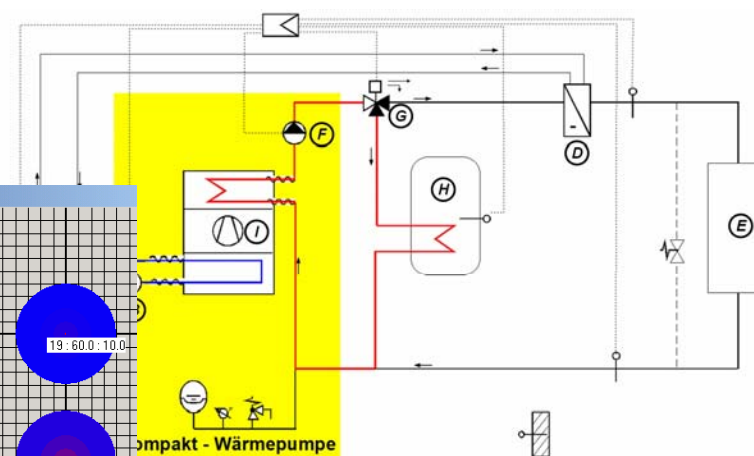
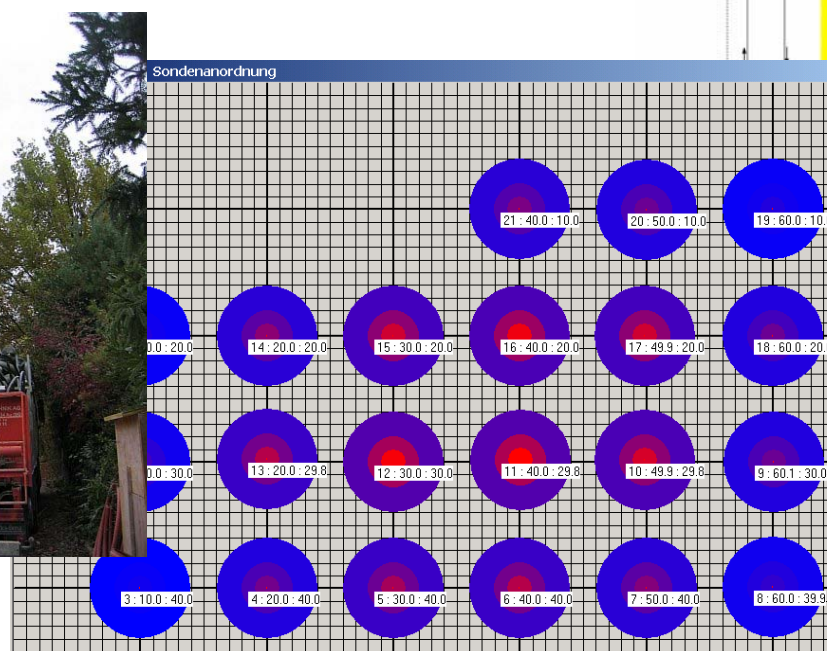


# Heizen und Kühlen mit geothermischer Energie

## Tools zur Auslegung von Erdwärmesonden und Luft-Erdregistern



Arthur Huber  
Huber Energietechnik AG  
Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich  
huber@hetag.ch

<http://www.hetag.ch>

## Arthur Huber



1. 8. 1963

dipl. Masch.-Ing. ETH / SIA

1995 Gründung der Firma  
Huber Energietechnik

- Geothermische Planungen
- MINERGIE – Planungen HLK
- Programm EWS für Erdwärmesonden
- Programm WKM für Luft - Erdregister

## Inhalt

- **Warum simulieren wir?**
- **Programm EWS**
- **g-functions und Zeitkonstanten von Sonden**
- **Sondenordnung in Sondenfeld**
- **Durchschnittsentzug und taktender Betrieb**
- **Lastprofil: Wie kommt man zu den Daten**
- **Beispiel Heizen und Sondenfreecooling mit 15 Sonden**
- **Parameteridentifikation bei Responsetests**
- **Druckabfallberechnung mit EWSDRUCK**
- **Programm WKM: Luft - Erdregister**

