Grundgebirge

Strukturgeologie am Bohrstandort

- Darmstadt liegt auf der östlichen Randverwerfung des Oberrheingrabens.
- Die Rheingrabenrandverwerfung unterteilt das Stadtgebiet geologisch und hydrogeologisch in einen Bereich mit kristallinen und permischen Kluftgrundwasserleitern des Odenwaldes und Sprendlinger Horstes im E und ein Gebiet mit den quartären Porengrundwasserleitern des Oberrheingrabens im W.
- Die steilstehende Rheingrabenrandverwerfung quert das Stadtgebiet etwa in N-S-Richtung und markiert einen Versatz der Gesteinsschichten von über 2.000 m
- Insbesondere im Innenstadtbereich, wo die Störung in NE-SW-Richtung umschwenkt, ist ein kompliziertes Schollenmosaik ausgebildet (Fahlbusch 1970, Hoppe & Lang 2007).
- Das Odenwaldkristallin besteht im Stadtgebiet hauptsächlich aus Granodiorit, außerdem treten Amphibolit, Gneise, Granit, Diorit, Gabbro, Kalksilikatfels und Hornfels auf (Klemm 1938, Nickel 1985).
- Die meist NE-SW streichenden Einheiten sind von jüngeren basischen und sauren Ganggesteinen sowie Barytgängen durchzogen (Chelius 1890, Klemm 1938).

Standortbedingungen

Lithologie

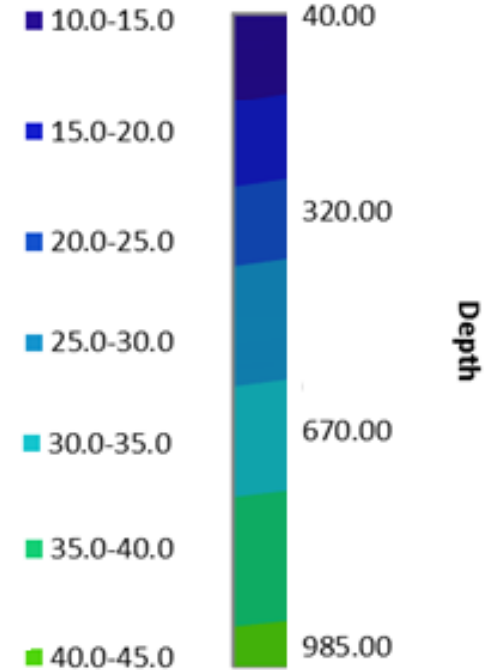


Bei einem angenommenen geothermischen Gradienten von $3^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$ ergeben sich Temperaturen von

- 12°C in 40 m
- 41°C in 1000 m

Der tatsächliche Gradient ist jedoch noch unbekannt.

