

# Effizienzkonzepte in der Geothermie - Abstimmung oberirdischer und unterirdischer Anlageteile Planung von Erwärmeanlagen





# Geothermie

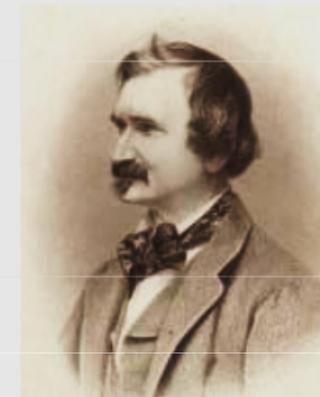
Ist die Idee „GEOTHERMIE“ neu?

...nicht wirklich !



## **Bernhard von Cotta empfahl 1858 erstmals die technische Nutzung der Geothermie**

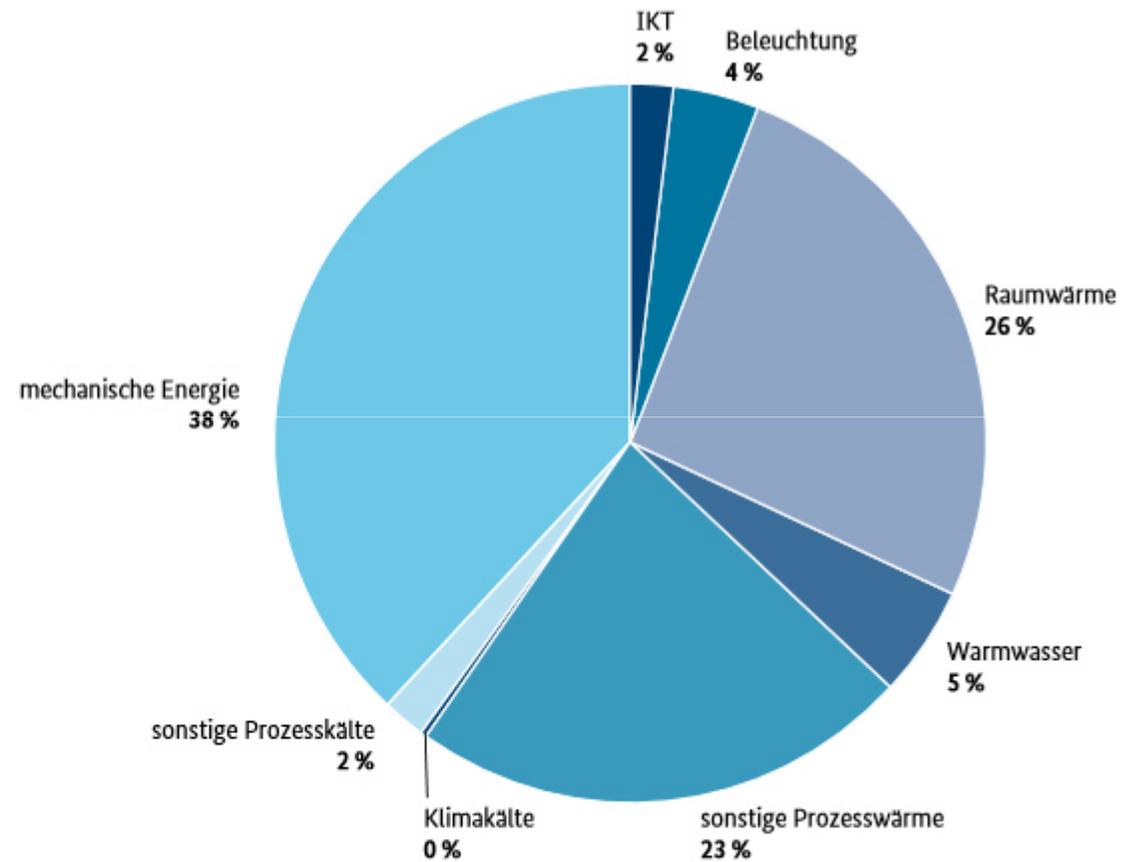
***"Diese hohe Temperatur, welche schon jetzt von unermesslicher Wichtigkeit für den Menschen und die Zustände seiner Existenz ist, könnte möglicherweise in später Zukunft noch eine neue wichtige Rolle unter den Hilfsmitteln des menschlichen Lebens spielen. Sollten einst auf der mehr und mehr bevölkerten Erde die Wälder überall stark gelichtet und die Kohlenlager erschöpft sein, so ist es wohl denkbar, dass man die Innenwärme der Erde sich mehr und mehr dienstbar macht, dass man sie durch besondere Vorrichtungen in Schächten oder Bohrlöchern zur Oberfläche leitet und zur Erwärmung der Wohnungen oder selbst zur Heizung von Maschinen verwendet. Man wird freilich nicht früher allgemein und mit Vortheil zu dieser ... Wärmequelle greifen, bis ein empfindlicher Mangel an Brennmateriale dazu nötigt; dann aber bleibt die Wärme der Mutter-Erde eine sichere letzte Zuflucht."***



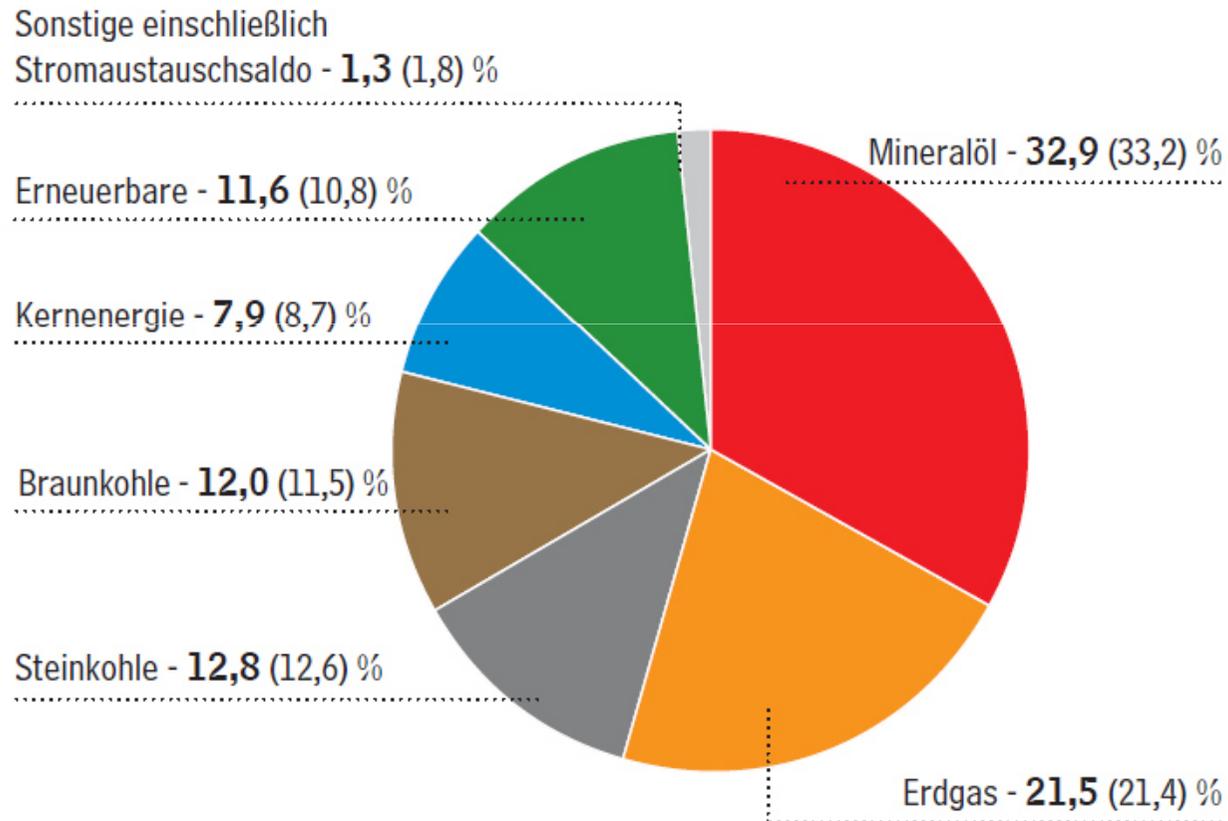
**Carl Bernhard von Cotta**  
(1808 -1879) war ein bedeutender deutscher Geologe und Bergbau-Wissenschaftler



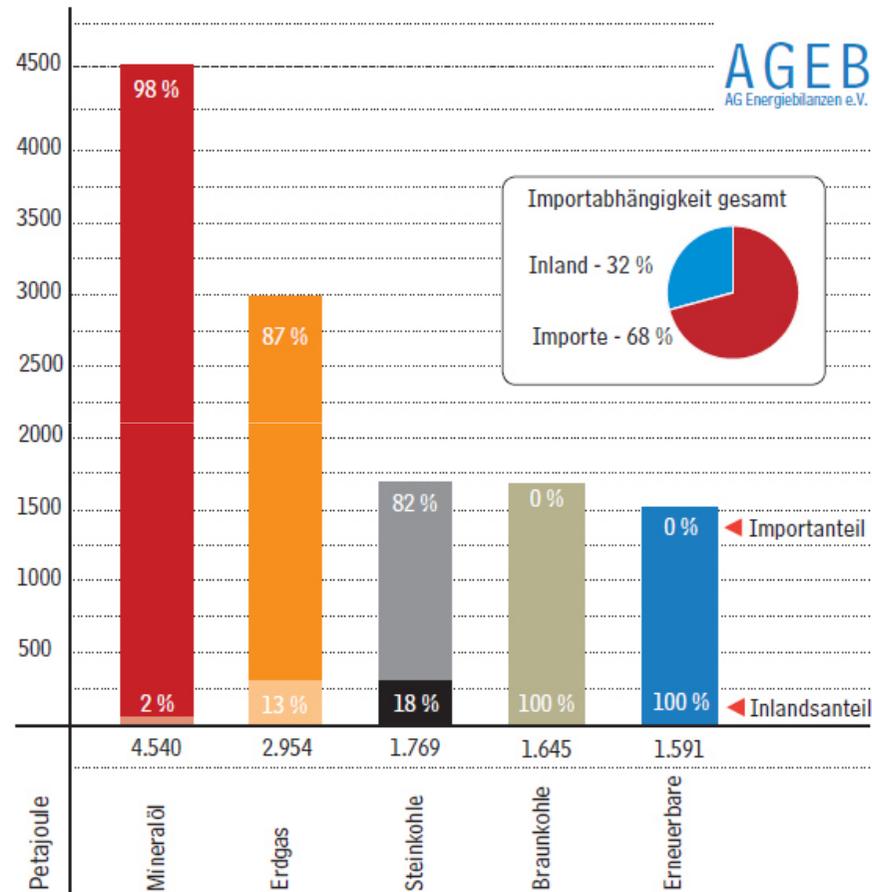
Die erste Bohrung erfolgt 1904 in Larderello, in der Toskana südlich von Florenz, die gewonnene Energie wird für eine Erdwärmeheizung genutzt. Die Nutzung heißer Quellen kann hier bis 270 v.Chr. belegt werden. 1905 wird dann eine erste 25 kW Anlage in Betrieb genommen. In Larderello und am Monte Amiata (Toscana) werden 1973 fast 390 MW produziert, 1975 sind es bereits 417 MW, und Mitte der 1980er sogar schon 455 MW. **In Italien fahren inzwischen fast alle Staatsbahnen mit ‚Geo-Strom‘.**



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW)



Stand: August 2013



Stand: August 2013

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen

## Geothermie ist sicher

Die Unfalldaten des DVGW für die Periode 1981-2002 (seit 1991 inkl. neue Bundesländer) wurden den zwei Kategorien *Kundenanlagen (UK)* und *Eigenanlagen (UE)* zugewiesen. Um einen konsistenten Datensatz zu gewährleisten, wurden a priori folgende Unfälle ausgeschlossen:

- Unfälle mit Stadtgas, da sie sich vor der Umstellung auf Erdgas ereigneten und für die heutige Situation nicht mehr relevant sind.
- Unfälle mit Flüssiggas (LPG), die ebenfalls in den DVGW-Statistiken geführt werden.
- Unfälle ohne Angaben zum Gastyp.

