

Erweiterte Heat-In-Place-Abschätzung für den Potenzial-Atlas „Tiefe Geothermie“ in Baden-Württemberg, SW-Deutschland

Ernst Kiefer & Konstantin Kuhn



- Kommunale Wärmeplanung in Baden-Württemberg für große Kreisstädte (20.000 EW) bis 31.12.2023
- 95 große Kreisstädte mit ca. 50% der rund 11,07 Mio. Einwohnerinnen und Einwohner
- Verfahrensgrundlage: Wärmeplanungsgesetz (WPG) ab 1.1.2024
- **4 Elemente** eines kommunalen Wärmeplans:
 - Bestandsanalyse
 - **Potenzialanalyse** ←
 - Zielszenario
 - Wärmewendestrategie
- 1101 Gemeinden in Baden-Württemberg (!)
- Wo kann die Tiefe Geothermie einen Beitrag leisten?

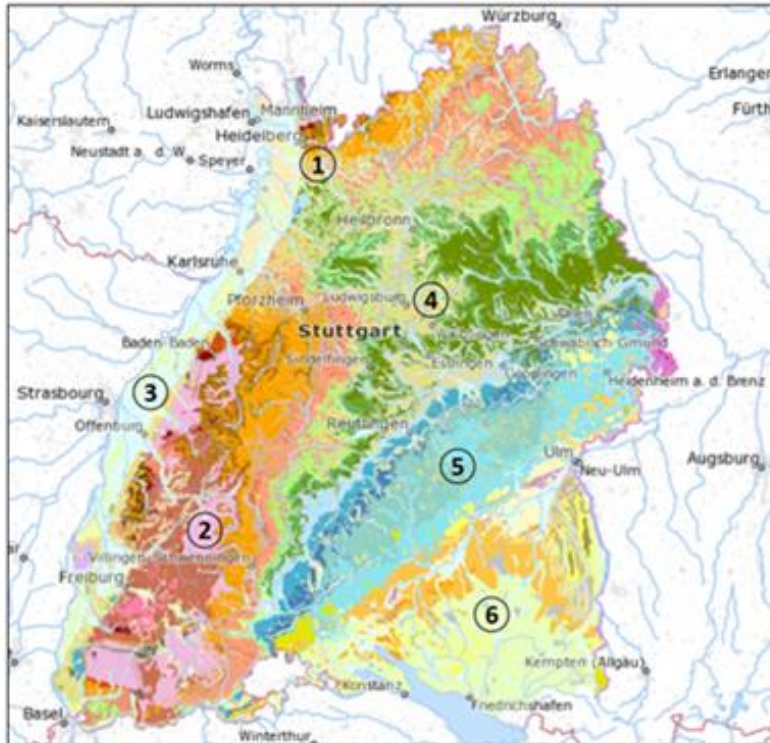


Quelle: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2023

<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/energieeffizienz/in-kommunen/kommunale-waermeplanung>

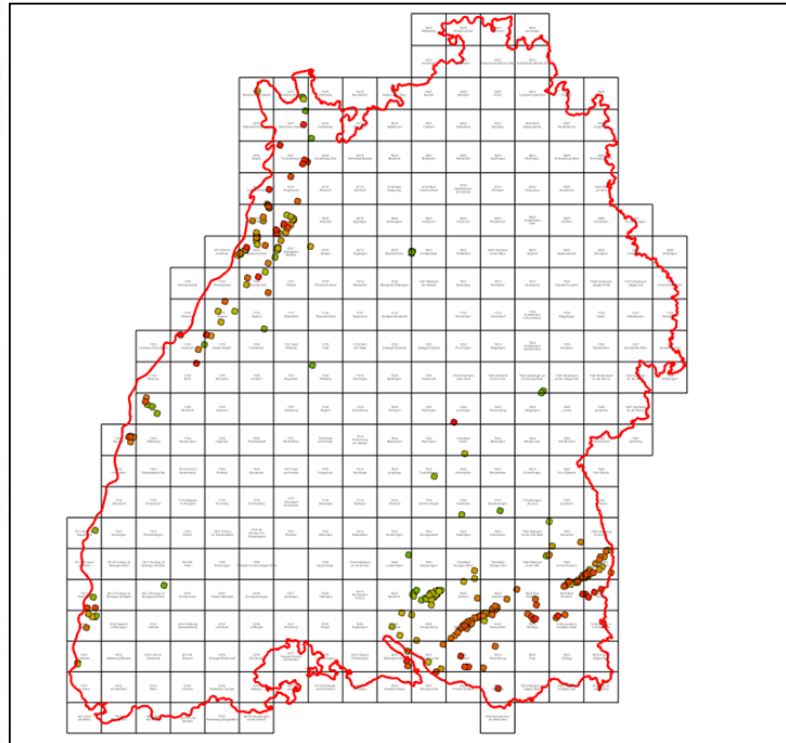
Datenquellen für die Tiefe Geothermie

Geologie

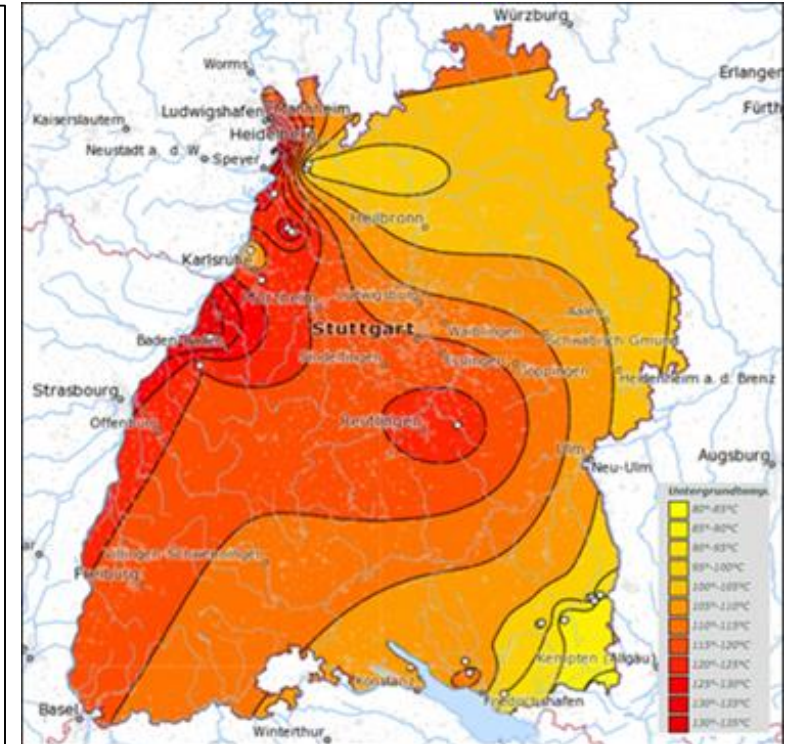


<https://maps.lgrb-bw.de/>

GK25 mit Erläuterungen & Tiefbohrungen



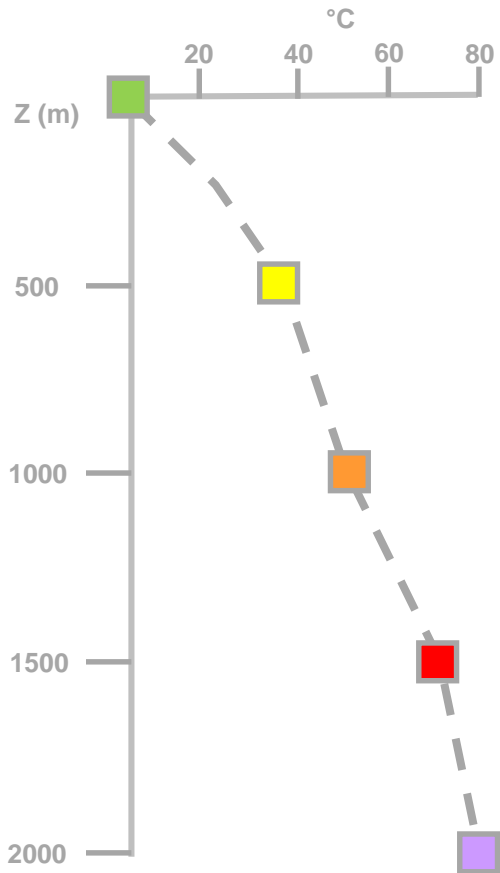
Untergrund-Temperaturen



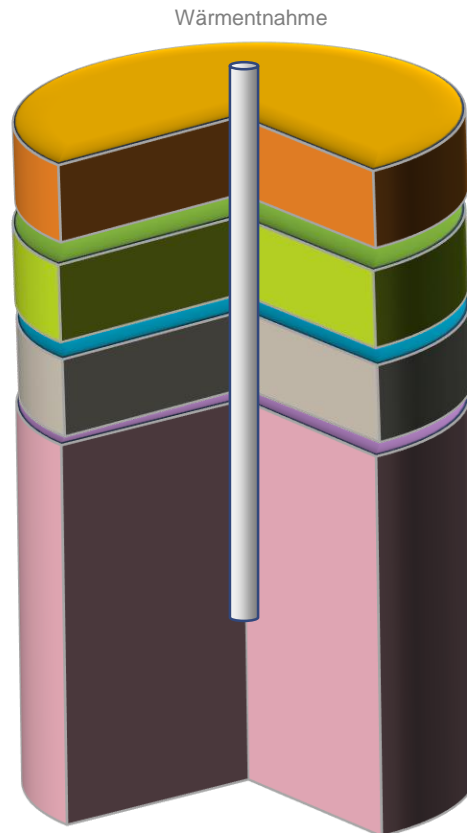
Schellschmidt & Stober (2008)

Geothermische Potenzial-Analyse

Geothermischer Gradient



Geologisches Modell



Petrophysikalische Parameter

- ϕ = Porosität des Reservoirs
- $\rho_{m,f}$ = Matrix-Dichte des Gesteins und Dichte des Poren-Fluids
- $c_{m,f}$ = Spezifische Wärmekapazität der Gesteinsmatrix und des Poren-Fluids
- λ = Wärmeleitfähigkeit
- α = Temperaturleitfähigkeit
- q = Wärme-Entzugsleistung pro Meter
- R = Recovery-Faktor (Gewinnungsfaktor)
- T_{res} = Reservoir-Temperatur → geothermischer Gradient
- T_0 = Oberflächentemperatur oder Absenkung
- r = Radius des Reservoirs
- h = Mächtigkeit des Reservoirs
- V = Volumen des Reservoirs

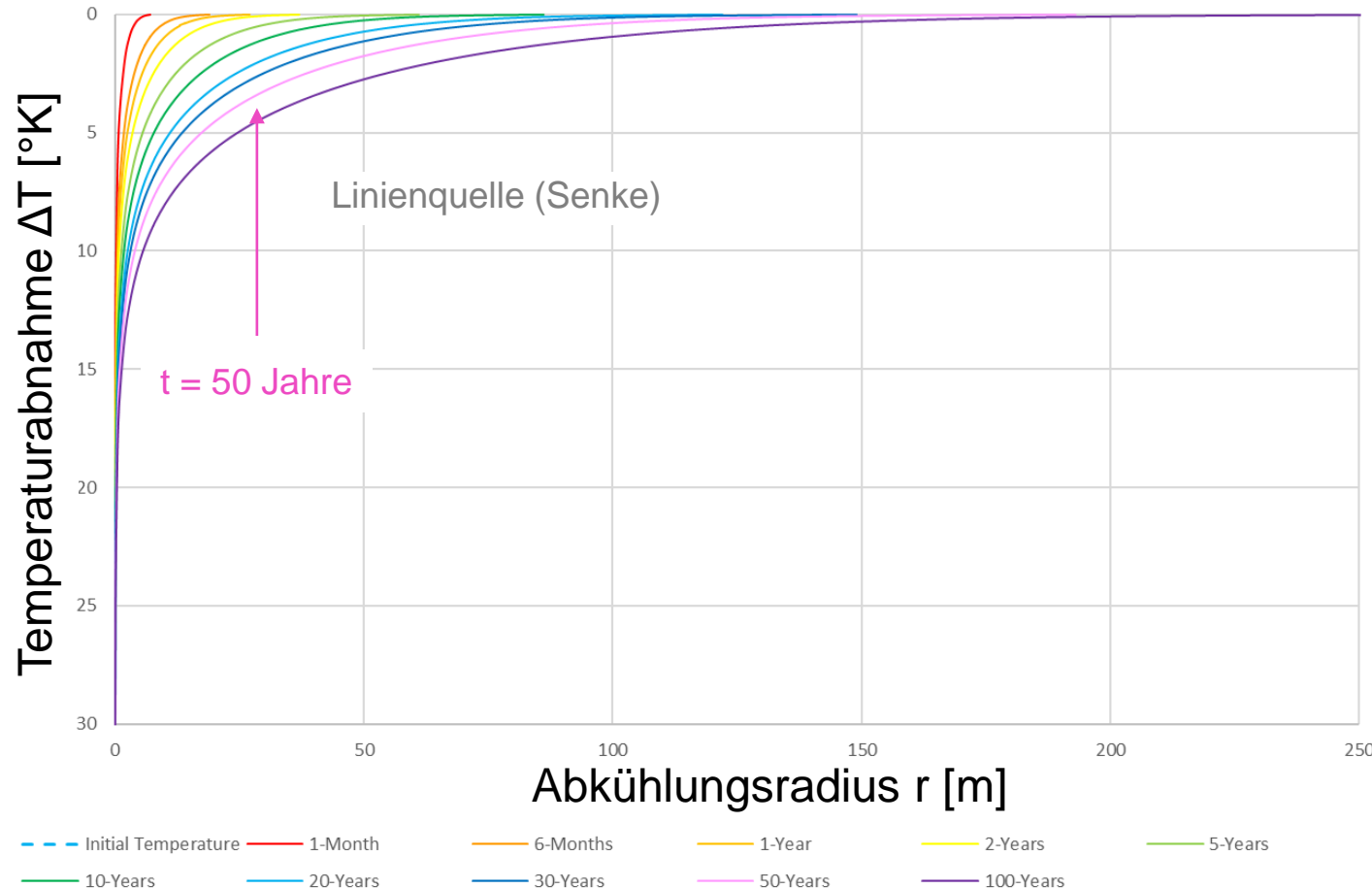
Unsere Studie:

Frage: Welche ist die schnellste und sicherste Berechnungsmethode ?

Vergleich von 3 numerischen Modellen – wir fokussieren hier auf Eines

Wärmepotenzial-Berechnungen

Kelvin's Line Source Model: Cooling Radius



1: Kelvin's Line Source Modell: ΔT als f (r)

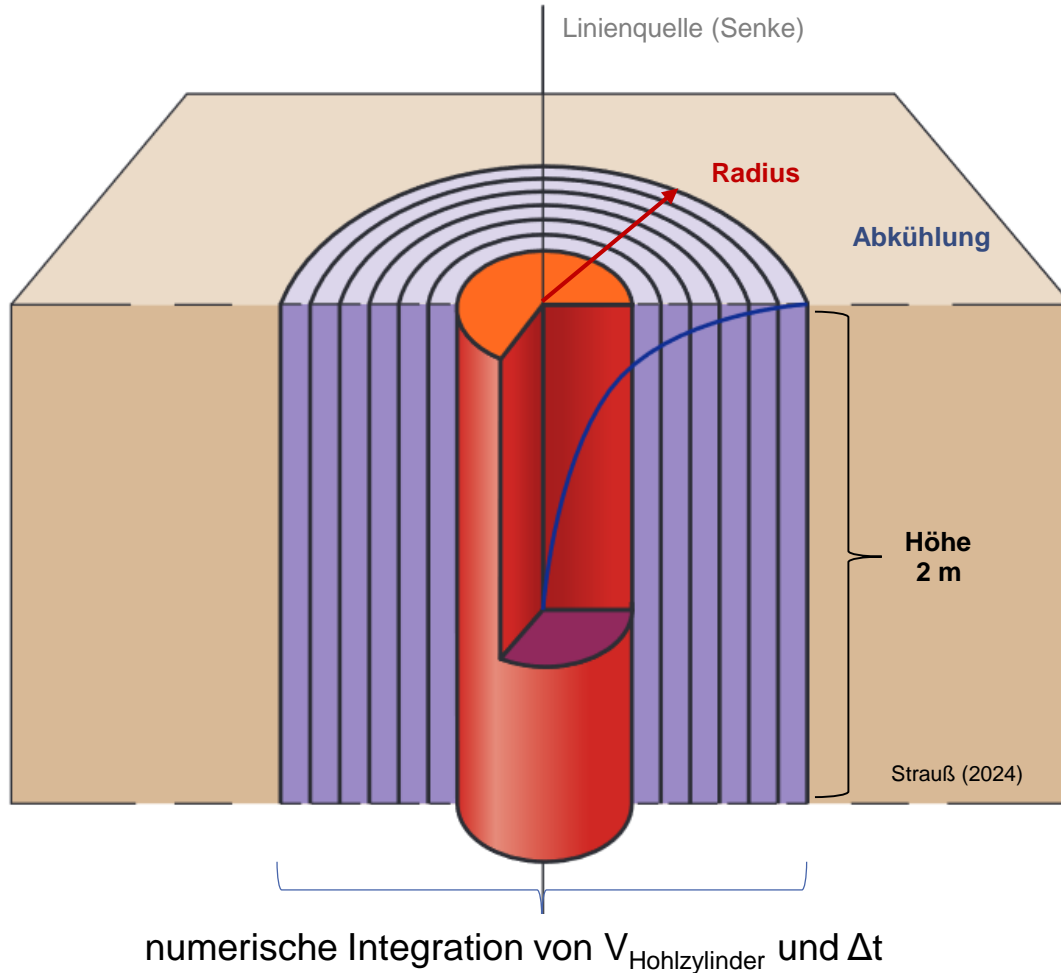
nach Carslaw & Jaeger, 1959

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{\dot{q}_l}{2\pi\lambda} \int_X^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{\dot{q}_l}{2\pi\lambda} \cdot \text{Ei}(X)$$

$$\text{mit } X = \frac{r}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}$$

Eingangsparameter:

- \dot{q}_l = längenbezogene Wärmestromdichte
- T_0 = ungestörte Untergrundtemperatur
- T = Temperatur während dem Betrieb
- λ = Wärmeleitfähigkeit
- a = Temperaturleitfähigkeit
- t = Zeit
- r = Radius
- β = Laufvariable



2: Deterministisches Hohlzylinder-Modell: volumetrischer Ansatz

(Ansatz nach Agemar, Weber & Moeck, 2018)

$$H_0 = \{V * [(1 - \Phi) * \rho_m * c_m + \rho_f * c_f] * (T_{res} - T_0)\} * R$$

Eingangsparameter:

- Volumen
- Porosität
- Dichte
- Spezifische Wärmekapazität
- Reservoir-Temperatur
- Temperaturabsenkung
- Gewinnungsfaktor

Reservoir-Gestein:

Buntsandstein mit 15 % Porosität

Geothermische Reservoirre



1



2



3



4



5



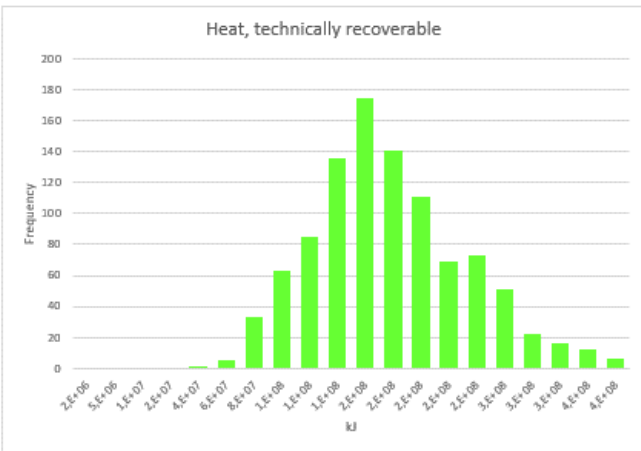
6

1. Tertiär + Quartär (Lockergesteine)
2. Ober-Jura (Festgesteine)
3. Mittel-Jura (Festgesteine)
4. Muschelkalk (Festgesteine)
5. Buntsandstein (Festgesteine)
6. Grundgebirge (Hartgesteine)

Ergebnisse: probabilistisches Zylindermodell

Input			Cylinder-Model	
Parameter	Symbol	Unit	Input Values	
			Mean	ST. DEV.
Radius, innen, Geothermie-Reservoir	r1	m	0,010	0,001
Radius, außen, Geothermie-Reservoir	r2	m	193,000	30,000
Mächtigkeit, Geothermie-Reservoir	h	m	2,000	0,001
Porosität	ϕ	frac	0,150	0,050
Dichte, Gesteinsmatrix	ρ_m	kg/m ³	2180,000	10,000
Dichte, Porenfluid	ρ_f	kg/m ³	1150,000	10,000
spezifische Wärmekapazität, Gesteinsmatrix	c_m	kJ/(kg * K)	0,705	0,005
spezifische Wärmekapazität, Porenfluid	c_f	kJ/(kg * K)	4,113	0,005
Temperatur 1	T_r	°C	1,942	0,001
Temperatur 2	T_0	°C	0,001	0,001
Recovery Factor	R	frac	0,18	0,01

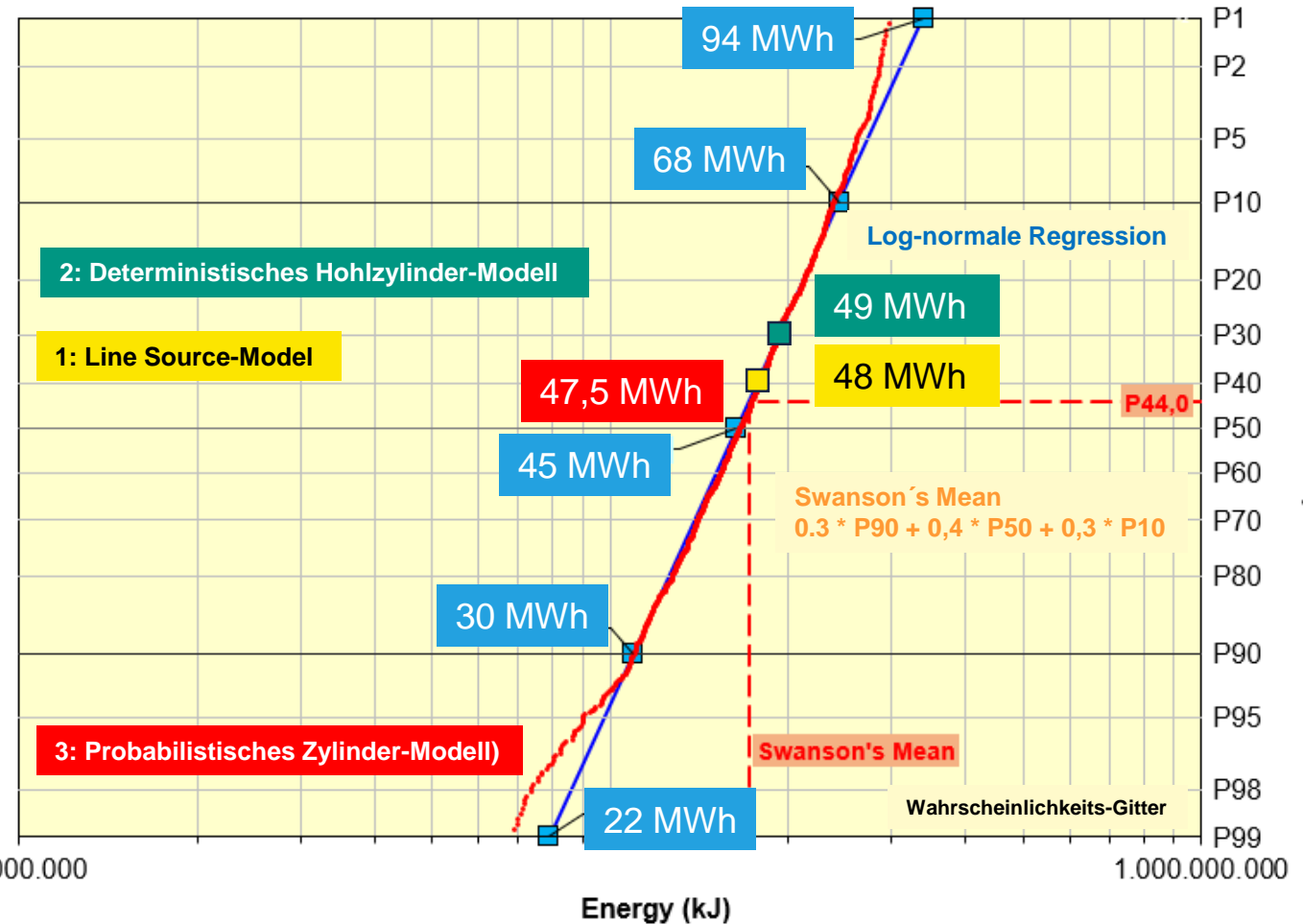
Heat, technically recoverable	H_{TR}	kJ	164.813.129,426	kJ
--------------------------------------	----------	----	------------------------	----



Monte Carlo Simulator



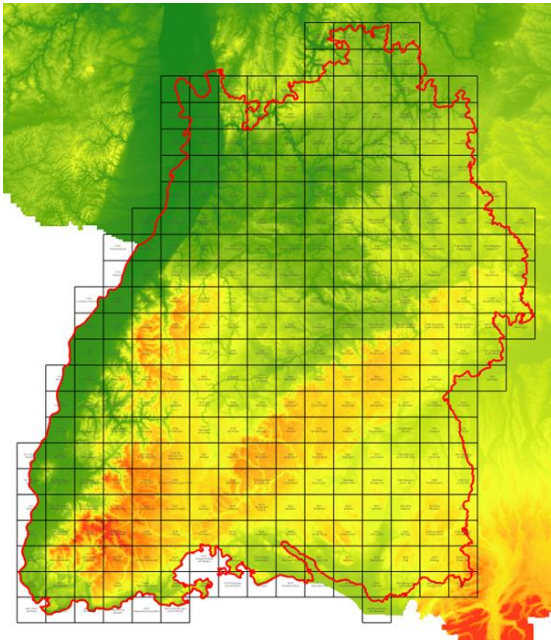
Karlsruhe Simulator for Geothermal Analysis of Minerals and Rocks



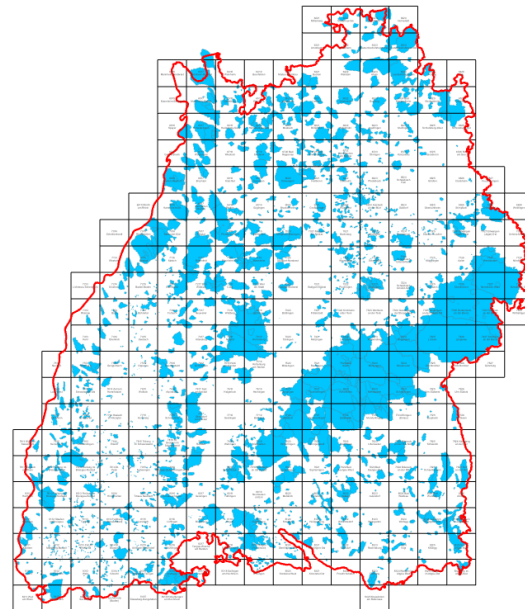
Benutzeroberfläche

- Das Gitter-Datenformat ist ökonomisch und erlaubt die Integration verschiedenster Informationen
- Erweiterungen im Oberrheingraben und in den Randgebieten erforderlich
- Lokale Verdichtung des Rasters
- Volle Potenzial-Analyse erfordert Zusatzinformationen aus öffentlichen Quellen....

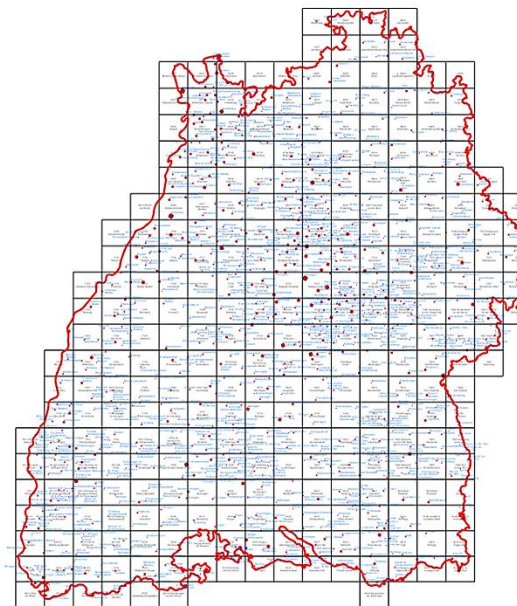
Topographie



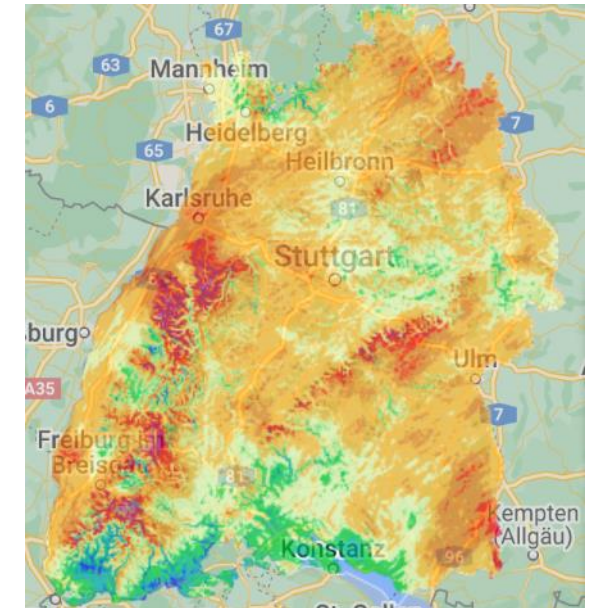
Schutz- und Ausschlußgebiete



1.100 Städte & Gemeinden

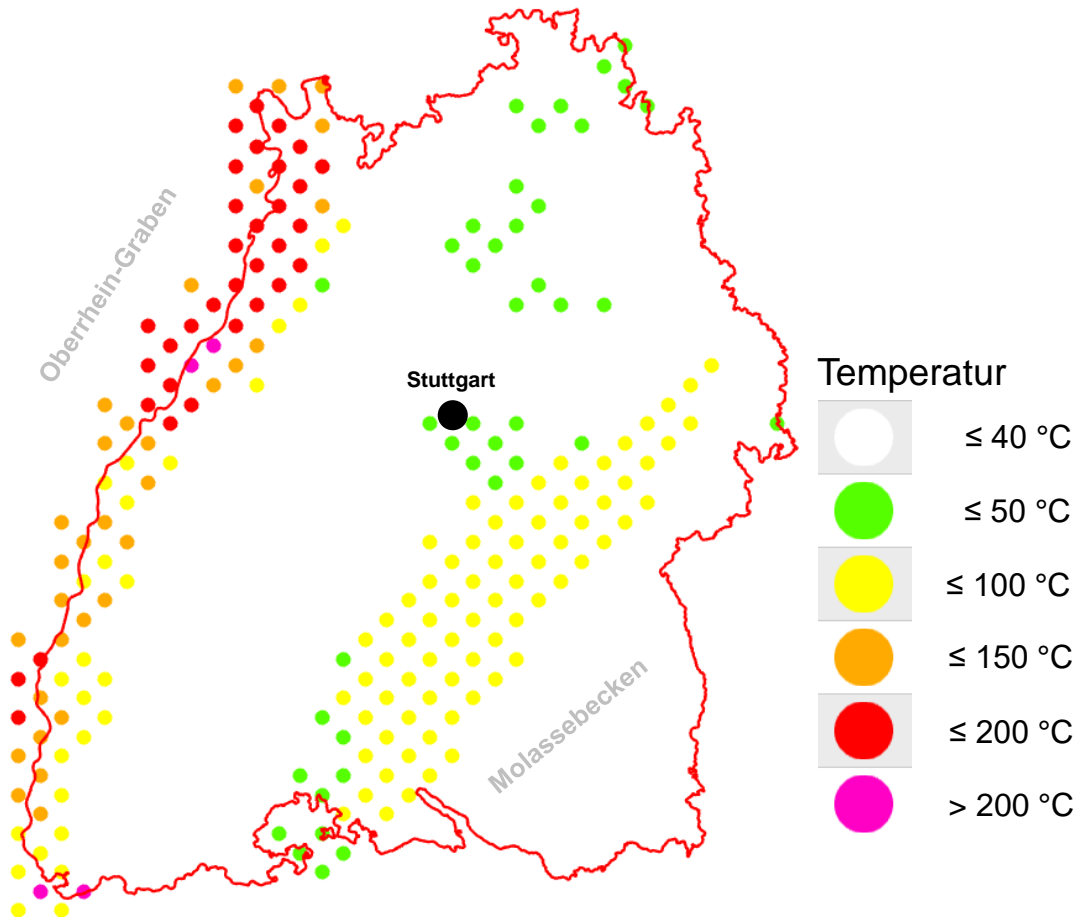


Erneuerbare Energien (Windatlas)

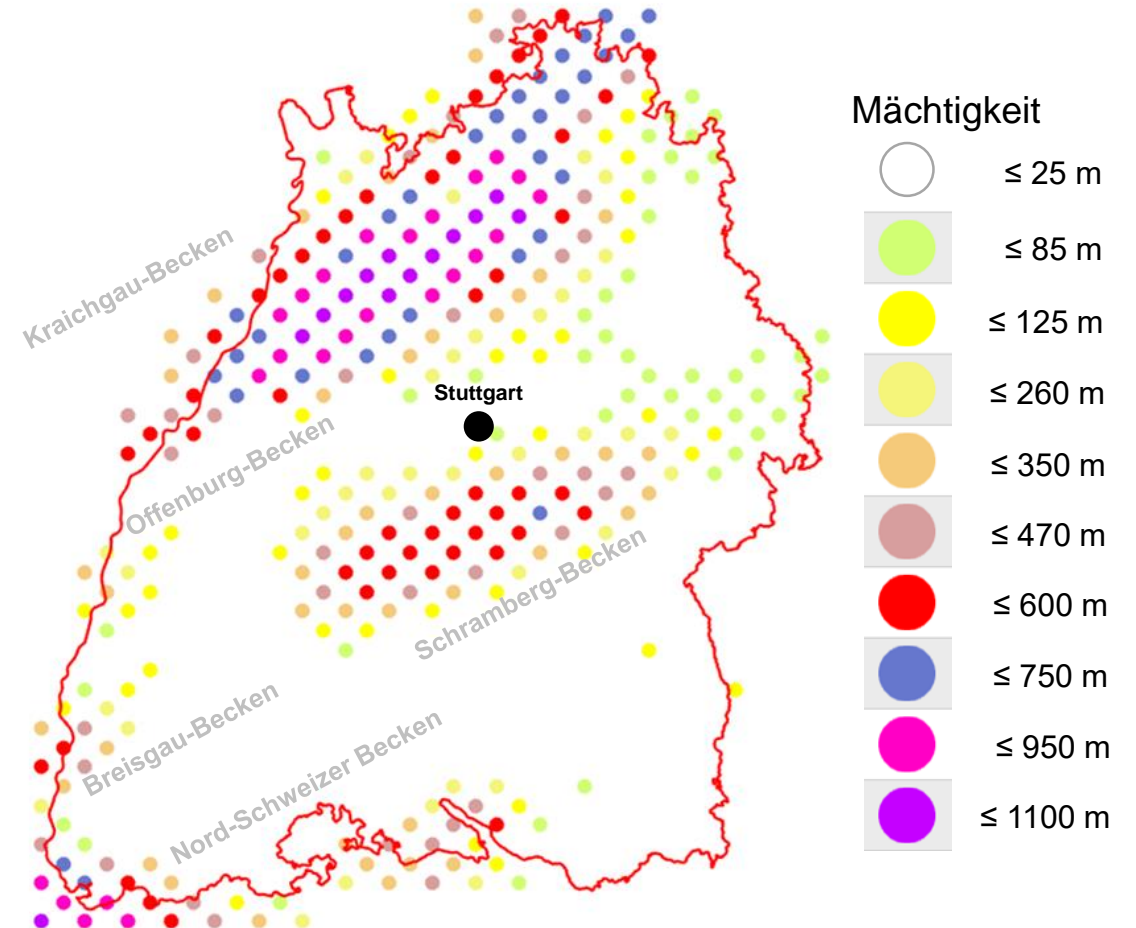


Beispiele

Subsurface Temperatur am Top Buntsandstein



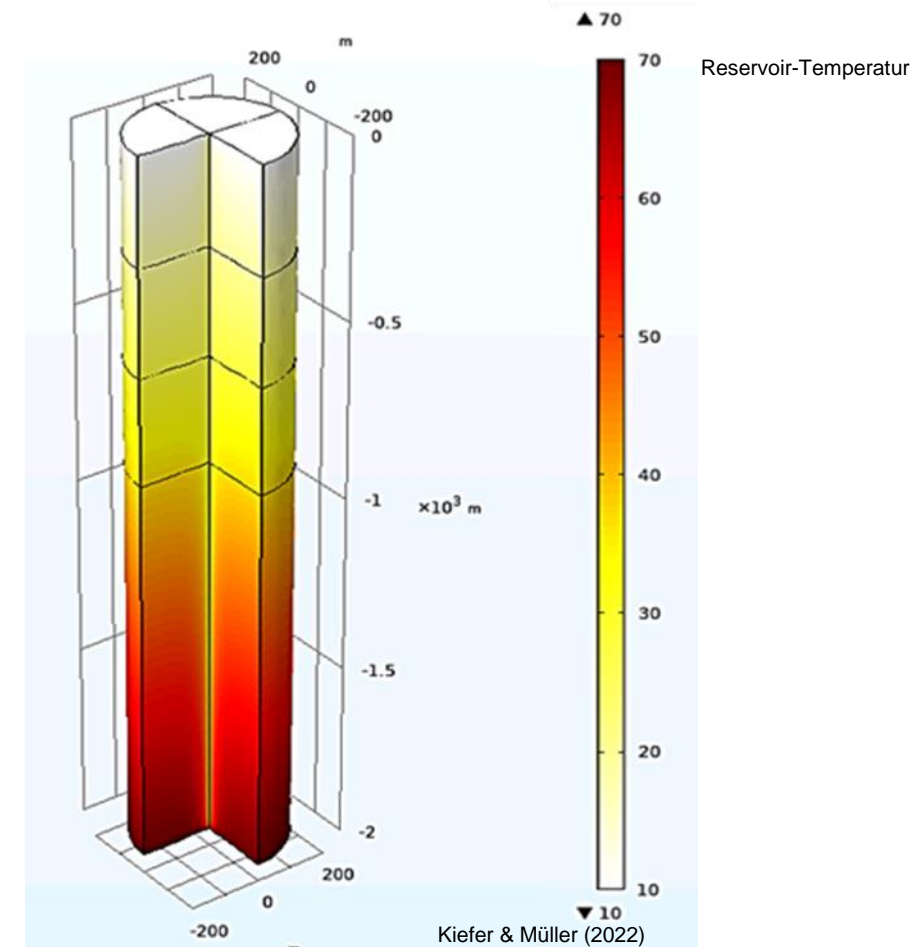
Mächtigkeit Oberkarbon - Rotliegend



Nächste Schritte

- Linienquellen-Modell rein konduktiv
 - Liefert sehr konservative Abschätzung
- Unsere Potenzialanalyse erfordert eine große Anzahl individueller Modelle
- Wir brauchen daher einen flexiblen Standard-Ansatz
- Die individuellen Modelle entstehen durch Anpassung der Eingangsparameter
- Die **COMSOL** Multi-Physics Plattform verfügt über diese Flexibilität
 - Konduktive Modelle
 - Doublettenbetrieb
- Bis Ende 2024 ist ein erster Modell „Roll-Out“ geplant

COMSOL



Vielen Dank !