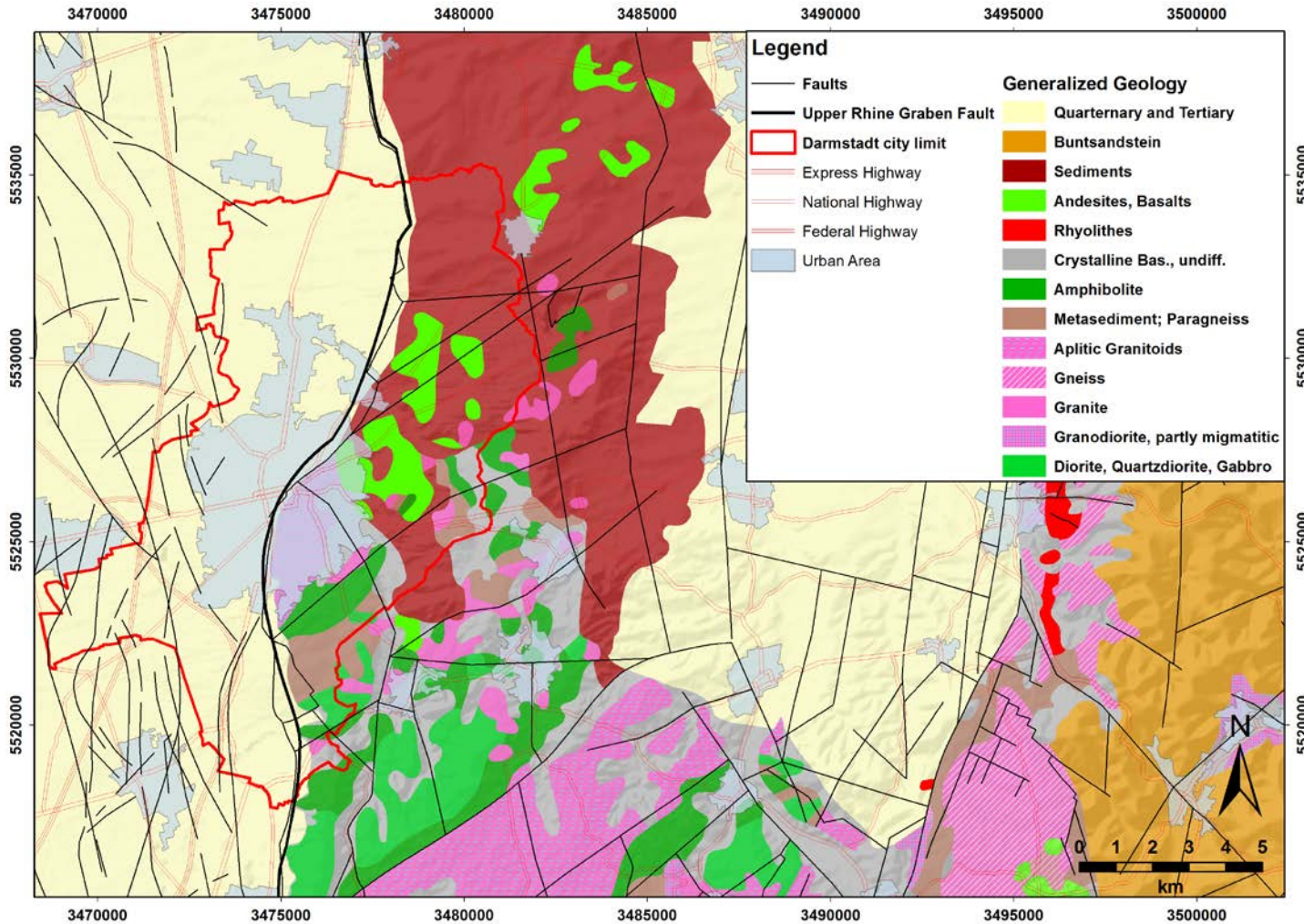
Temperaturverteilung



Geologie am Vorhabensstandort

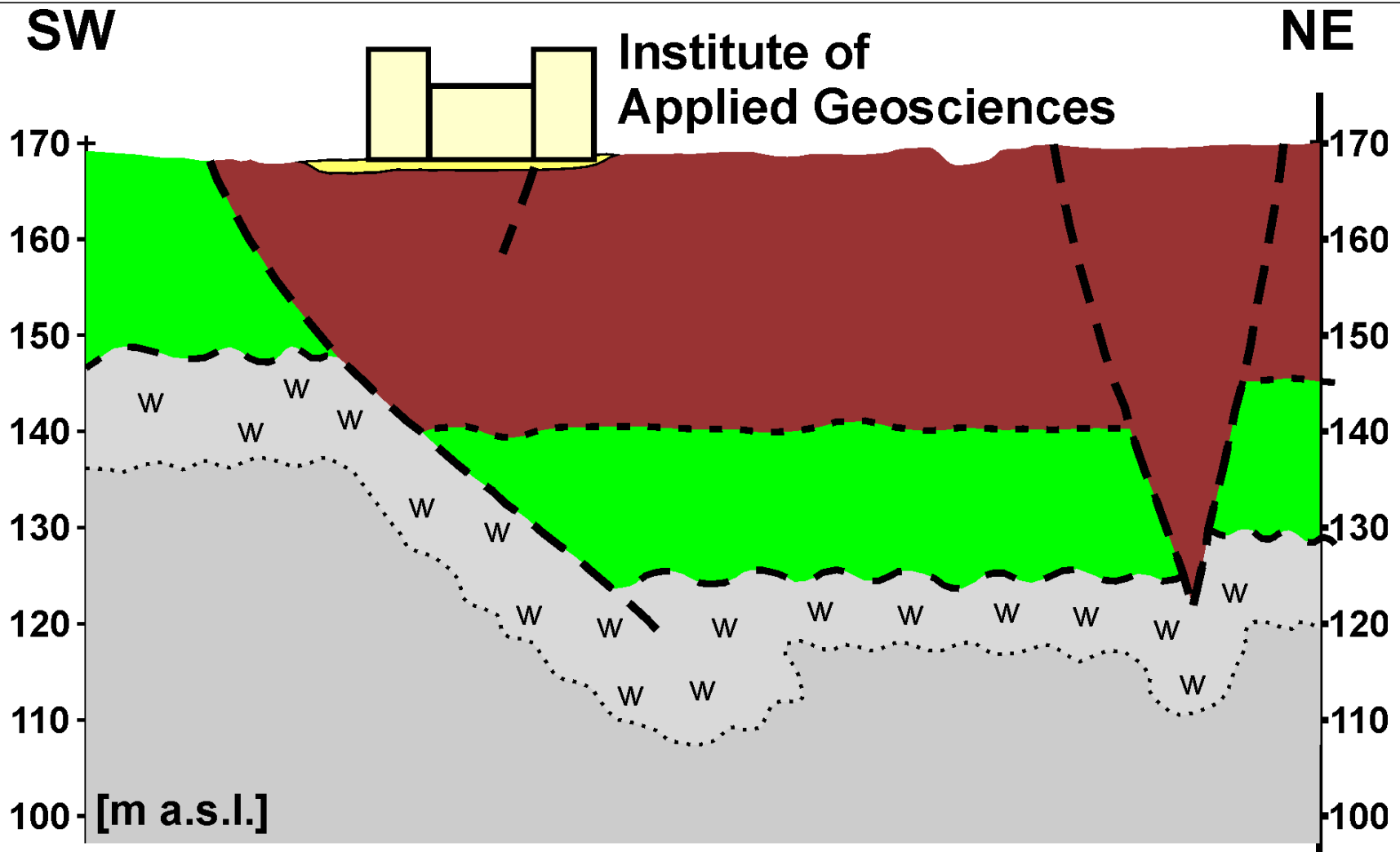


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

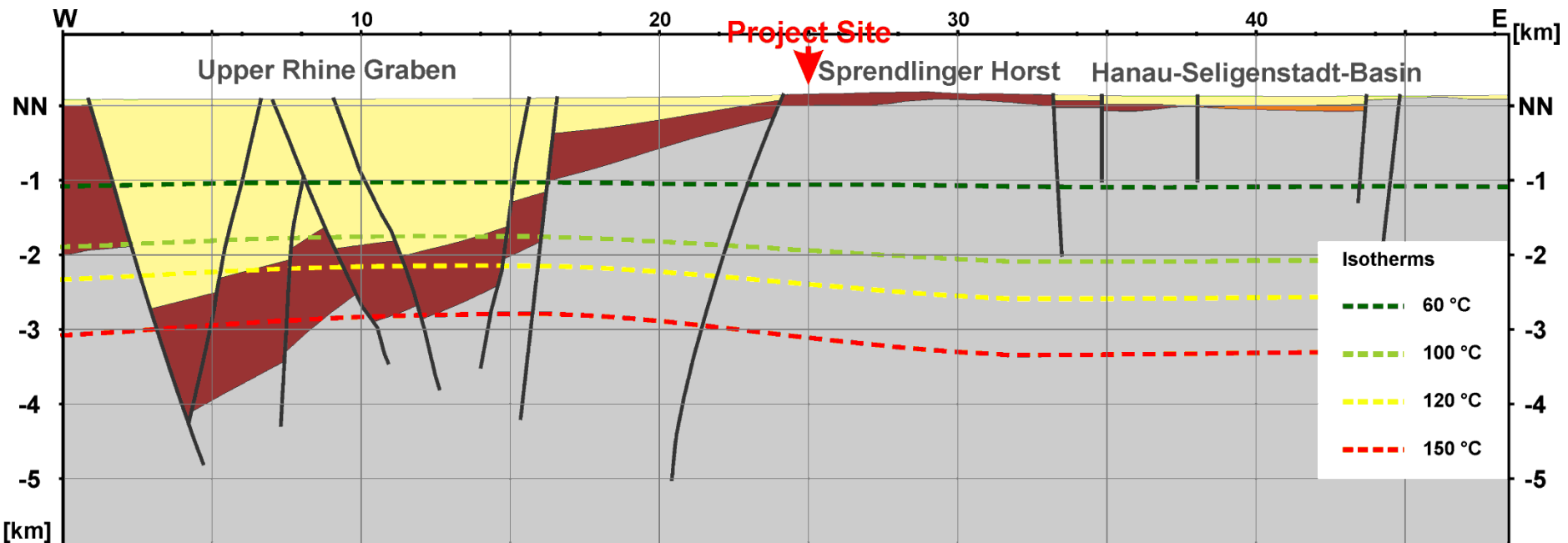


Geologischer Profilschnitt

Institut für Angewandte Geowissenschaften



Geologischer Profilschnitt nördlicher Oberrheingraben



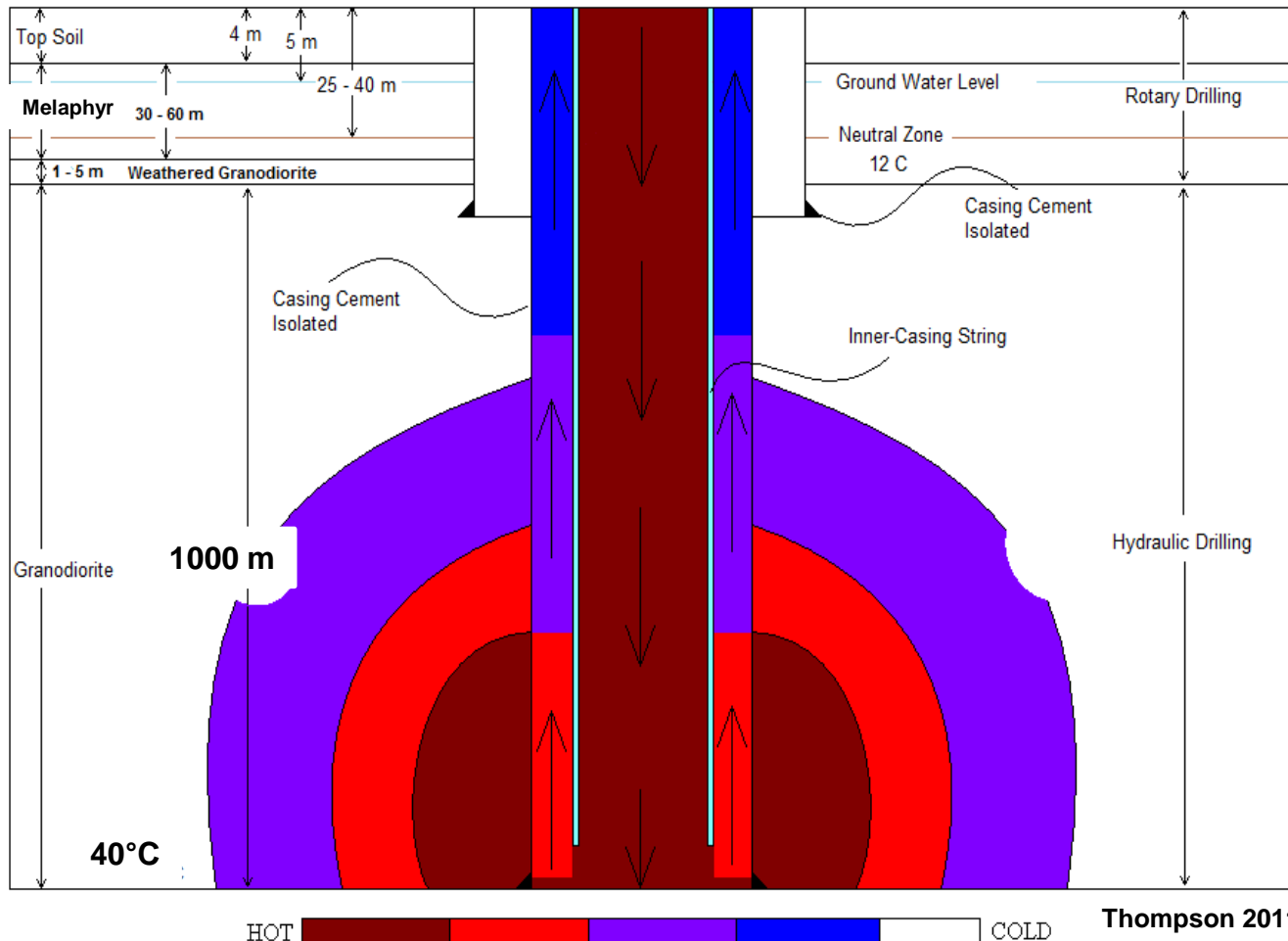
Welche Untersuchungen liefern wichtig Eingangsdaten für Dimensionierung und Modellierung des Speichers und petrothermaler Systeme



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Für belastbare Prognosen zur Dimensionierung und Betrieb eines thermischen Speichers ist eine gute Kenntnis des geologischen Aufbaus des ausgewählten Speichergesteins, der petrophysikalischen Eigenschaften sowie der geometrischen und hydraulischen Eigenschaften des Kluftnetzwerkes notwendig.
→ direkter Aufschluss (Analog und Bohrungen zur Herstellung des Hochtemperaturspeichers)
- Die projektierte Lage des Bohrstandortes gewährleistet die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf den tieferen Untergrund im Bereich des nördlichen Oberrheingrabens zwischen Heidelberg im Süden bis Frankfurt a. M. im Norden sowie bis ins Pfälzer Bergland im Westen und den kristallinen Odenwald im Osten und somit auf einen großen Teil der Mitteldeutschen Kristallinschwelle.
→ integrierende geophysikalische Untersuchungen
- Die unmittelbare Nähe zur Rheingrabenrandverwerfung mit einem vergleichbaren Trennflächensystem wie im nördlichen Oberrheingraben lässt Aussagen über den Spannungszustand sowie die Stimulierbarkeit des Grundgebirges zu.
→ Bohrlochtests

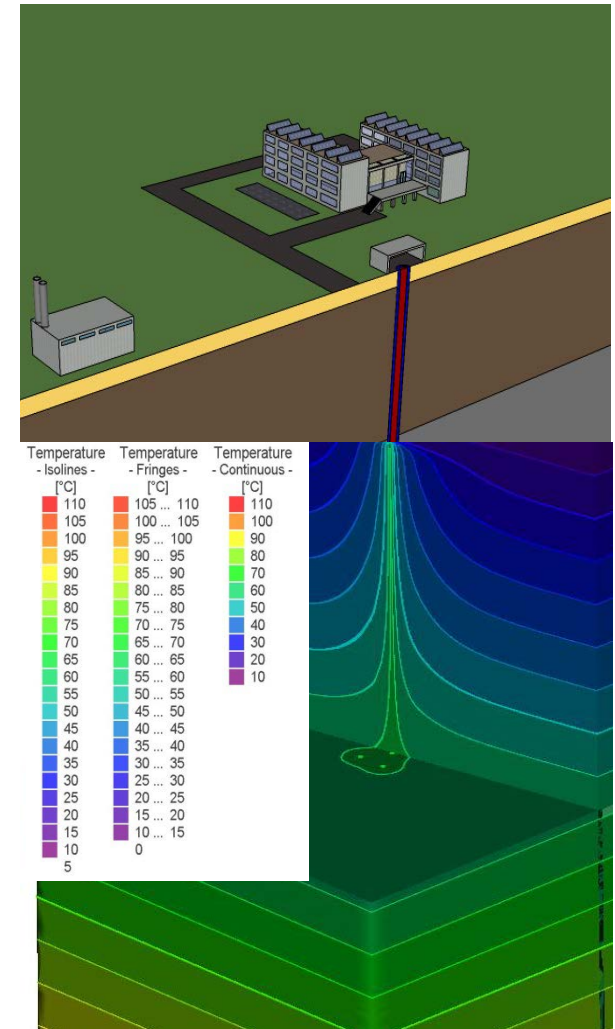
Halbanalytische Vorbemessung: Einspeicherung



- **Einspeise-
temperatur: 70-110°C**
- **Bohrtiefe: 1000 m**
- **3 Bohrungen**
- **Thermische
Isolierung: ca. 100 m**
- **Koaxialsonde**

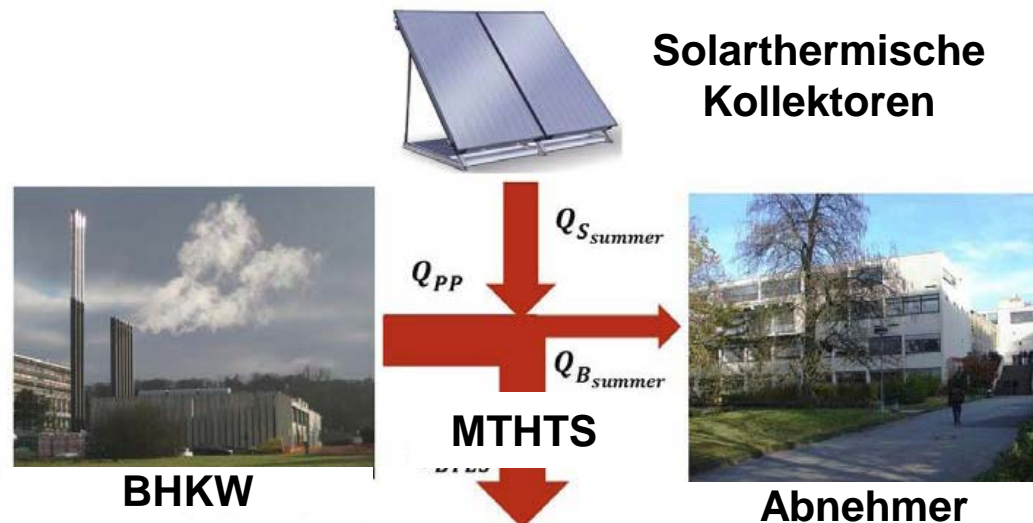
Mitteltiefe Hochtemperaturspeicherung

- Wenige mitteltiefe Bohrungen (500 – 1500 m)
- Hohe Vorlauftemperaturen von 70 - 110°C
- Mit Bohrtiefen von mehr als 1000 m werden höhere Unter-grundtemperaturen erreicht und somit die Temperatur-differenz zwischen Reservoir und Vorlauftemperatur verringert. Dadurch ist mit geringeren Wärmeverlusten im Gegensatz zu oberflächennahen Speichern zu rechnen.
- Hohe Speicherrücklauftemperaturen zum Betrieb konventioneller Heizsysteme werden erreicht (45-65°C)
- Ein Einsatz von Wärmepumpen ist nicht nötig. Dies erhöht die Effizienz und verringert den Primärenergieverbrauch
- Energetische Optimierung bestehender Infrastruktur
- Kostengünstige Bohrtechnik kann eingesetzt werden (down the hole (DTH) fluid hammer)