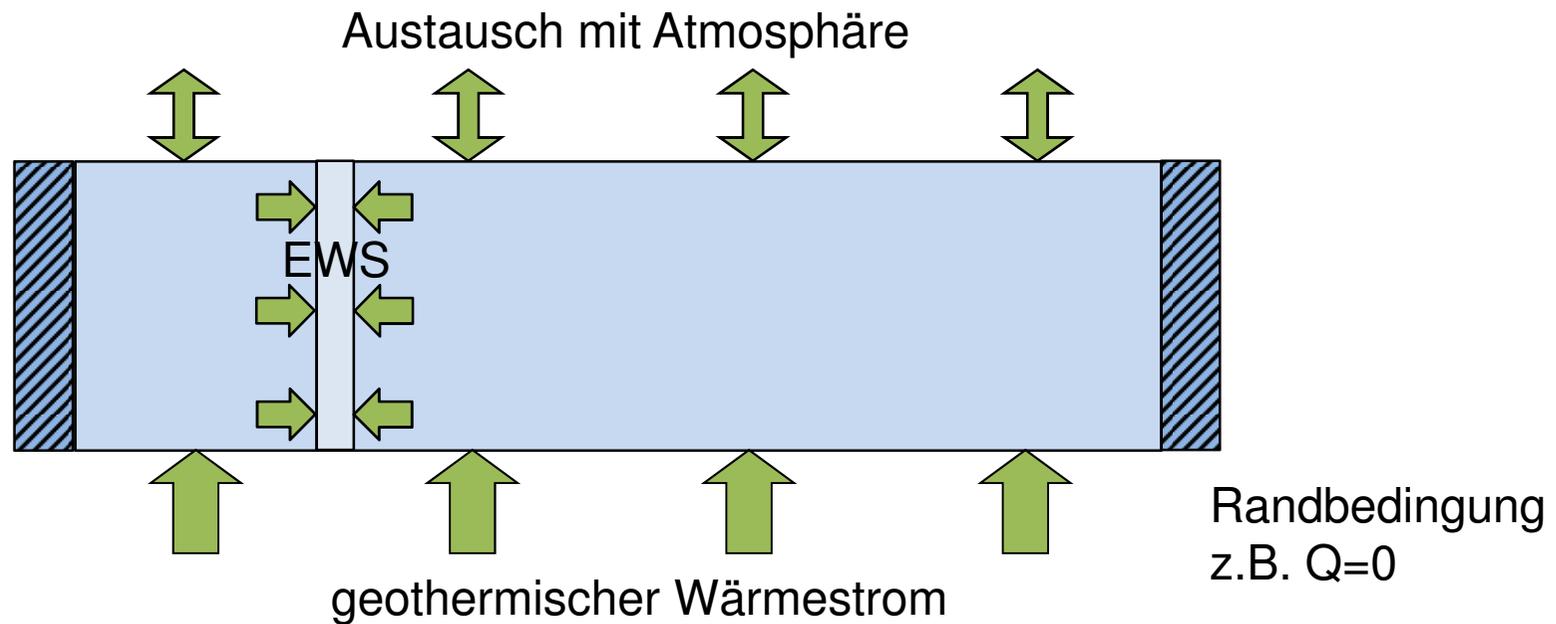
Für die detaillierte Schwachstellenanalyse wurden 837 Erdgasunfälle bei Kundenanlagen mit insgesamt 314 Todesfällen und 943 Verletzten sowie 500 Unfälle bei Eigenanlagen mit insgesamt 73 Todesfällen und 671 Verletzten verwendet.

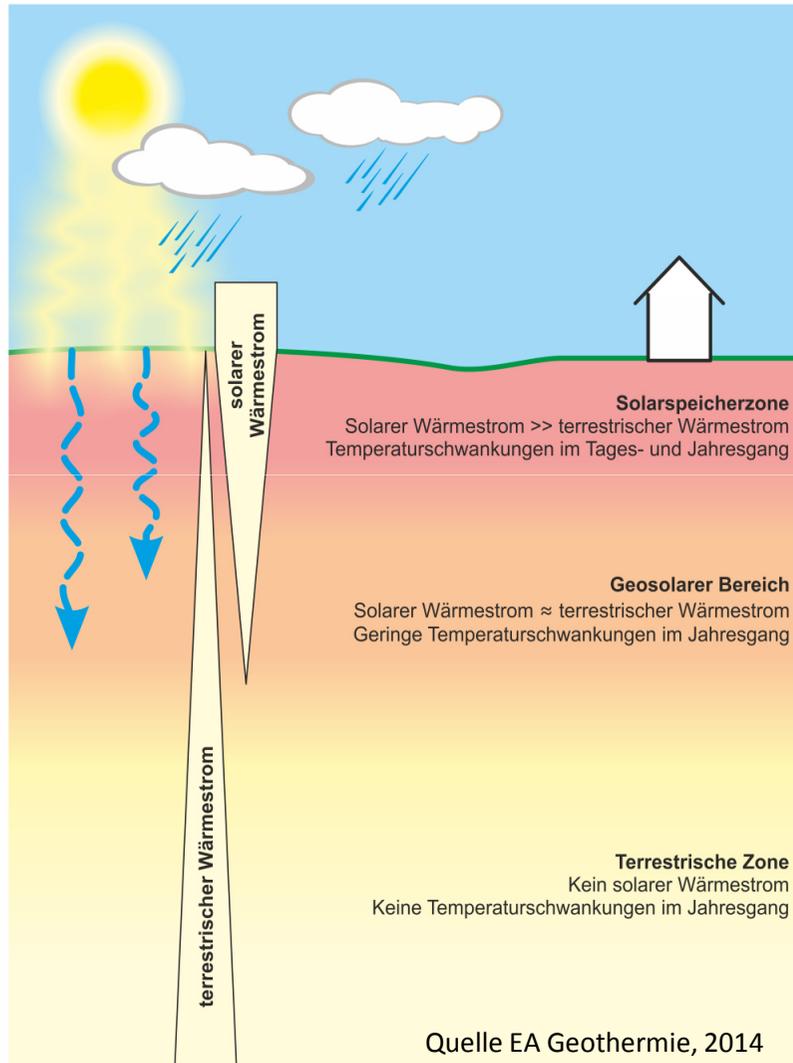
## Schlussfolgerungen

### Vergleiche der verschiedenen Energieträger

- Energiebezogene Unfallrisiken in der OECD sind deutlich tiefer als in der Nicht-OECD.
- Die Erdgaskette zeigt die tiefsten Todesfallraten aller fossilen Energieträger sowohl in der OECD wie in der Nicht-OECD. Erdöl, Kohle und LPG folgen mit deutlich höheren Werten für die Todesfälle pro  $\text{GW}_e\text{a}$ .
- Die historischen Unfalldaten zeigen, dass die erfahrungsbasierten maximal möglichen Konsequenzen für Erdgas klar am tiefsten von allen fossilen Energieträgern sind.
- Westliche Wasserkraft- und Kernkraftwerke haben zwar noch tiefere Todesfallraten, die maximal möglichen Konsequenzen können jedoch sehr gross sein.

# Konzeptionelles Untergrundmodell





Solare Gewinne bis  
 $1370 \text{ W/m}^2$   
minus Evaporationsverluste  
ca.  $400 \text{ W/m}^2$  (Verdunstung)

Gewinne durch  
Niederschläge

Geothermischer Fluss  
um  $70 \text{ mW/m}^2$



# Gebäude

Heizlastberechnung DIN EN 12831 (NORM -12°C)

Energiebedarf beheizter und klimatisierter  
Gebäude nach VDI 2067 Blatt 10

Die Berechnung erfolgt idealer Weise stundenweise für das ganze Jahr, anhand von Datensätzen des TRY (Testreferenzjahrdaten des Deutschen Wetterdienstes).

Kühllastberechnung nach VDI 2078.

# Begriffe: Last und Leistung

Gebäude**lasten** (Heizen/ Kühlen)

immer(!) in Relation zur Zeit

**Einheit kWh**

Spitzen**leistung** (Abhängig von der Wärmepumpe)