Backup Slides

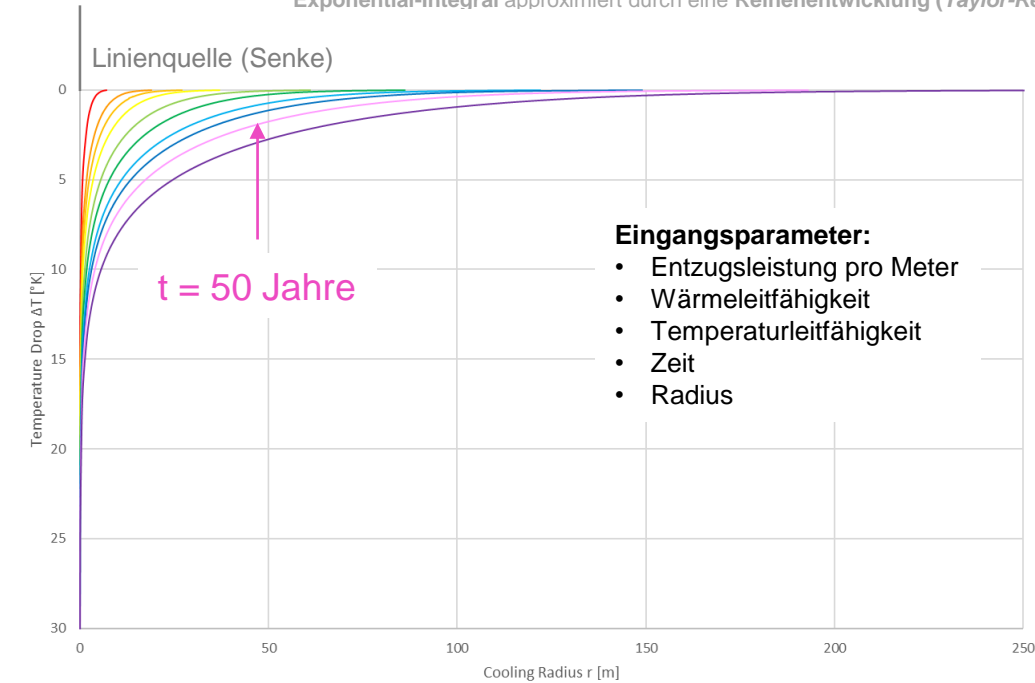
Wärmepotenzial-Berechnungen

1: Kelvin's Line Source Modell: ΔT als f (r)

nach Carslaw & Jaeger, 1959

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \int_y^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \left[-\gamma - \ln y + y - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot y^n}{n \cdot n!} \right]$$

Exponential-Integral approximiert durch eine Reihenentwicklung (Taylor-Reihe)

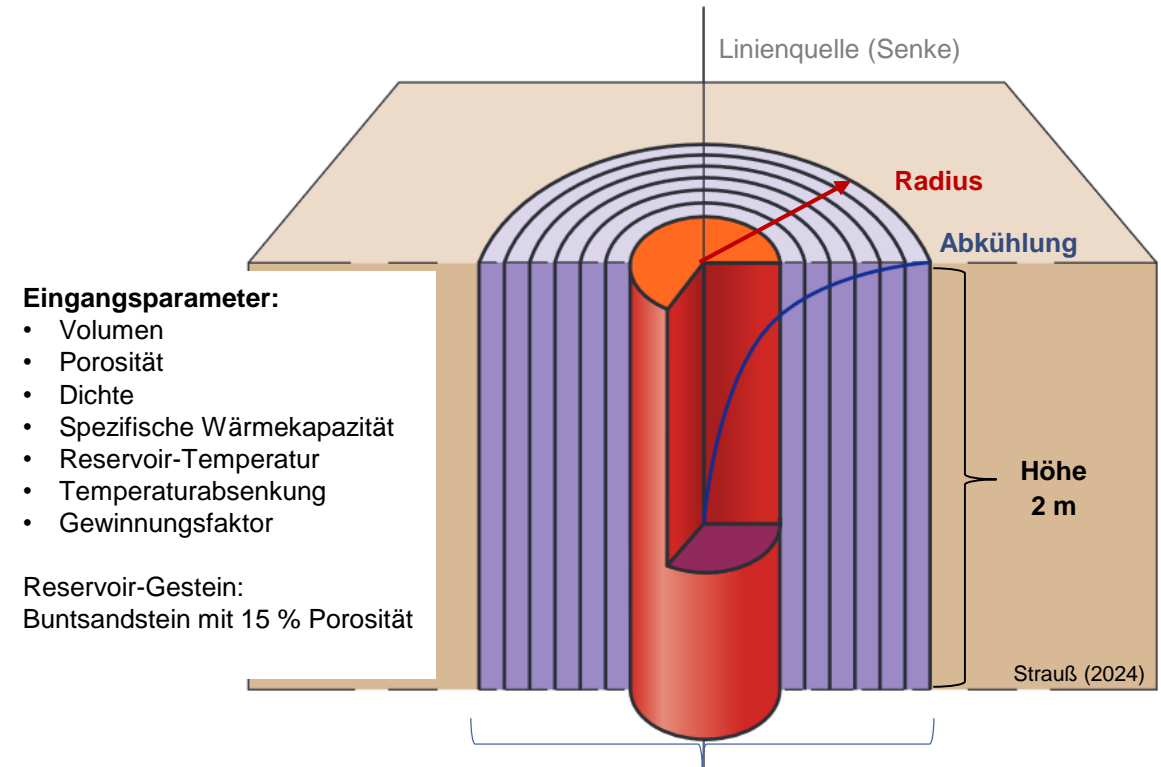


--- Initial Temperature — 1-Month — 6-Months — 1-Year — 2-Years — 5-Years
— 10-Years — 20-Years — 30-Years — 50-Years — 100-Years

2: Deterministisches Hohlzylinder-Modell: volumetrischer Ansatz

(Ansatz nach Agemar, Weber & Moeck, 2018)

$$H_0 = \{V * [(1 - \Phi) * \rho_m * c_m + \rho_f * c_f] * (T_{res} - T_0)\} * R$$



Eingangsparameter:

- Volumen
- Porosität
- Dichte
- Spezifische Wärmekapazität
- Reservoir-Temperatur
- Temperaturabsenkung
- Gewinnungsfaktor

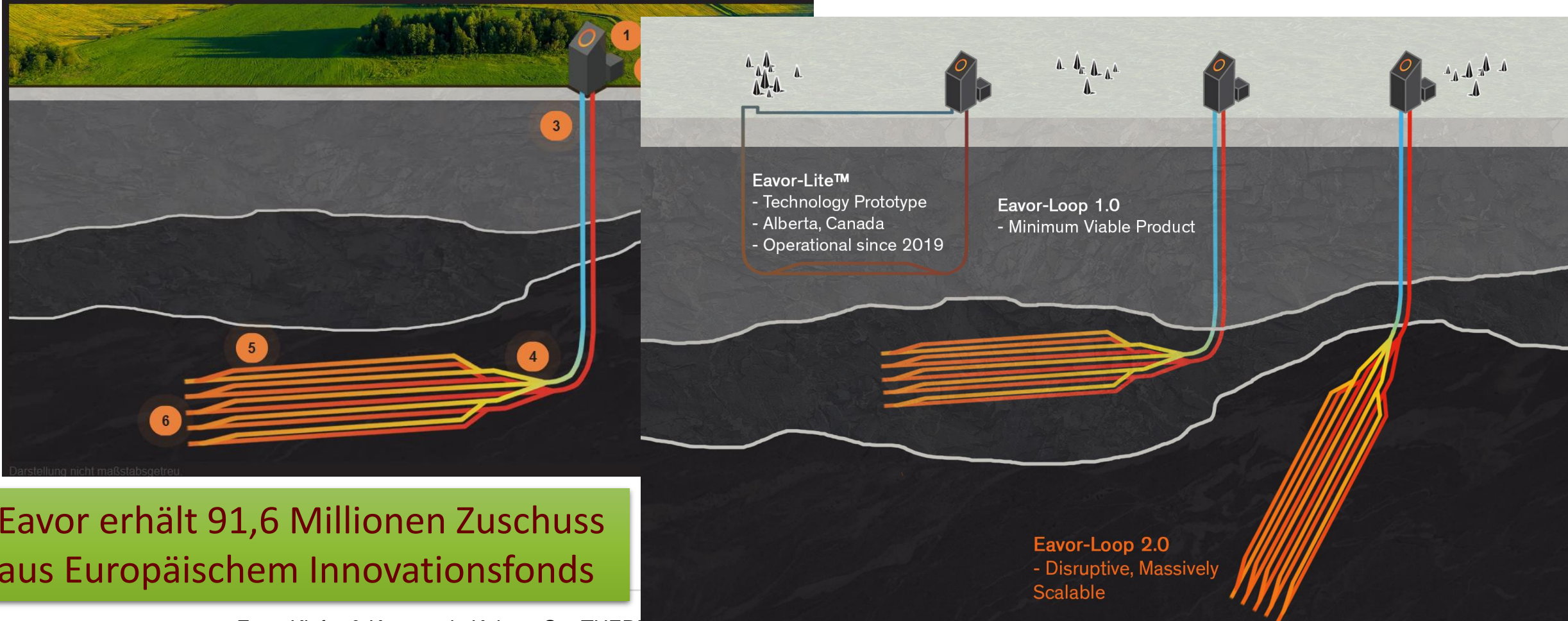
Reservoir-Gestein:
Buntsandstein mit 15 % Porosität

numerische Integration von $V_{\text{Hohlzylinder}}$ und Δt

(Zukunfts-)Konzept – Cloosed Loop (z.B. Eavor)

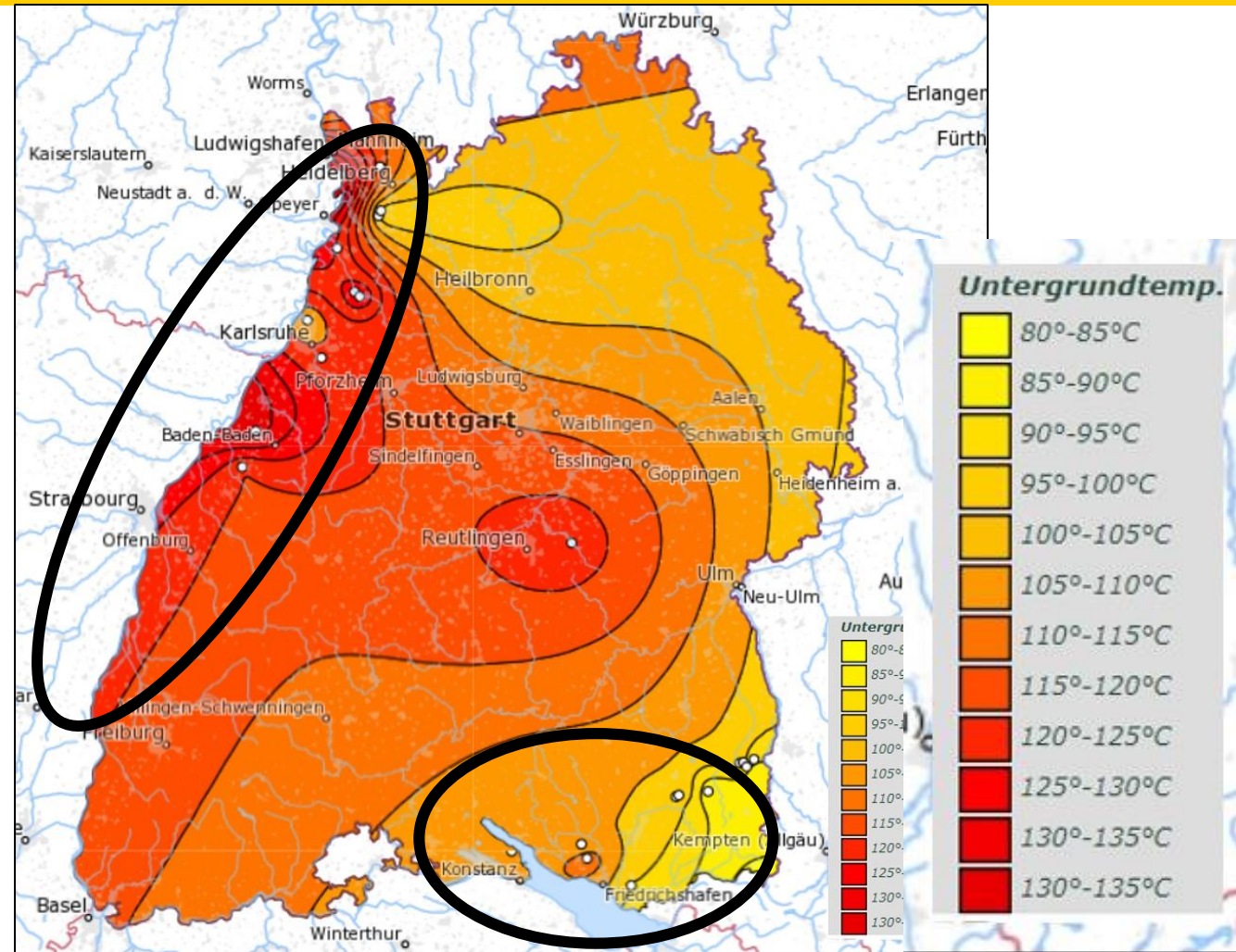


Funktionsweise des Eavor-Loop™



Eavor erhält 91,6 Millionen Zuschuss aus Europäischem Innovationsfonds

Untergrundtemperatur 2500 m – Schätzung



Quelle: Schellschmidt & Stober (2008)

Bohrungsdaten sind erforderlich, insbesondere für Tiefen > 2.5 km

Die Potenzial-/Temperaturkarten müssen überarbeitet werden!

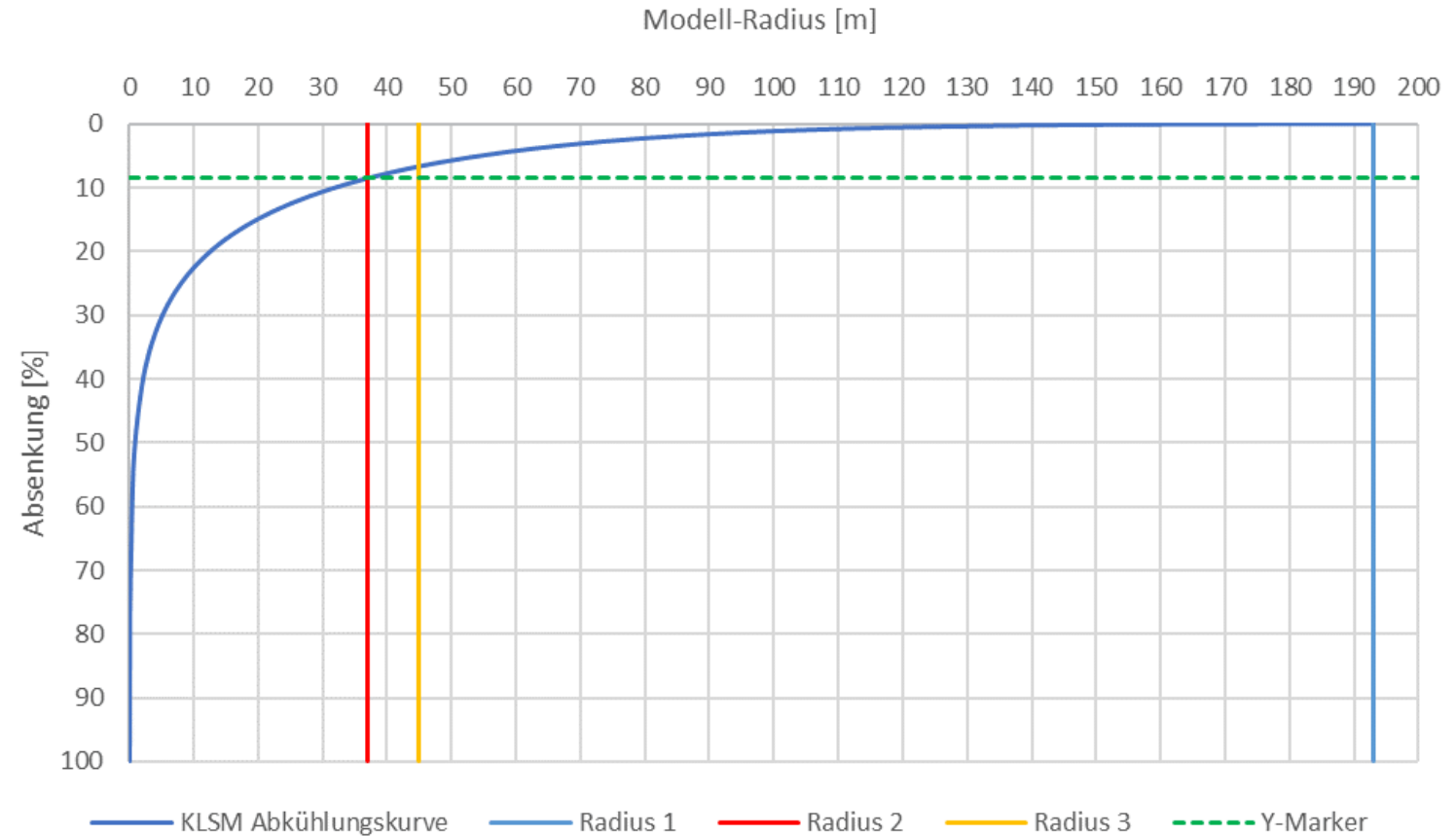
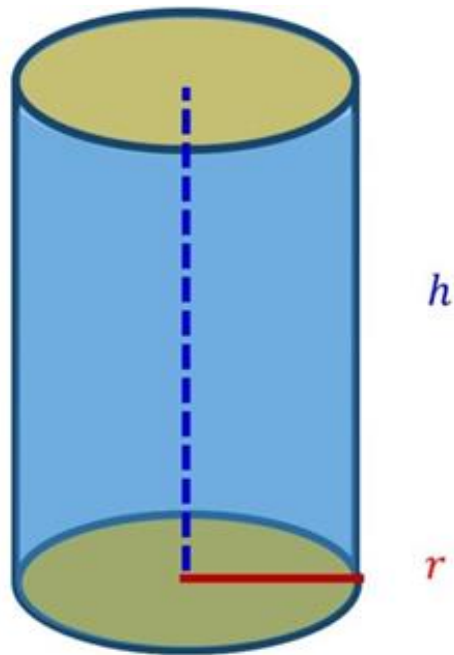
Problem: Gridding/Contouring mit zu wenig Stützstellen und keine Daten über die Landesgrenzen hinaus.

