



Geothermische Erschließungskonzepte

Dr. Torsten Tischner

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
Arbeitsbereich „Tiefe Geothermie und CO₂-Speicherung“

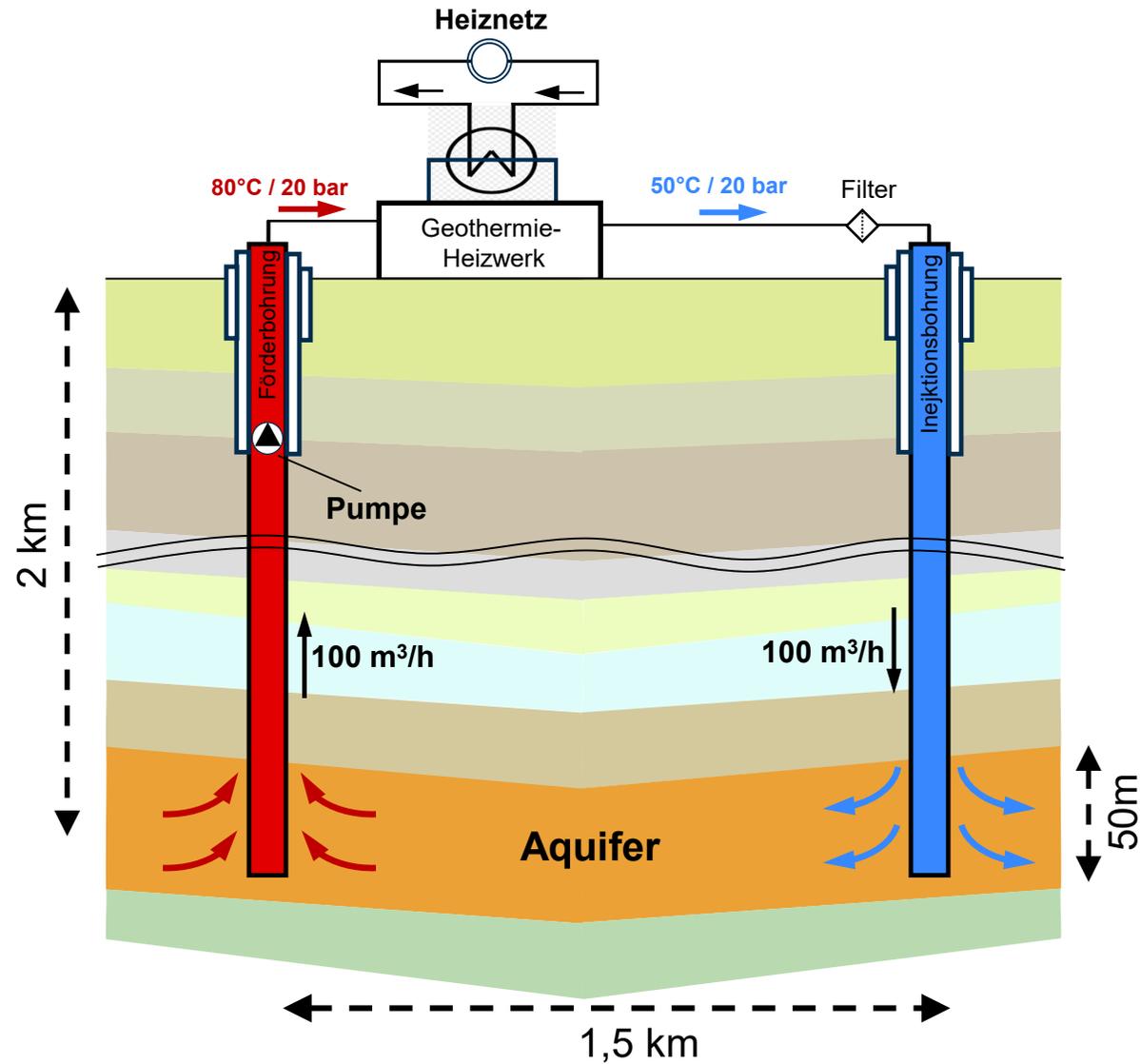
Torsten.Tischner@bgr.de

Gliederung



- **Hydrothermale Dubletten (Grundlagen, Auslegung,...)**
- **Geothermische Anlagen in Norddeutschland**
- **Tiefe Erdwärmesonden**
- **Erschließung dichter Gesteinsformationen**

Hydrothermale Dublette



- Hydraulisch durchlässiges Gestein (Aquifer) erforderlich!
- Thermalwasserzirkulation im geschlossenen Kreislauf (zur Druckhaltung im Aquifer, Anlagensicherheit, Umweltschutz)

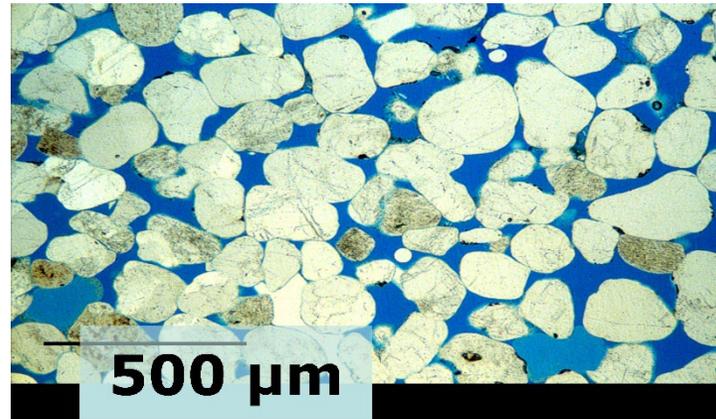
Zahlenangaben sind Beispielwerte für Norddeutschland

Hydraulische Durchlässigkeit

Sandstein



Mikroskopaufnahme
(blau: Porenraum, angefärbt)



Hydraulische Durchlässigkeit kann um viele Größenordnungen variieren



Hydraulische Durchlässigkeit ist entscheidend für die geothermische Nutzung (Fündigkeit) !

Permeabilitätsmächtigkeit/Transmissibilität



$$T = k * h$$

Permeabilität
(hydr. Durchlässigkeit)

Mächtigkeit

Sandstein 1:

h = 20m
k = 0,5 D (Darcy)