Gekoppelte Systeme

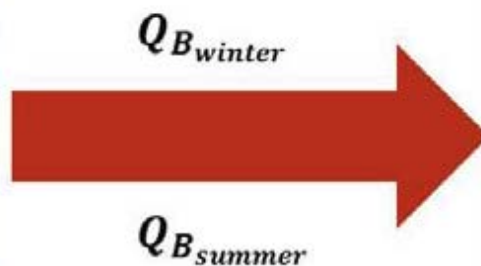
- Eine sinnvolle Kopplung verschiedener erneuerbarer Energien zur Heizwärmeversorgung bestehender Gebäudekomplexe ist i.d.R. nur über Speichersysteme möglich.
- Dies trifft im speziellen auf Technologien zu, die von wetter- und klimabedingten saisonalen Änderungen abhängig sind.
- Die Kopplung geothermischer Potenziale mit industrieller Abwärme oder Prozesswärme garantiert die Wärmegrundlastversorgung.
- Die Kopplung mit Blockheizkraftwerken (BHKW) erlaubt deren stromgeführten Betrieb im Sommer.



Szenario 1: BHKW / Abnehmer



BHKW

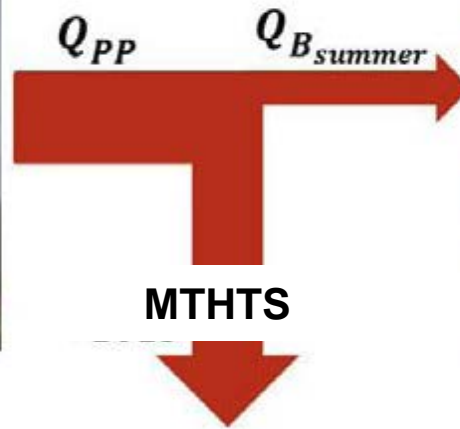


Abnehmer

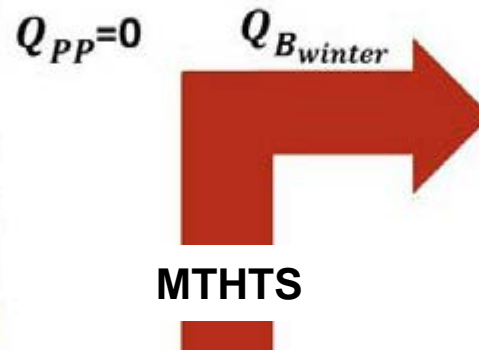
Szenario 2 : BHKW / MTHTS / Abnehmer



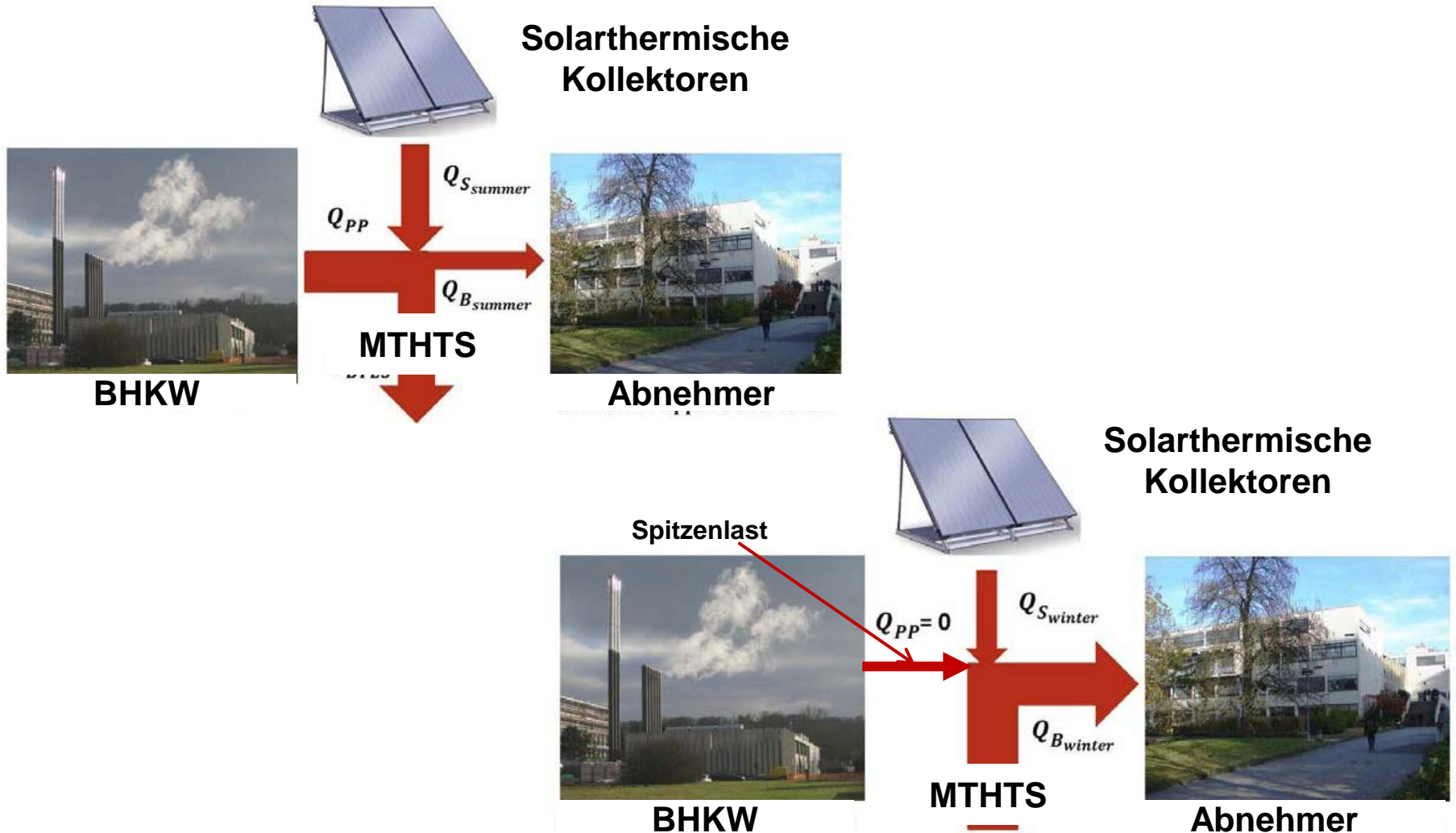
BHKW



Abnehmer



Szenario 3: BHKW + Solarthermie / MTHTS / Abnehmer

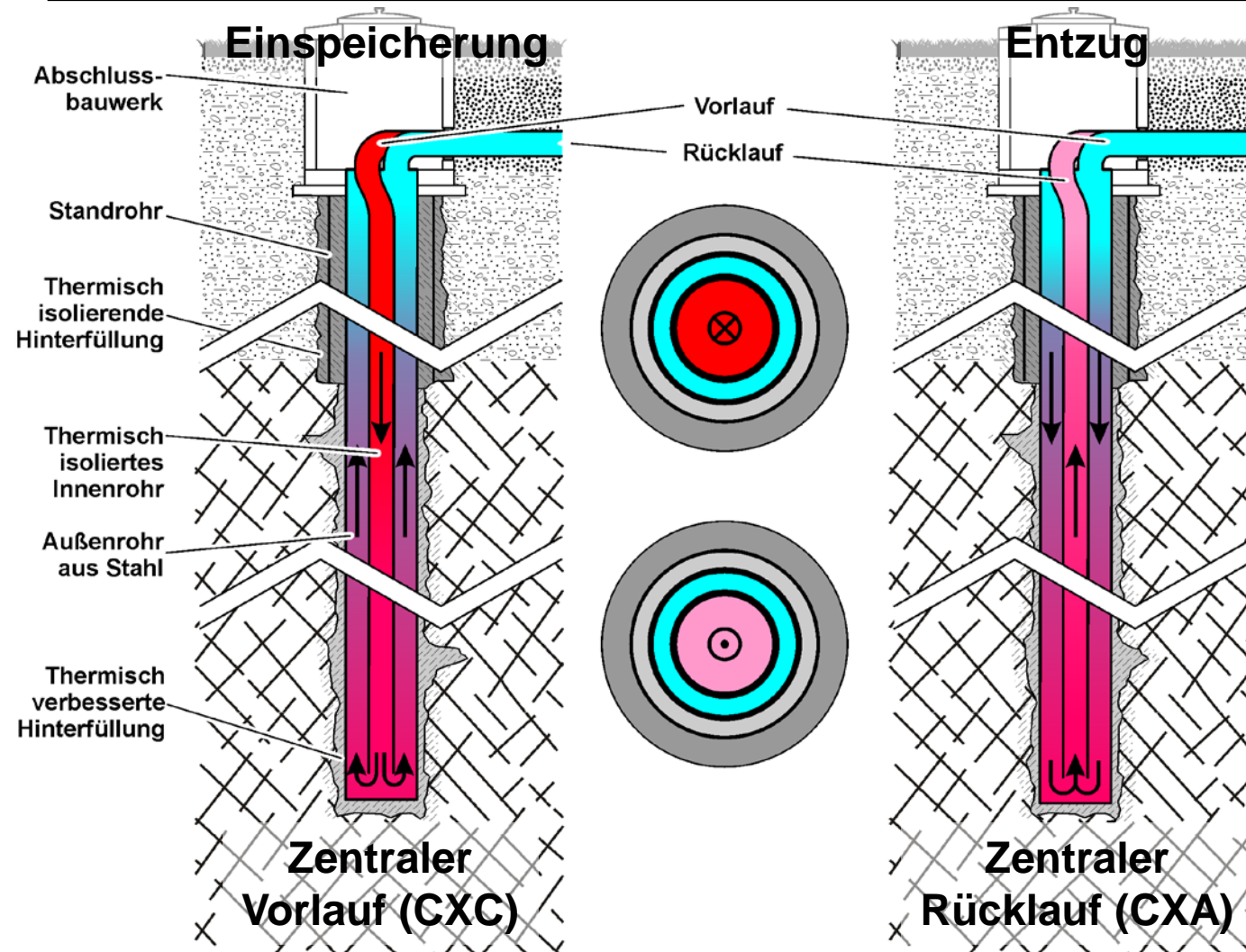


Sollen darüber hinaus gehende Szenarien betrachtet werden?