Wärmenetze
3. Generation


2. Generation

klassische
Wärmenetze

Ergebnis & Schlussfolgerungen



Prognostische Bohrprofile in BW

LGRB Informationssystem  **Baden-Württemberg**
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Oberflächennahe Geothermie - Anfrage vom 28.11.2023: Gemarkung 'Calw' Ost/Nord : 480839 / 5395395

Bohrprofil „Calw“

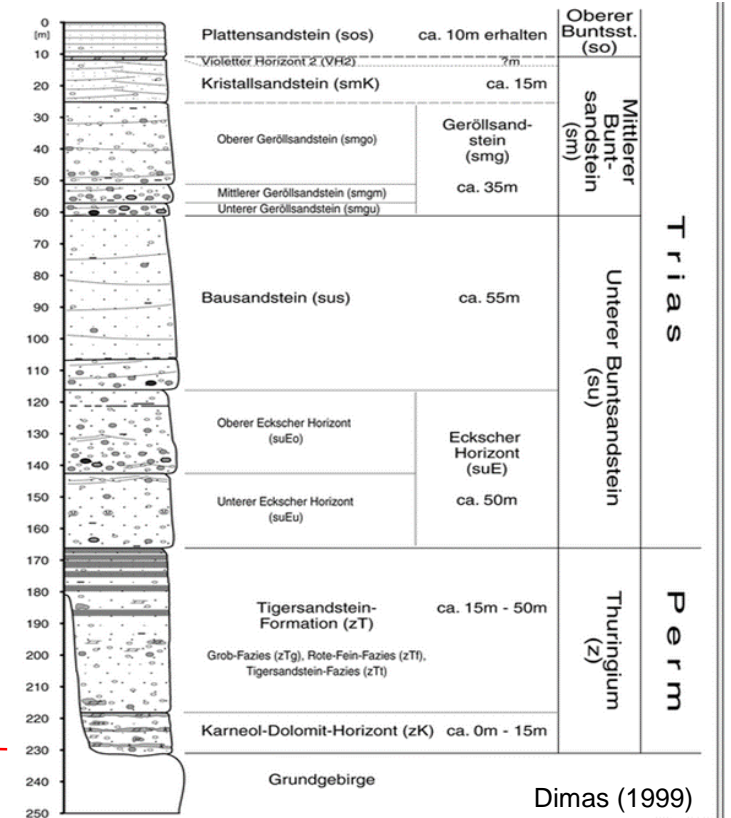
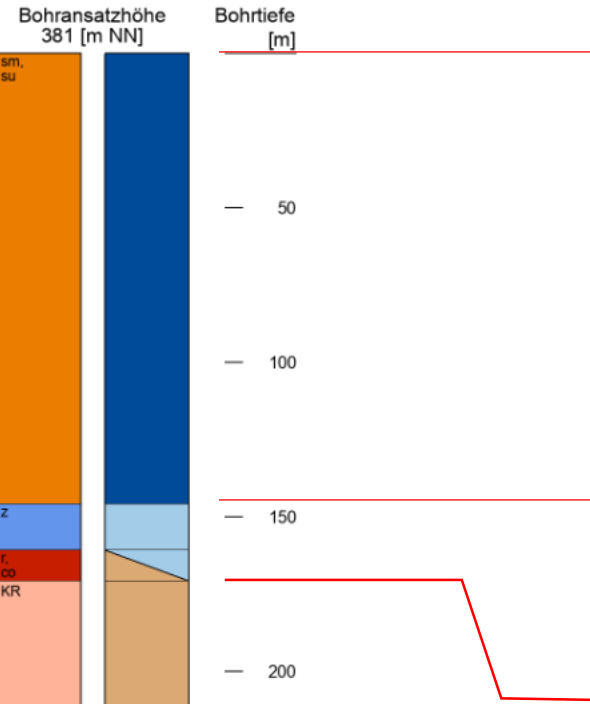
Prognostisches Bohrprofil

Sandstein, Tonstein; Mittlerer Buntsandstein sm und Unterer Buntsandstein su [Restmächtigkeit]

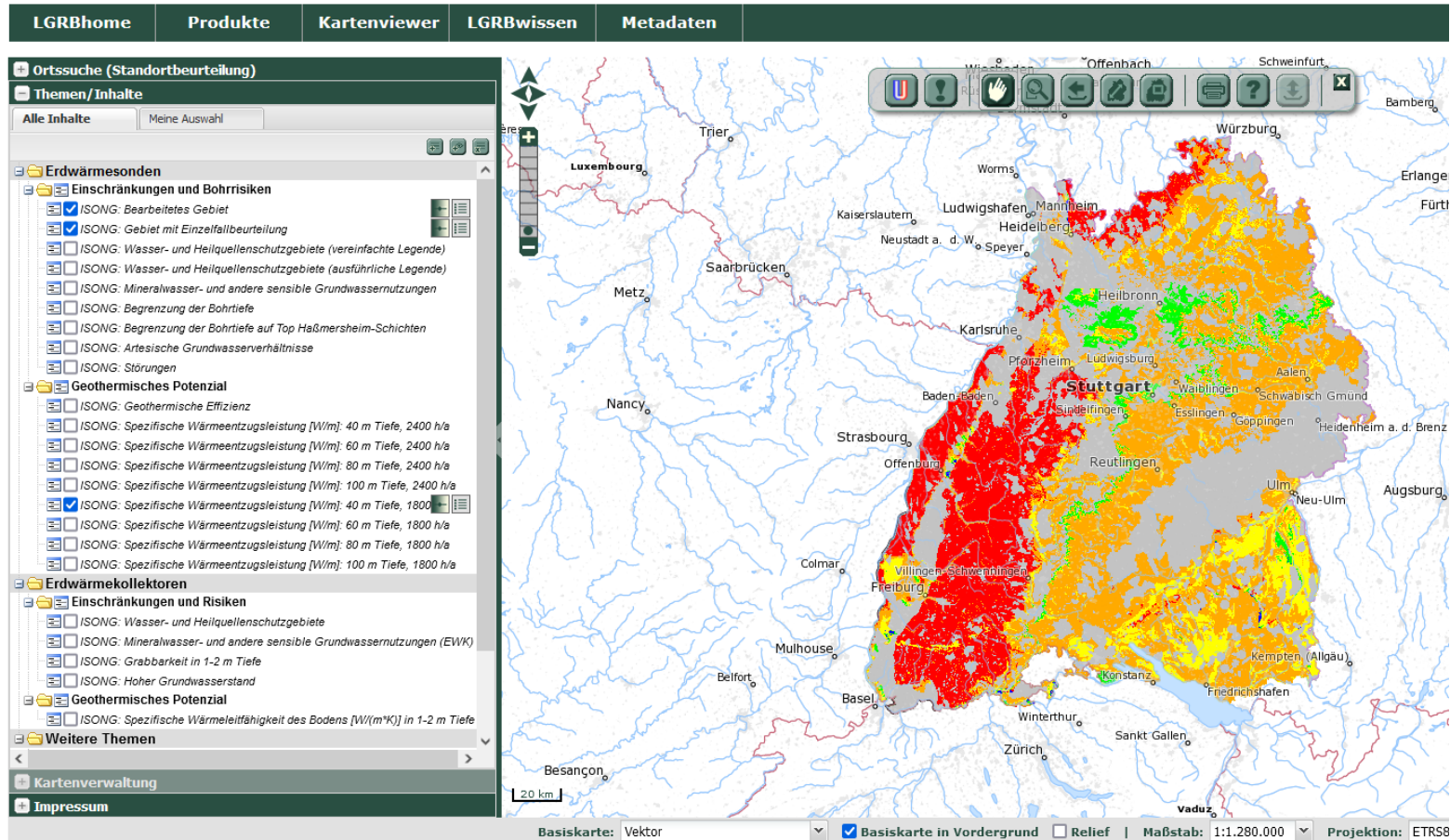
Arkose, Sandstein, Konglomerat; Zechstein z

Arkose, Sandstein, Tonstein, Schluffstein, Quarzporphyr; Rotliegend r und Oberkarbon co (Tiefenlage der Basis unsicher)

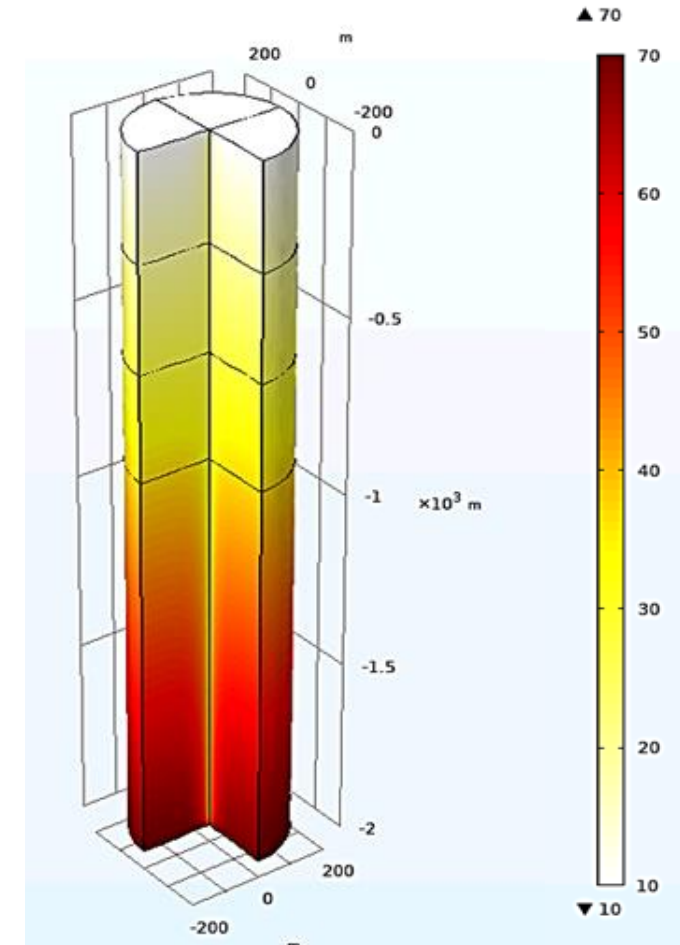
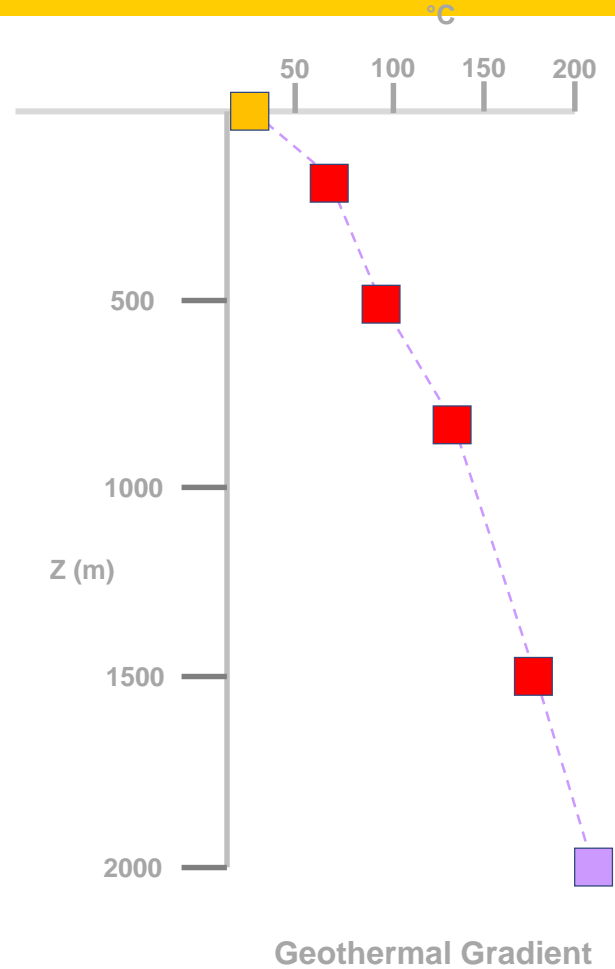
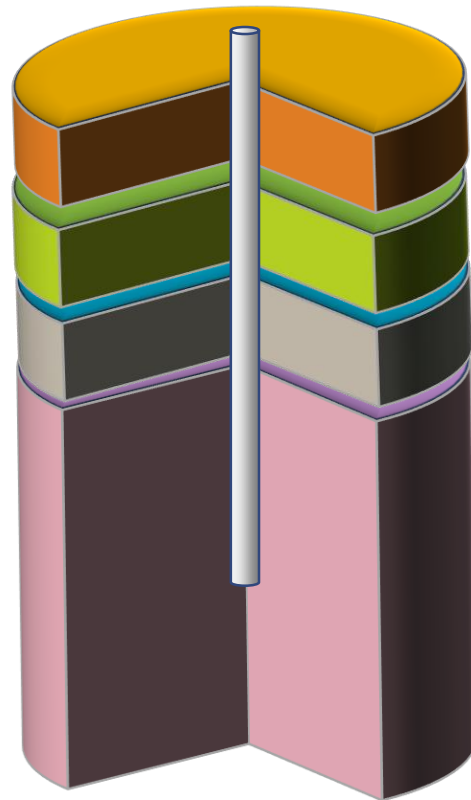
Granit, granitoides Gestein, Migmatit und Gneis; Metamorphes und Magmatisches Grundgebirge KR



Informationssystem OberflächennaheSONG



Deterministic Heat-In-Place

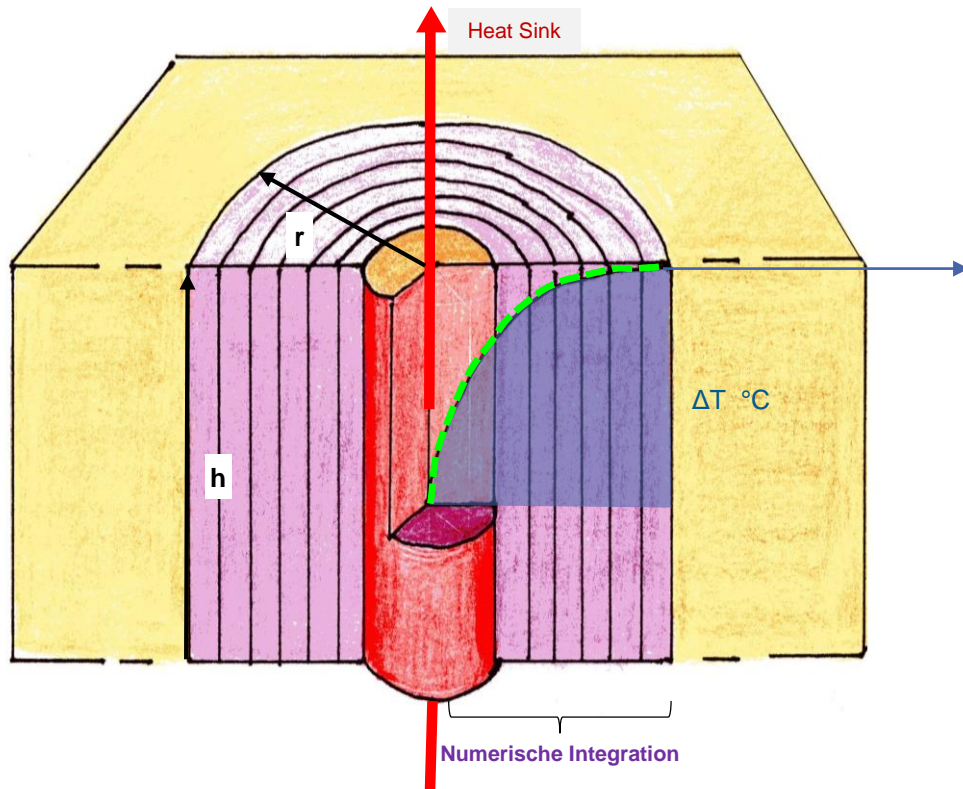


Kelvin's Line Source Modell

Statisches HIP Modell

$$H_0 = \{V * [(1 - \Phi) * \rho_m * c_m + \rho_f * c_f] * (T_{res} - T_0)\} * R$$