## **Klassische Gründe für eine Simulation**

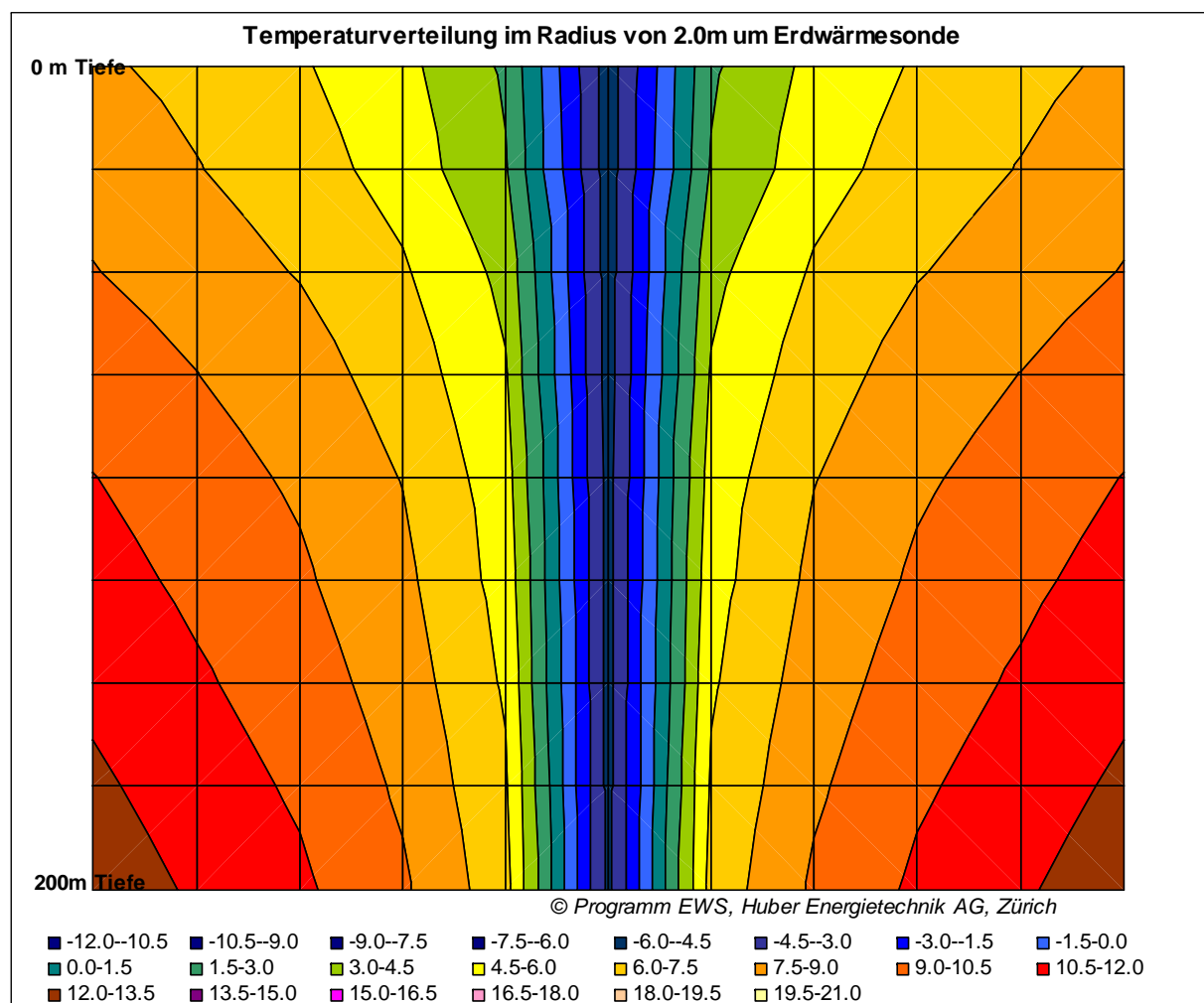
- Auslegung und Optimierung von Komponenten einer Anlage, z. B. Anzahl und Bohrtiefe von Erdwärmesonden
- Variantenvergleiche in der Planung, z. B. Erdsonden oder Erdregister für Gebäudekühlung
- Berechnung von Garantiewerten in der Planungsphase z. B. erreichbare Kühlleistung und Temperaturen mit Erdwärmesonden im Sommer
- Vorhersage von Betriebskosten einer Anlage in der Planung z. B. Kühlkosten bei Einsatz von geothermischem Freecooling

## „Versteckter“ Nutzen einer Simulation

- Simulationsprogramme zwingen den Anwender kompromisslos, alle relevanten Randbedingungen abzuklären („Input-Zwang“)
- Simulationsprogramme ermöglichen intuitives Arbeiten durch iteratives Herantasten an die optimale Lösung
- Gute Simulationsprogramme führen den Anwender ans Ziel -> Schulung von Mitarbeitern in ein neues Arbeitsgebiet
- Simulationsprogramme zur Nutzung von Umgebungsenergie sind immer auch eine Wissens- und Erfahrungsbasis
- Gute Simulationsprogramme ermöglichen das Ausbrechen aus dem gewohnten Erfahrungsbereich ( „Was wäre wenn..“)