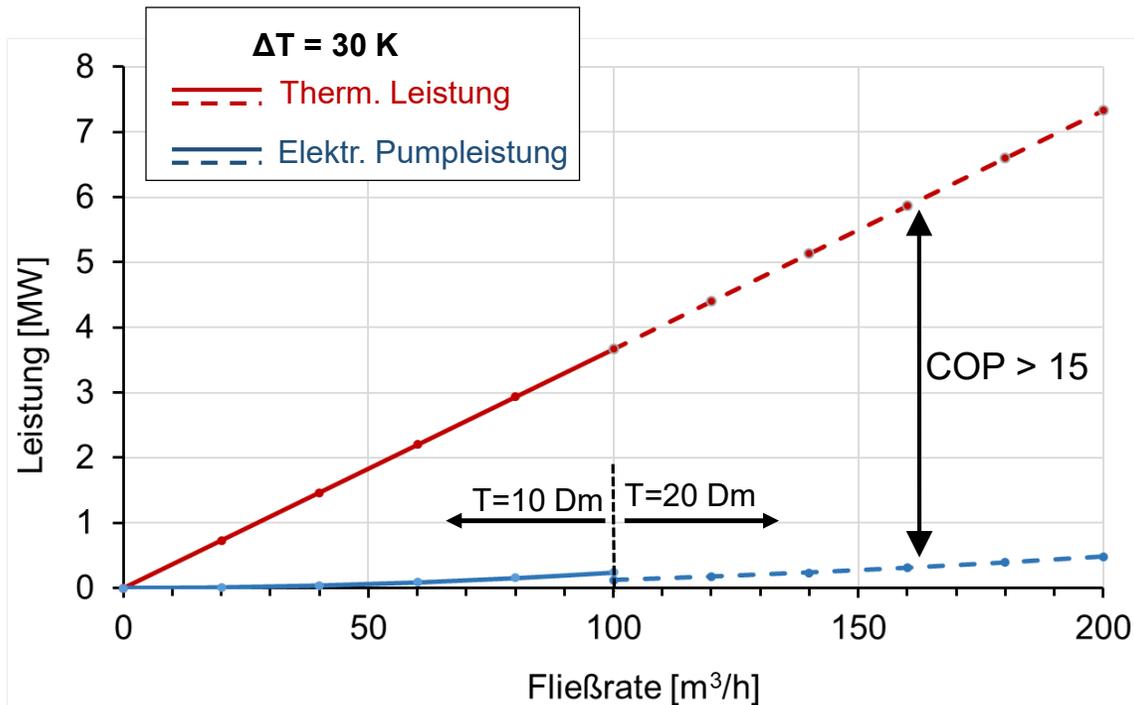
hydraulisch
äquivalent

Sandstein 2:

h=5m; k=2 D

- Transmissibilität entscheidend für Fließrate und geoth. Leistung
- Mindesttransmissibilität: ca. **5 Dm (Darcymeter)** - standortabhängiger Orientierungswert
- Nutzung geringmächtiger und multipler Reservoire bei entsprechender Permeabilität grundsätzlich möglich...

Thermische Leistung und Pumpleistung

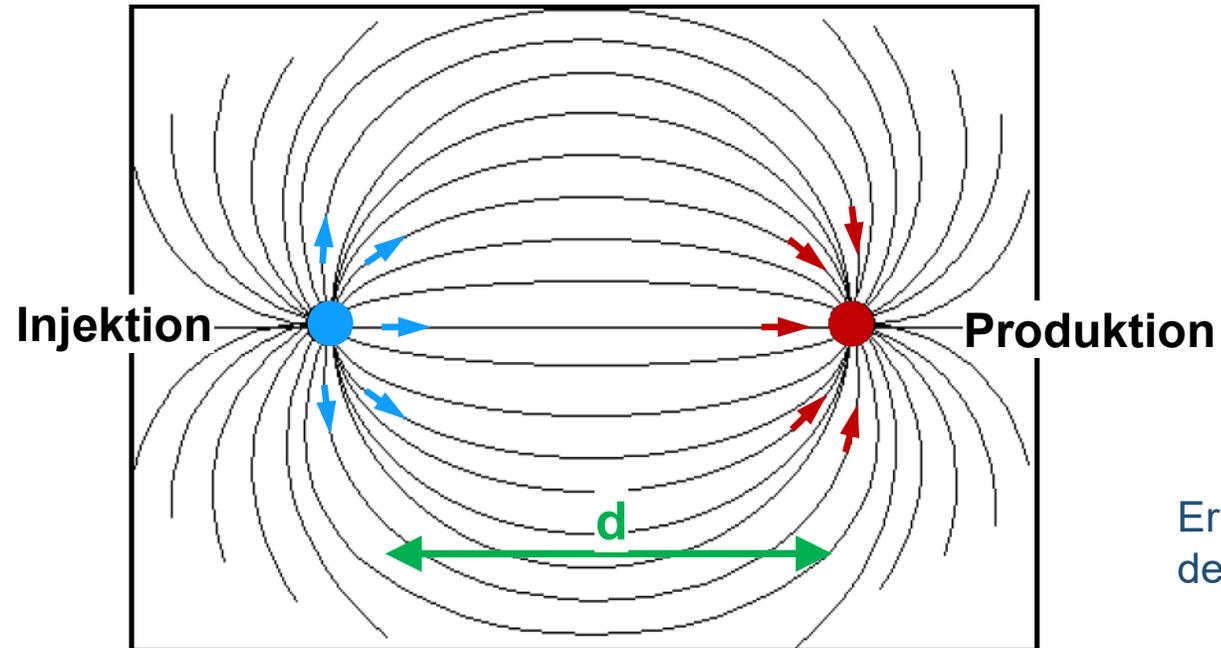


[Temperaturspreizung: 30 K; max. Druckänderung pro Bohrung: 30 bar, Bohrungsabstand: 1500m;
Bohrungsradius: 0,11m; dyn. Viskosität: $0,7 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$]

- Therm. Leistung im Bereich einiger MW (Norddeutschland)
- Hohe Arbeitszahl (COP)
- Förderpumpe (Strom, Austausch) dennoch wichtiger ökonom. Faktor
- Bei Einsatz einer Wärmepumpe deutlich geringerer COP

COP: Coefficient of Performance

Dublette: Strömung und Bohrungsabstand



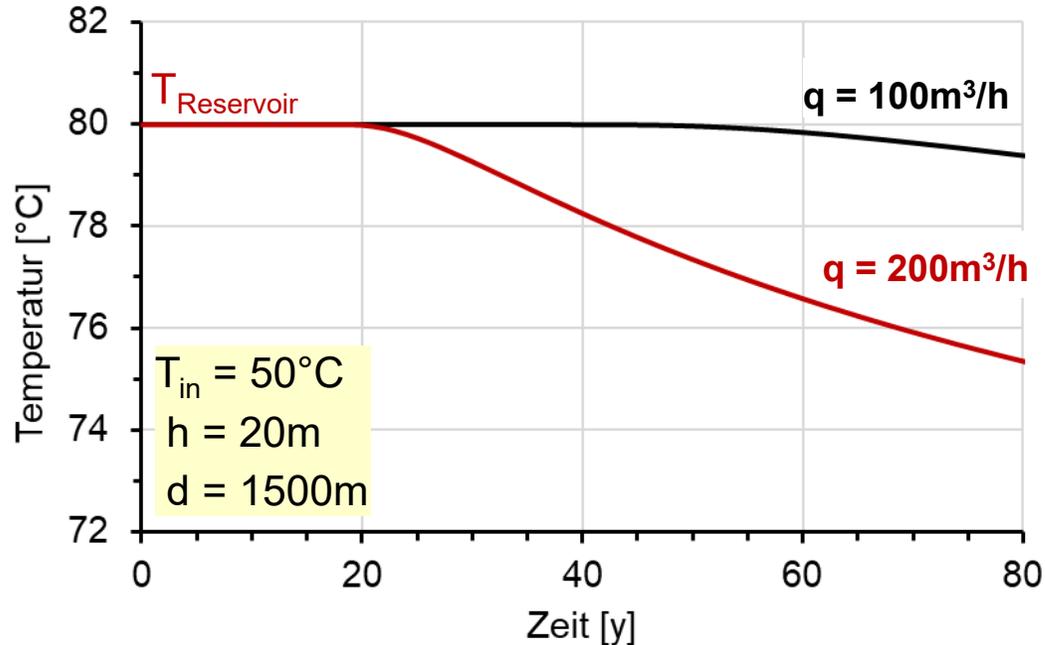
Erhöhte Druckverluste im Umfeld der Bohrungen (Stromlinienverengung)