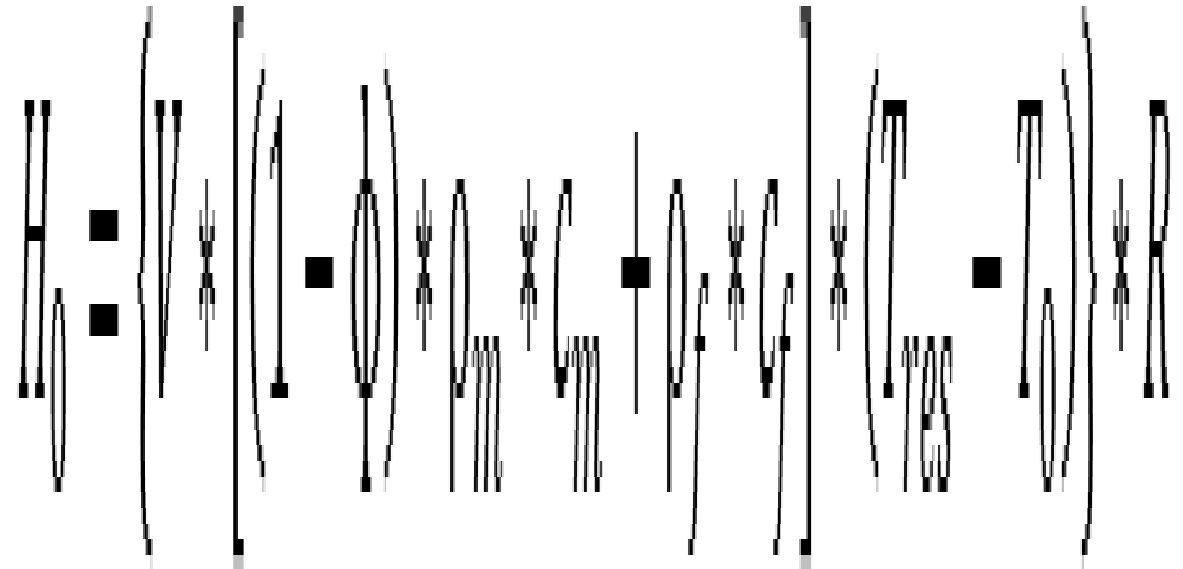
(Agemar, Weber & Moeck, 2018)



Petrophysikalisches HIP Modell mit Zeitabhängigkeit

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \left[-\gamma - \ln y + y - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot y^n}{n \cdot n!} \right]$$

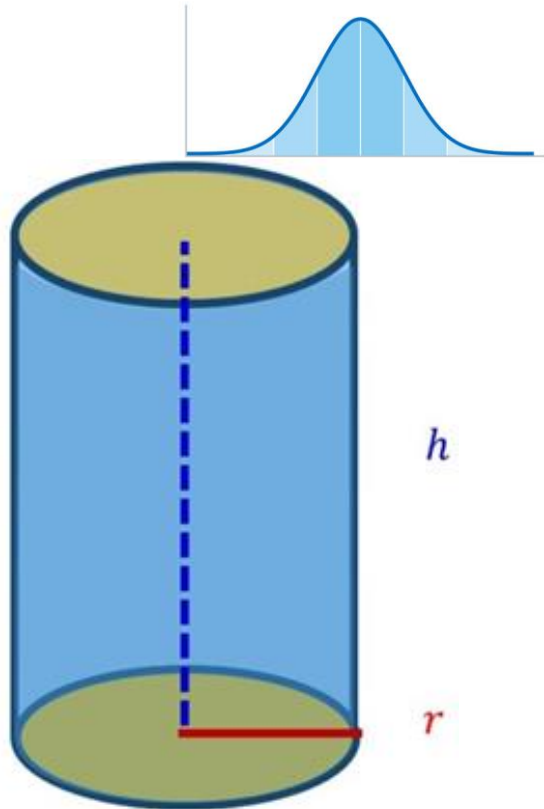
Kelvin's Line Source Modell (Loose, 2006; Erbas, 2001; Mogensen, 1981; Carslaw & Jaeger, 1959 in Kölbl, 2010)



Exponential-Integral approximiert durch eine Reihenentwicklung (Taylor-Reihe)

Institut für Angewandte Geowissenschaften AGW

Test: MC Simulator



Governing Equation

$$H_0 = V \cdot [(1 - \phi)\rho_m c_m + \phi\rho_f c_f] \cdot (T_r - T_0)$$

Agemar et al. (2018)

Press fn + F9 for Calculation (HP Elitebook)

Input

Parameter	Symbol	Unit
Radius, innen, Geothermie-Reservoir	r1	m
Radius, außen, Geothermie-Reservoir	r2	m
Mächtigkeit, Geothermie-Reservoir	h	m
Porosität	ϕ	frac
Dichte, Gesteinsmatrix	ρ_m	kg/m ³
Dichte, Porenfluid	ρ_f	kg/m ³
spezifische Wärmekapazität, Gesteinsmatrix	c_m	kJ/(kg * K)
spezifische Wärmekapazität, Porenfluid	c_f	kJ/(kg * K)
Reservoir-Temperatur	T_r	°C
Oberflächen-Temperatur (oder Abkühlung)	T_0	°C
Recovery Factor	R	frac

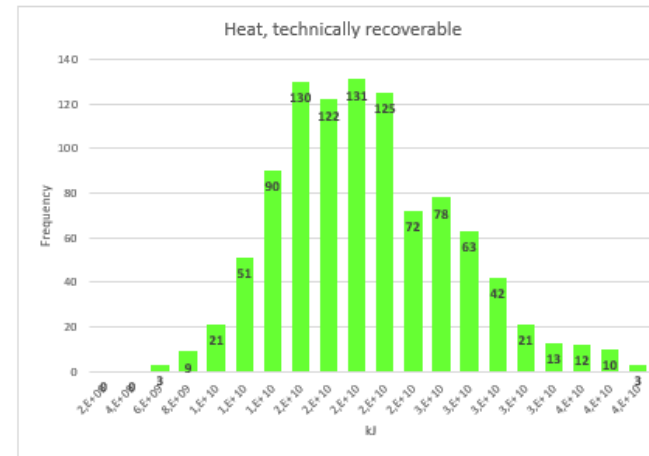
Cylinder-Model

Parameter	Input Values		Initial Stochastic Model
	Mean	ST. DEV.	
Radius, innen, Geothermie-Reservoir	0,010	0,001	0,008
Radius, außen, Geothermie-Reservoir	193,000	30	180,474
Mächtigkeit, Geothermie-Reservoir	2,000	0,001	2,000
Porosität	0,150	0,050	0,061
Dichte, Gesteinsmatrix	2180,000	10,000	2.165,913
Dichte, Porenfluid	1150,000	10,000	1.144,547
spezifische Wärmekapazität, Gesteinsmatrix	0,705	0,005	0,704
spezifische Wärmekapazität, Porenfluid	4,113	0,005	4,112
Reservoir-Temperatur	120,000	1,000	120,628
Oberflächen-Temperatur (oder Abkühlung)	0,100	0,001	0,100
Recovery Factor	0,34	0,0001	0,340

MC Simulator

MC Simulations	
Trial	1.000
1	14.432.663.113,552
2	18.724.716.561,684
3	26.614.484.374,801
4	31.756.157.358,342
5	25.217.780.541,146
6	15.969.722.069,670
7	14.022.696.224,766
8	18.332.181.689,524
9	8.882.739.357,081
10	22.603.154.264,904
11	13.537.554.228,516
12	15.872.666.015,737
13	27.716.502.455,053
14	23.454.534.778,034
15	17.263.890.348,715
16	8.458.164.499,597
17	22.210.650.653,856
18	12.643.486.632,331
19	17.331.635.363,730
20	11.085.705.946,832
21	18.559.137.115,358
22	15.023.914.189,786
23	24.209.414.873,197
24	36.470.977.186,402
25	18.071.976.962,903
26	12.652.311.781,314
27	15.456.638.939,663
28	29.315.850.133,526
29	17.362.184.811,245
30	16.617.990.182,644
31	18.339.178.841,589
32	18.012.746.813,121
33	37.776.800.355,729
34	9.870.242.050,554
35	29.158.814.796,302

Heat, technically recoverable H_{TR} kJ **19.233.238.370,386** kJ **14.432.663.113,552**



Results from MC Simulator

Min	4.525.811,990	kJ
Mean (ari.)	19.833.140,228	kJ
Max	53.386.936,090	kJ
Min	1.257.170,00	kWh
Mean	5.509.205,62	kWh
Max	14.829.704,47	kWh

Kosten für Fernwärme

Min. ct / kWh	7
Min. ct / kWh	12
Euro, min	385644,39
Euro, max	661104,67

x 1000 Iterationen

Kelvin's Line Source Modell

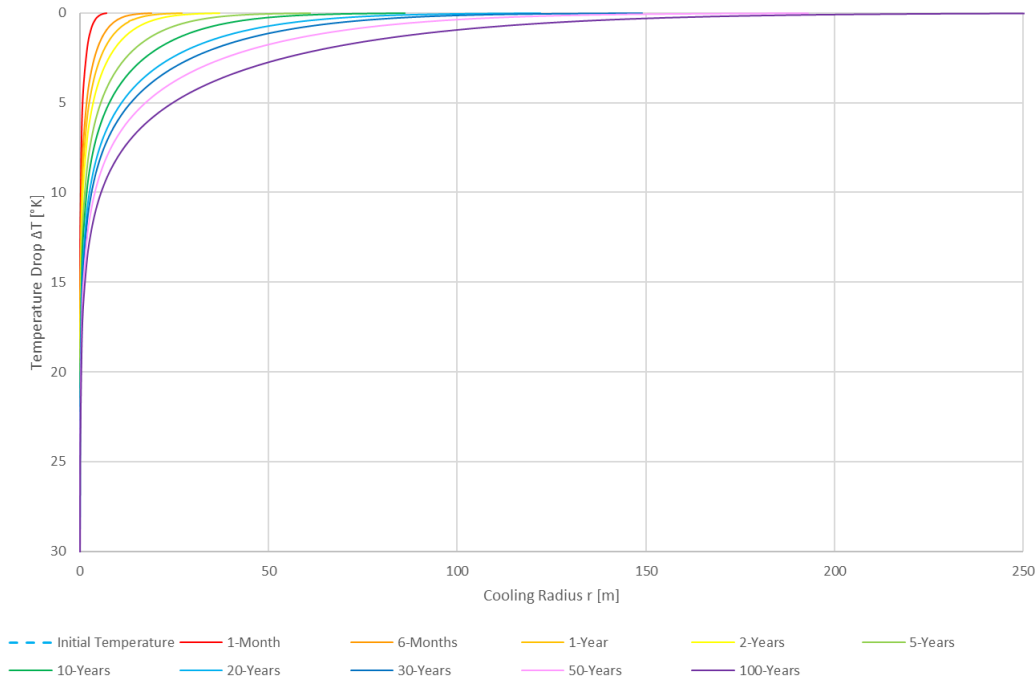
Kelvin's Line Source Modell

Loose, 2006; Erbas, 2001; Mogensen, 1981; Carslaw & Jaeger, 1959 in Kölbl, 2010

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \int_y^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \left[-\gamma - \ln y + y - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot y^n}{n \cdot n!} \right]$$

Exponential-Integral approximiert durch eine Reihenentwicklung (Taylor-Reihe)

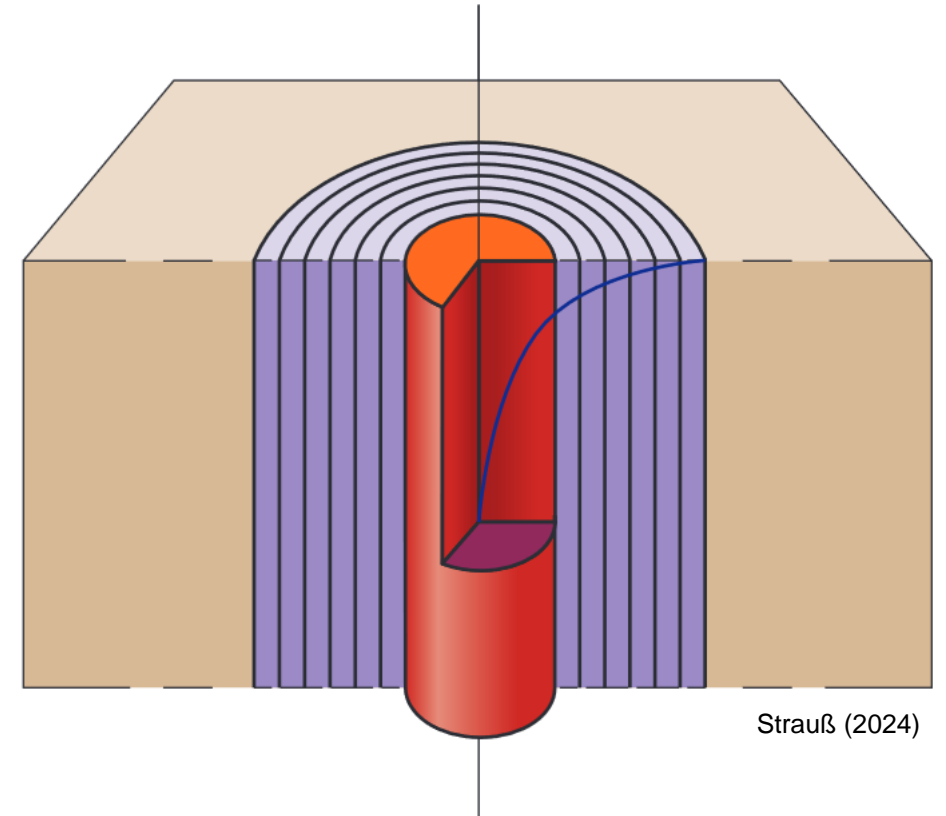
Kelvin's Line Source Model: Cooling Radius



Deterministisches Zylinder-Modell

(Agemar, Weber & Moeck, 2018)

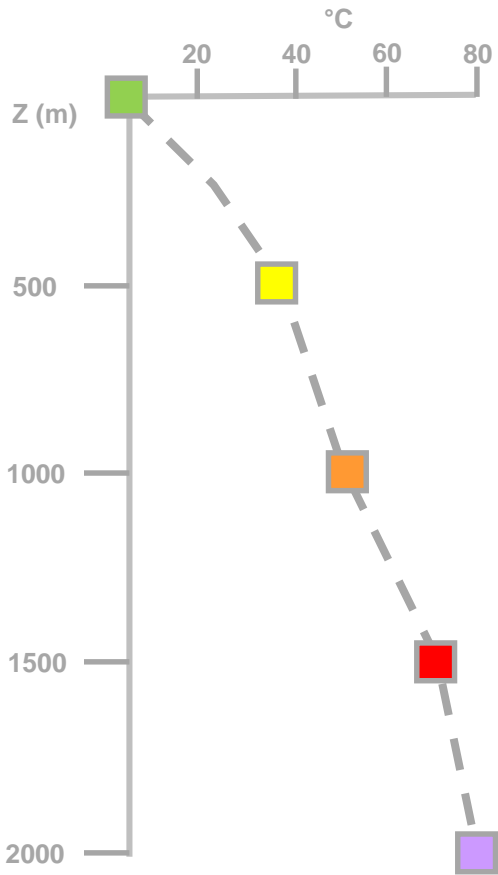
$$H_0 = \{V * [(1 - \phi) * \rho_m * c_m + \rho_f * c_f] * (T_{res} - T_0)\} * R$$



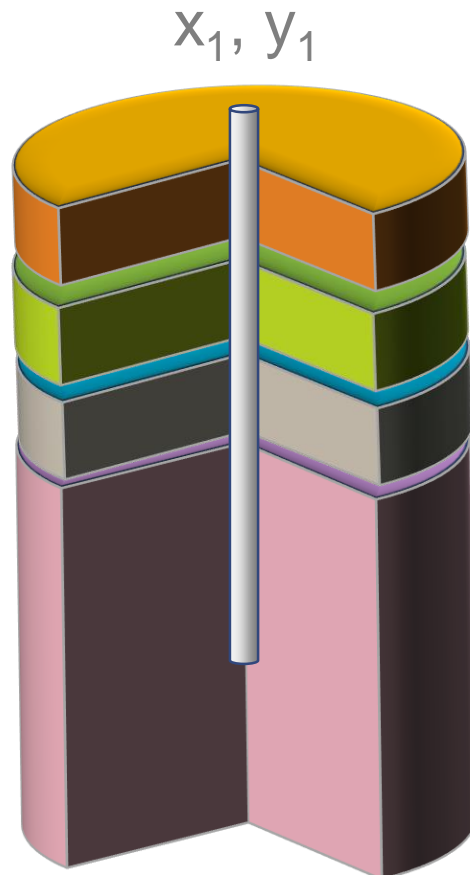
- **Einleitung:** Regionale Wärmeanomalien in BW insbesondere im ORG sind aufgezeigt; Vielzahl von Extraktionsverfahren sind mathematisch beschrieben, Förderpotenziale sollen prognostiziert werden: Ein Problem ist die Dimensionierung eines Simulationsmodells; Man kann raten oder annehmen oder berechnen; wir stellen eine Strategie vor
- **Geologisch-petrophysikalisches Modell:** Was ist das strategische Ziel? Was gehört zu einem geologisch-petrophysikalisches Modell? Was sind die möglichen Strategien zu Potenzialbestimmung
- **Deterministisches Modell:** Kelvin's Line Source Modell; 2 Aspekte: a) statisches Volumen, b) Näherungslösung für einen Modellradius
- **Probabilistisches Modell:** MC Simulator, wie funktioniert dieser?
- **Statistischer Vergleich der Modelle:** 3-Stufen-Lösung: a) Statisches Volumen, b) Swanson's Mean, c) full Prob.
- **Anwendungen in BW**

Ziel: Bohrprofil und Potenzialanalyse für einen beliebigen Ort in BW

Geothermischer Gradient



Stratigraphisches Profil



GIS-Datenbank

Stadt, Gemeinde Long. [°], Lat. [°]	Geotherm. Gradient [°C/100 m]	Mächtigkeit [m]	Attribute
x_1, y_1	3,84	120	1
x_2, y_2	4,60	230	4
x_3, y_3	3,65	190	3
x_4, y_4	4,88	750	2

Layer 1
Layer 2
Layer 3
Layer 4

Math Wizard



Visualisierung & Interpretation

Probabilistisches Modell

Governing Equation

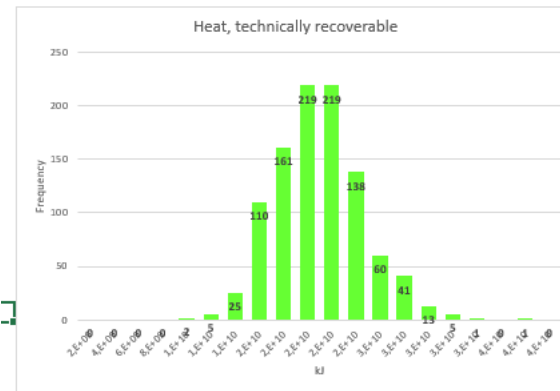
$$H_0 = V \cdot [(1 - \phi)\rho_m c_m + \phi\rho_f c_f] \cdot (T_r - T_o)$$

Agemar et al. (2018)

Press fn + F9 for Calculation (HP Elitebook)

Input			Cylinder-Model		Initial Stochastic Model
Parameter	Symbol	Unit	Mean	ST. DEV.	
Radius, innen, Geothermie-Reservoir	r1	m	0,010	0,001	0,010
Radius, außen, Geothermie-Reservoir	r2	m	114,000	10	117,958
Mächtigkeit, Geothermie-Reservoir	h	m	2,000	0,001	2,001
Porosität	φ	frac	0,150	0,050	0,129
Dichte, Gesteinsmatrix	ρ _m	kg/m ³	2180,000	10,000	2.177,458
Dichte, Porenfluid	ρ _f	kg/m ³	1150,000	10,000	1.156,205
spezifische Wärmekapazität, Gesteinsmatrix	c _m	kJ/(kg·K)	0,705	0,005	0,715
spezifische Wärmekapazität, Porenfluid	c _f	kJ/(kg·K)	4,113	0,005	4,117
Reservoir-Temperatur	T _r	°C	120,000	1,000	120,826
Oberflächen-Temperatur (oder Abkühlung)	T _o	°C	0,100	0,001	0,102
Recovery Factor	R	frac	1	0,0001	1,000