## „Versteckter“ Nutzen einer Simulation

- Präsentation der Resultate



## „Versteckter“ Nutzen einer Simulation

- Analytische Lösungen machen weniger „Eindruck“ beim Auftraggeber!

$$T_{\text{Quelle}} = T_{\text{mo}} + \Delta T_{\text{Grad}} \cdot \frac{H}{2} - \left[ \frac{g(t, r_1)}{2\pi \lambda_{\text{Earth}}} + R_b + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{R_a} \cdot \frac{H^2}{\dot{m}^2 \cdot c_{p_{\text{Sole}}}} - \frac{H}{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p_{\text{Sole}}}} \right] \dot{q}$$

Analytische Erdwärmesondengleichung (aus „Erdwärmesonden für Direktheizung“, A. Huber, BFE, 2005)

## Warum simulieren wir Erdwärmesonden ?

- **Klassische Auslegung:**  
15 m Sondenlänge pro  
kW Heizleistung,  
50 W/m Entzugsleistung

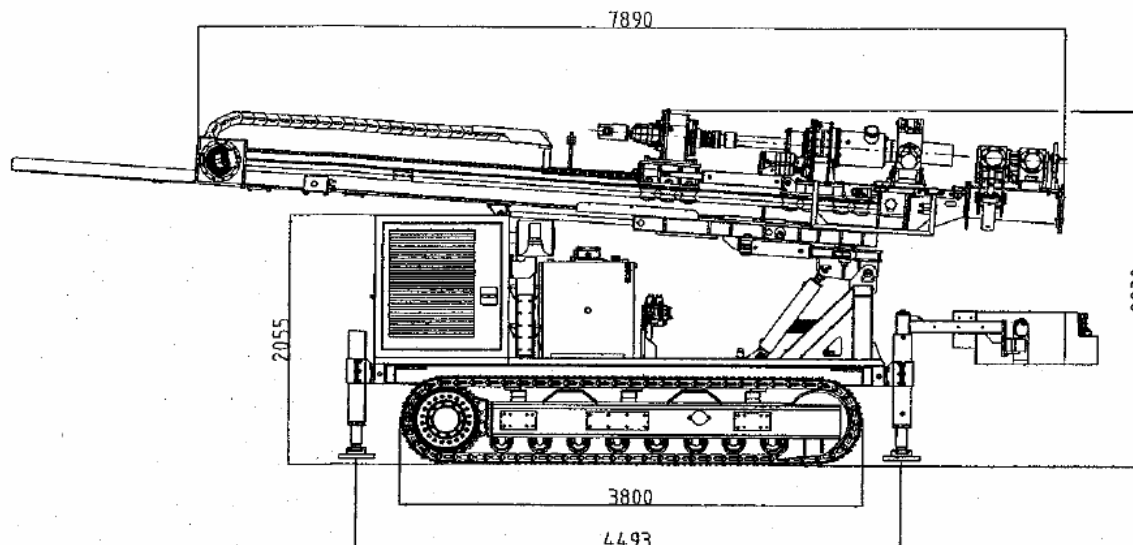
- **AWP-Richtlinie T1**  
erlaubt Einsatz  
der Erdsonden  
nur bis 1'800 h/a

- **SIA 380/6, Anhang D:**  
spezifische Entzugsleistung  
für 1-4 Sonden, monovalent,  
keine aktive Regeneration,  
mit Frostschutzfüllung,  
„Normentzugsprofil“

Klassische Empfehlung für Erdsonden-Wärmepumpen:

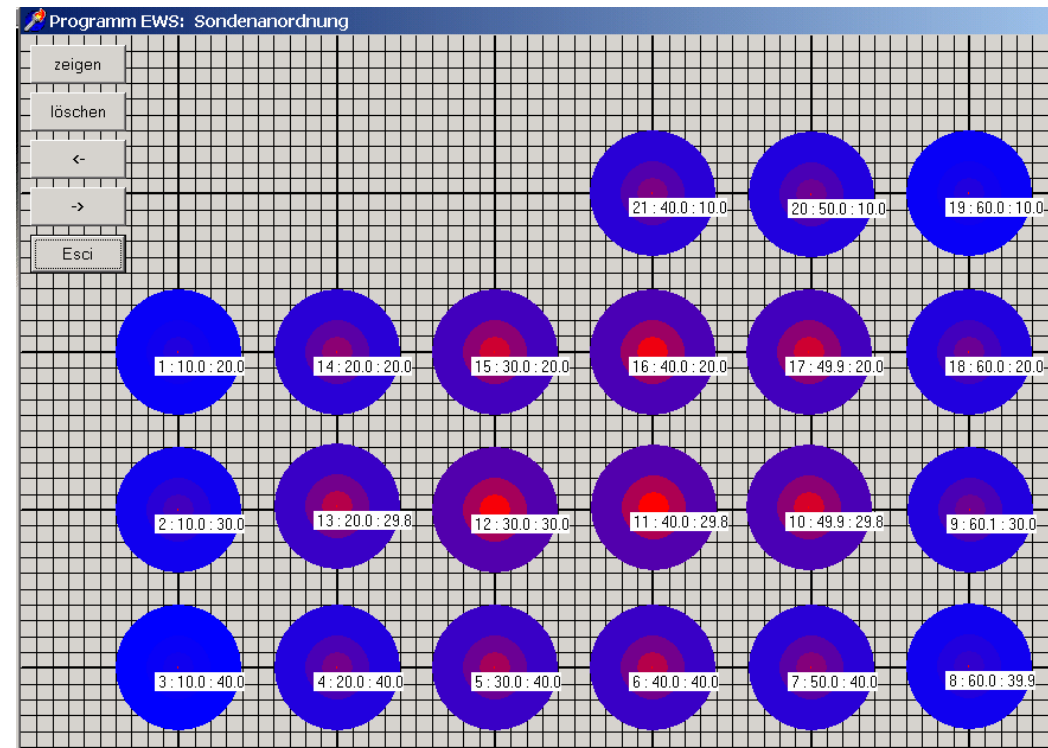
„Man nehme einen durchschnittlich gut leitenden Boden, bohre darin ein Erdwärmesonde, fülle die Sonde mit Frostschutzmittel, hänge eine mittelmässige Wärmepumpe daran und verhindere einen Betrieb von mehr als 1'800 h/a ..“

**Und was passiert in allen anderen Fällen ?**



## Programm EWS

- **Einzelsonden und Sondenfelder**
- **freie Anordnung der Sonden**
- **stationäre und instationäre Rechnung**
- **Zeitschrit 1 Minute – 1 Stunde**
- **Bis 100 Jahre Simulation**
- **Taktender Lastbetrieb**
- **frei definierbare Lastprofile**
- **Sonden-Freecooling und Rückkühlung  
mit Temperaturbegrenzung**