- Einbindung der ETA-Fabrik als Wärmequelle (?)
- Einbindung des Hochleistungsrechners am Standort Lichtwiese (?)

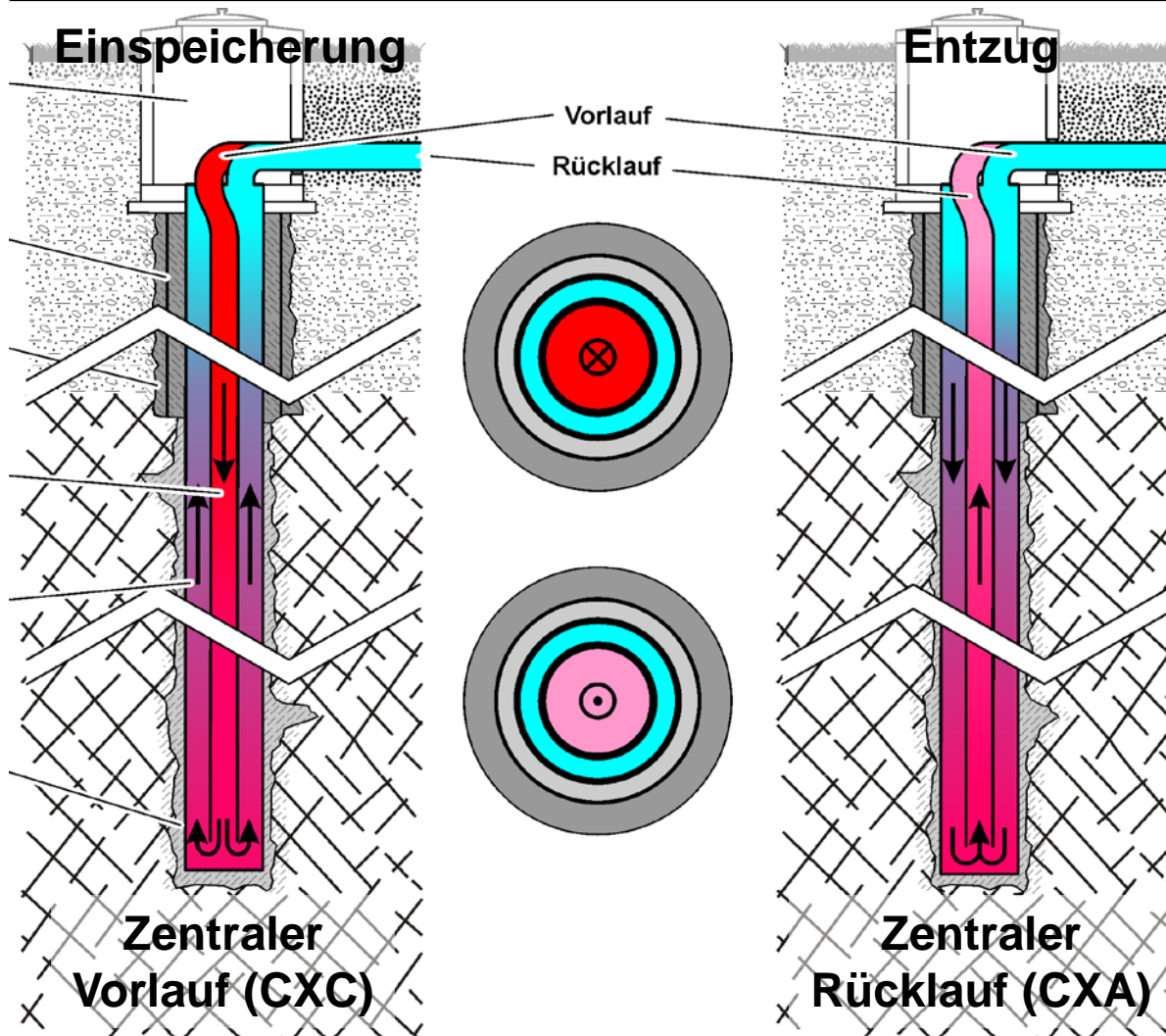


System Design

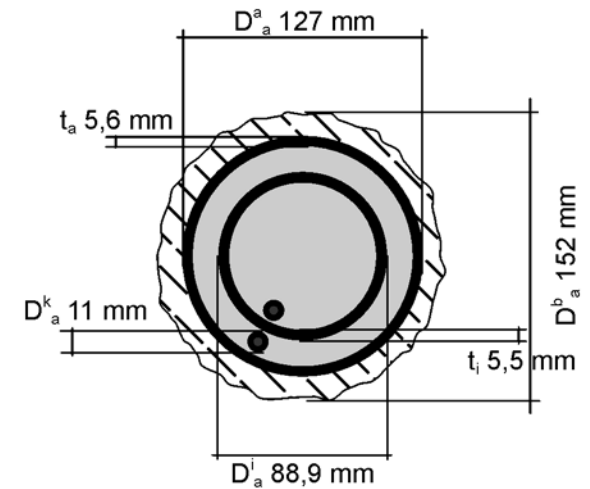


- Koaxiale EWS
- Vorlauftemperatur: 70 - 110°C
- Rücklauftemperatur : 55 - 65°C
- 3 Bohrungen
- Bohrtiefe: 500 - 1500 m
- Lithologie: Granodiorit
- Thermische Isolation: ca. oberste 100 m

System Design

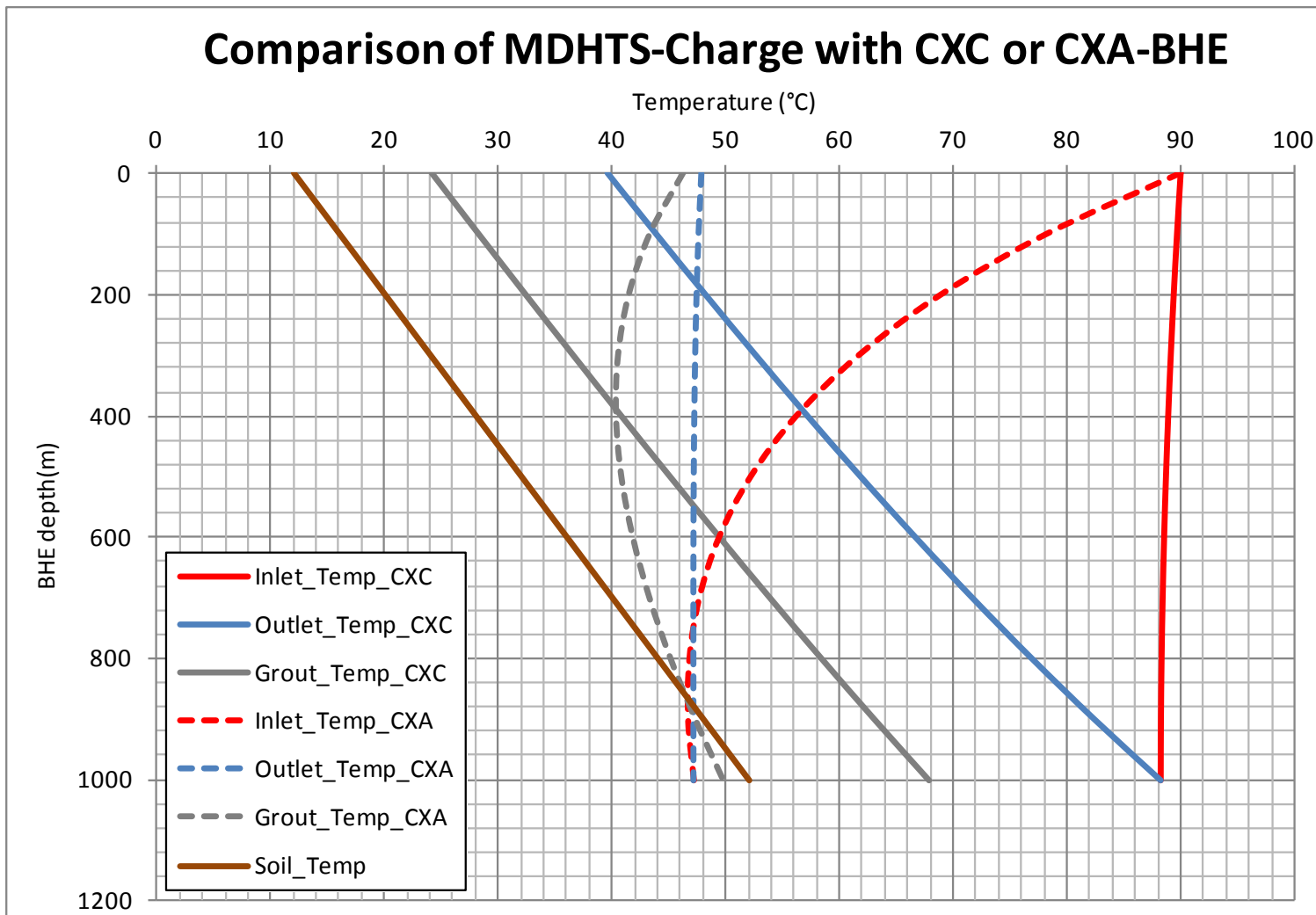


Dimensionierung:

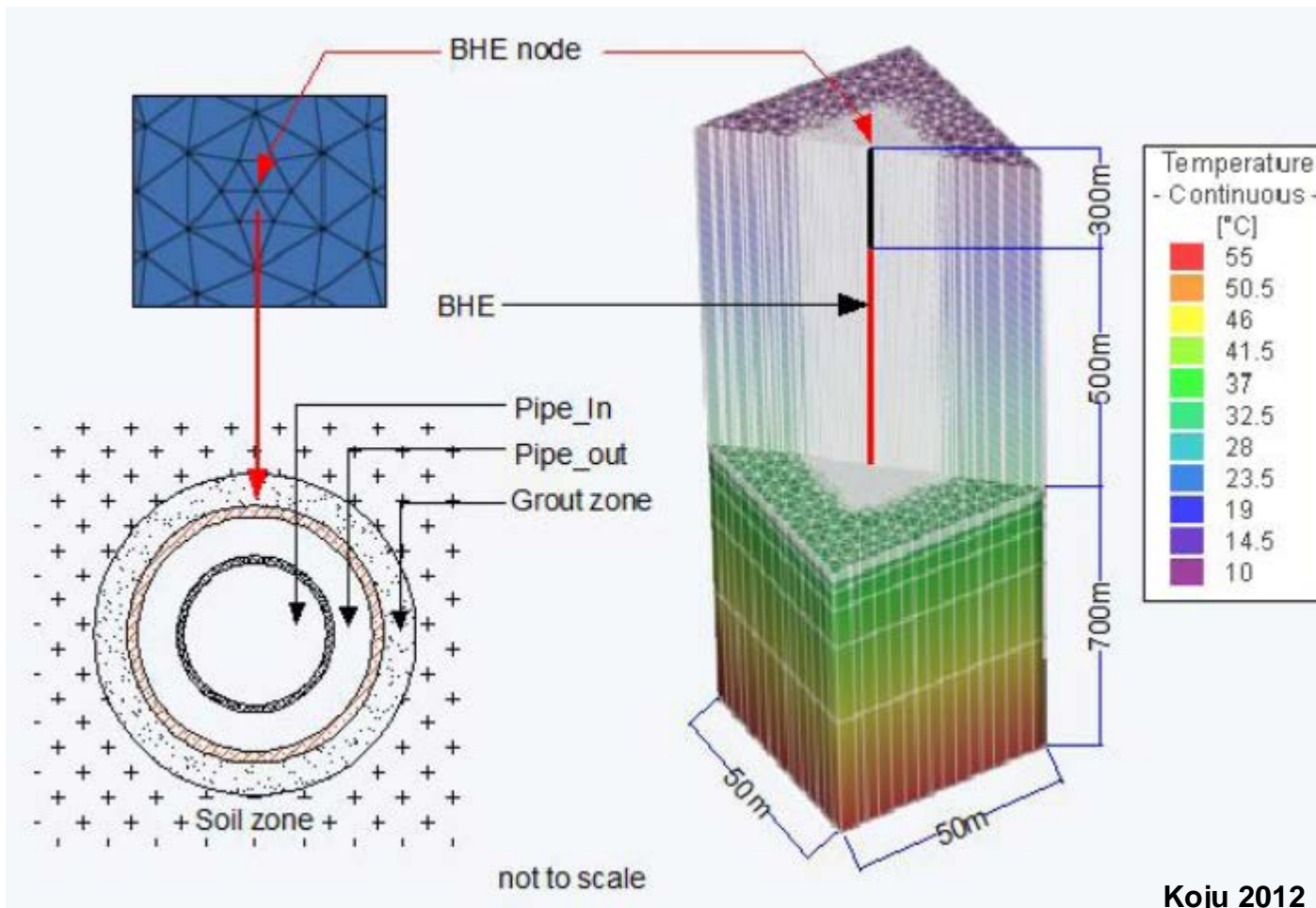


Fließrate	17 l/s
Vorlauftemp.	90 °C
WLF Außenrohr	54 W/m·K
WLF Innenrohr	0,05 W/m·K
WLF Zement	1,73 W/m·K
WLF Gestein	2,6 W/m·K

Beladung mit CXC-EWS vs. CXA-EWS

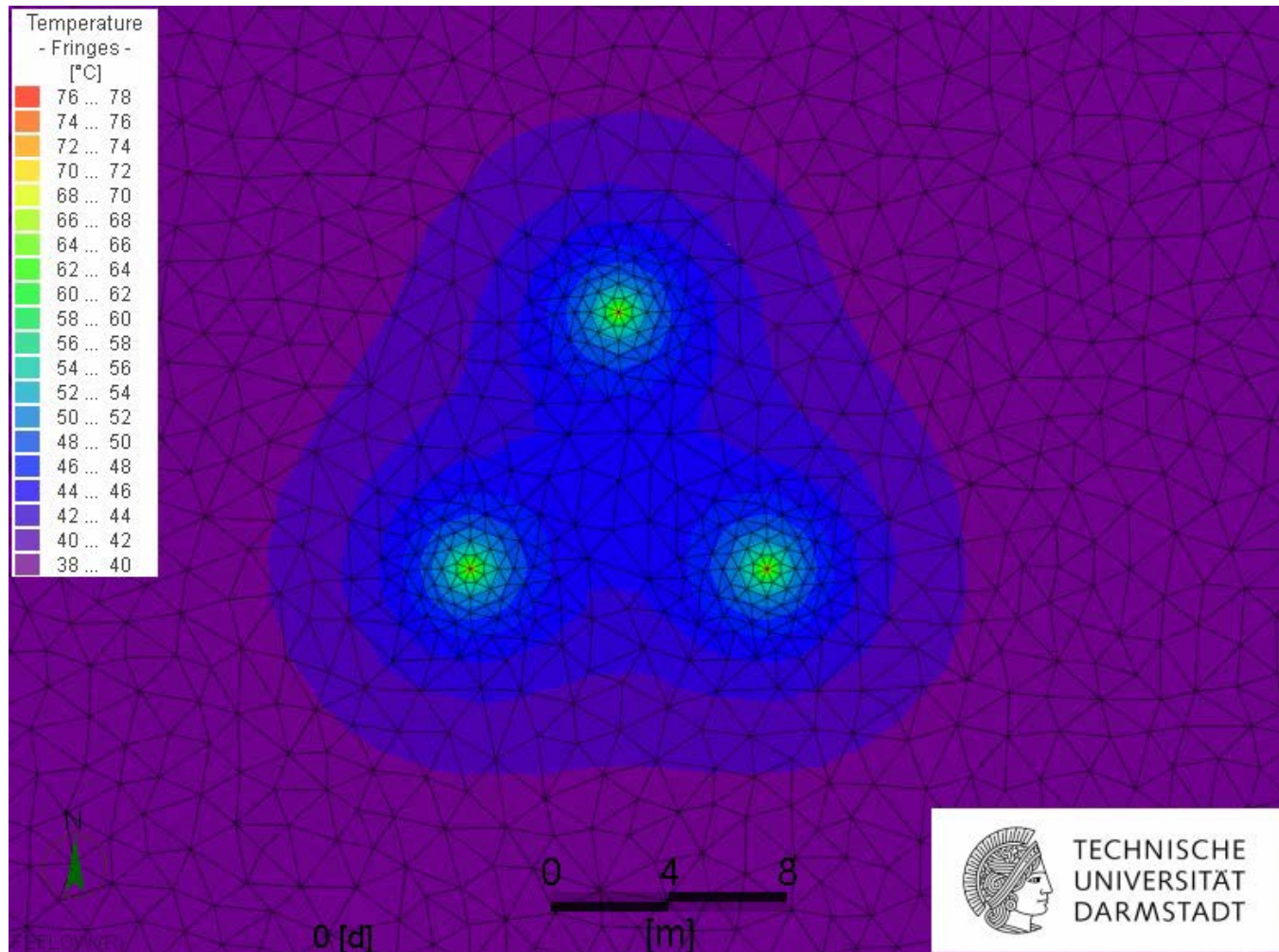


Aufbau eines ersten numerischen 3D-Modells

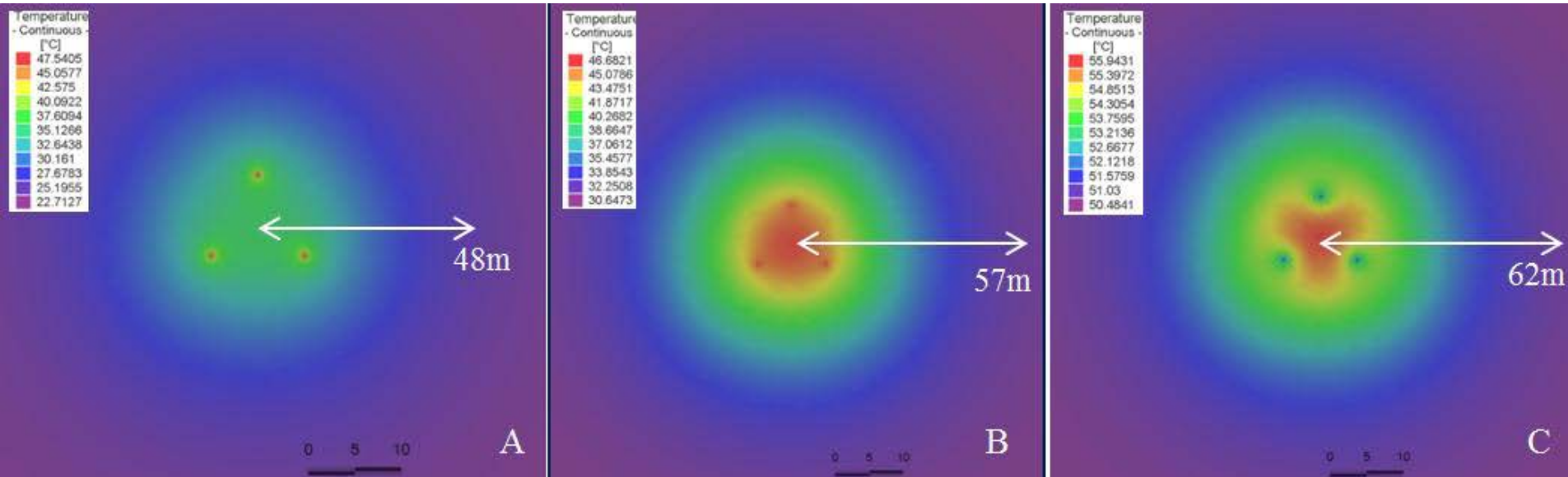


- **Simulation des Speichers über eine Betriebsdauer von 10 Jahren**
- **Boxmodell für 3 Sonden a 1000 m**