Heat, technically recoverable H_{TR} kJ **19.736.429.135,030** kJ **20.790.350.452,829**



MC Simulator

MC Simulations	
Trial	1.000
1	20.790.350.452,829
2	22.234.656.524,166
3	16.938.729.709,032
4	19.584.364.195,092
5	20.677.069.881,876
6	23.069.133.017,045
7	20.252.870.013,279
8	17.632.257.765,692
9	21.288.674.653,733
10	20.778.104.911,145
11	16.377.212.304,099
12	16.440.718.001,147
13	20.094.549.221,613
14	29.642.562.799,425
15	18.276.151.529,702
16	21.238.663.314,690
17	24.796.697.674,624
18	15.893.832.975,123
19	13.270.268.392,952
20	16.486.412.295,136
21	14.820.634.127,602
22	21.202.194.238,377
23	17.805.206.600,194
24	15.735.014.672,898
25	20.820.050.991,542
26	22.914.156.366,425
27	20.743.896.476,762
28	19.591.826.829,952
29	24.937.353.420,957
30	17.653.327.659,812
31	22.369.255.657,585
32	26.305.473.828,792
33	16.561.283.209,490
34	23.039.943.407,238
35	25.580.999.262,297

Histogram

Class	Frequency
2.000.000.000	0
4.000.000.000	0
6.000.000.000	0
8.000.000.000	0
10.000.000.000	2
12.000.000.000	5
14.000.000.000	25
16.000.000.000	110
18.000.000.000	161
20.000.000.000	219
22.000.000.000	219
24.000.000.000	138
26.000.000.000	60
28.000.000.000	41
30.000.000.000	13
32.000.000.000	5
34.000.000.000	1
36.000.000.000	0
38.000.000.000	1
40.000.000.000	0
last plus	0

Results from MC Simulator

Min	9.065.080.885	kJ
Mean (ari.)	19.948.384.564	kJ
Max	36.103.357.861	kJ

Min	2.518.078,02	kWh
Mean	5.541.217,33	kWh
Max	10.028.710,52	kWh

Kosten für Fernwärme

Min, ct/kWh	7
Min, ct/kWh	12
Euro, min	387885,26
Euro, max	664946,15

Geologisch-petrophysikalisches Modell

Schritt 2: Heat-In-Place mit einer MC Simulation

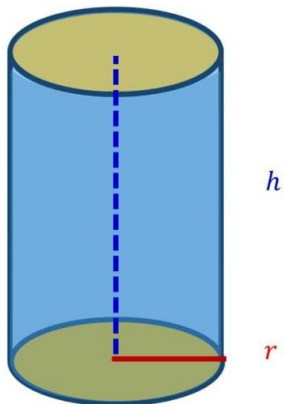
Wärmepotenzial: $H_0 =$ Heat-in-Place (kJ)

$$H_0 = \{V * [(1 - \phi) * \rho_m * c_m + \rho_f * c_f] * (T_{res} - T_0)\} * R$$

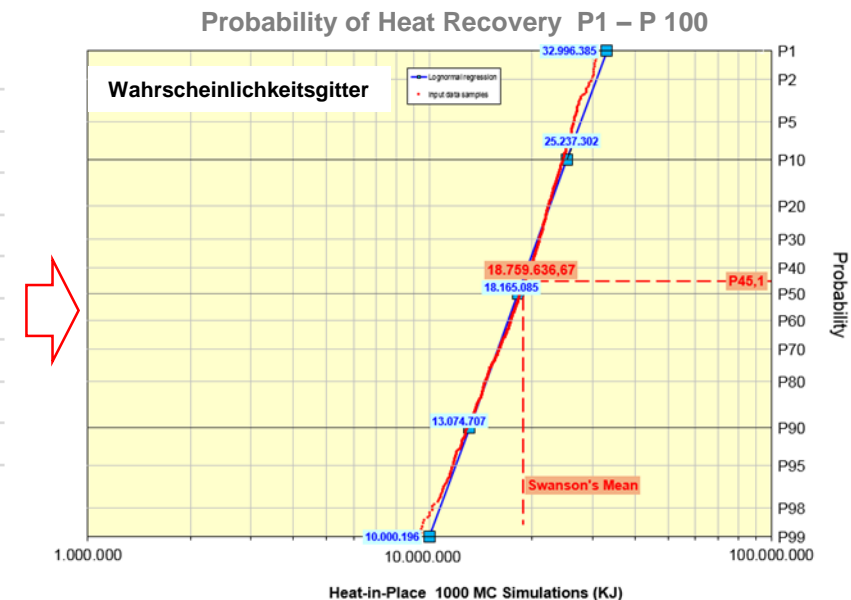
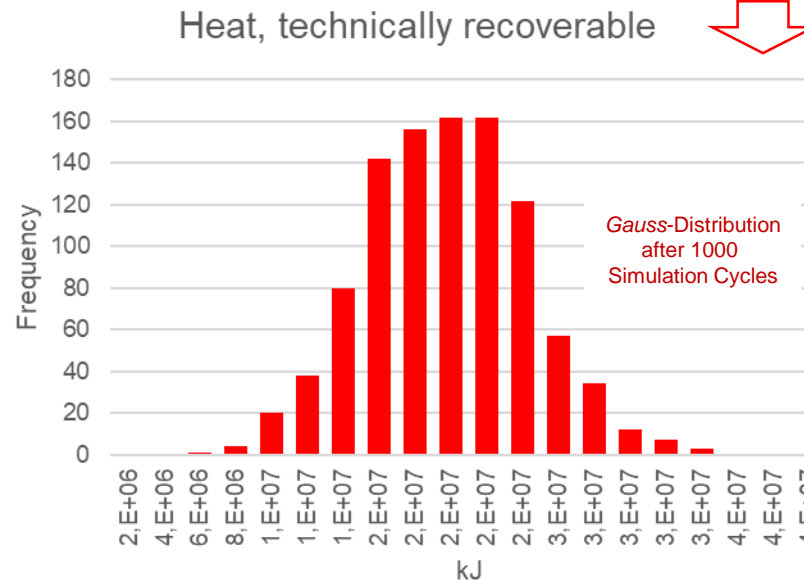
- Deterministische Volumetrie (Agemar, Weber & Moeck, 2018)
- Probabilistische Volumetrie (KIT, LFZG)...warum?
 - Variabilität von r nach Kelvin's Line Source-Modell
 - Geologische Streuung von $\rho_{m,f}$ und $c_{m,f}$
 - Abhängigkeit von R von t und Q_{EWS}

- V** = Volumen des Geothermie-Reservoirs
- ϕ** = Porosität des Reservoir-Gesteins
- $\rho_{m,f}$** = Matrix-Dichte des Reservoir-Gesteins und Dichte des Poren-Fluids
- $c_{m,f}$** = Spezifische Wärmekapazität der Gesteinsmatrix und des Poren-Fluids
- T_{res}** = Reservoir-Temperatur vor Wärmeentnahme (tiefenabhängig → geothermischer Gradient)
- T_0** = Reservoir-Temperatur nach Wärmeentnahme
- R** = Recovery-Faktor (siehe Schritt 1: Kelvin's Line Source-Modell)

Parametrisierung: Mean + Standardabweichung → Monte Carlo-Simulation (Programm)



Hier: Zylinder-Modell nach Line Source-Ansatz für das geothermische Reservoir.
Geometrische Alternativen: Waben-Modell, Kugel-Modell

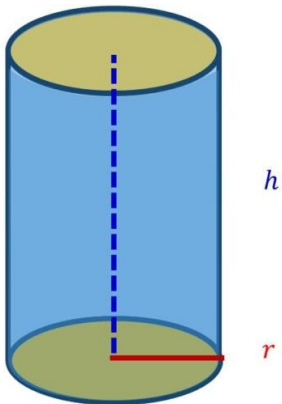


Modellparameter

Schritt 2: Heat-In-Place mit einer MC Simulation

$$H_0 = \{V * [(1 - \phi) * \rho_m * c_m + \rho_f * c_f] * (T_{res} - T_0)\} * R$$

- Deterministische Volumetrie (Agemar, Weber & Moeck, 2018)
- Probabilistische Volumetrie (KIT, LFZG)...warum?
 - Variabilität von r nach Kelvin's Line Source-Modell
 - Geologische Streuung von $\rho_{m,f}$ und $c_{m,f}$
 - Abhängigkeit von R von t und Q_{EWS}

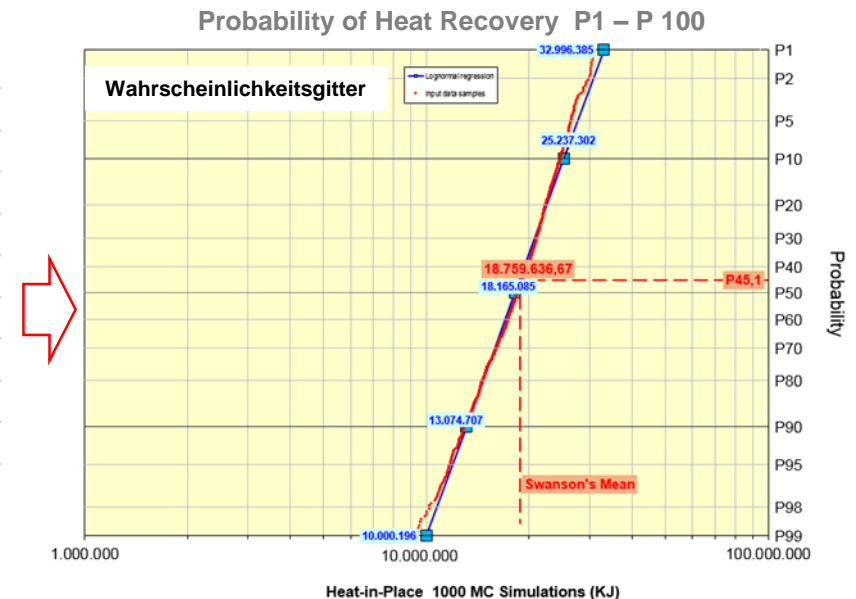
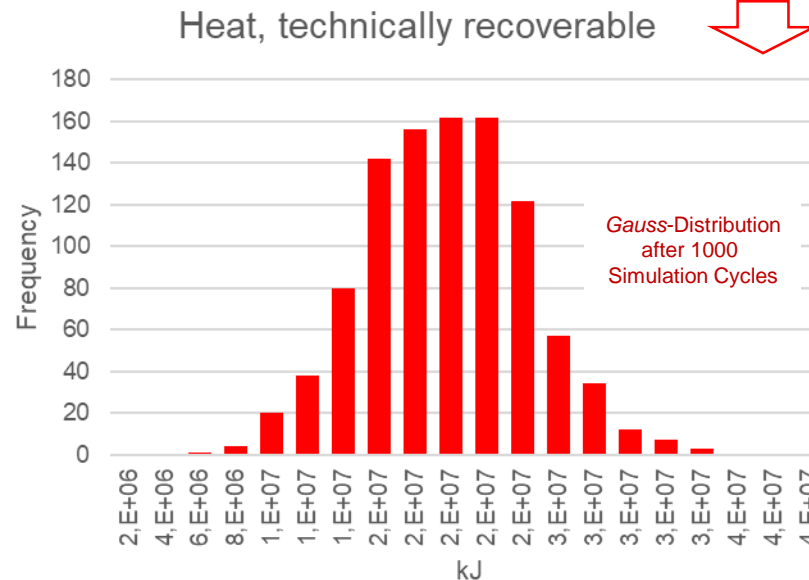


Hier: Zylinder-Modell nach Line Source-Ansatz für das geothermische Reservoir.
Geometrische Alternativen: Waben-Modell, Kugel-Modell

Wärmepotenzial: $H_0 =$ Heat-in-Place (kJ)

- V** = Volumen des Geothermie-Reservoirs
- ϕ** = Porosität des Reservoir-Gesteins
- $\rho_{m,f}$** = Matrix-Dichte des Reservoir-Gesteins und Dichte des Poren-Fluids
- $c_{m,f}$** = Spezifische Wärmekapazität der Gesteinsmatrix und des Poren-Fluids
- T_{res}** = Reservoir-Temperatur vor Wärmeentnahme (tiefenabhängig → geothermischer Gradient)
- T_0** = Reservoir-Temperatur nach Wärmeentnahme
- R** = Recovery-Faktor (siehe Schritt 1: Kelvin's Line Source-Modell)

Parametrisierung: Mean + Standardabweichung → Monte Carlo-Simulation (Programm)



Deterministisches Modell

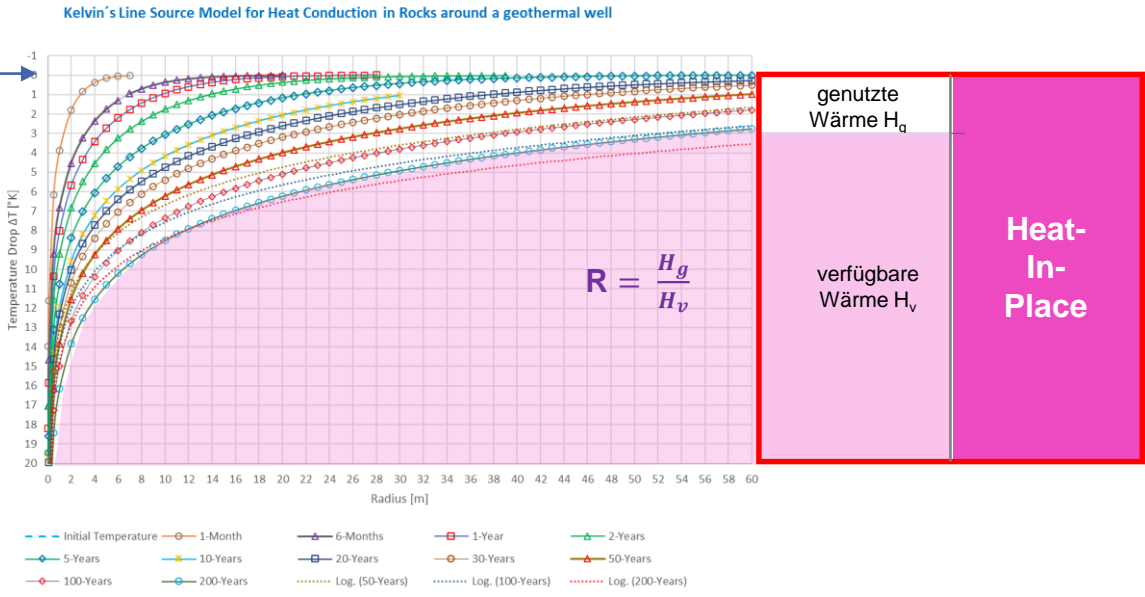
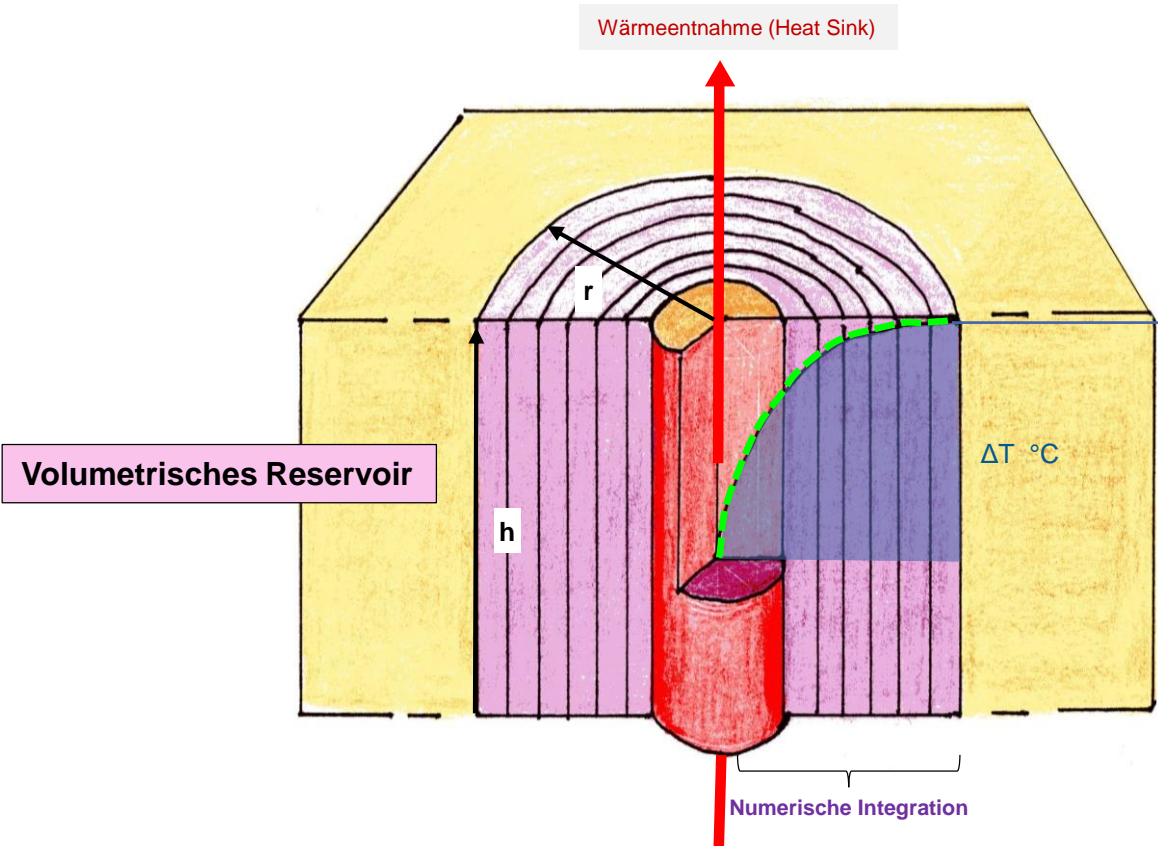
Schritt 1: Bestimmung des geothermischen Gewinnungsradius mit Kelvin's Line Source Modell

(Loose, 2006; Erbas, 2001; Mogensen, 1981; Carslaw & Jaeger, 1959 in Köbel, 2010)

Physik: Abkühlung eines Körpers als Funktion von r

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \int_y^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \left[-\gamma - \ln y + y - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot y^n}{n \cdot n!} \right]$$

Exponential-Integral approximiert durch eine Reihenentwicklung (Taylor-Reihe)



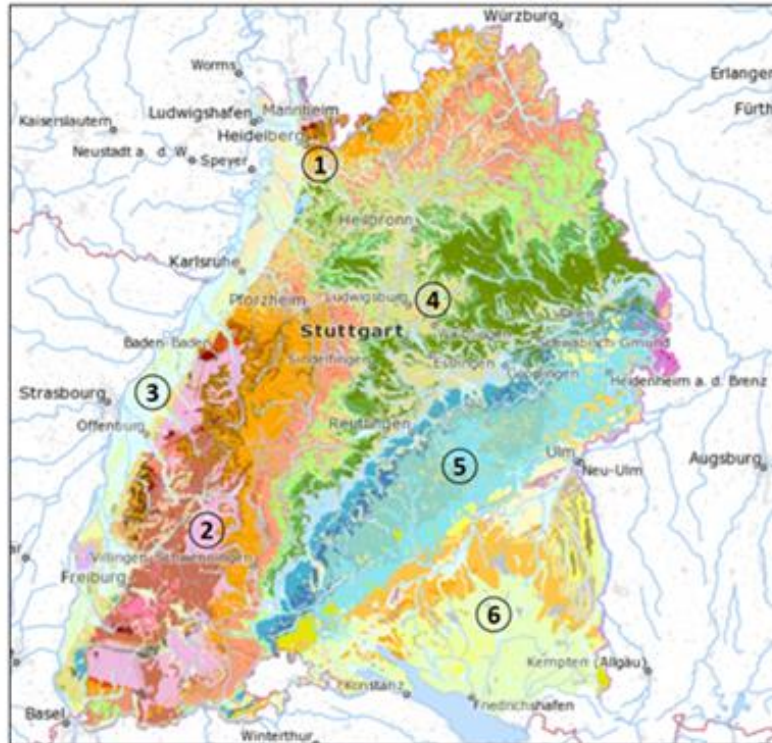
Fragen der Öffentlichkeit

- Welche geothermischen Konzepte sind für uns sinnvoll ?
- Wo befinden sich ideale Standorte?
- Wie groß ist der Flächenbedarf ?
- Welche Kosten und Risiken sind zu erwarten ?
- Ist Geothermie hier bei „**UNS**“ eine Option ?