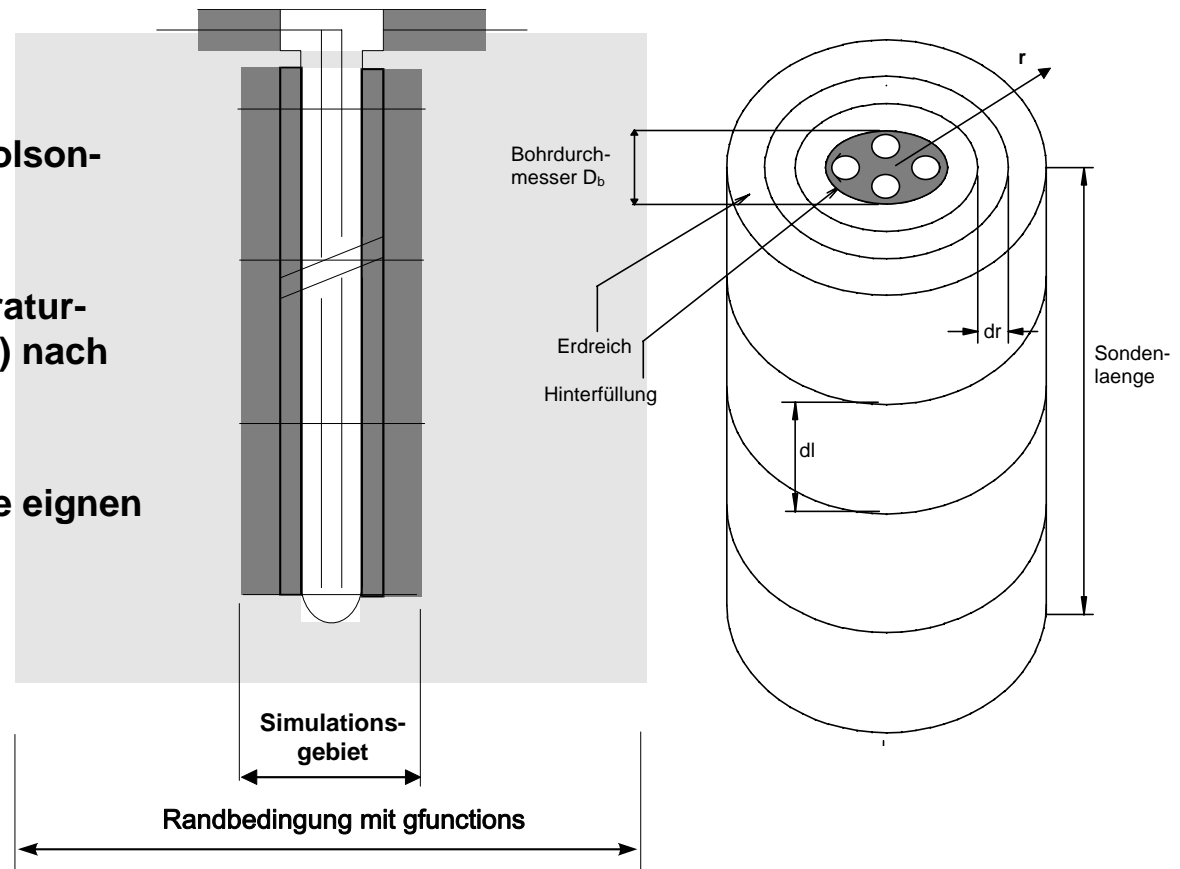


[www.hetag.ch](http://www.hetag.ch)



## Programm EWS

- **Echte Simulation (Crank-Nicholson-Verfahren)**
- **Randbedingungen mit Temperatur-Sprungantworten (g-functions) nach Eskilson**
- **Bis 10 Schichten vertikal mit je eigenen Stoffwerten**



## Dimensionslose Temperatursprungantwort $g$ ( $g$ -function)

$\Delta T$  = Temperaturabkühlung gegenüber  
unbeeinflussten Zustand [K]

$g$  = dimensionslose Temperaturabkühlung [-]

$q$  = spezifischer Wärmeentzug [W/m]

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit der Erde [W/mK]

$$g(r, t) = \frac{\Delta T(r, t) \cdot \lambda \cdot 2\pi}{\dot{q}}$$

Eskilson, 1987: Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes

$$\Delta T(r, t) = \frac{g(r, t) \cdot \lambda \cdot 2\pi}{\dot{q}}$$

## Zeitkonstanten $t_s$ von Erdwärmesonden

$H$  = Bohrtiefe [m]

$\rho$  = Dichte Erde [kg/m<sup>3</sup>]

$c_p$  = spezifische Wärmekapazität Erde [J/kgK]

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit der Erde [W/mK]