**Einheit: kW**

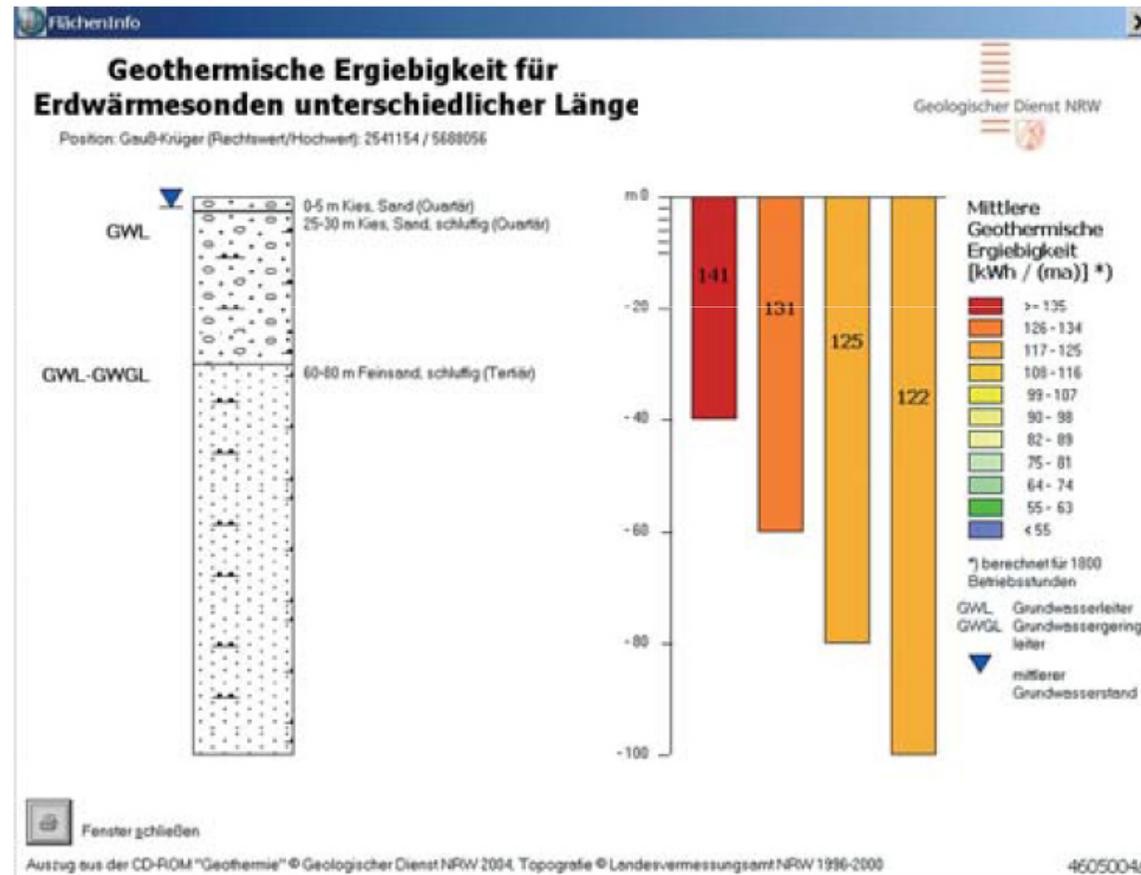
**Das ist keine Planung!**

**Angaben in der geophysikalisch  
(als Materialkonstante) nicht existenten Einheit  
W/m sind falsch.**

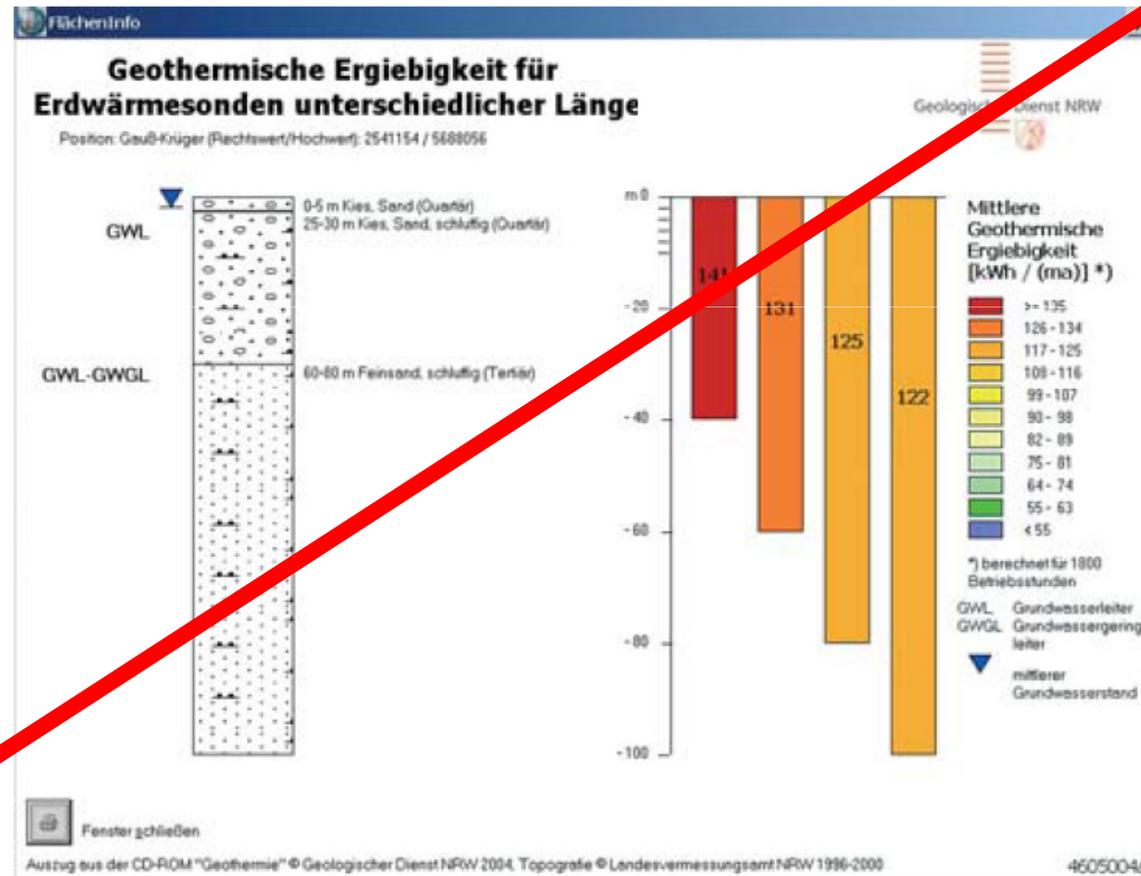
**Der Boden ist keine Steckdose!**

~~**50 W/m**~~

# Das ist keine Planung!



# Das ist keine Planung!



## Wärme und Wärmeleitfähigkeit

- Je höher die Temperatur, desto stärker ist die brownsche Bewegung der Teilchen.
- Benachbarte Teilchen stoßen gegeneinander und geben so ihre kinetische Energie weiter.
- Die kinetische Energie der Teilchen ist die Wärmeenergie des Mediums.

# Wärme und Wärmeleitfähigkeit

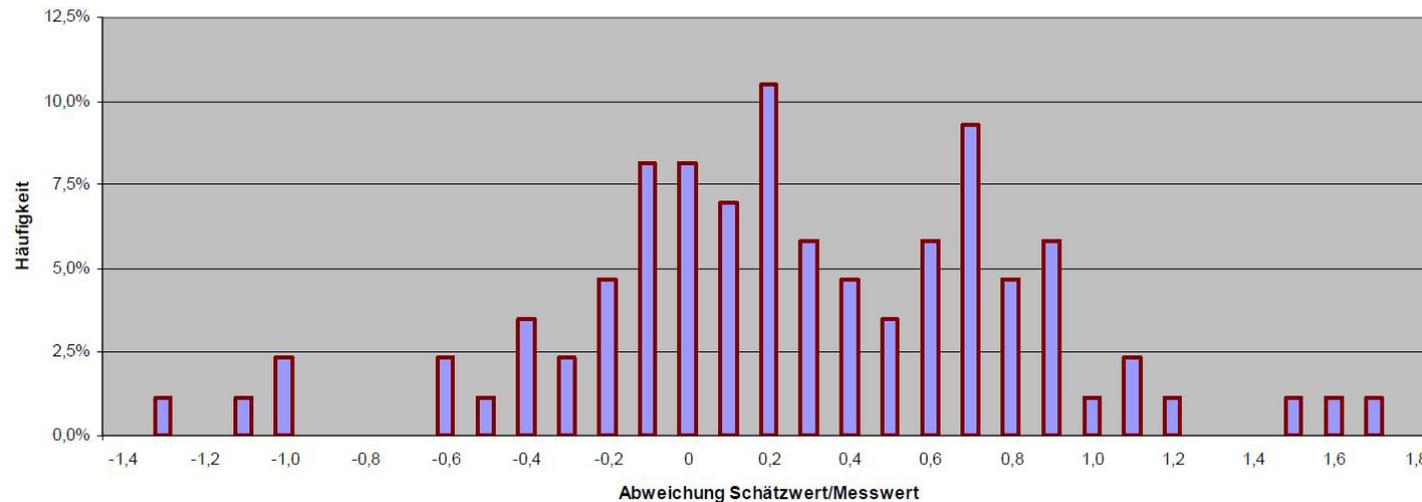
- Die Energie wandert von den “bewegteren” (wärmeren) zu den “ruhigeren” (kälteren) Teilchen, und folgt somit dem **negativen Temperaturgradienten!**
- Die Fähigkeit, die Energie weiterzuleiten, ist die thermische Leitfähigkeit **Einheit:  $W/(mK)$**

# Wärmekapazität

- Menge an Wärmeenergie, die zugeführt werden muss, um ein bestimmtes Material um ein Grad zu erwärmen.
- Die Energiemenge kann pro Masse oder pro Volumen angegeben werden.
- Bezogen auf das Volumen:  
volumetrische Wärmekapazität **Einheit: MJ/(m<sup>3</sup>K)**

# Untergrundparameter – woher?

Aus GRT- oder eGRT-Messung

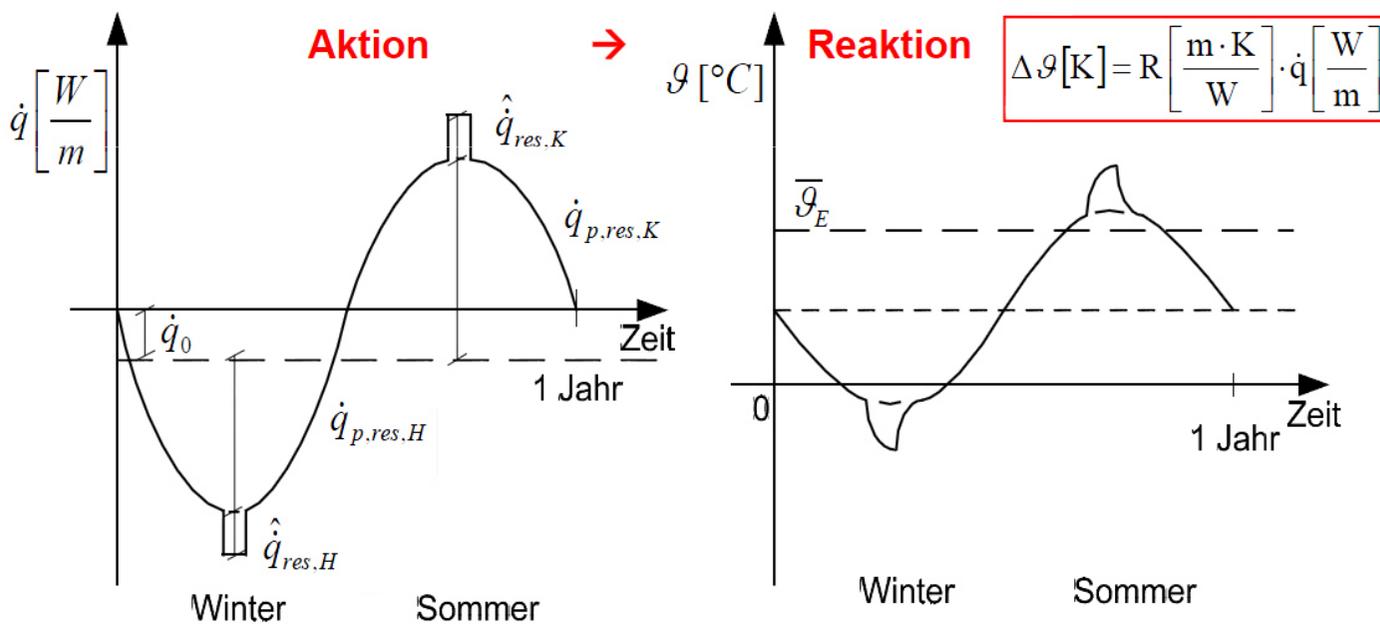


Abweichung zwischen Schätzwert und Messung für  $\lambda_{\text{eff}}$  (n=86 Messungen, n. Sauer et.al, 2007)