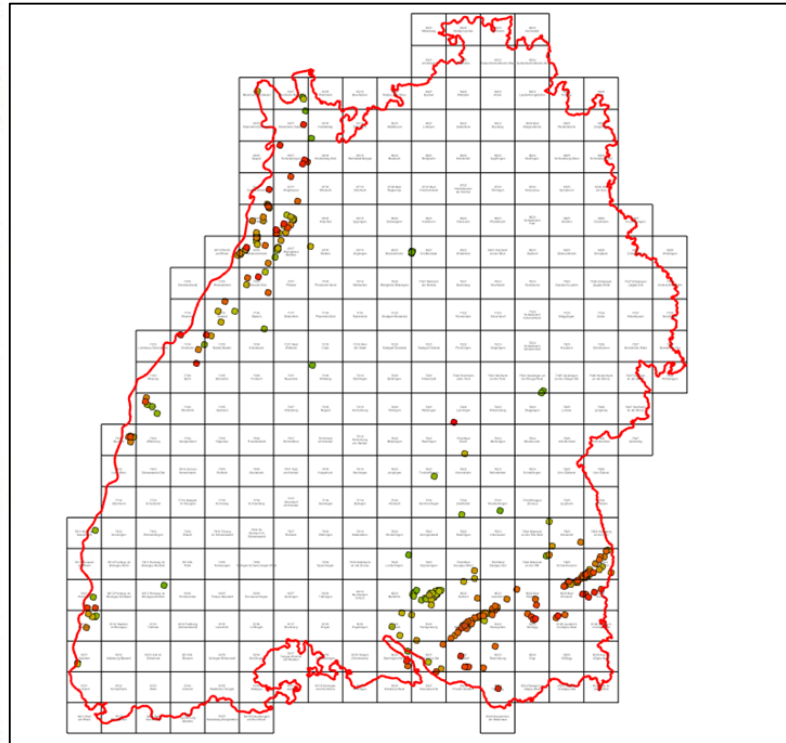
Datenquellen für die Tiefe Geothermie

Geologie

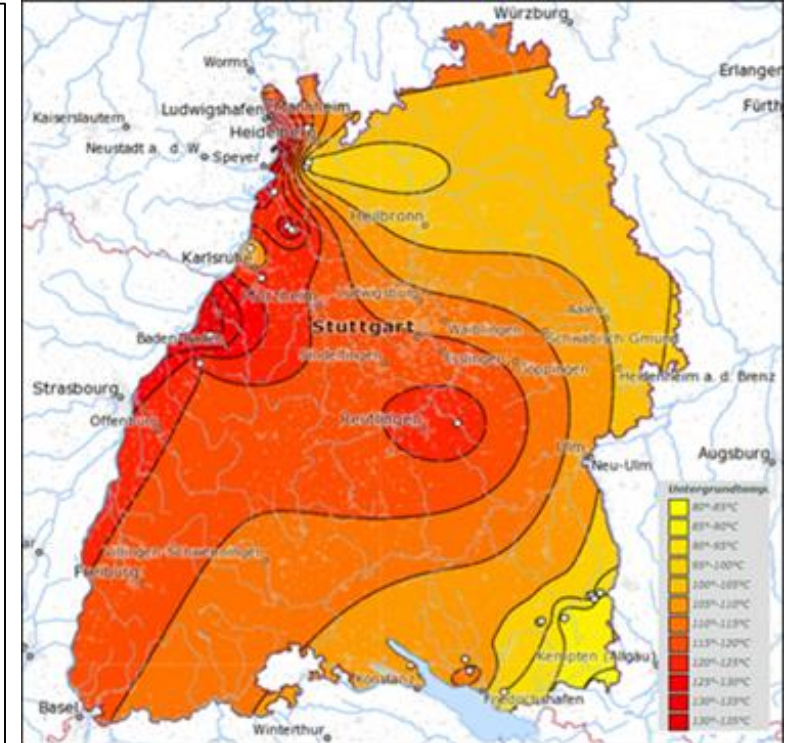


<https://maps.lgrb-bw.de/>

GK25 mit Erläuterungen & Tiefbohrungen



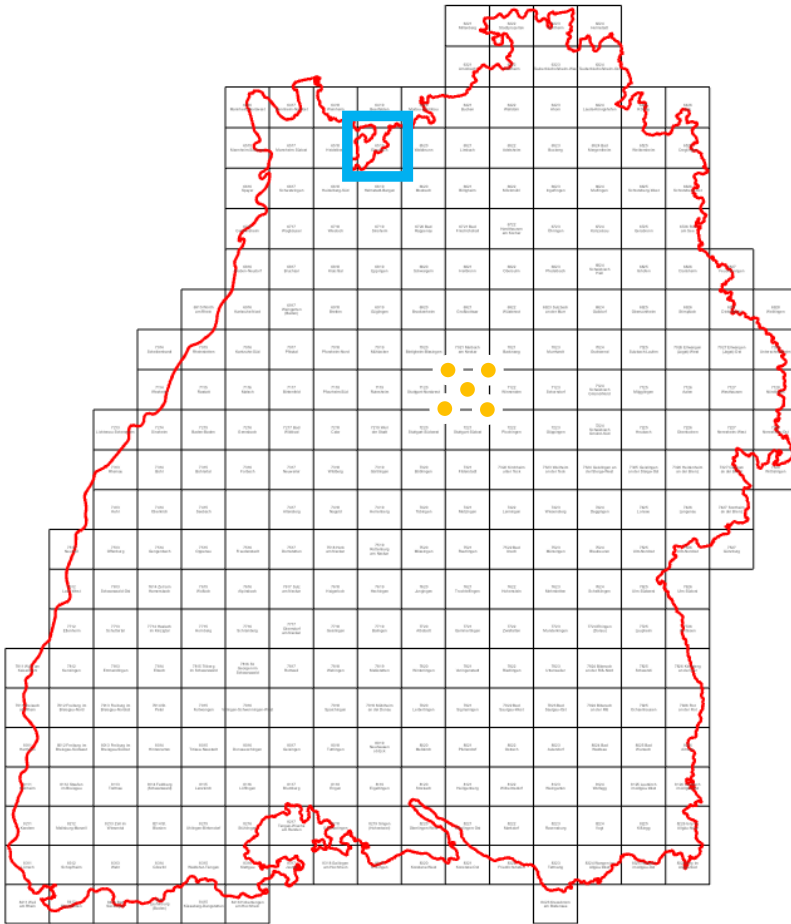
Untergrund-Temperaturen



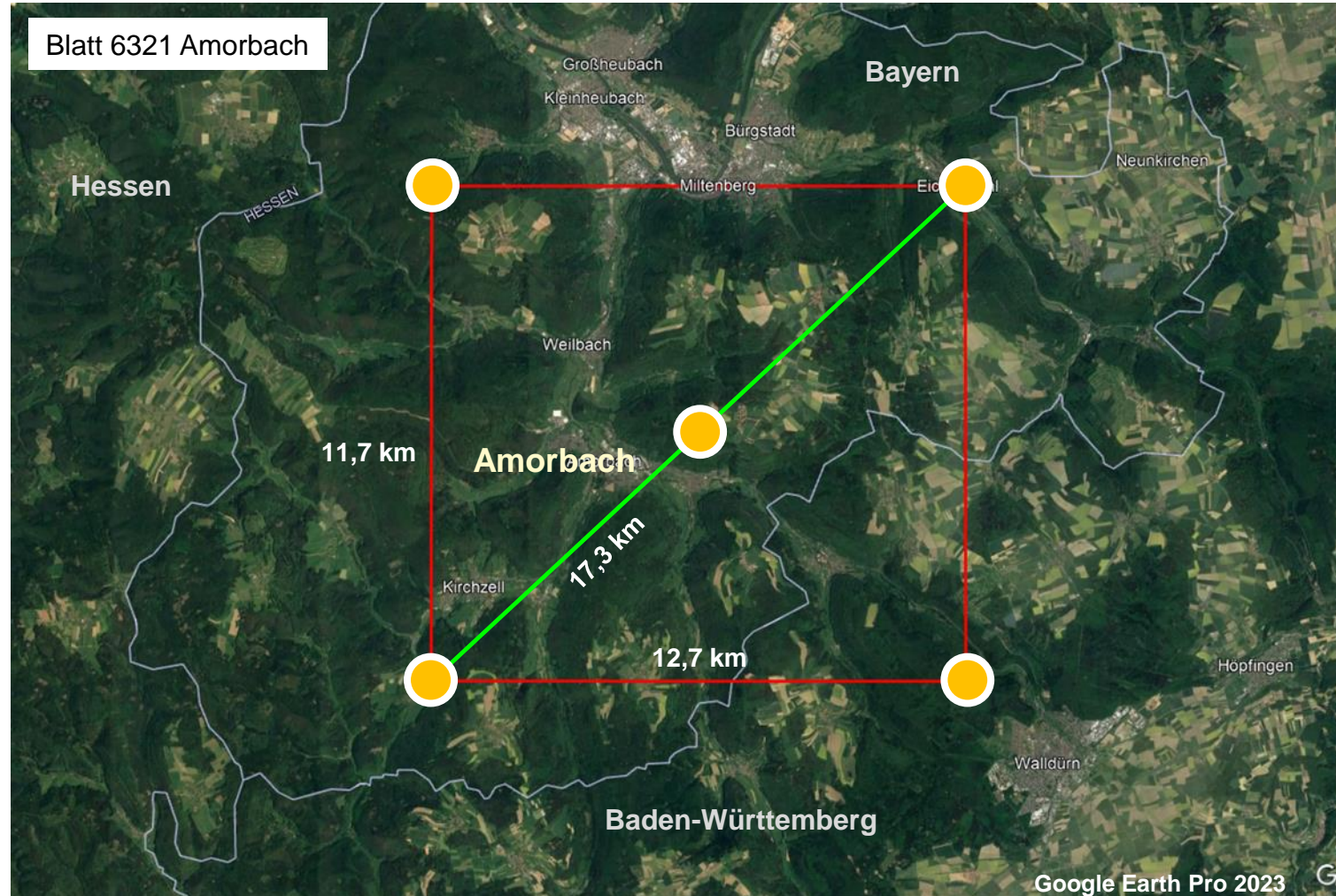
Schellschmidt & Stober (2008)

GK25 Gitter & Datenerfassung

304 Kartenblätter GK / TK25

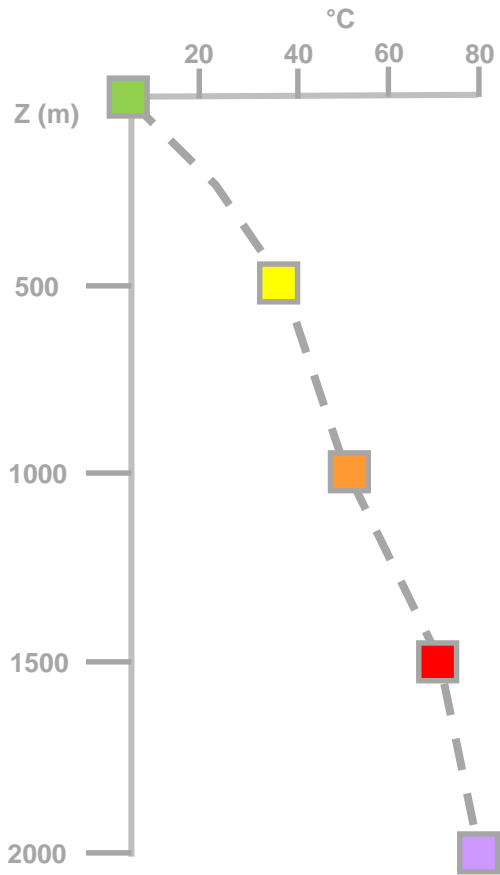


651 Datenerfassungspunkte

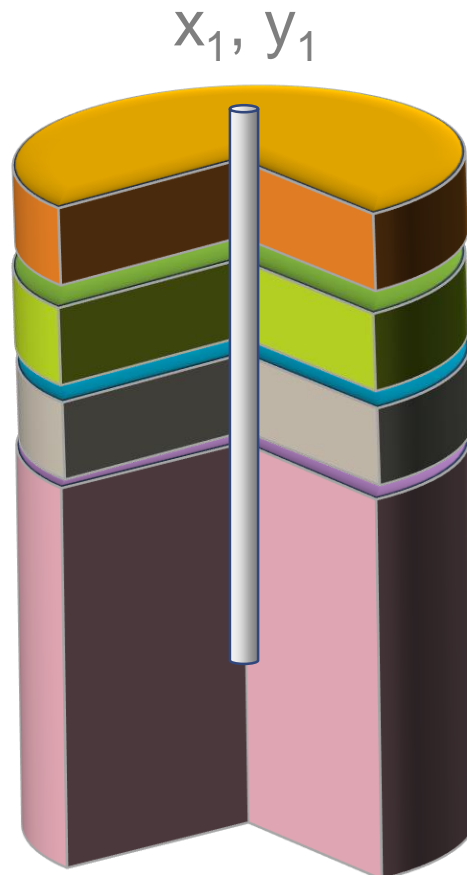


Raster-Datenverarbeitung

Geothermischer Gradient



Stratigraphisches Profil



Long. [°], Lat. [°]	Grad./100 m [°C]	Thick. [m]	Attribute
x_1, y_1	3,84	120	1
x_2, y_2	4,60	230	2
x_3, y_3	3,65	190	3
x_4, y_4	4,88	750	4

Layer 1
Layer 2
Layer 3
Layer 4

Datenbank

Attribute

1. anstehend
2. abgedeckt
3. erodiert
4. Fazies

Math Wizard

Long. [°], Lat. [°]	Property Thick. [m]
x_1, y_1	120
x_2, y_2	230
x_3, y_3	190
x_4, y_4	750

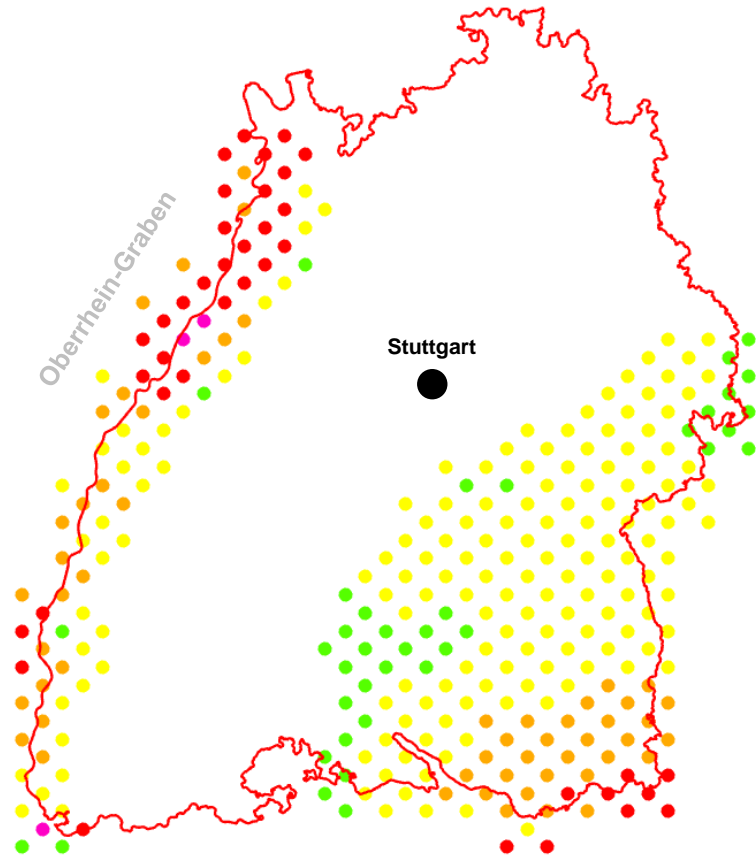
Karte

Visualisierung
Interpretation

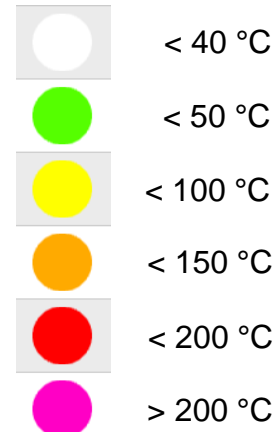


Muschelkalk als Geothermie-Reservoir

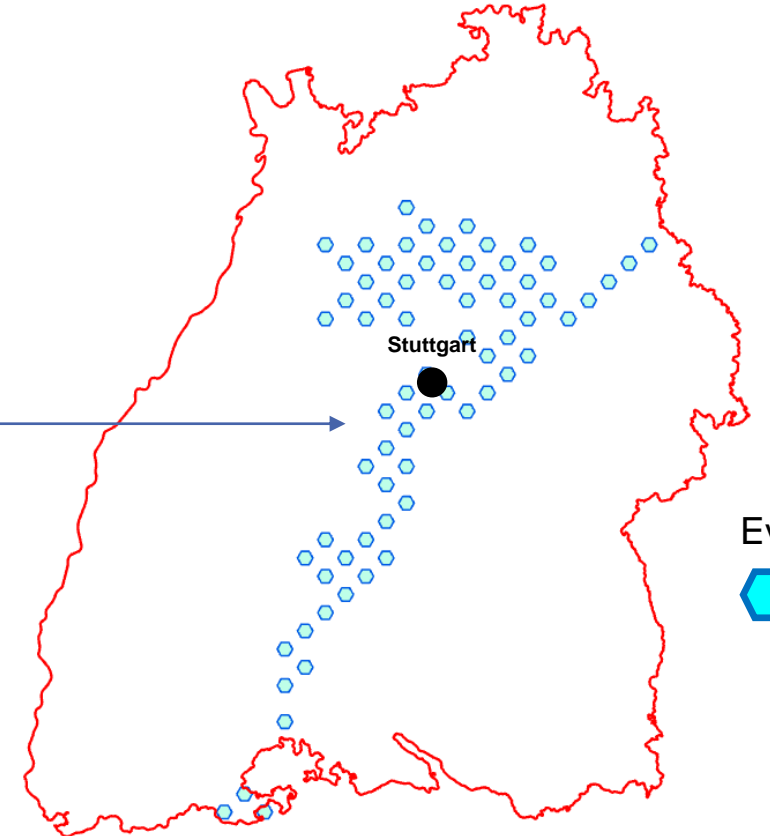
Subsurface Temperatur am Top Muschelkalk