$$t_s = \frac{H^2 \cdot \rho \cdot c_p}{9 \cdot \lambda}$$

Eskilson, 1987: Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes

### Typische Werte Schweizer Molassebecken

$H$  = 70 – 300 m

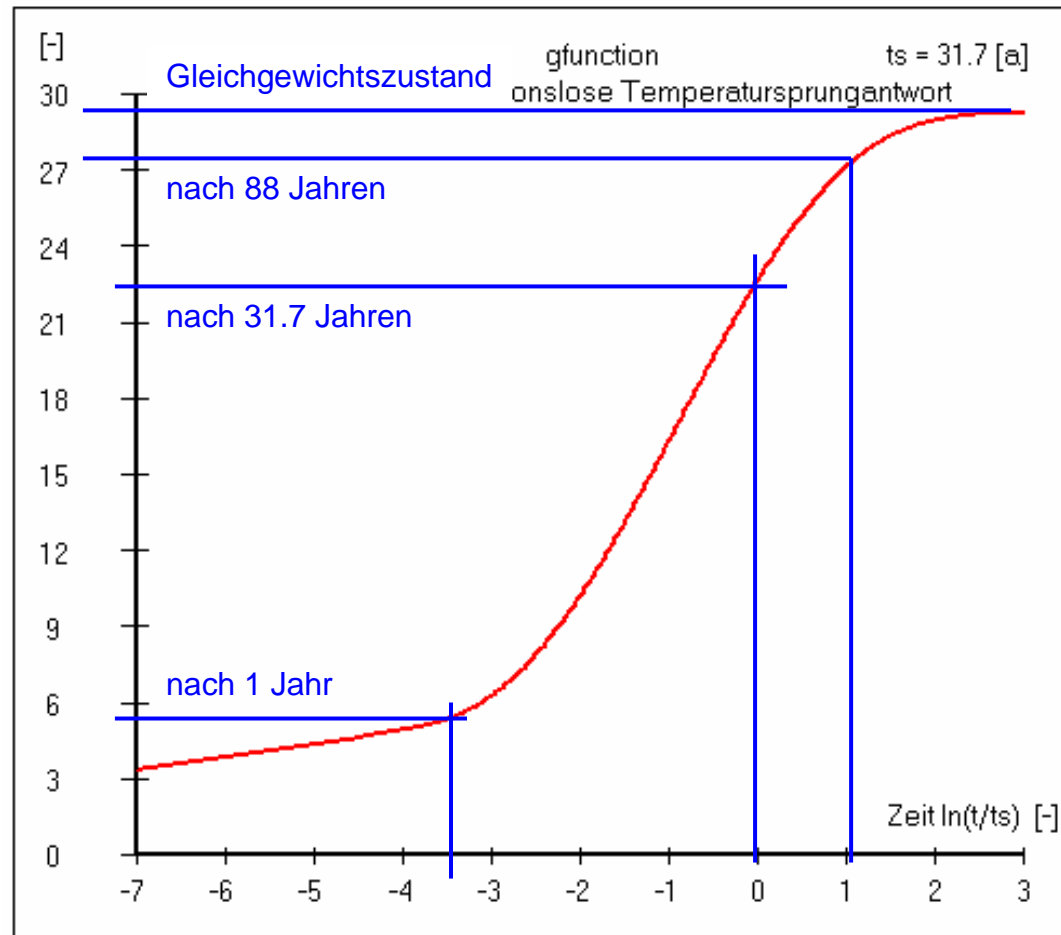
$\rho$  = 2500 kg/m<sup>3</sup>

$c_p$  = 900 J/kg K