Bohrungsabstand 1 – 2 km:

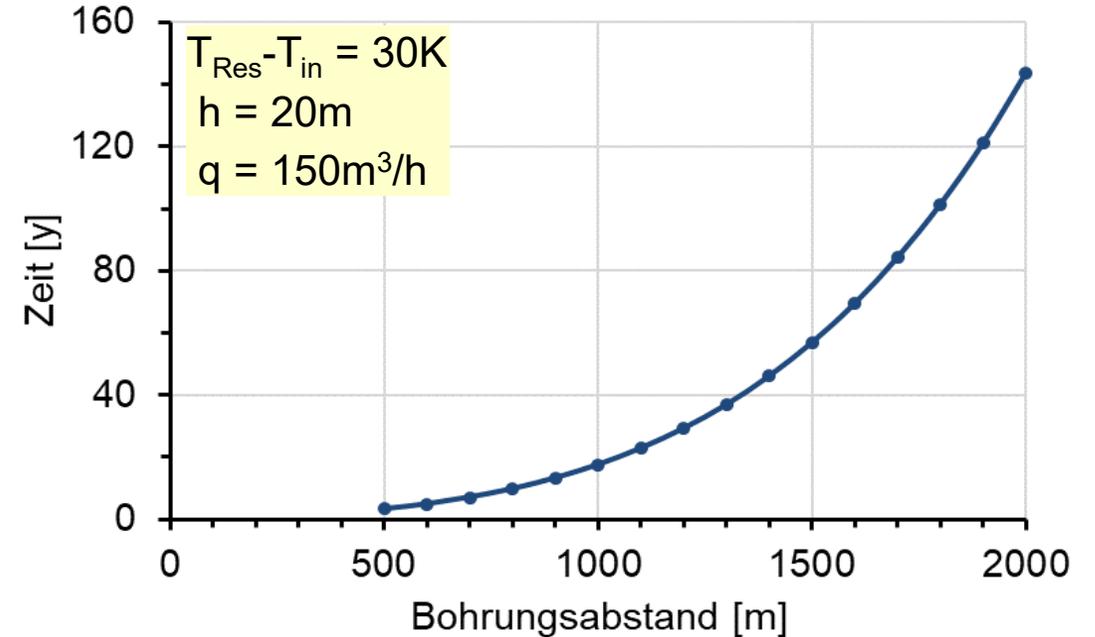
- Quasistationäre Strömung nach einigen Stunden
- Stofflicher Durchbruch nach wenigen Jahren
- „Thermischer Durchbruch“ nach einigen Jahrzehnten!

Auskühlung und Bohrungsabstand

Fördertemperatur



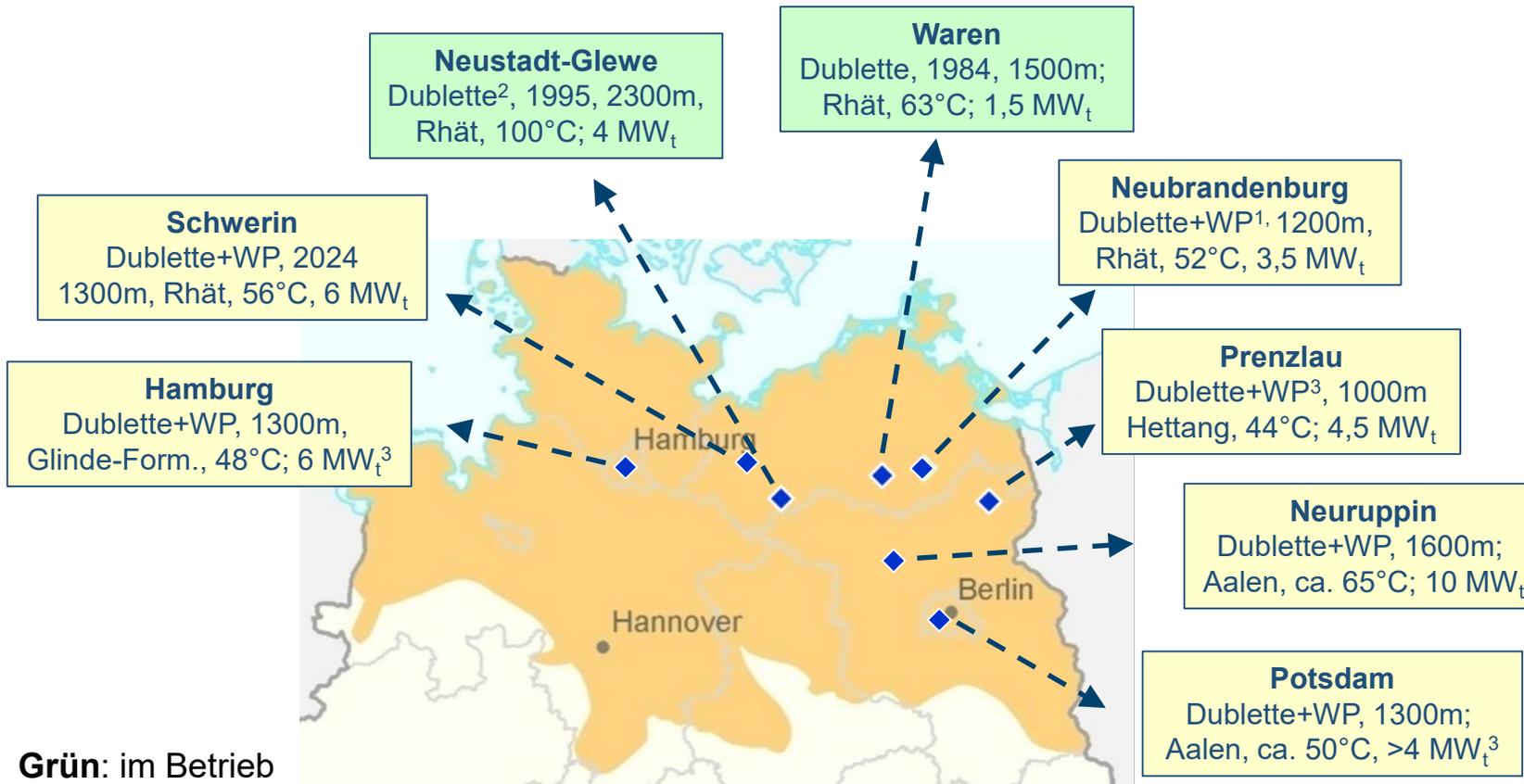
„Thermischer Durchbruch“



[Weitere Annahmen: Porosität: 0,25; Wärmekapazität: 4,0 bzw. 0,8 kJ/K/kg; Dichte: 1,1 bzw. 2,5 kg/l (Wasser/Gestein); Wärmeleitfähigkeit-Tonstein im Hangenden/Liegenden: 2,5 W/m/K; Thermischer Durchbruch wird hier mit 1K Temperaturabsenkung definiert; Analytische Berechnungen nach Schulz (1987)]