Temperatur



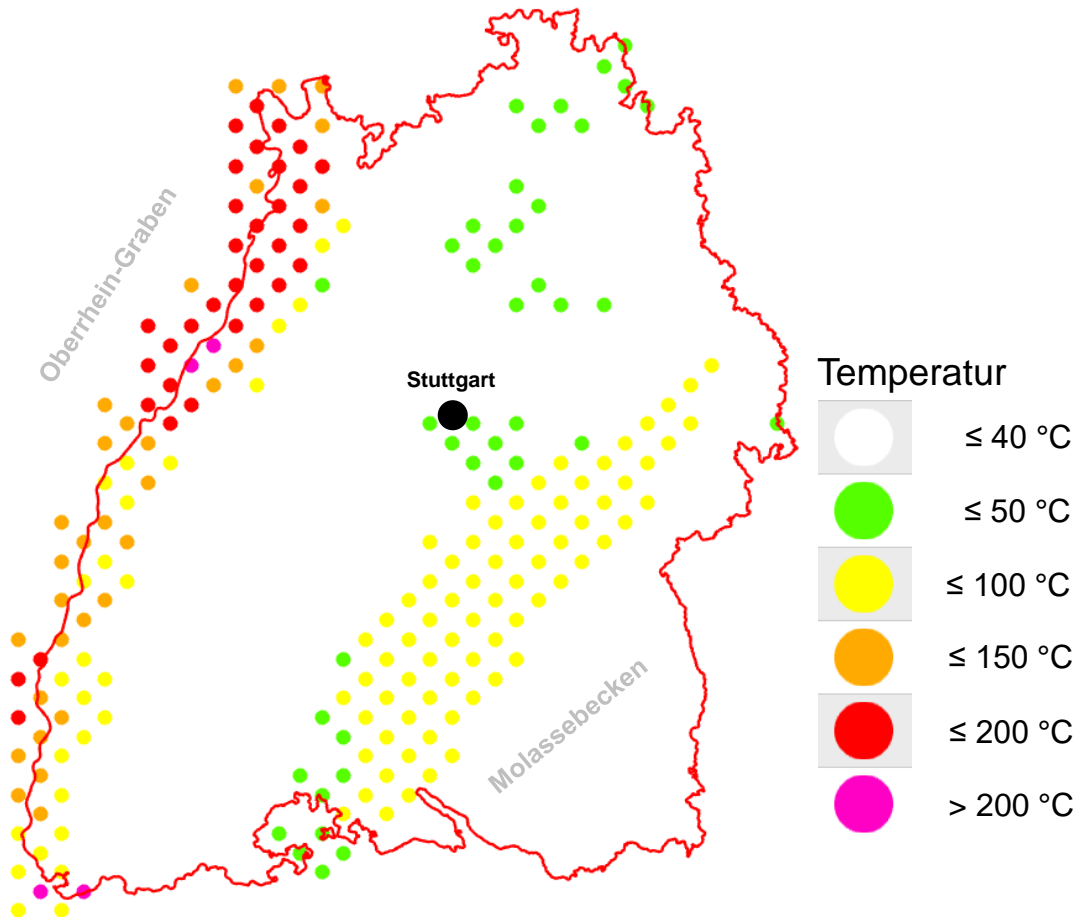
Salinar-Fazies im Mittleren Muschelkalk



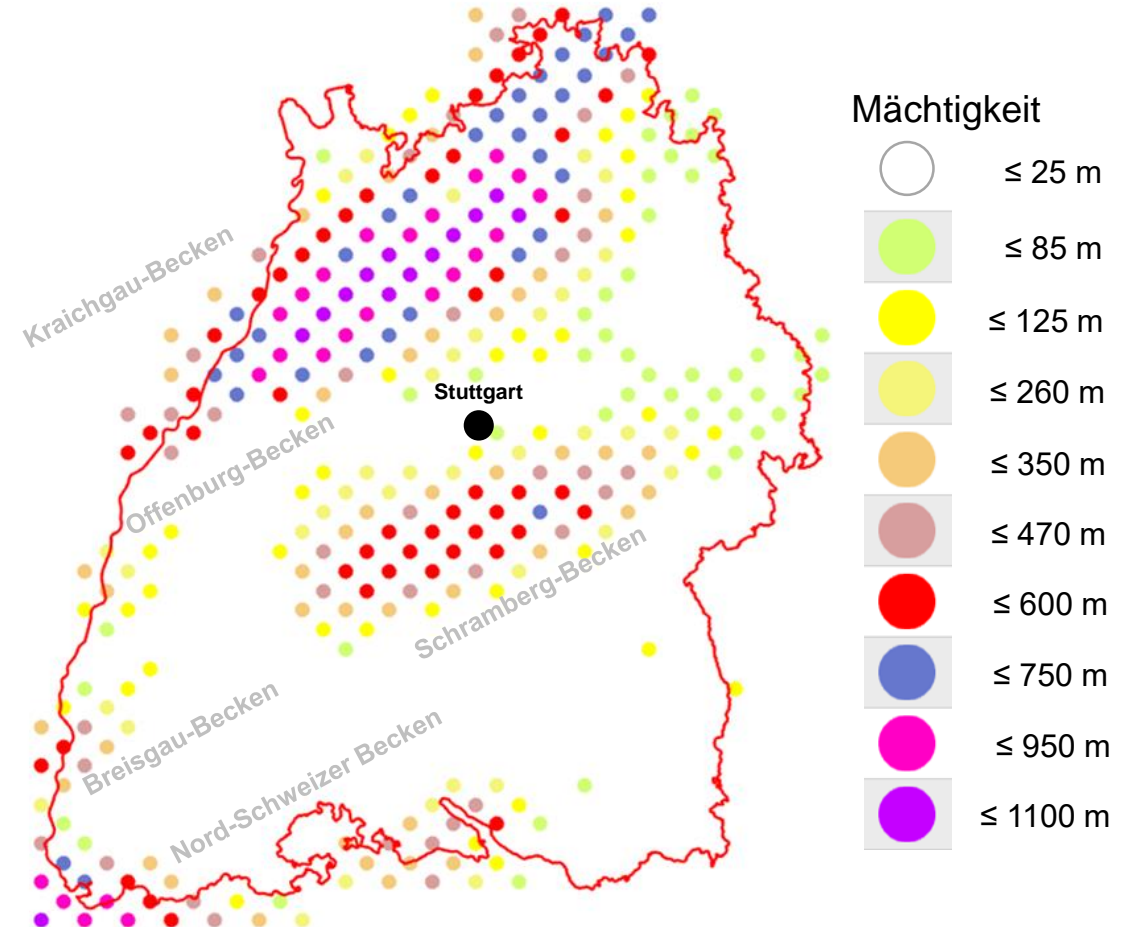
Evaporite

Rotliegend & Buntsandstein

Subsurface Temperatur am Top Buntsandstein



Mächtigkeit Oberkarbon - Rotliegend



Quantitative Potenzial-Analyse

Heat-in-Place

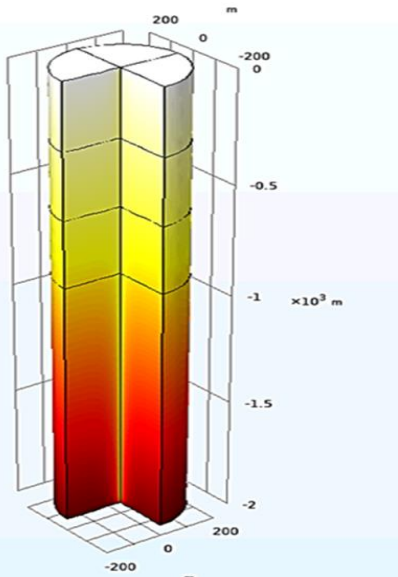
Monte Carlo Simulator *KASIMIR*



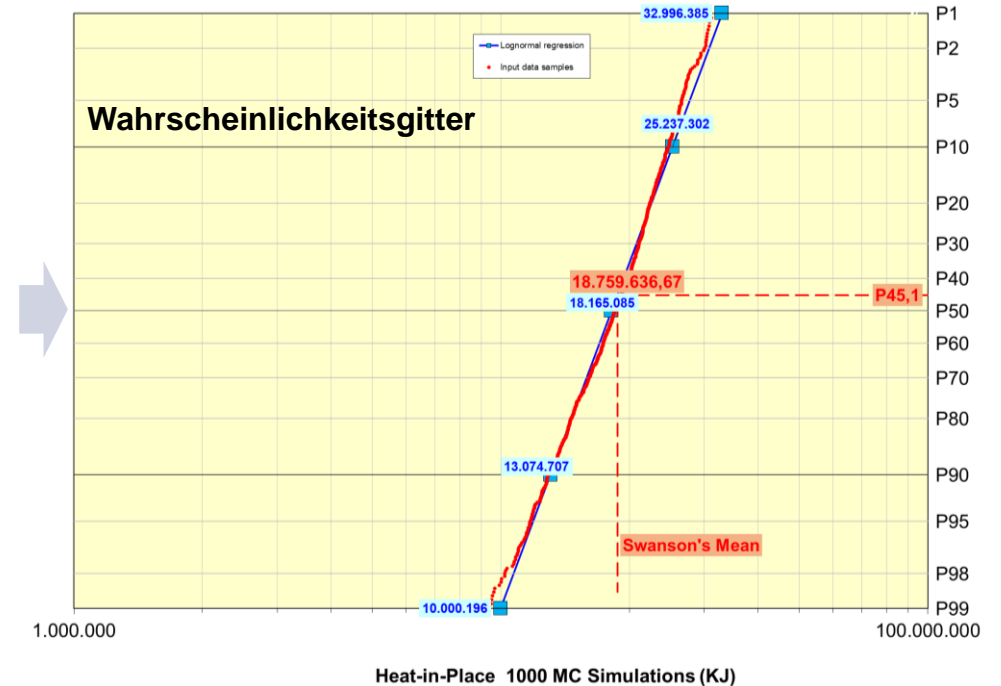
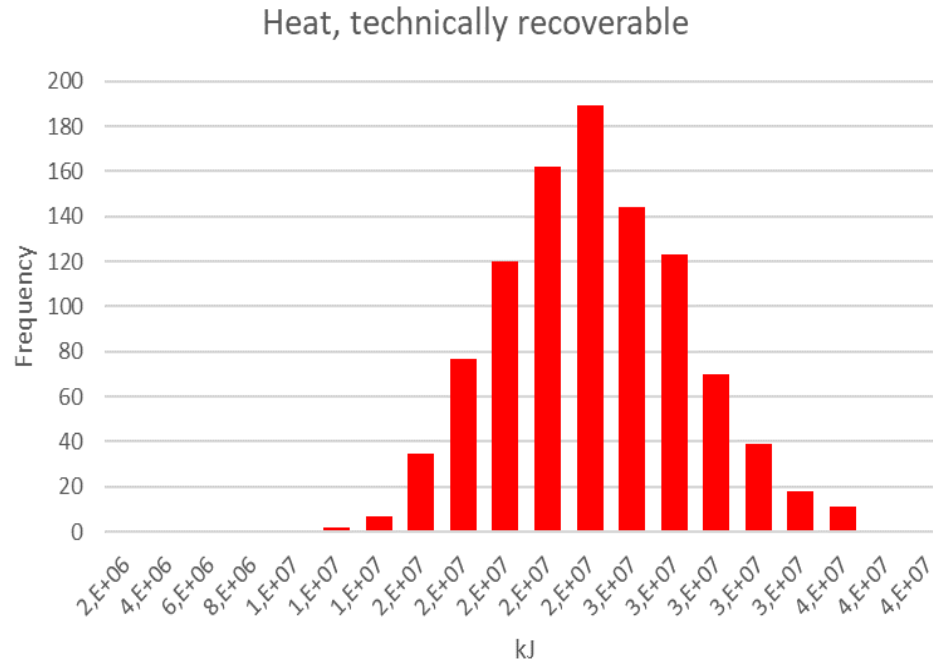
$$H_0 = V * [(1 - \phi) * \rho_m * c_m + \phi * \rho_f * c_f] * (T_r - T_0)$$

(Agemar et., 2018)

Parameter als Mean & Std. Dev.



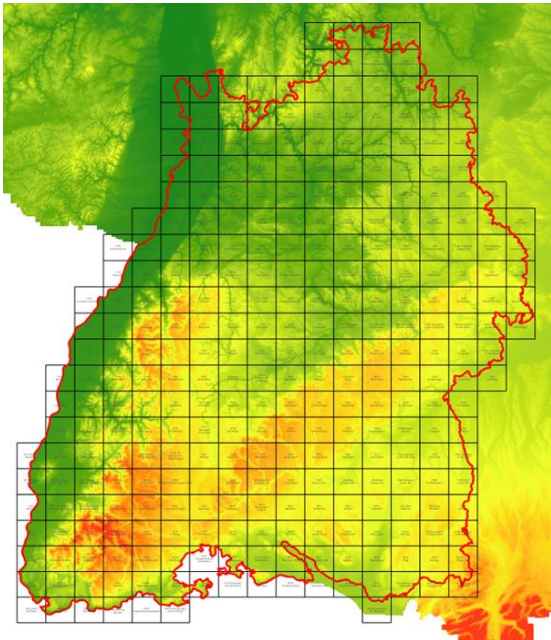
(COMSOL Modell cf. Müller, 2022)



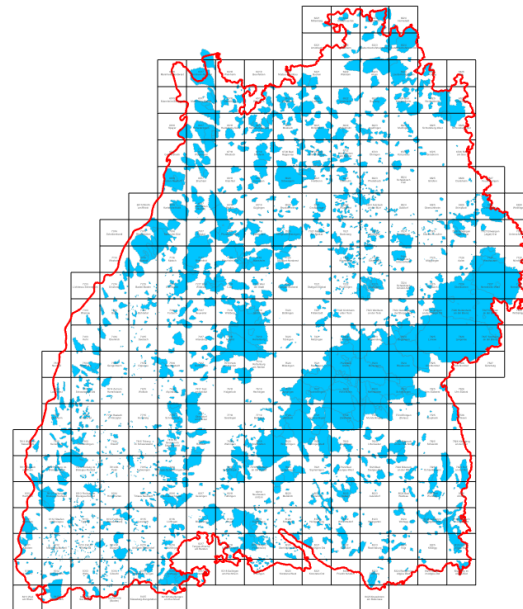
Bisherige Erfahrungen & Ausblick

- Das Raster-Datenformat ist ökonomisch und erlaubt die Integration verschiedenster Informationen
- Erweiterungen im Oberrheingraben und in den Randgebieten an der Landesgrenze erforderlich
- Lokale Verdichtung des Rasters
- Volle Potenzial-Analyse erfordert Zusatzinformationen aus öffentlichen Quellen....

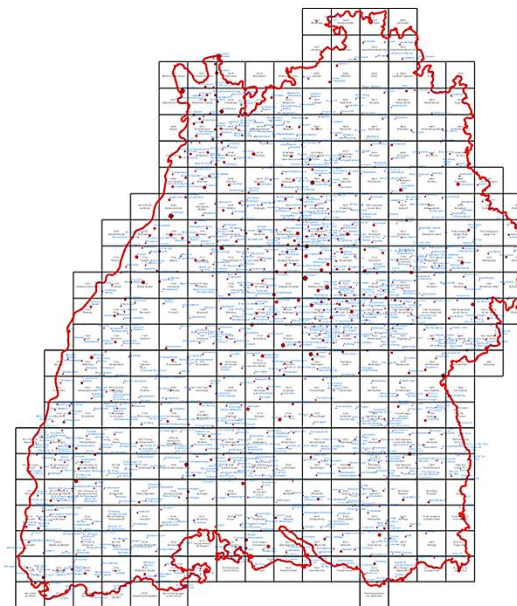
Topographie



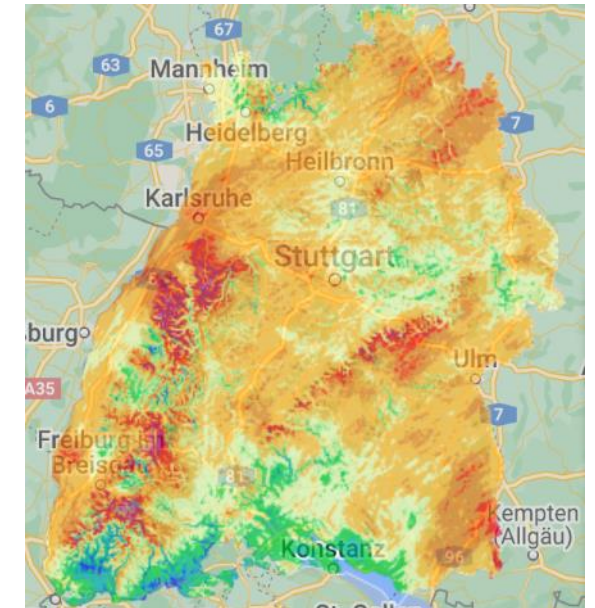
Schutz- und Ausschlußgebiete



1.100 Städte & Gemeinden



Erneuerbare Energien (Windatlas)



Danke für die Unterstützung....



LANDES
FORSCHUNGS
ZENTRUM
GEOTHERMIE



- Frank Schilling
- Birgit Müller
- Ingrid Stober
- Lukas Müller
- Jessica Blackwell
- Luisa Röckel
- Marcel Schulz
- Thomas Niederhuber
- Sigmund Heller
- Birgit Strauß
- Kathrin Menberg
- Philipp Blum
- Jochen Kolb
- Elisabeth Eiche
- Roland Koenigsdorff
- Alik Ismail-Zadeh
- Michael Reuß



LFZG im FZU am KIT – Campus Süd