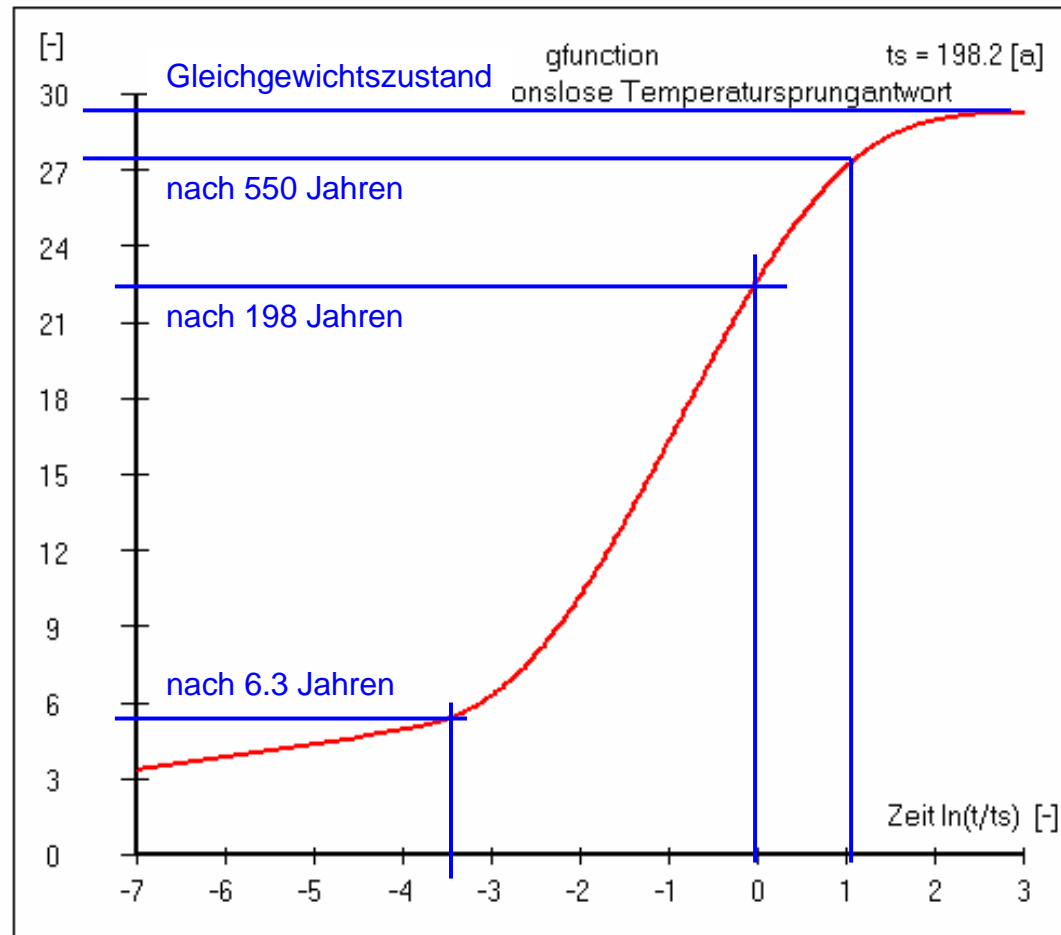
$\lambda$  = 2.5 W/m K

Bohrtiefe	Zeitkonstante
70 m	15.5 Jahre
100 m	31.7 Jahre
150 m	71.3 Jahre
200 m	126.8 Jahre
250 m	198.2 Jahre
300 m	285.4 Jahre

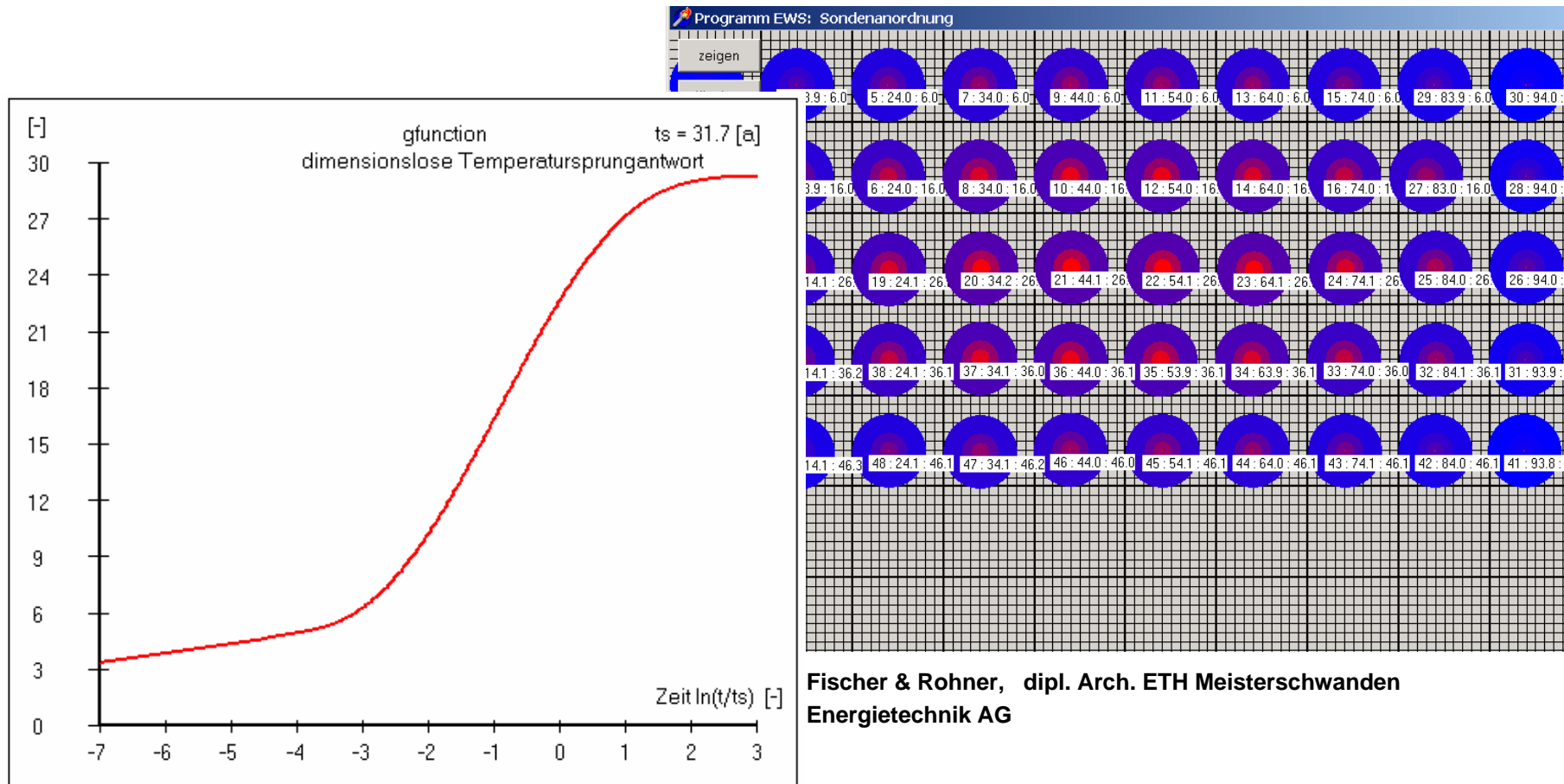
# Zeitkonstanten $t_s$ von 100m tiefen Erdwärmesonden