Simulation der Temperatur in 950 m Tiefe nach 10 Jahren Speicherbetrieb



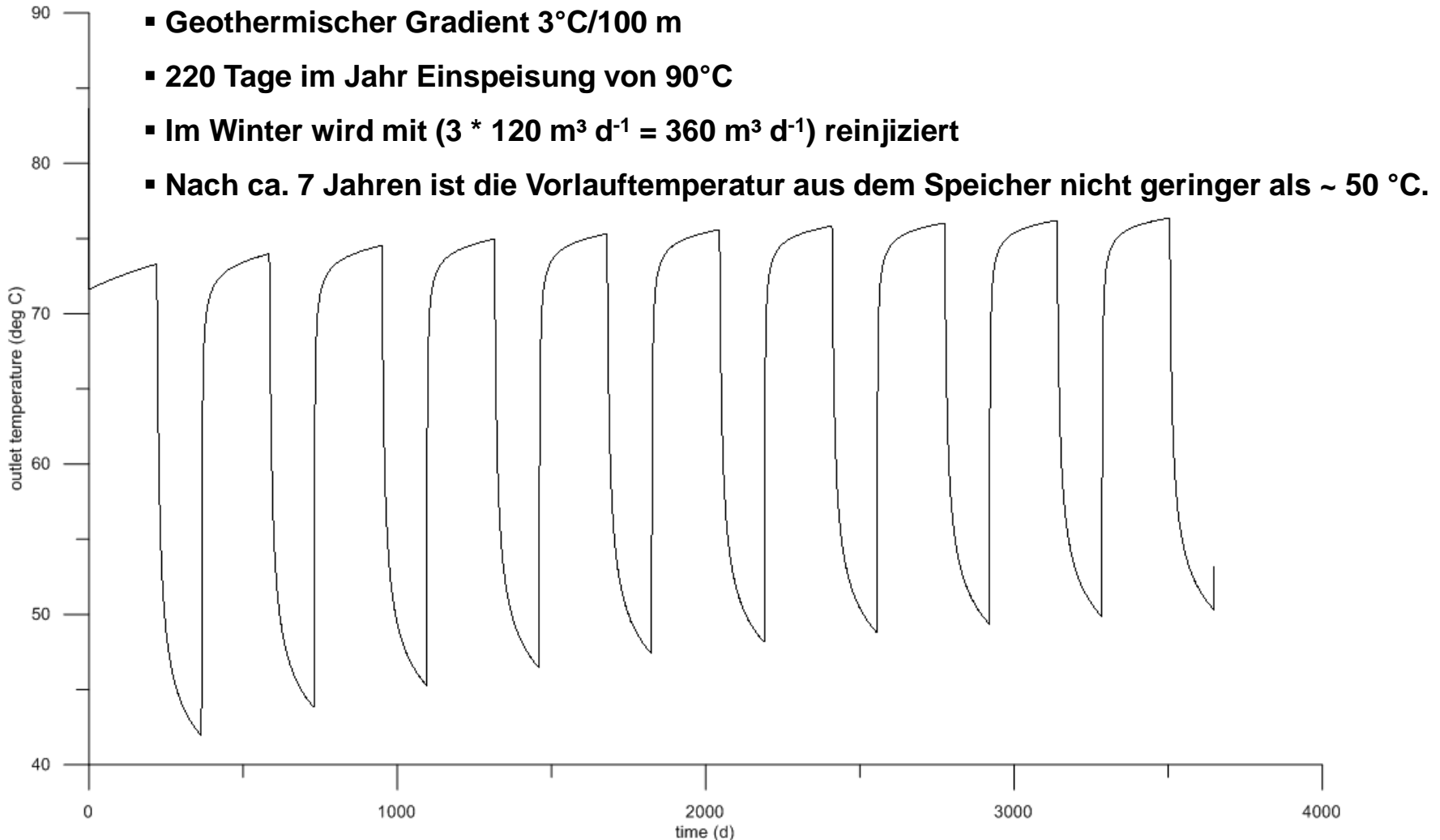
Thermische Beeinflussung des Untergrundes



Koju 2012

Nach der thermischen Be- und Entladung des Speichers mit 100 kW (8640 MJ/d) erreicht die horizontale Ausdehnung des thermischen Einflussbereiches nach 10 Jahren (A) 48 m in 300 m Tiefe, (B) 57 m in 500 m Tiefe und (C) 62 m in 1000 m Tiefe.

Temperatur Output des Speichers



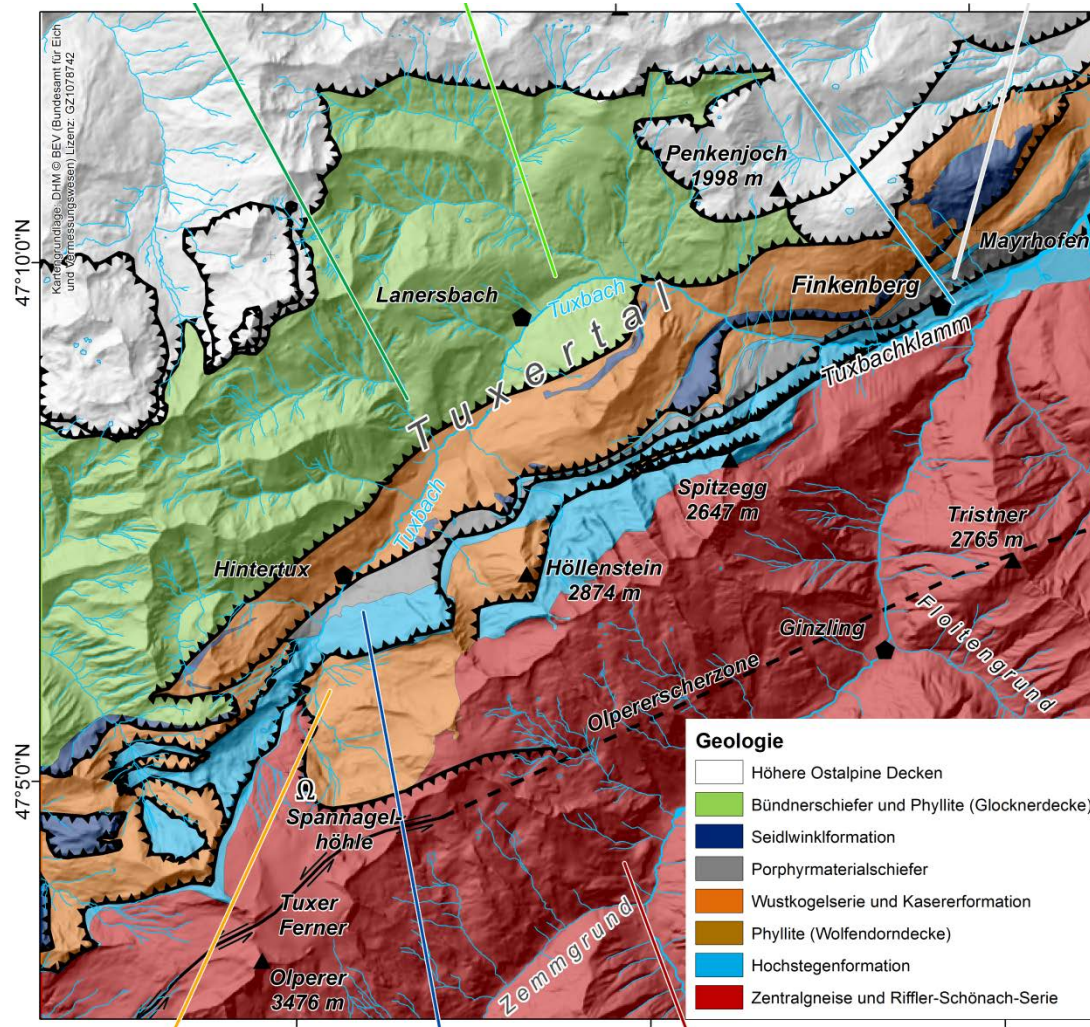
Optimierungsparameter für den Erdwärmespeicher



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

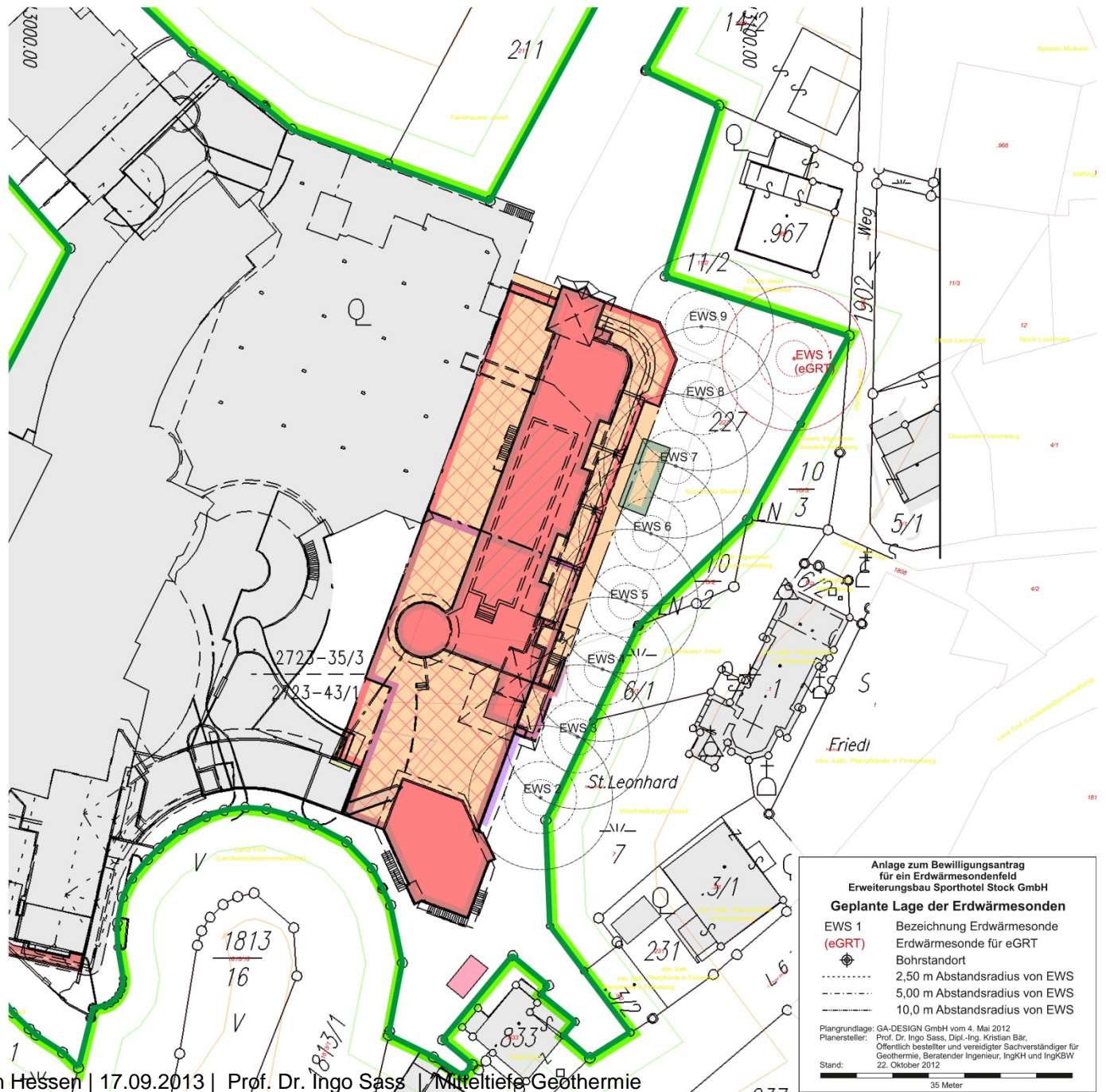
- **Fließrate in der EWS (variabel oder festgelegt?)**
- **Dimensionierung der EWS**
 - **Länge/Tiefe der EWS (Limitierung durch Bohrverfahren)**
 - **Bohrloch- und Rohrdurchmesser (Limitierung durch Bohrverfahren,-technik)**
 - **Rohrmaterialien (thermische Eigenschaften, Festigkeitseigenschaften, Kosten)**
 - **Verfüllbaustoffe**
- **Anordnung der EWS**
- **Flacher Speicher (?)**
- **Kaskadierungsoptionen (?)**
- **Weitere...**

Karst-Erdwärmespeicher, Zillertal, A



Marmore der Hochstegenserie





**Anlage zum Bewilligungsantrag
für ein Erdwärmesondenfeld
Erweiterungsbau Sporthotel Stock GmbH**

Geplante Lage der Erdwärmesonden

EWS 1	Bezeichnung Erdwärmesonde
(eGRT)	Erdwärmesonde für eGRT
⊙	Bohrstandort
⋯	2,50 m Abstandsradius von EWS
⋯	5,00 m Abstandsradius von EWS
⋯	10,0 m Abstandsradius von EWS