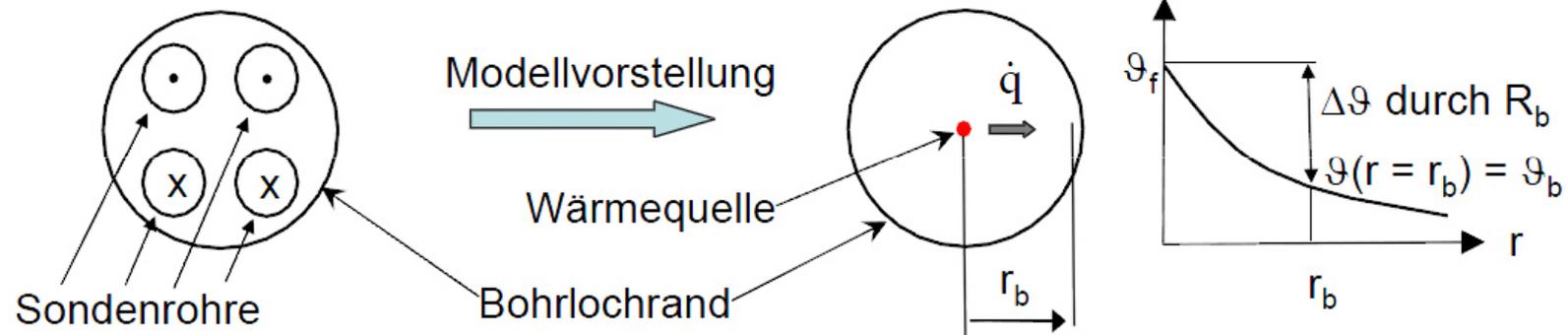
## Berechnung nach Eskilson

### Ermittlung der thermischen Sondenreaktion aus Einzelanteilen:

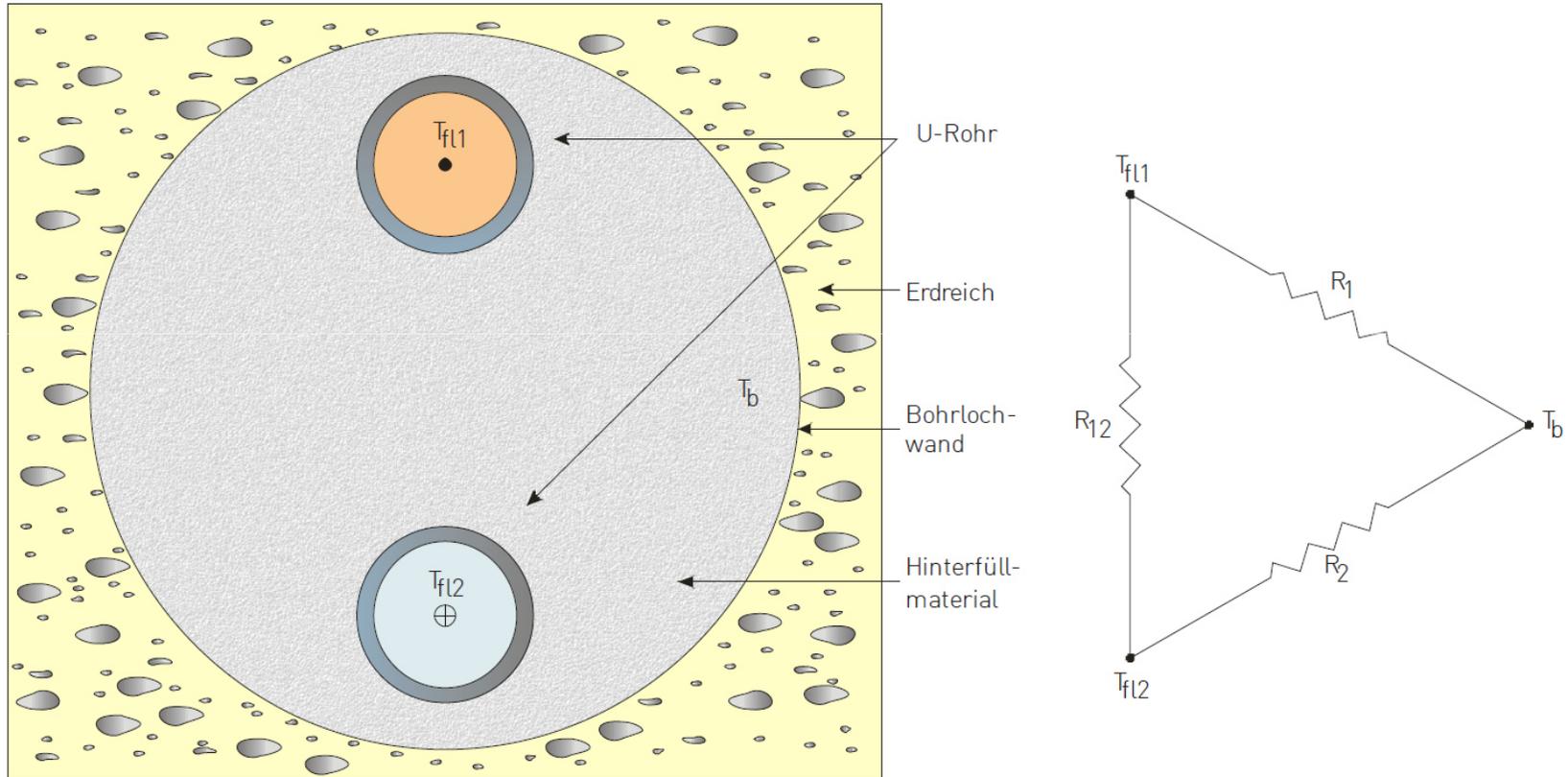
Wärmeübertragung in der Sonde / im Bohrloch: Fluid → Bohrlochrand



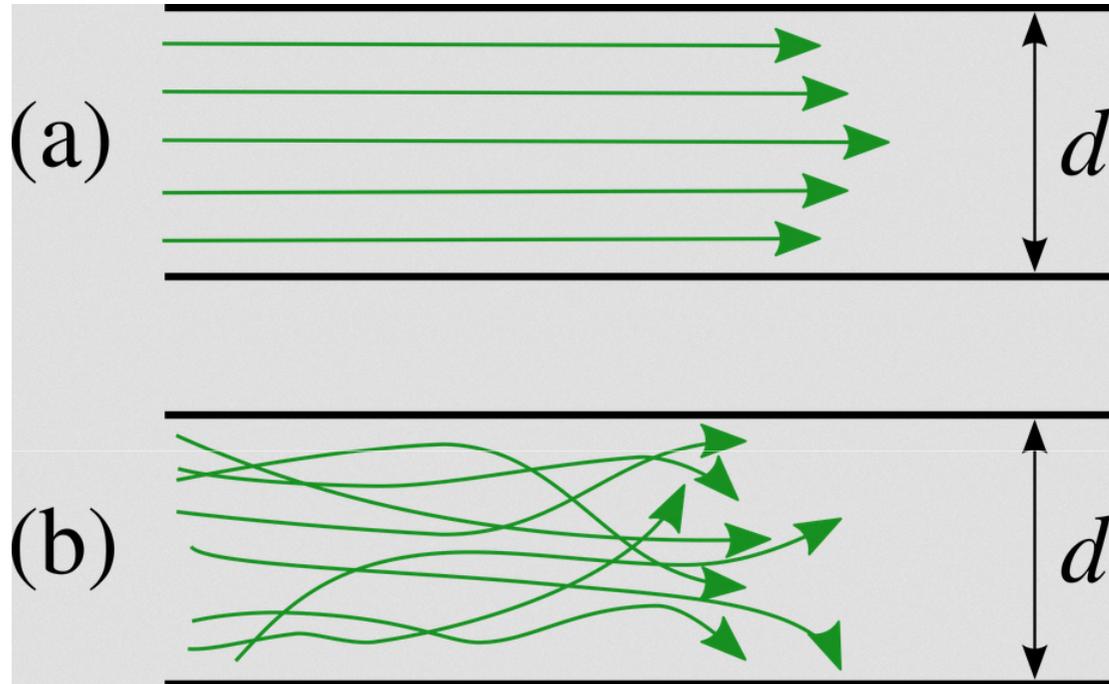
Die einzelnen Teilvorgänge der Wärmeübertragung vom Fluid in einer Erdwärmesonde (EWS) bis zum Erdreich (Bohrlochrand) werden im Bohrlochwiderstand  $R_b$  [ $m \cdot K/W$ ] zusammengefasst :



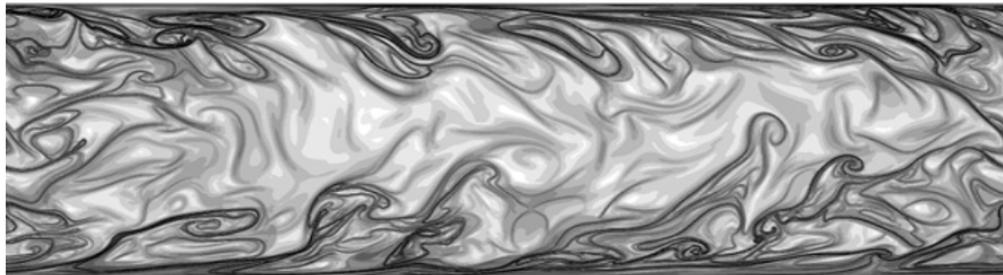
$$\Delta \vartheta = R_b \cdot \dot{q}$$



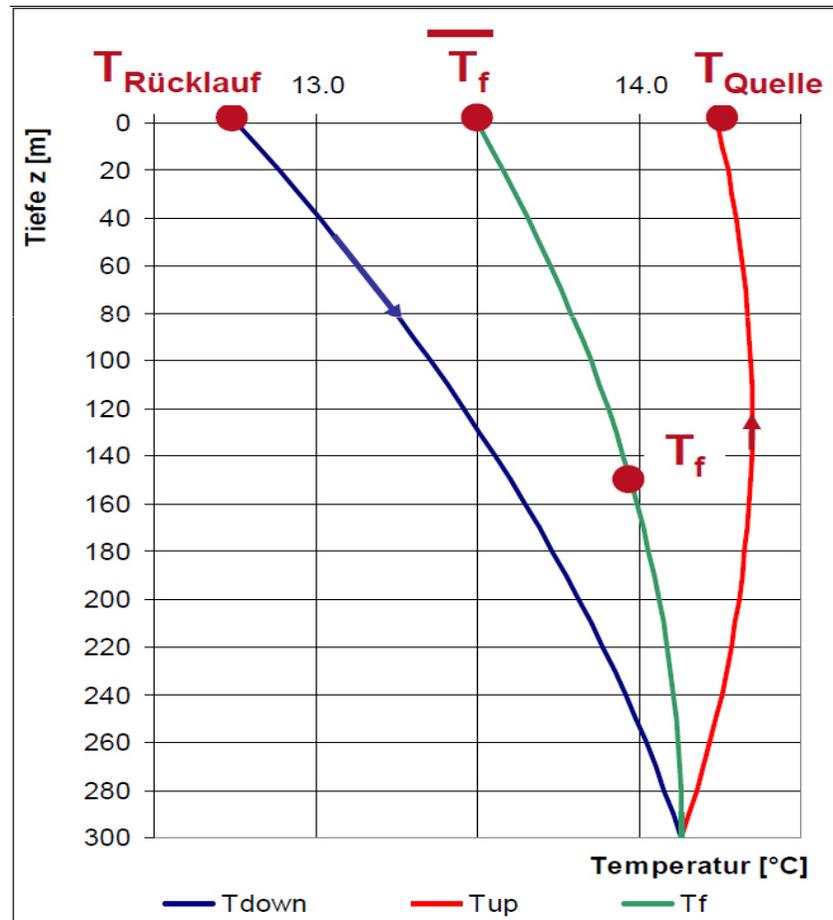
Strömung  
laminar



turbulent



# Mitteltemperatur





$$\Delta\vartheta = R_b * \dot{q}$$

## Zahlenbeispiel:

Spezifische Entzugsleistung - aber welche?  $\dot{q}_0$  /  $\dot{q}$  /  $\hat{q}$