- Thermische Durchbruchzeit steigt näherungsweise quadratisch mit dem Bohrungsabstand
- Abnahme der Fördertemperatur bei geoth. Dubletten in Porenaquiferen ist i.d.R. kein Problem

Geothermieranlagen–Fernwärme, Norddeutsches Becken



Grün: im Betrieb

Gelb: im Bau bzw. Umbau

Dubletten in Norddeutschland:

- Tiefe: ca. 1000 – 2500 m
- Therm. Leistung: < 10 MW

Zum Vergleich:

Anlagen in Süddeutschland:
(Molassebecken u. Oberrheingraben)

- ca. 30 Anlagen im Betrieb
- Tiefe bis ca. 5000 m
- Therm. Leistung bis 50 MW

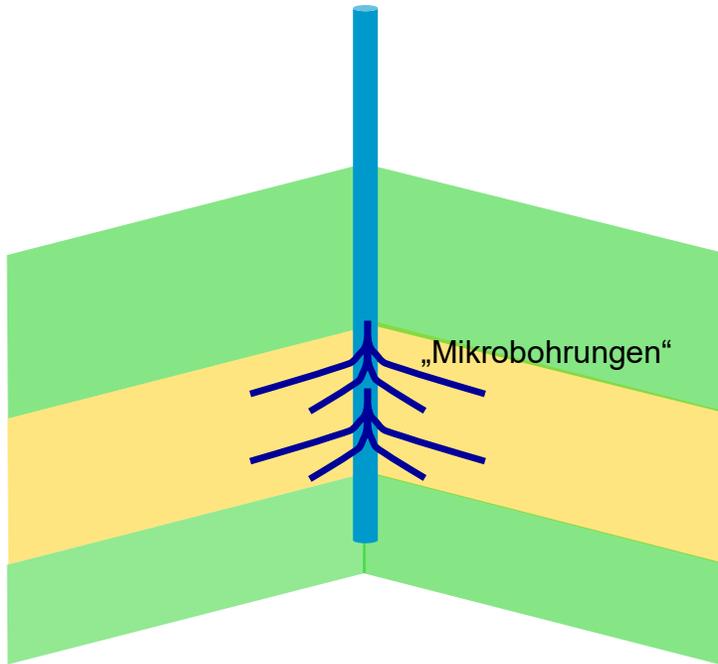
Angegeben sind das Jahr der Inbetriebnahme, Tiefe, Zielhorizont, dessen Temperatur sowie die therm. Leistung; WP: Wärmeentzug und „Nacherhitzung“ mit Wärmepumpe

¹: In Neubrandenburg wurde 1988 eine Dublette in Betrieb genommen, diese ab 2004 für einen Aquiferwärmespeicher umgerüstet. Aktuell (2024) erfolgt wiederum der Umbau für den Dublettenbetrieb.

²: Die Geothermieranlage in Neustadt-Glewe wird aktuell durch einen Sidetrack erweitert

³: In Prenzlau wurde die ehemalige 2800m tiefe Erdwärmesonde verfüllt und stattdessen wird in einem flacheren Horizont eine geoth. Dublette errichtet

Microdrilling

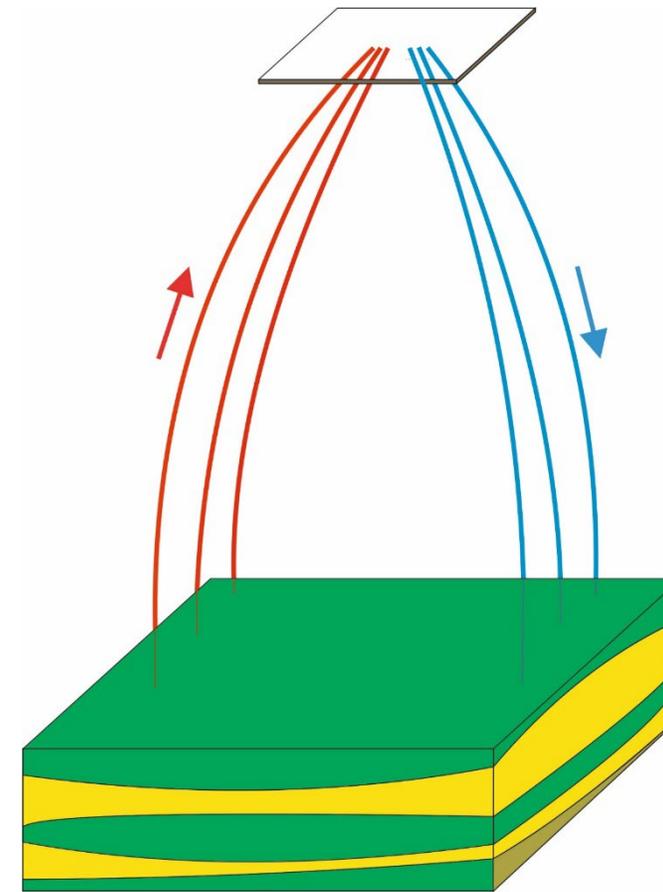


- Laterale Mikrobohrungen (typ. einige Zehnermeter lang)
- Vergrößerung der Kontaktfläche zum Gestein

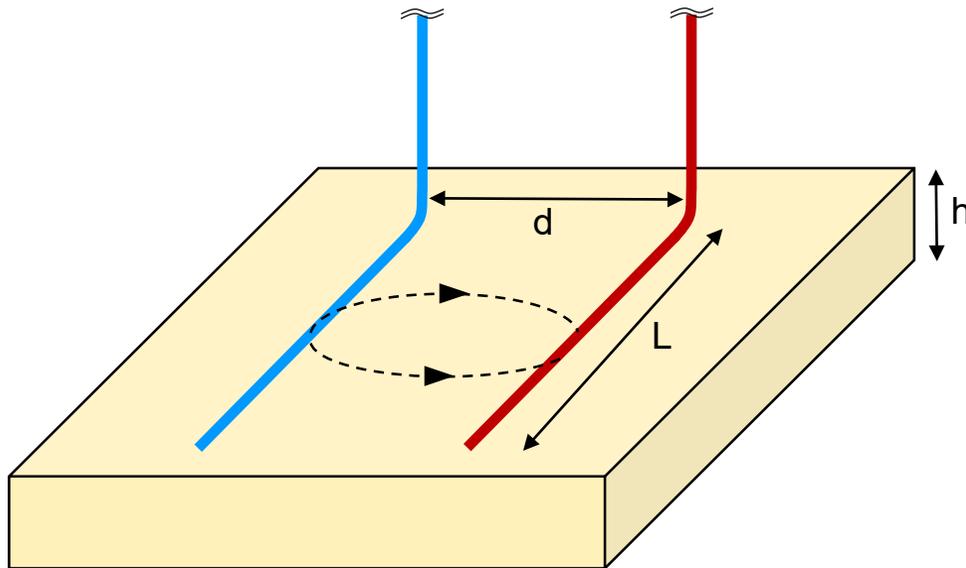
Verfahren:

- Radial drilling, Radial jet drilling, Fisbone drilling,...