Plangrundlage: GA-DESIGN GmbH vom 4. Mai 2012
 Planersteller: Prof. Dr. Ingo Sass, Dipl.-Ing. Kristian Bär,
 Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für
 Geothermie, Beratender Ingenieur, IngKH und IngKBW
 Stand: 22. Oktober 2012

35 Meter

Heiz- und Kühlenergiebedarf des Hotelbauteils



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Heat Extraction / Year (Heating Demand)		Heat Injection / Year (Cooling Demand)	
Month	KWh	Month	KWh
January	138.000	January	15.000
February	130.000	February	15.000
March	120.000	March	15.000
April	84.000	April	18.000
May	73.000	May	18.000
June	22.000	June	55.000
July	22.000	July	56.000
August	22.000	August	54.000
September	38.000	September	28.000
October	76.000	October	18.000
November	105.000	November	15.000
December	138.000	December	15.000
Total Power	968.000		322.000

**Wärmepumpenleistung:
insgesamt 378 kW.**

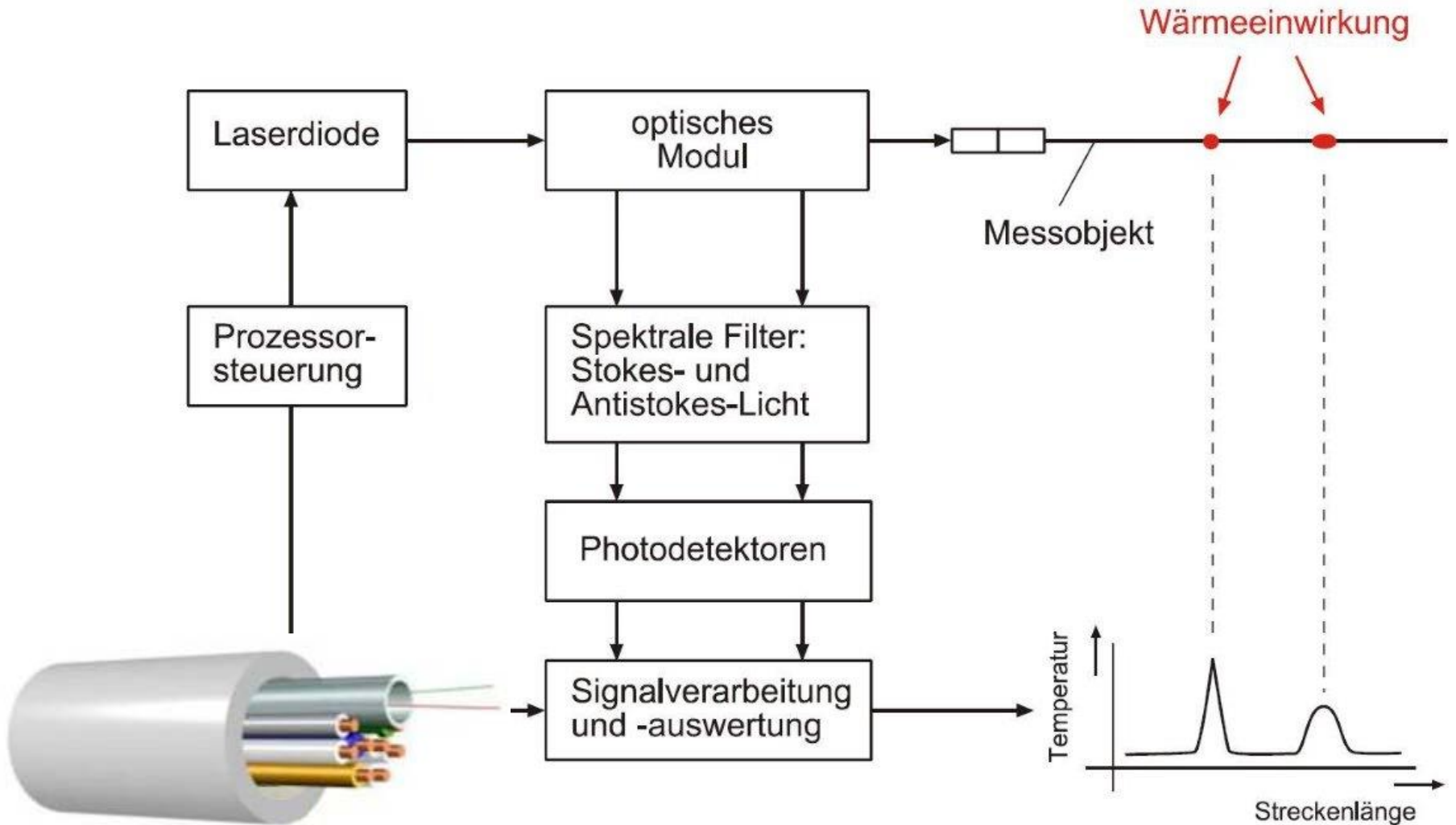




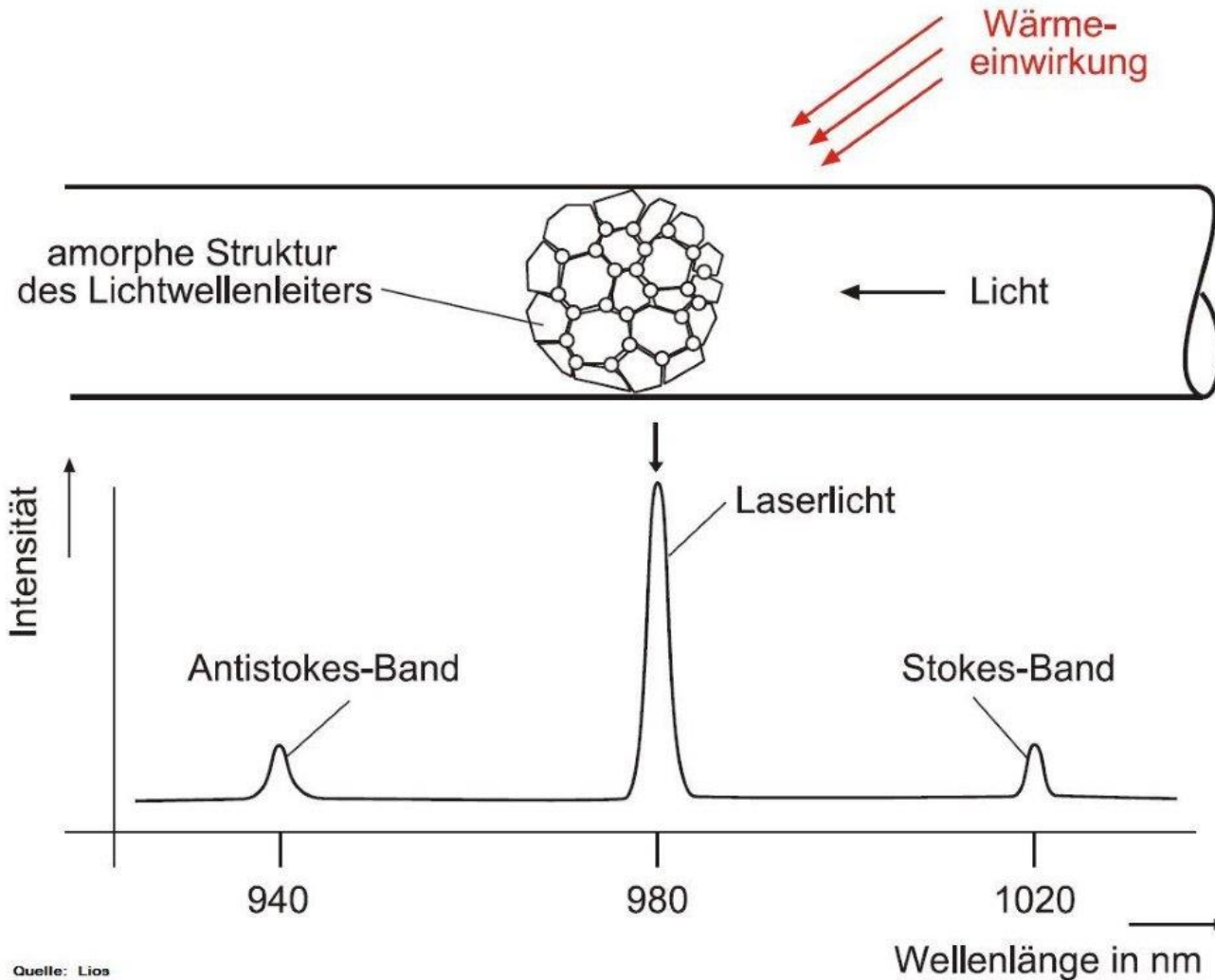




Funktionsprinzip OFDR

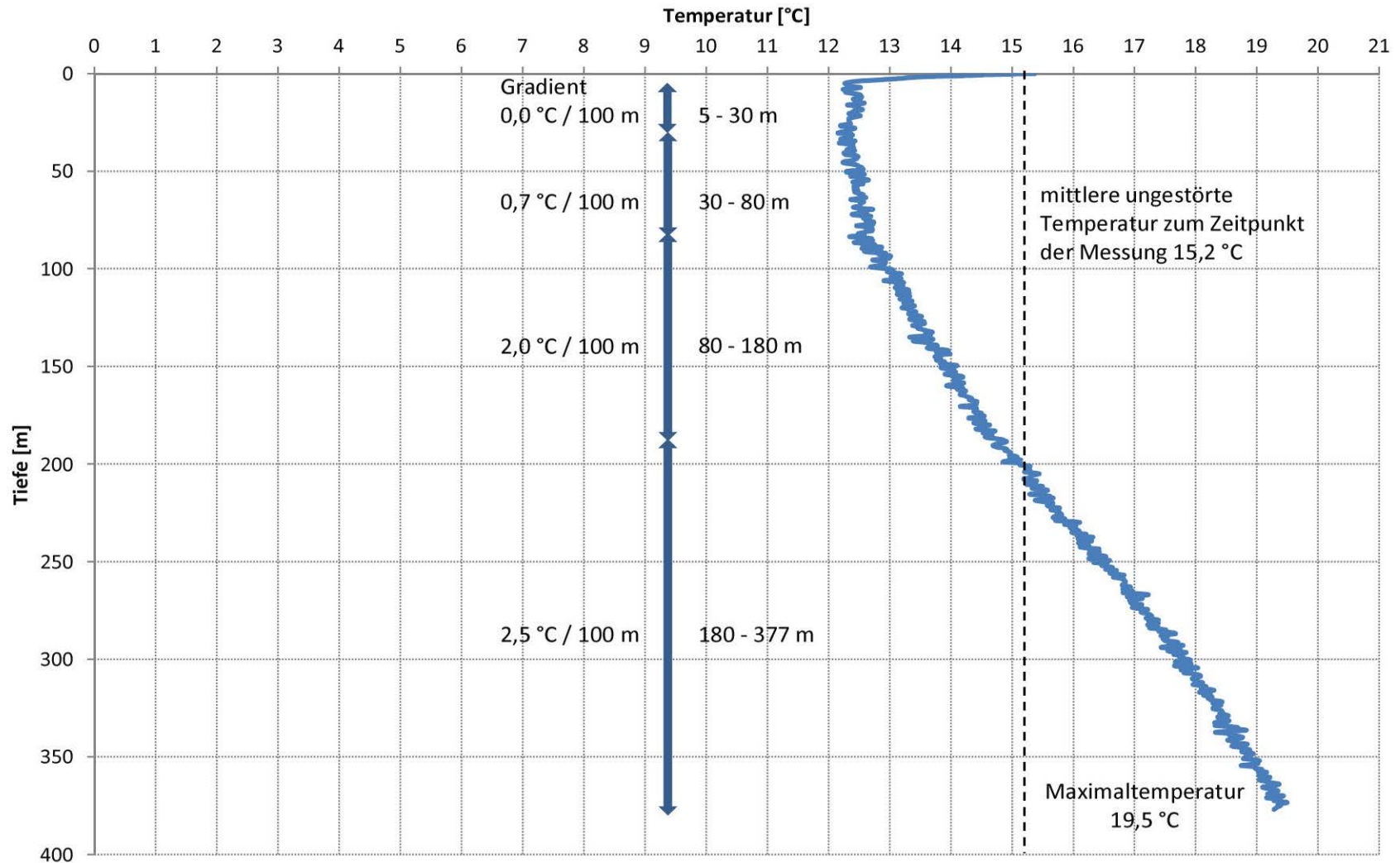


Raman-Streuung



Quelle: Lios

Ungestörter geothermischer Gradient



Pecletzahl-Analyse zur Auswertung des EGRT



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