6 kW Wärmepumpe bei 2400 Vollbetriebsstunden

Jahresgebäudebedarf 14,4 MWh z.B. Januar 16%

2304 kWh/31 d/24 h = 3,09 kW

Bohrung 100 m

$\dot{q} = 3.090 \text{ W} / 100 \text{ m} = 30,09 \text{ W/m}$  Januar

$\hat{q} = 6.000 \text{ W} / 100 \text{ m} = 60,00 \text{ W/m}$  bei WP Betrieb

(hier bezogen auf Verdampferleistung)

$$R_b = \dot{R} = 0,16 \text{ m} \cdot \text{K} / \text{W} \text{ (vereinfacht)}$$

$$\dot{q} = 3.090 \text{ W} / 100 \text{ m} = 30,09 \text{ W/m Januar}$$

$$\hat{q} = 6.000 \text{ W} / 100 \text{ m} = 60,00 \text{ W/m bei WP Betrieb}$$

$$\Delta\vartheta = R_b * \dot{q}$$

$$\Delta\vartheta = \dot{R} * \hat{q}$$

$$30,09 * 0,16 = 4,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$60,00 * 0,16 = 9,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Fluidtemperatur und Bohrlochrand (Bodentemperatur)

$30,09 * 0,16 = 4,8 \text{ K (Grundlast)}$

$60,00 * 0,16 = 9,6 \text{ K (Spitzenleistung)}$

Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Fluidtemperatur und  
Bohrlochrand (Bodentemperatur)

Wenn die Temperatur am Bohrlochrand z.B.  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  beträgt,

Ist die mittlere Fluidtemperatur

$10 \text{ }^\circ\text{C} - 4,8 \text{ K} = 5,2 \text{ }^\circ\text{C (Grundlast)}$

$10 \text{ }^\circ\text{C} - 9,6 \text{ K} = 0,4 \text{ }^\circ\text{C (Spitzenleistung)}$

Wenn die Temperatur am Bohrlochrand z.B. 10 °C beträgt,

Ist die mittlere Fluidtemperatur

10 °C – 4,8 K = 5,2 °C (Grundlast)

10 °C – 9,6 K = 0,4 °C (Spitzenleistung)

Bei 4 K Spreizung

3,2 °C in die Sonde – 7,2 °C aus der Sonde (Grundlast)

**-1,6 °C** in die Sonde – 2,4 °C aus der Sonde (Spitzenleistung)

	Ethylenglykol/Wasser 25%		Wasser	
Leistung WP [kW]	6		6	
COP/JAZ	3,8		3,8	
Leistung Erdseite [kW]	4,421052632		4,421052632	
Volumen [m <sup>3</sup> /h]	1,733295831		0,482955113	
Wärmekapazität [kWh/(kg K)]	0,001054167		0,001308	
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1052		999,8	
Spreizung [K]	2,3		7	
<hr/>				
Sondenanzahl	1		1	
Strömungsgeschwindigkeit [l/s]	0,481471064		0,134154198	
<hr/>				
<b>Durchschnittliche Laufzeit der Wärmepumpe/ Heizen</b>				
<hr/>				
Monat	Tage	Energiebedarf/Monat [MWh]	Energiebedarf/Tag [kWh]	Laufzeiten Wärmepumpe Stunden je Tag
JAN	31	2,3	74,19	12,4
FEB	28	2,06	73,57	12,3
MÄR	31	1,8	58,06	9,7
APR	30	1,43	47,67	7,9
MAI	31	0,92	29,68	4,9
JUN	30	0	0,00	0,0
JUL	31	0	0,00	0,0
AUG	31	0	0,00	0,0
SEP	30	0,88	29,33	4,9
OKT	31	1,25	40,32	6,7
NOV	30	1,68	56,00	9,3
DEZ	31	2,07	66,77	11,1
<b>Summen</b>	<b>365</b>	<b>14,39</b>		

## Wärmepumpe

Gebäudebedarf im Januar 2304 kWh

Durchschnittlicher Tagesbedarf  $2304 \text{ kWh} / 31 \text{ d} = 74,19 \text{ kWh}$

WP 6 kW = Laufzeit 12,4 h/d = 74,19 kWh

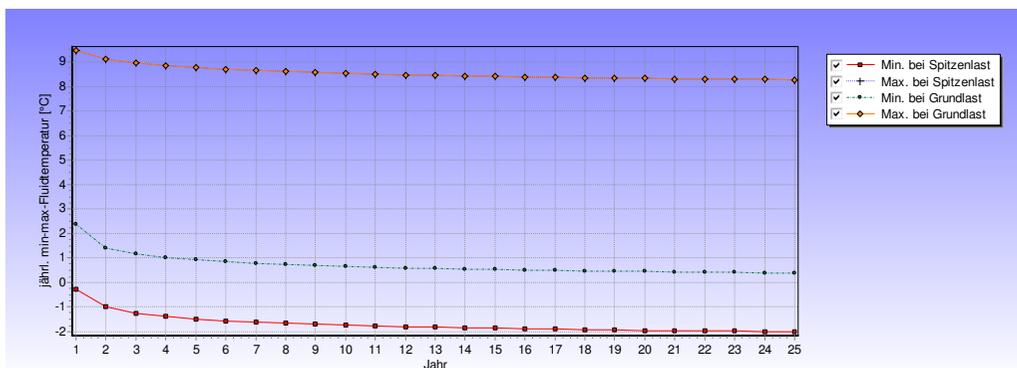
WP 5 kW = Laufzeit 14,8 h/d = 74,19 kWh

WP 8 kW = Laufzeit 09,3 h/d = 74,19 kWh

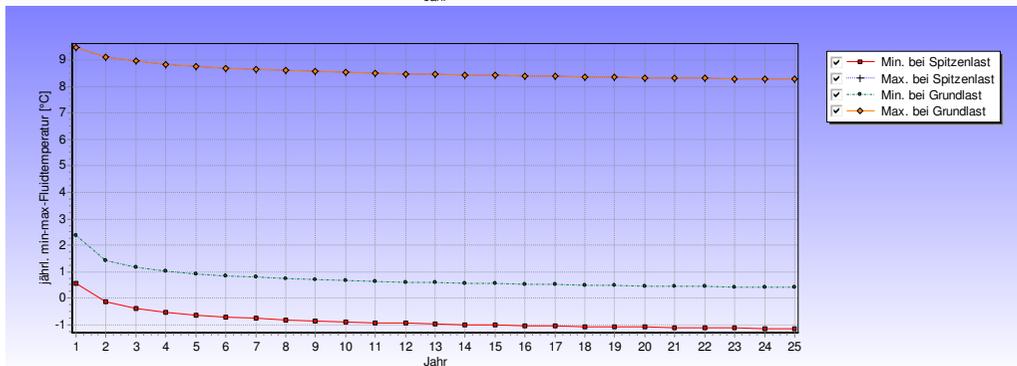
(hier bezogen auf thermische Leistung)

## Temperaturentwicklung im Fluid?

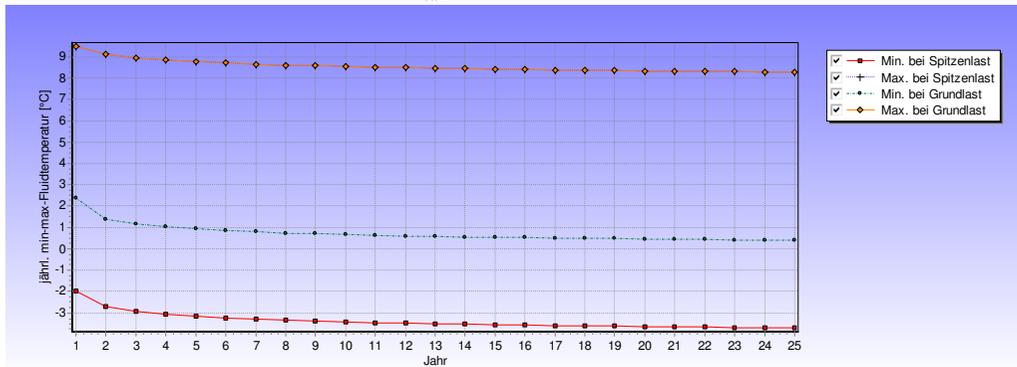
WP 6 kW



WP 5 kW



WP 8 kW



Berechnungen via EED

# Wärmepumpe

Auslegungsgrenze: - 2°C Mitteltemperatur bei Spitzenleistung

Gebäudebedarf im Januar 2304 kWh

Durchschnittlicher Tagesbedarf 2304 kWh/31 d = 74,19 kWh

WP 6 kW = Laufzeit 12,4 h/d = 74,19 kWh = 100 m

WP 5 kW = Laufzeit 14,8 h/d = 74,19 kWh = 90 m (-10%)

WP 8 kW = Laufzeit 09,3 h/d = 74,19 kWh = 115 m (+15%)

# Konduktiver Wärmetransport

- Wärmestrom  $Q$  ist proportional:

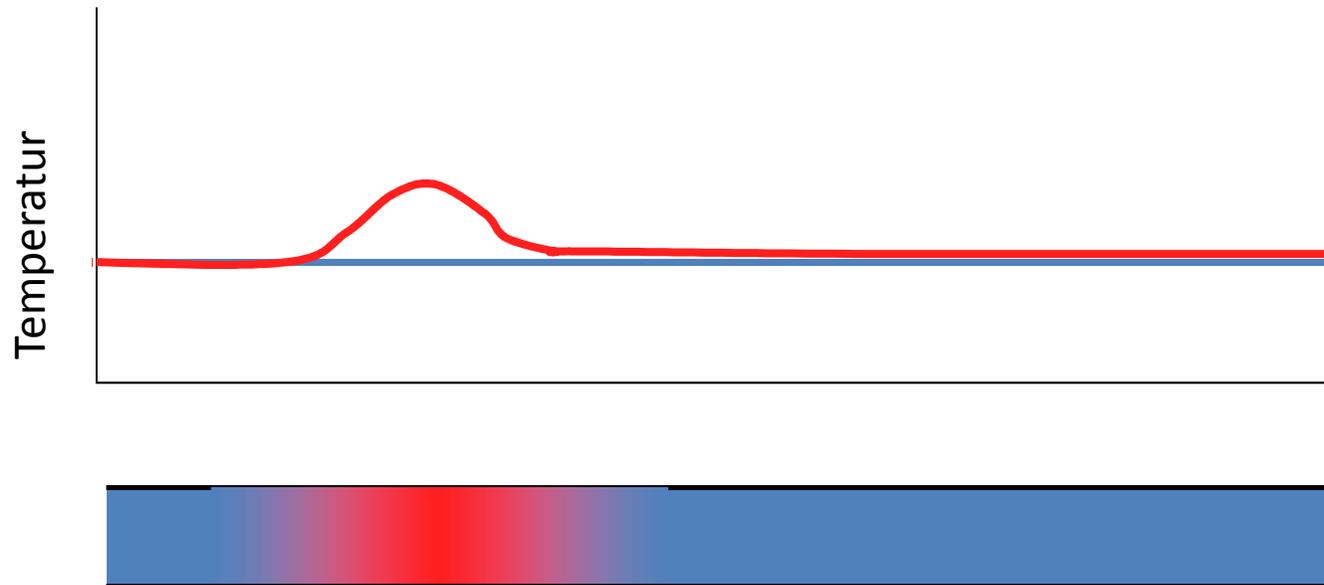
- Temperaturgradient
- durchströmte Fläche
- Wärmeleitfähigkeit

$$Q(x) = -\lambda(x) \times A(x) \times \frac{\partial \vartheta}{\partial x}$$

- Vorteil FE-Modell:

- Wärmeleitfähigkeit und Fläche (Mächtigkeit) lassen sich räumlich getrennt zuordnen

# Konvektiver Wärmefluss



## Advektion von Wärme in fließendem Wasser

Eine geothermische Anlage muss Gebäude, Gebäudetechnik und Untergrund gleichermaßen berücksichtigen.