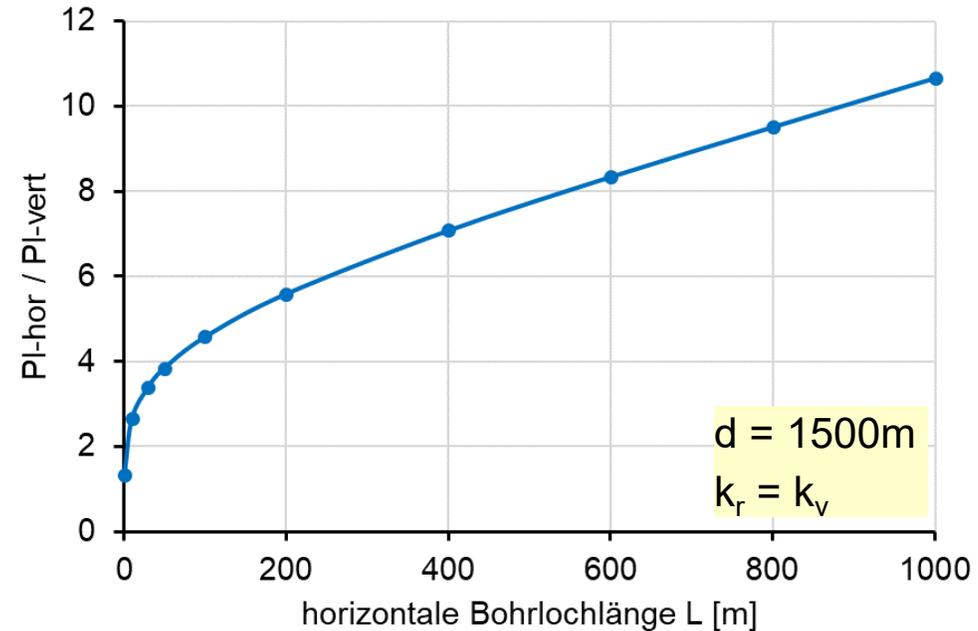
Multipletten



Mehrere Bohrungen vom gleichen Bohrplatz (z.B. in München)



Produktivitätssteigerung



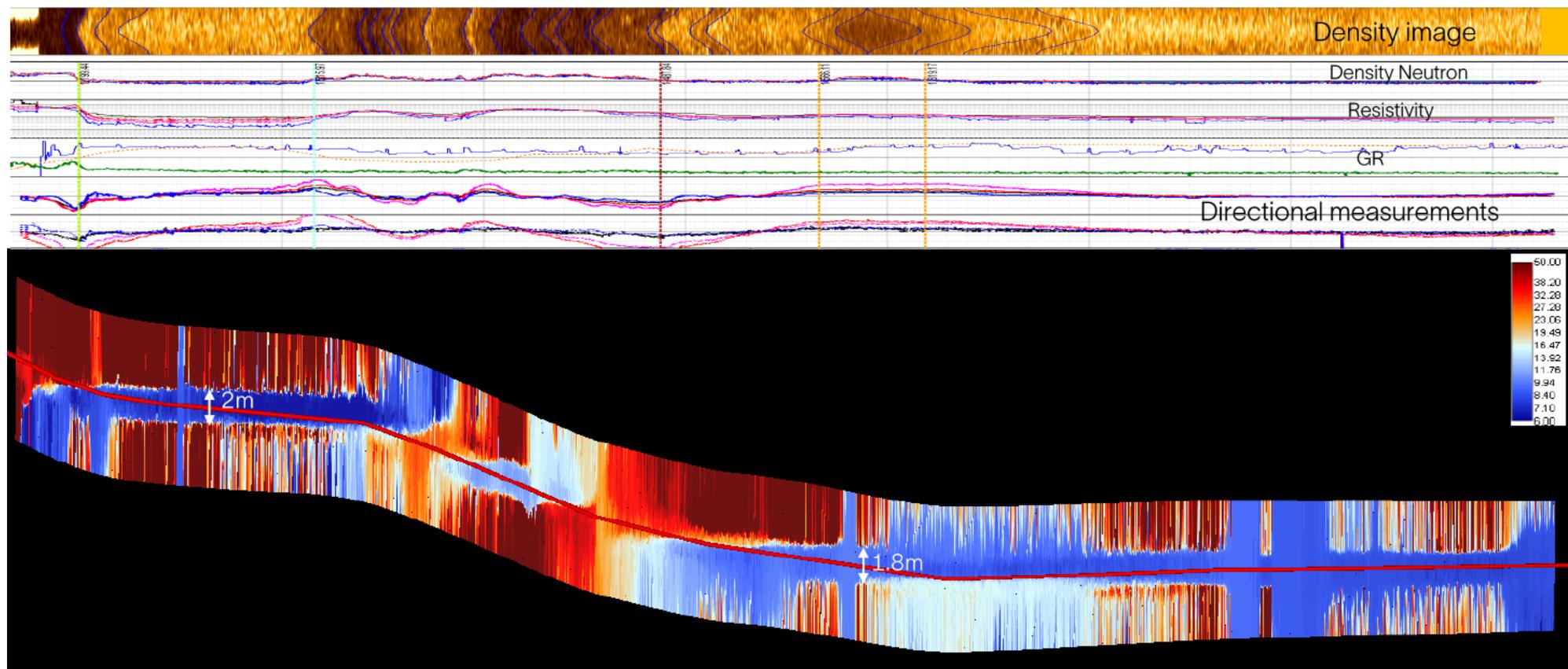
k_r (k_v): radiale (vertikale)
Permeabilität

PI: Produktivitätsindex

[Berechnungen für horizontale Dublette erfolgten mit Saphir 4.3. Ergebnisse sind unabhängig von Mächtigkeit, Viskosität und Permeabilität (sofern $k_r=k_v$ gilt); Bohrungsradius: 0,011m]

- Signifikante höhere Produktivität von horizontalen Dubletten im Vergleich zu „vertikalen“
- Horizontalbohrungen vor allem eine Option in geringmächtigen Reservoirien

Horizontalbohrungen: Pariser Becken

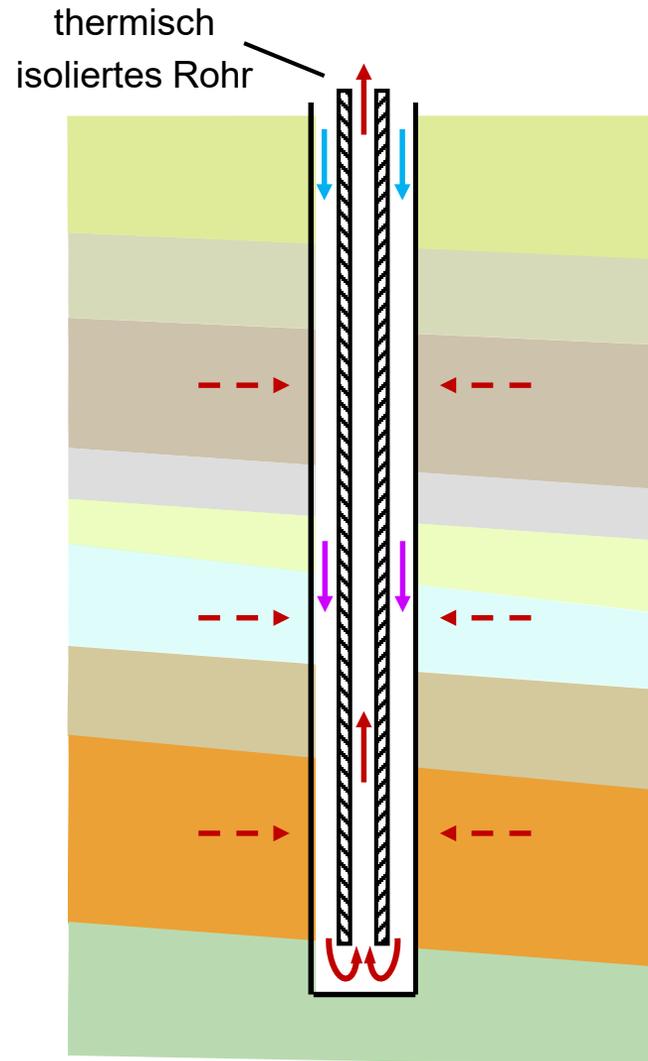


Maalouf et al., 2024

Bohrungen GCAH1 und GCAH2 (Cachan)