$$P_e = \frac{\lambda_{kond+konv} - \lambda_{kond}}{\lambda_{kond}} = \frac{\lambda_{kond+konv}}{\lambda_{kond}} - 1$$

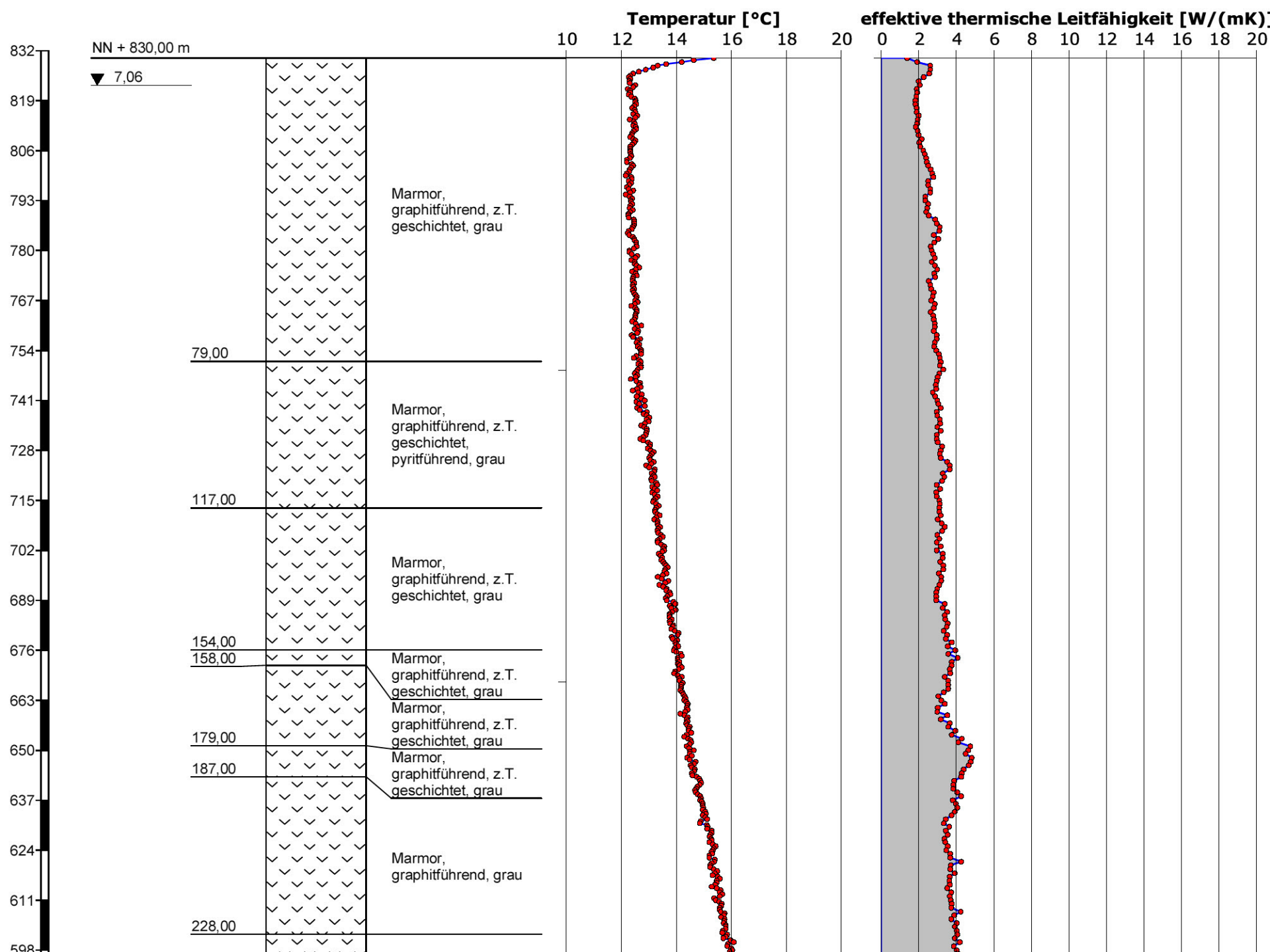
- $\lambda_{eff} = \lambda_{kond+konv} = \text{effektive thermische Leitfähigkeit [W/(mK)]}$
- $\lambda_{kond} = \text{konduktive thermische Leitfähigkeit [W/(mK)]}$
- $\lambda_{konv} = \text{konvektive thermische Leitfähigkeit [W/(mK)]}$

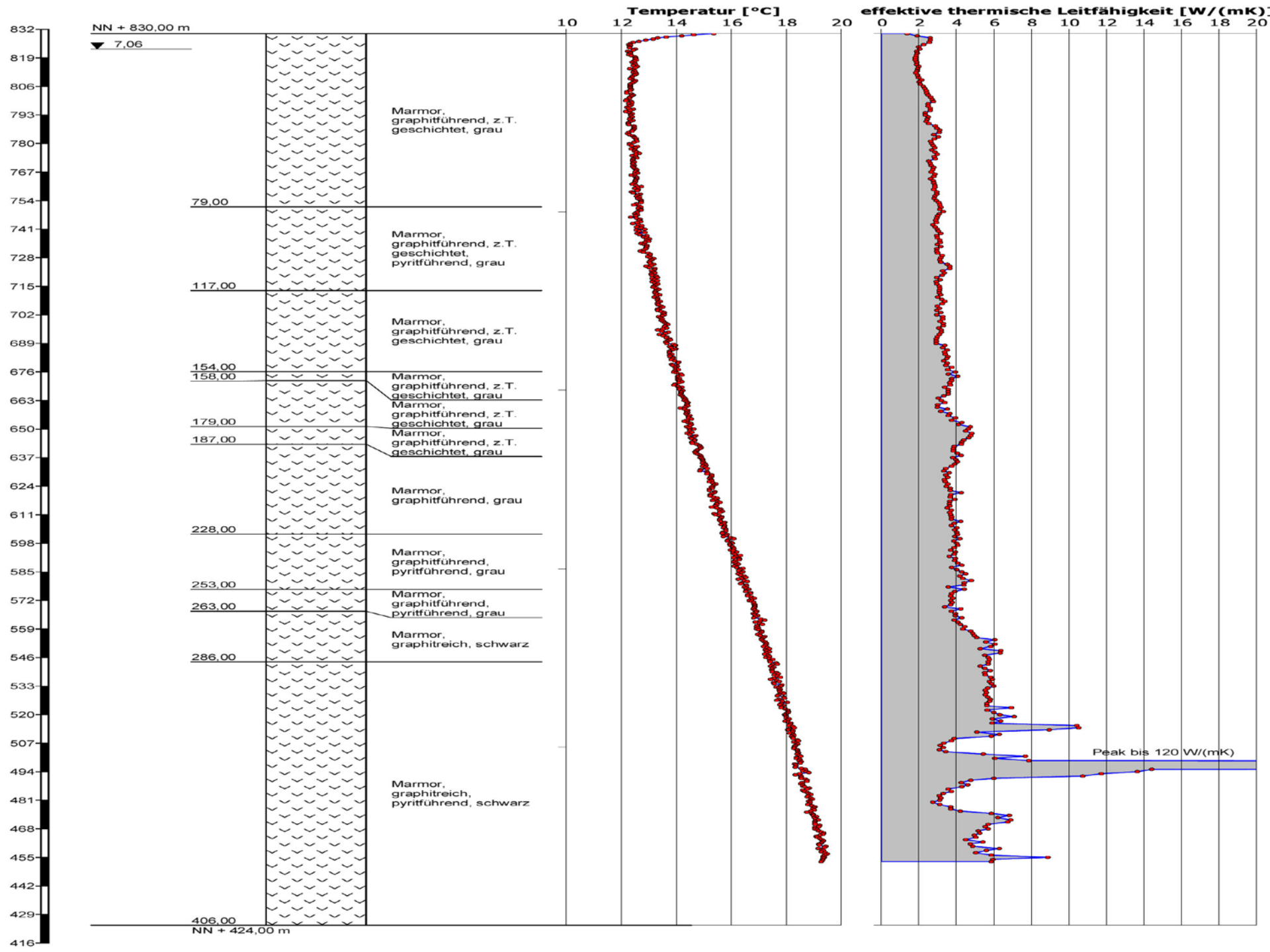
Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit



$$P_e = \frac{q_a}{q_c} = \frac{\rho c_p v_f \Delta T}{\lambda \left(\frac{\Delta T}{l} \right)}$$
$$v_f = \frac{P_e \lambda}{l \rho c_p}$$
$$v_f = \frac{\lambda_{kond+konv} - \lambda_{kond}}{l \rho c_p}$$

- q_a = konvektiver thermischer Fluss [W/m^2]
- q_c = koduktiver thermischer Fluss [W/m^2]
- ρ = Dichte des Fluids [kg/m^3]
- c_p = spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [$J/kg/K$]
- v_f = Darcy – Geschwindigkeit des Fluids [m/s]
- ΔT = Spreizung [K]
- λ = λ_{kond} = konduktive thermische Leitfähigkeit [$W/(mK)$]
- λ_{konv} = konvektive thermische Leitfähigkeit [$W/(mK)$]
- l = charakteristische Länge [m]





Einfluss der Grundwasserströmung