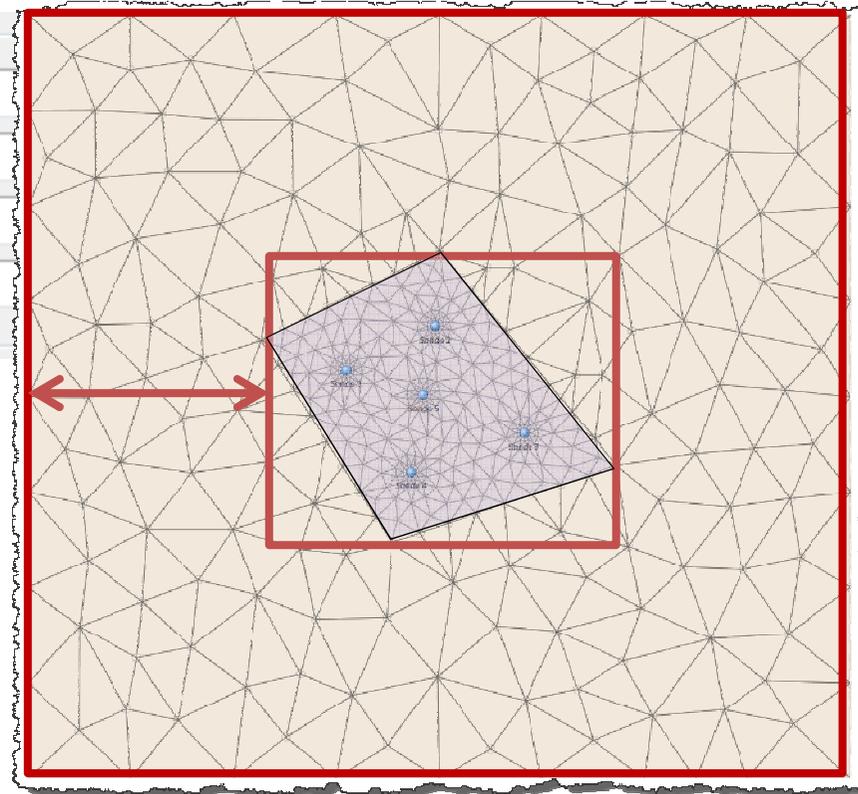
Beispiel anhand der Planungssoftware SF (Geologik Software)

# Grid-Generierung - Implementierung

Gittergeometrie

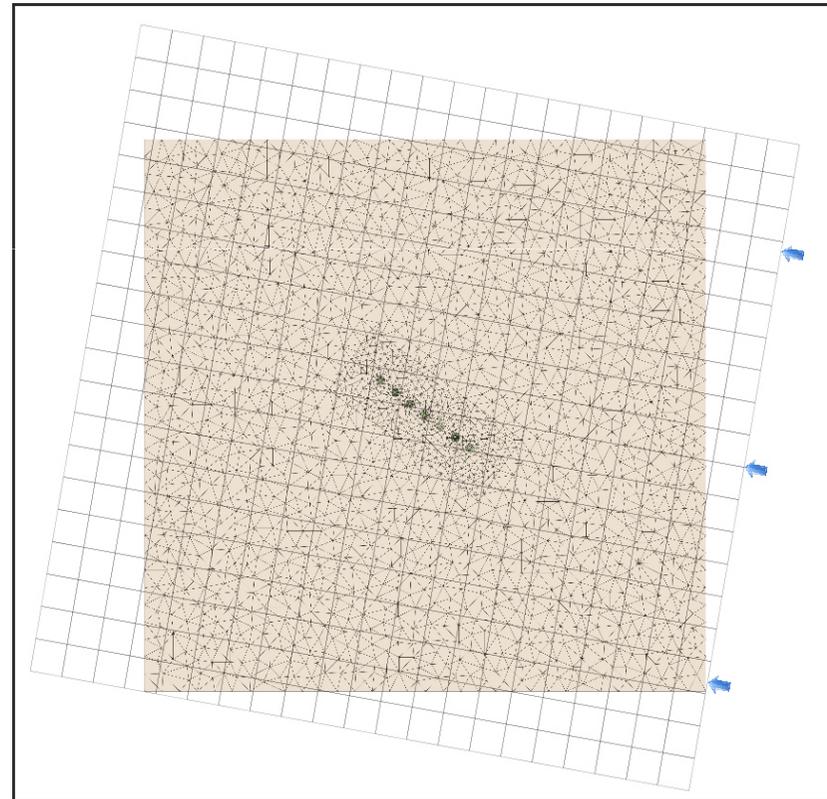
Innerer Bereich: Max. Elementfläche [m <sup>2</sup> ]	5
Äußerer Bereich: Max. Elementfläche [m <sup>2</sup> ]	50
Skalierungsfaktor innerer Bereich	2
Mindestabstand "Bounding Box" innen/außen [m]	30

- An „Triangle“:
  - EWS-Koordinaten
  - Innerer Bereich: Koordinaten und max. Fläche
  - Modellgebiet: Koordinaten und max. Fläche



# Wärmetransport durch Grundwasser

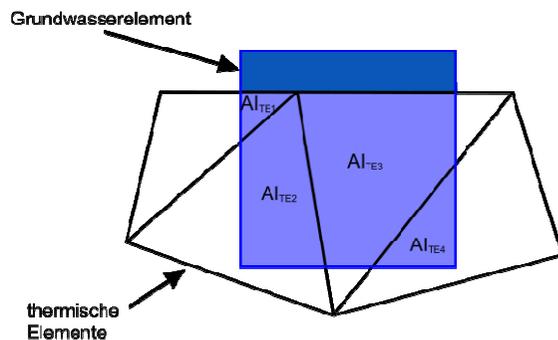
- Strömung
  - homogen
  - isotrop
  - stationär
- SF erstellt Grundwassergrid in Fließrichtung
  - GW-Grid <> therm. Grid



## Berücksichtigung der unterschiedlichen Gittergeometrien

Beispiel: Berechnung der Grundwassertemperatur

$$\vartheta_{GW} = \left( \sum_{i=1}^n \vartheta_{TEi} \frac{A_{TEi}}{A_{GW}} \right) + \frac{A_{GW} - \sum_{i=1}^n A_{TEi}}{A_{GW}} \vartheta_{GW0}$$



$n$ : Anzahl der Element aus dem thermischen Modell die eine Schnittfläche mit dem Grundwasserelement haben

$\vartheta_{TEi}$ : Durchschnitttemperatur des thermischen Element  $i$  [K]

$A_{TEi}$ : Schnittfläche zwischen dem thermischen Element  $i$  und dem Grundwasserelement [ $m^2$ ]

$A_{GW}$ : Fläche des Grundwasserelement =  $s^2$  [ $m^2$ ]

$\vartheta_{GW0}$ : Anfangstemperatur im Grundwasserelement [K]

# Lastseite

## Leistungsvorgabe auf das Untergrundmodell

- konstante Leistung
- variable Leistung
- Jahresprofil (Monat/Energiebedarf)

Gleiche Leistung auf jede EWS

## Energievorgabe auf das Gesamtmodell

- Jahresprofil (Datum/Energiebedarf)

Leistung der EWS abhängig von der Untergrundtemperatur

# Sonde als Wärmeübertrager

$$\vartheta_R = \vartheta_{Bl} + (\vartheta_V - \vartheta_{Bl}) \times e^{-NTU}$$

$$NTU = \frac{2\pi L}{R_B \rho c_p \dot{V}}$$

L = Tiefe/Länge der Sonde [m]

V = Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]

R<sub>B</sub> : Bohrlochwiderstand [m K / W]

ρc<sub>p</sub>: Volumetrische Wärmekapazität [MJ/(m<sup>3</sup>K)]

Die auf das Feld übertragene Leistung Q errechnet sich mit

$$\dot{Q} = \dot{V} \rho c_p (\vartheta_R - \vartheta_V)$$

# Implementierung in SF

Sondentyp

Bauform und Wärmeübertrager-Eigenschaften der Sonde

Bezeichnung  Symbol

Sondentyp

U-Sonde  Doppel-U-Sonde  Koaxialsonde

Allgemein Projektinstallungen Energie zum Heizen und Kälteleistung der Wärmepumpe

Fluid

Wasser  Propylenglykol 33 %  Ethylenglykol 33 %

Propylenglykol 25 %  Ethylenglykol 25 %

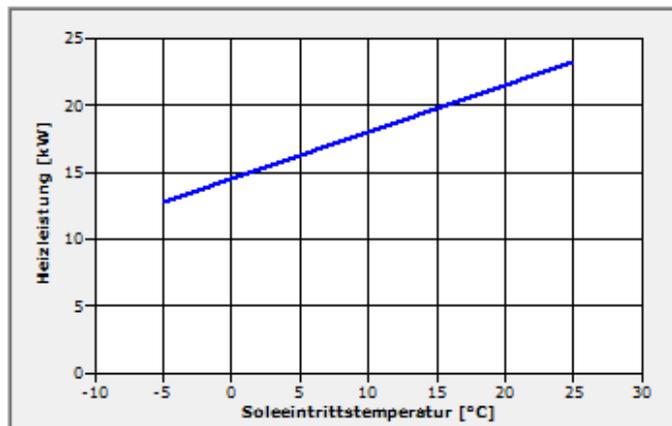
$\rho c_p$  = vol. Wärmekapazität

### Wärmepumpe

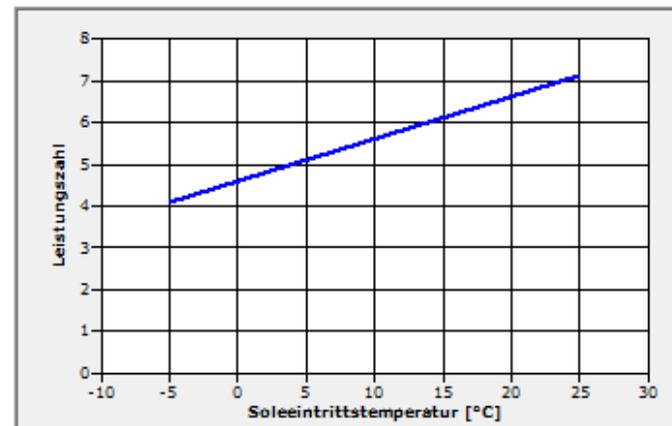
- keine Wärmepumpe
- Wärmepumpe verwenden