- Horizontalbohrungen in ca. 1600m Tiefe; Länge der horizontalen Strecken: ca. 900m; Schichtmächtigkeit ca. 2m
- Umfangreiches „Logging while Drilling“ zum Verfolgen permeabler Schichten

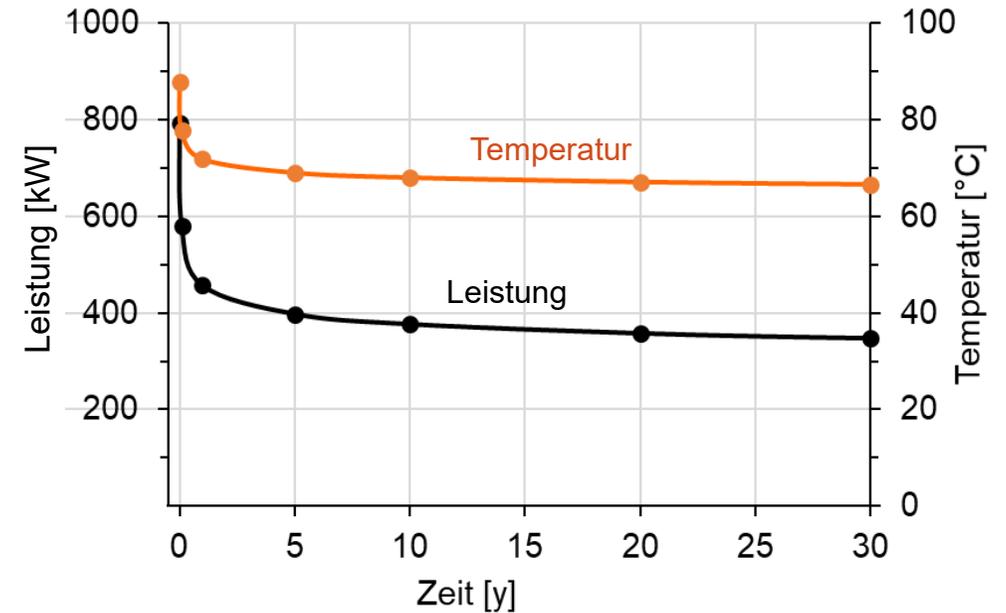
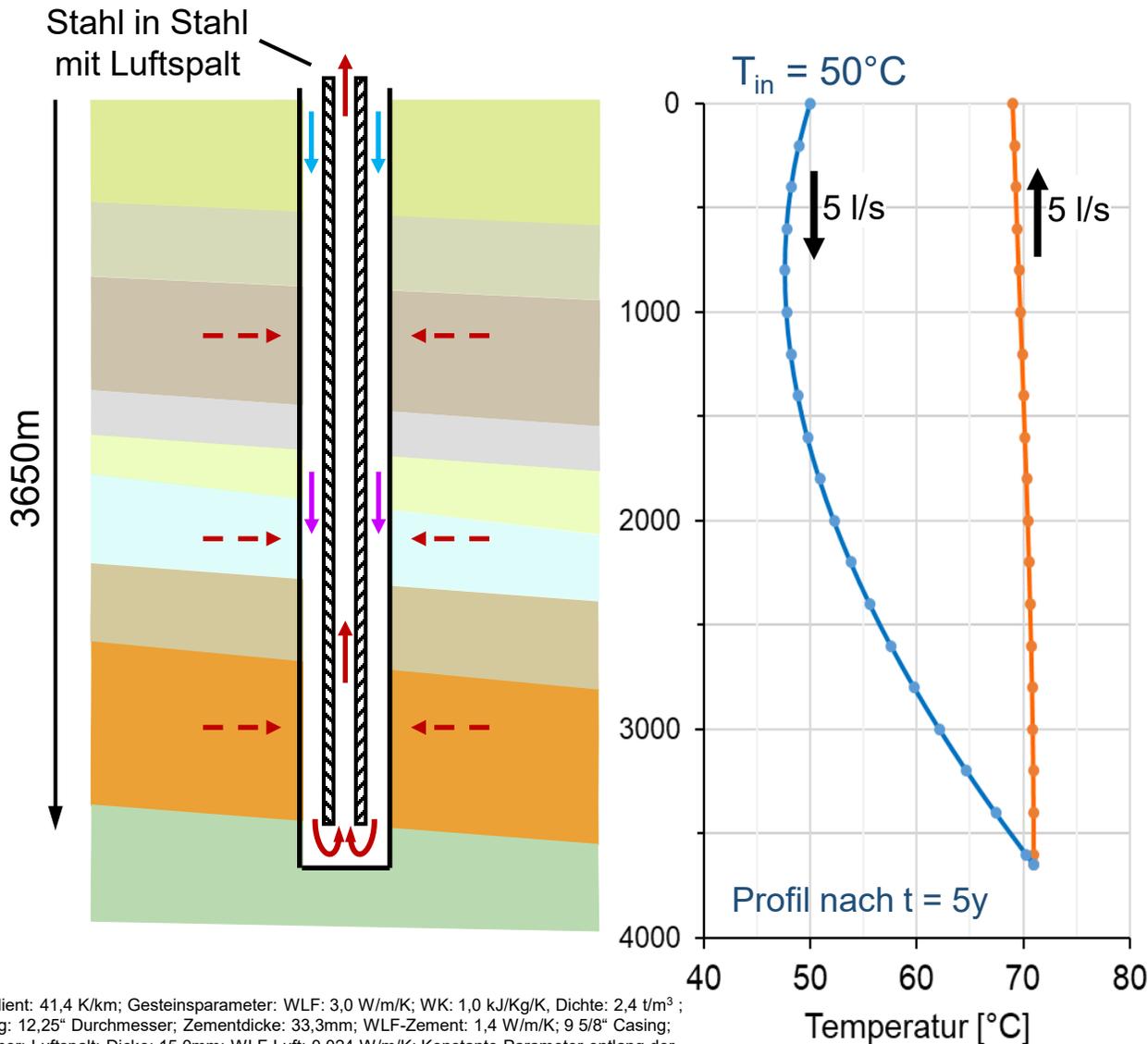
Tiefe Erdwärmesonde