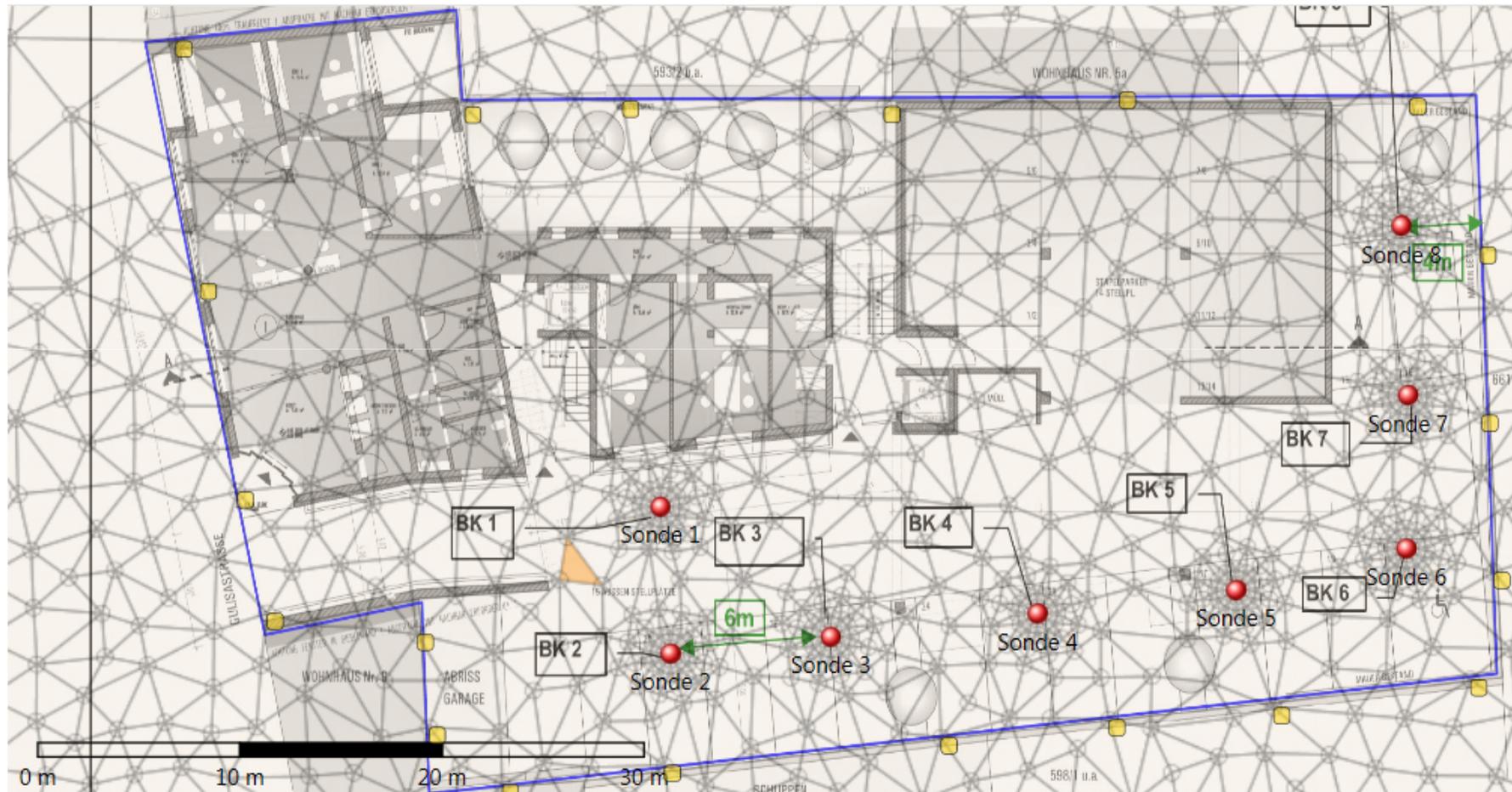
Bezeichnung	COP	Heizleistung [k...	Wasser...	COP (Kühlbetri...	Kühlleistung [k...	Wasser...
Dimplex SIK 14TE	$4,60+0,10 \times \varnothing$	$14,50+0,35 \times \varnothing$	35	$9,00-0,20 \times \varnothing$	$20,00-0,15 \times \varnothing$	18
Dimplex SI 30TER+ (1 Ver...	$4,10+0,10 \times \varnothing$	$15,00+0,45 \times \varnothing$	35	$10,10-0,18 \times \varnothing$	$23,00-0,20 \times \varnothing$	8
Dimplex SI 6TU	$4,60+0,15 \times \varnothing$	$6,00+0,20 \times \varnothing$	35	$9,00-0,20 \times \varnothing$	$20,00-0,15 \times \varnothing$	18
Dimplex Test SIK 14TE	$4,60+0,10 \times \varnothing$	$14,50+0,35 \times \varnothing$	35	$0,000,00 \times \varnothing$	$0,000,00 \times \varnothing$	18
Dimplex Test SIK 14TE	$4,60+0,10 \times \varnothing$	$14,50+0,35 \times \varnothing$	35	$9,00-0,20 \times \varnothing$	$20,00-0,15 \times \varnothing$	18
	$4,00+0,00 \times \varnothing$	$10,00+0,00 \times \varnothing$	40	$9,00-0,20 \times \varnothing$	$20,00-0,15 \times \varnothing$	18
	$4,00+0,00 \times \varnothing$	$10,00+0,00 \times \varnothing$	40	$9,00-0,20 \times \varnothing$	$20,00-0,15 \times \varnothing$	18