- Hydraulisch geschlossenes System
- Wärmezufuhr „nur“ durch Wärmeleitung
- Leistung wenige „Hundert kW“ auch bei großen Tiefen (> 3000m)
- Kein Fündigkeitsrisiko
- Betriebssicher, wartungsarm (Zirkulation von Frischwasser)
- Wenige Anlagen in Europa, tiefer als 1000m:
Arnsberg (D), Weggis (CH), Triemli (CH), Mühlleiten (AUT), Cornwall (UK),...
- Option v.a. zur Nachnutzung bestehender Bohrungen

Tiefe Erdwärmesonde – Temperaturprofil und Leistung

(Beispiel Hannover, vereinfacht)

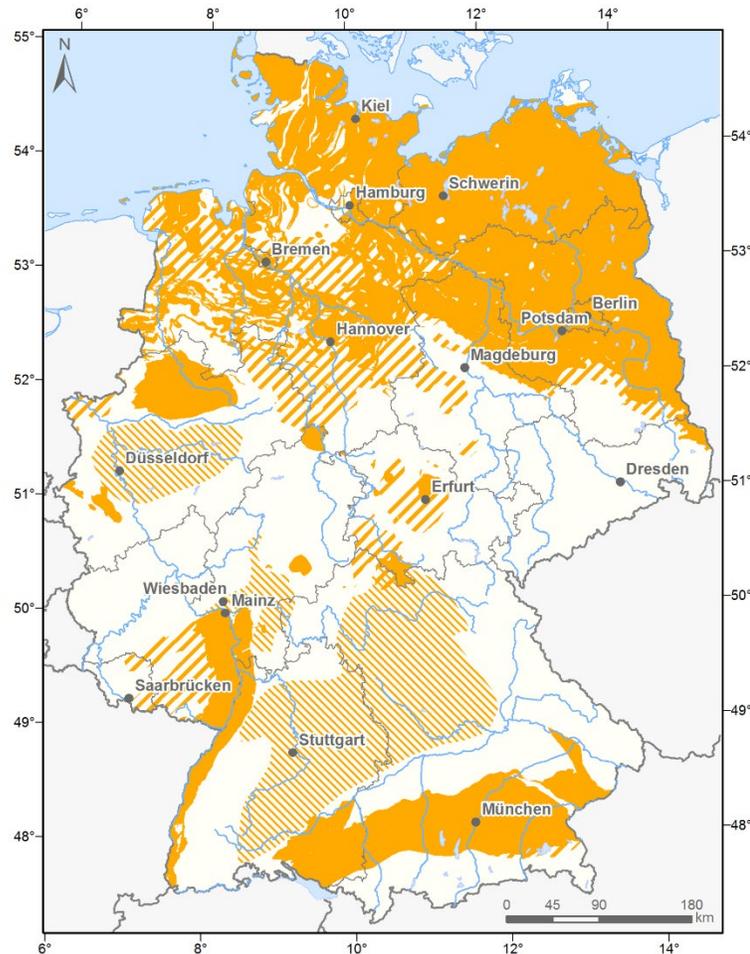


- signifikanter Leistungsabfall zu Beginn
- 300-400 kW im Langzeitbetrieb
- deutliche Leistungssteigerung bei Reduktion der Injektionstemperatur möglich (Wärmepumpe)

[T-Gradient: 41,4 K/km; Gesteinsparameter: WLF: 3,0 W/m/K; WK: 1,0 kJ/Kg/K, Dichte: 2,4 t/m³ ; Bohrung: 12,25" Durchmesser; Zementdicke: 33,3mm; WLF-Zement: 1,4 W/m/K; 9 5/8" Casing; 5 7/8" Liner; Luftspalt: Dicke: 15,0mm; WLF-Luft: 0,024 W/m/K; Konstante Parameter entlang der Bohrung]

Hydrothermales und petrothermales Potenzial

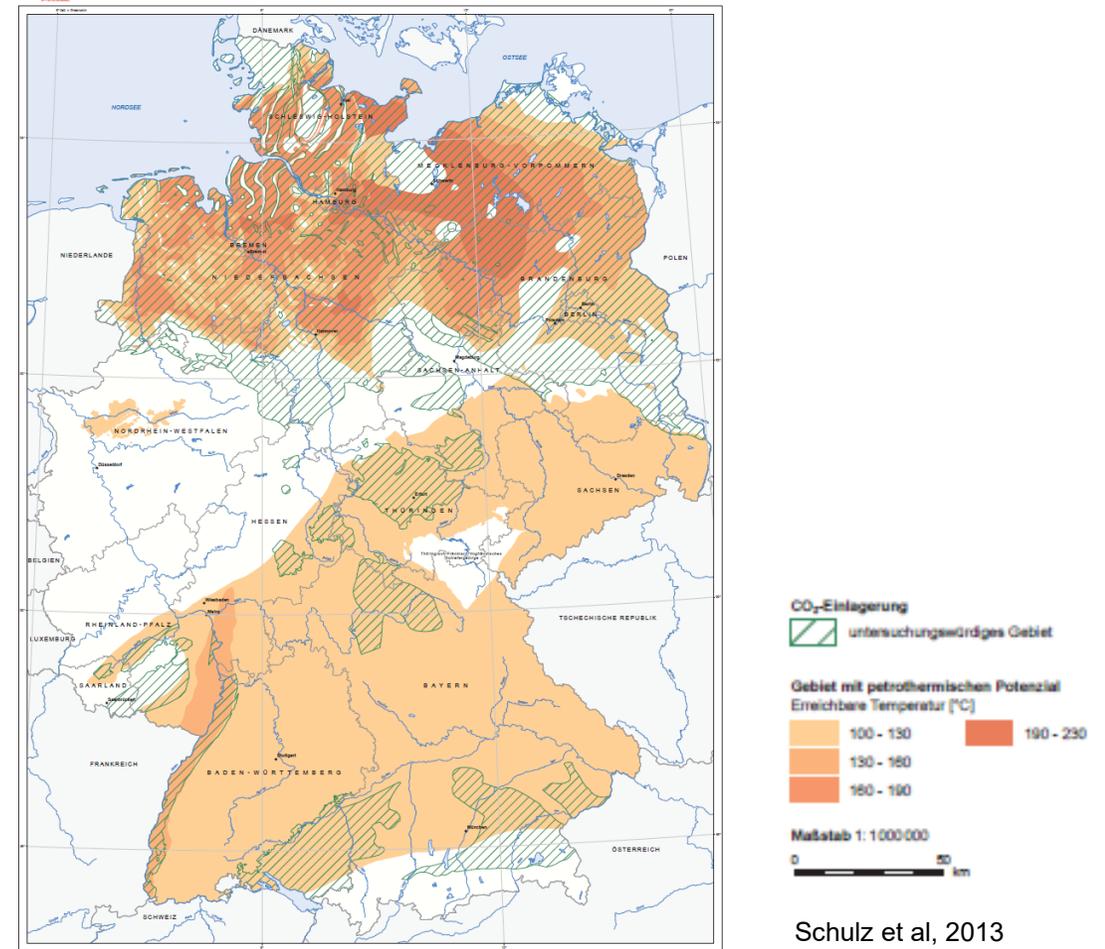
Hydrothermal (> 40°C)



- vorhanden
- vermutet
- untersuchungswürdig

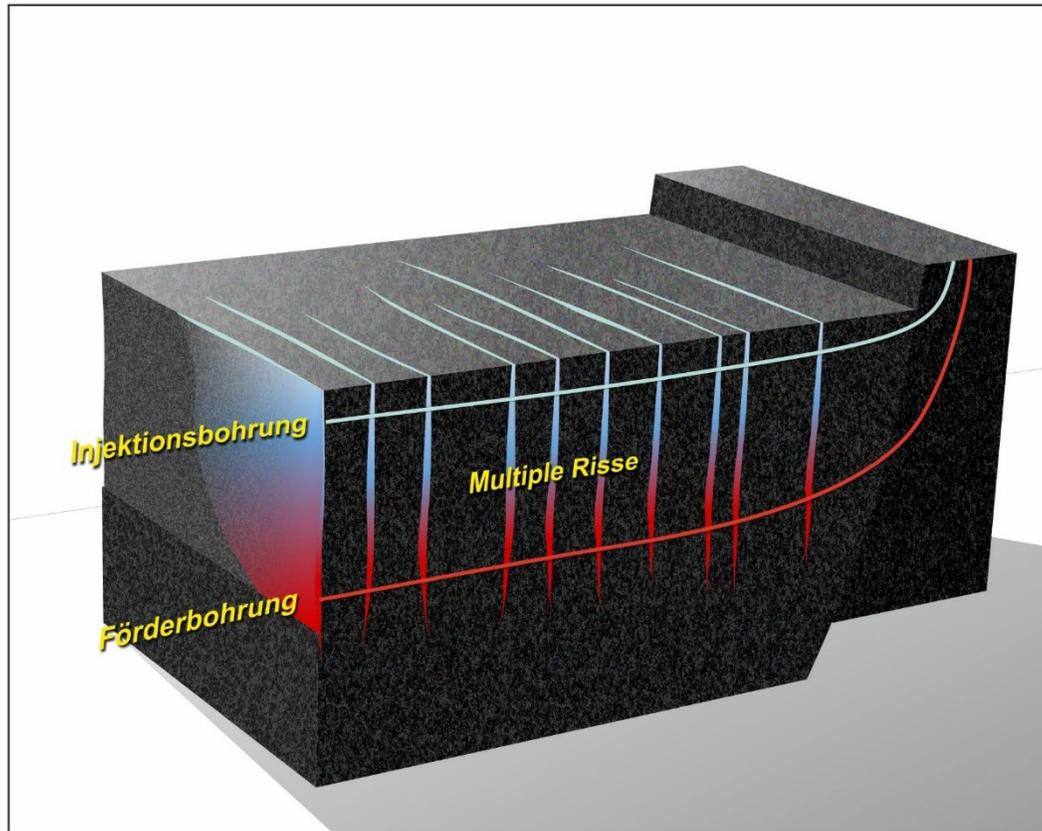
Agemar et al., 2018

Petrothermal

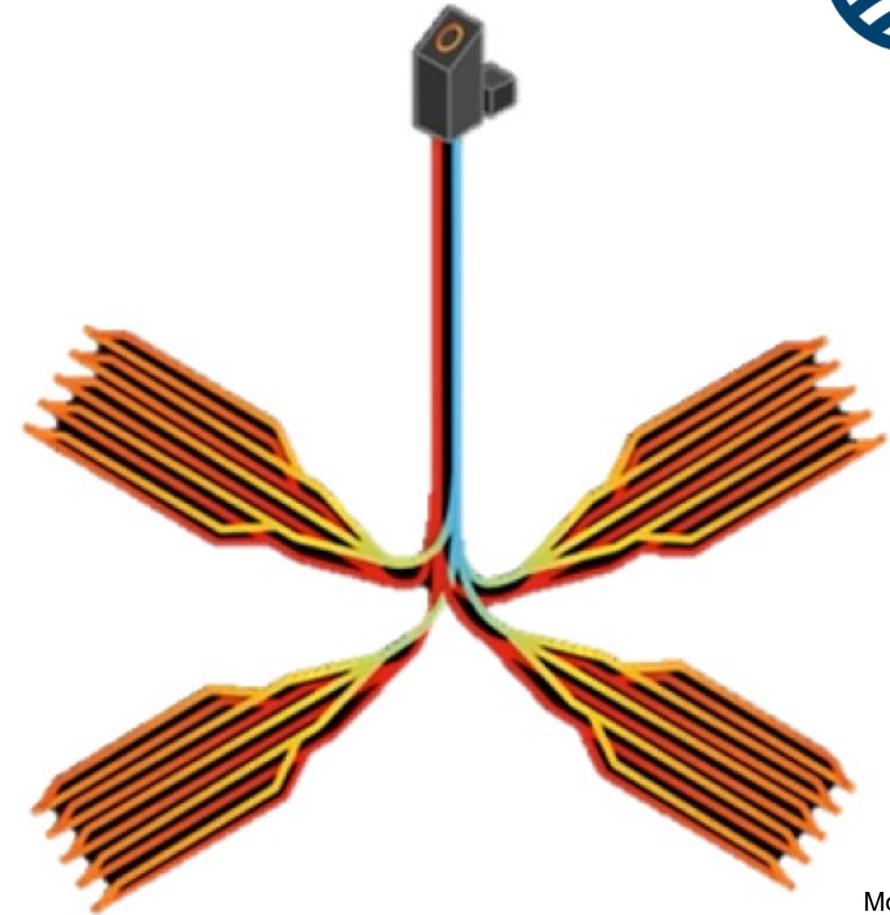


Schulz et al., 2013

Enormes Geothermepotenzial auch in „dichten“ und kristallinen Gesteinsformationen (Granit, Vulkanit,...)



- Fließwege durch Risserzeugung (hydraulische Stimulation)
Referenzen: Soultz (F), Utah-Forge, Fa. Fervo (Utah, Nevada),...
- Perspektive auch in Deutschland?



Moelk, 2021

- Fa. Eavor: Horizontalbohrungen/Loops als Wärmetauscher
Pilotprojekte: Alberta, Geretsried, Hannover

**Vielen Dank
für die
Aufmerksamkeit!**



Referenzen:

AGEMAR, T., SUCHI, E., MOECK, I. (2018): *Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende. Positionspapier, LIAG, Hannover, URL:*

https://geotis.info/homepage/sitecontent/info/publication_data/public_relations/public_relations_data/Positionspapier-Waermewende.pdf

Maalouf, J., Romain Griffon, R., Volintir, T.-R., Skinner, G. (2024): *A world's first geosteering application in Geothermal. Vortrag, Geotherm: Expo&Congress, Offenburg, 29.02.2024.*

Moelk, D. (2021): *Eavor. Vortrag auf der Herbstsitzung des Geothermieforums Niedersachsen, 22.09.2021.*

SCHULZ, R., KNOFF, S., SUCHI, E. & DITTMANN, J. (2013): *Geothermieatlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie.*

Endbericht, LIAG, Hannover, URL: [https://geotis.info/homepage/sitecontent/info/publication_data/final_reports/final_reports_data/Endbericht Geothermie Atlas.pdf](https://geotis.info/homepage/sitecontent/info/publication_data/final_reports/final_reports_data/Endbericht_Geothermie_Atlas.pdf)