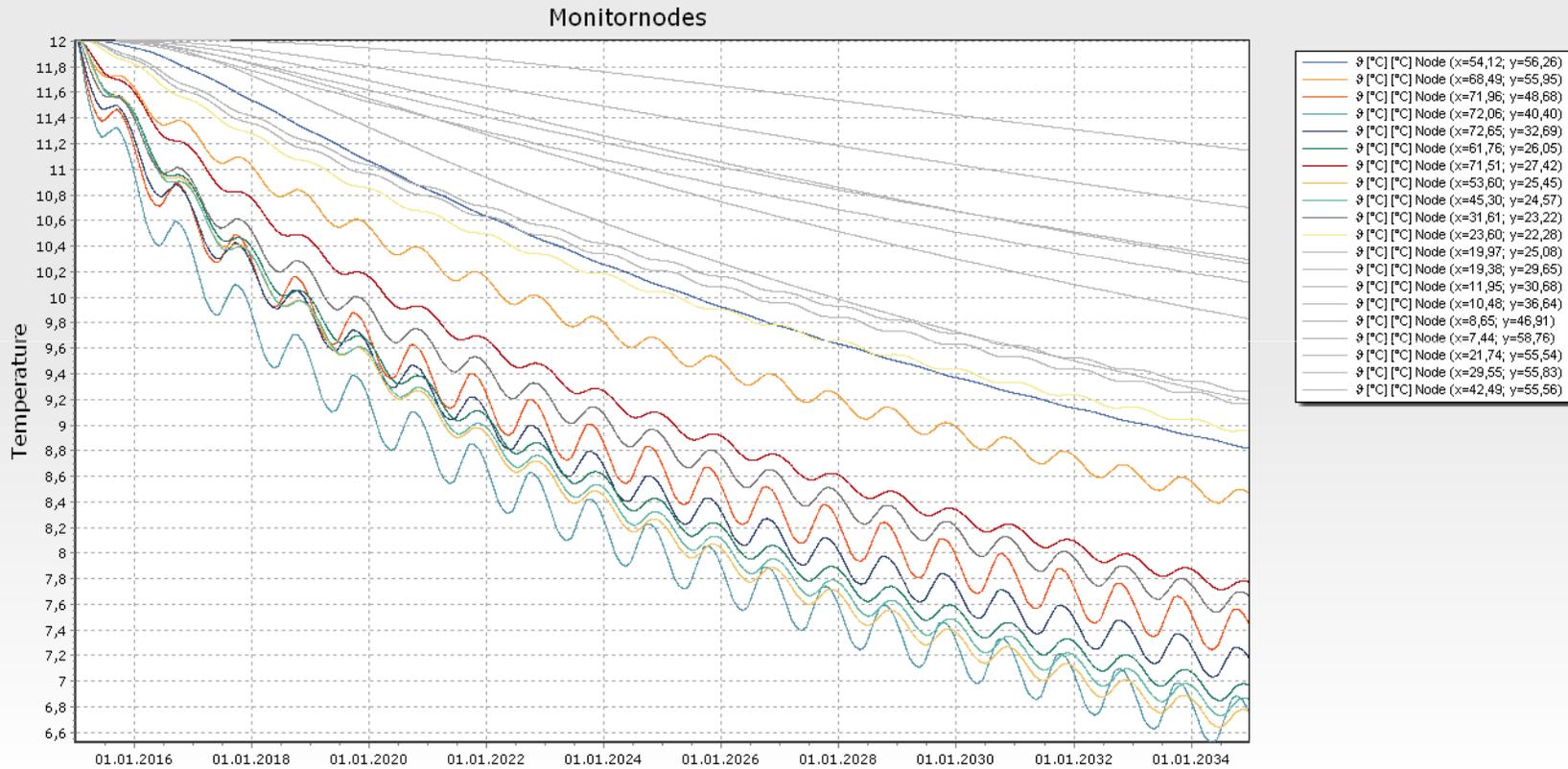
Kennlinie Heizleistung



Kennlinie Leistungszahl



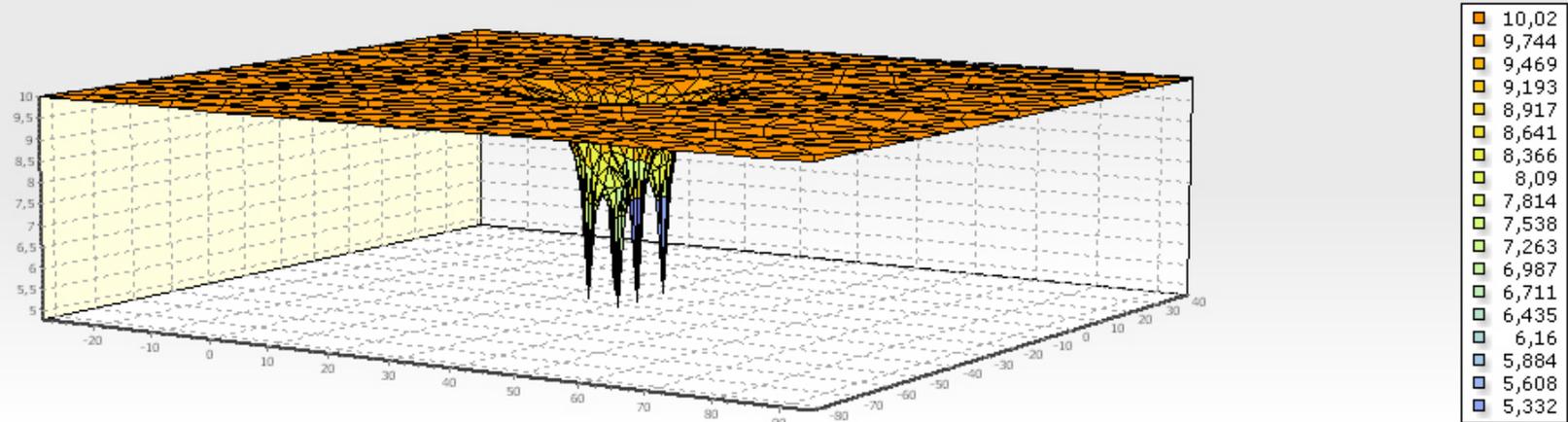




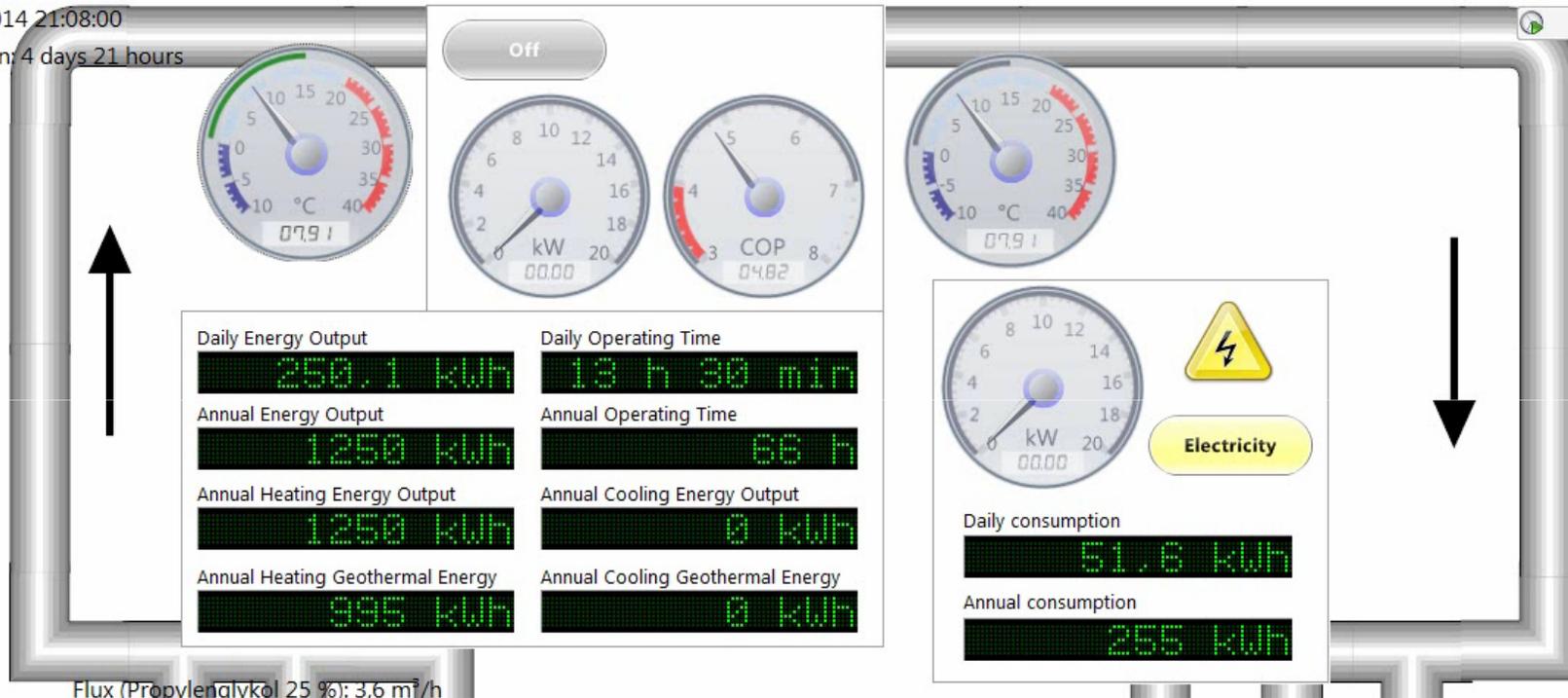
Nr.	Datum	Betriebsdauer [h]	Feldenergie [kWh]	Energie an Gebäude [kWh]	Erdwärmeanteil [%]	EWS1 Energie [kWh]	EWS1 Effizienz	EWS1 $\varnothing$ min [°C]	EWS1 $\varnothing$ max [°C]
355	21.12.2014	15 h 0 min	200,11	258,29	77,47	40,66		4,73	5,21
356	22.12.2014	15 h 0 min	200,03	258,20	77,47	40,65		4,72	5,20
357	23.12.2014	15 h 0 min	199,94	258,12	77,46	40,64		4,71	5,18
358	24.12.2014	15 h 0 min	199,87	258,03	77,46	40,62		4,70	5,17
359	25.12.2014	15 h 0 min	199,79	257,95	77,45	40,61		4,69	5,16
360	26.12.2014	15 h 0 min	199,71	257,87	77,45	40,60		4,67	5,15
361	27.12.2014	15 h 0 min	199,64	257,79	77,44	40,59		4,66	5,14
362	28.12.2014	15 h 0 min	199,56	257,71	77,44	40,57		4,65	5,12
363	29.12.2014	15 h 0 min	199,49	257,63	77,43	40,56		4,64	5,11
364	30.12.2014	15 h 0 min	199,42	257,56	77,43	40,55		4,63	5,10
365	31.12.2014	15 h 0 min	199,35	257,48	77,42	40,54		4,62	5,09

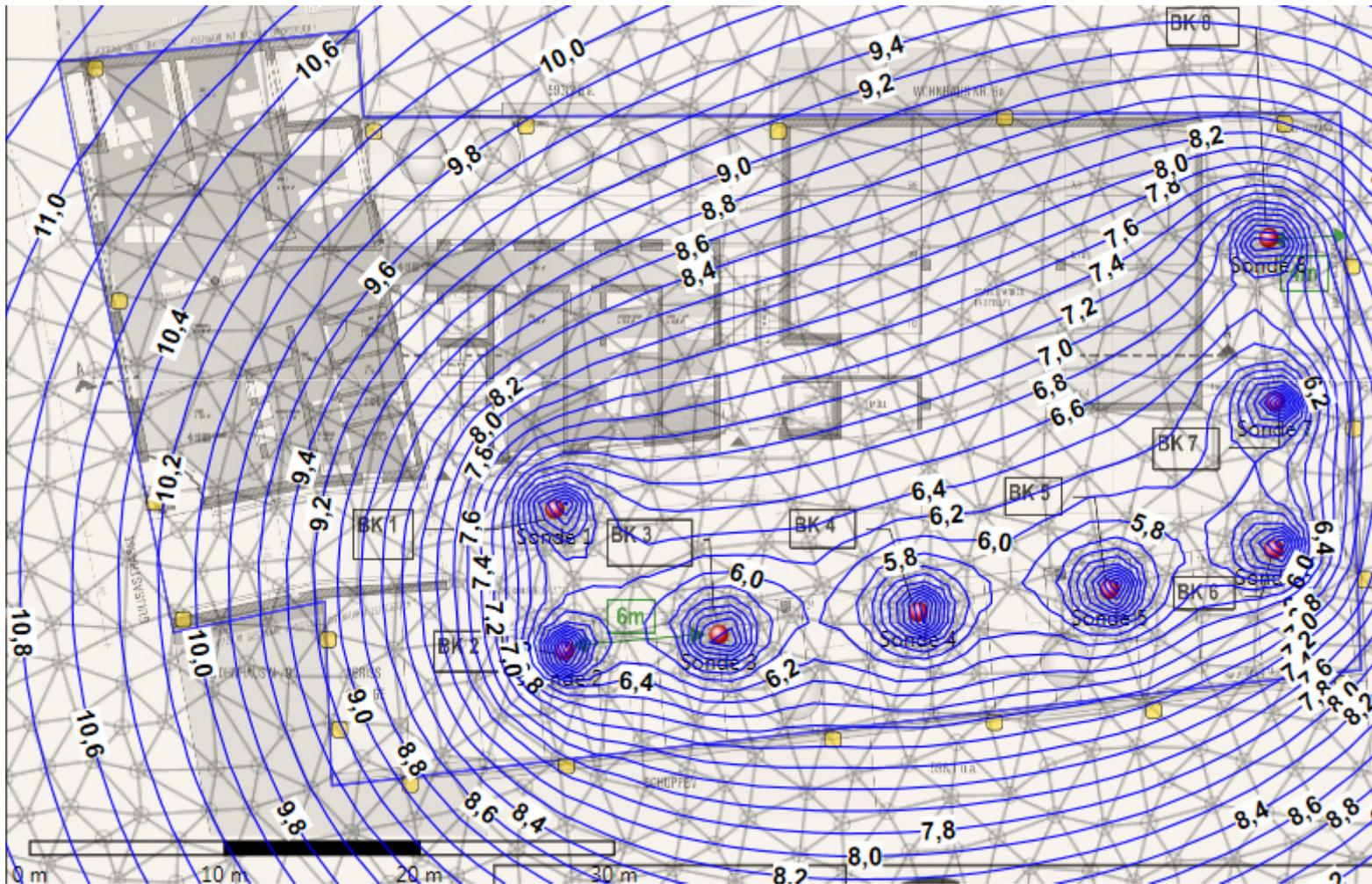


Temperaturfeld



05 Jan 2014 21:08:00  
Time Span: 4 days 21 hours

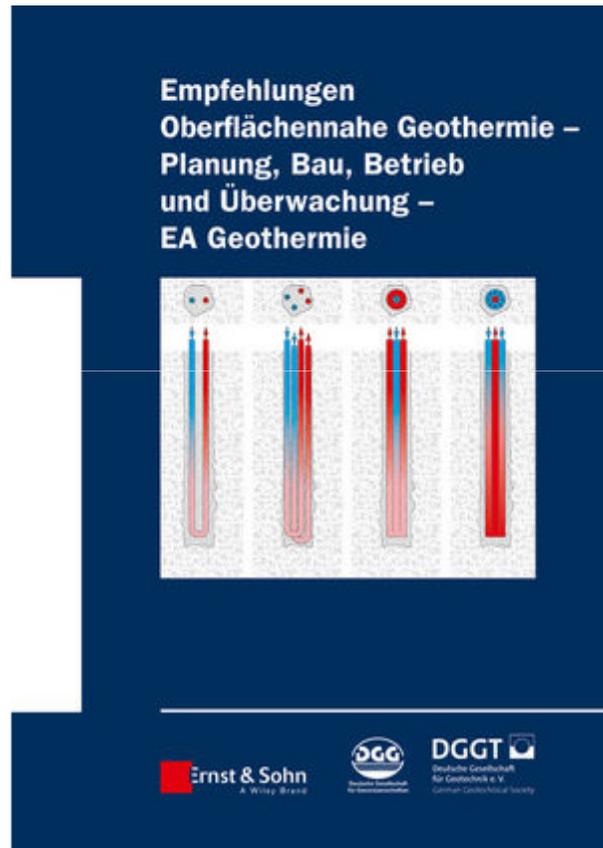




# Zusammenfassung

Die Planung ist ein komplexer Vorgang, der

- Gebäudebedarf
  - Wärmepumpentechnik und
  - Geophysikalische Standortgegebenheiten berücksichtigen muss.
- 
- Die Planung muss durch einen Fachplaner durchgeführt werden.



## Empfehlung Oberflächennahe Geothermie: Planung, Bau, Betrieb und Überwachung - EA Geothermie

[Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. /  
German Geotechnical Society](#) (Editor),  
[Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften](#)  
(Editor)

336 pages  
November 2014

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