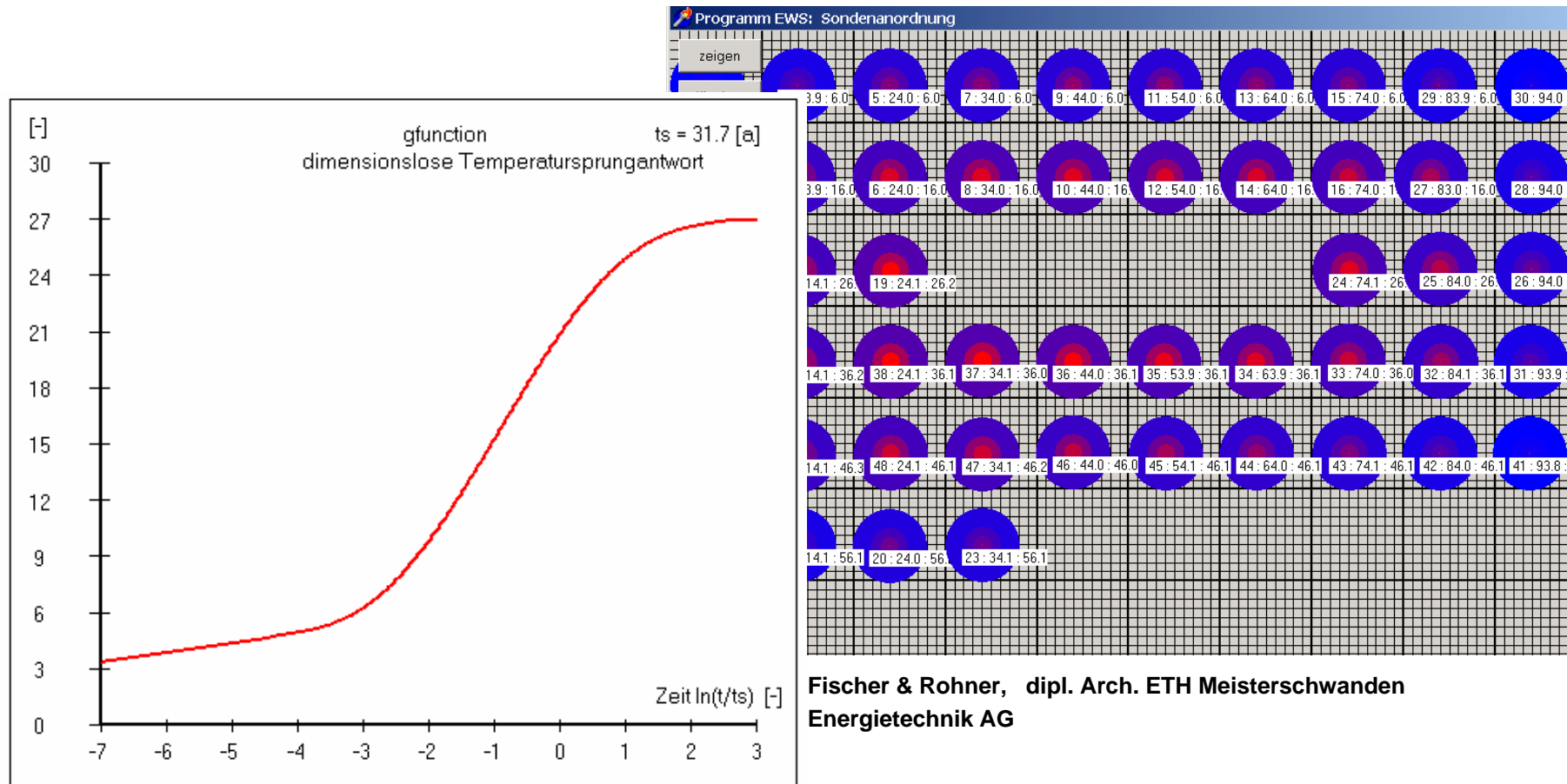
# Zeitkonstanten $t_s$ von 250m tiefen Erdwärmesonden



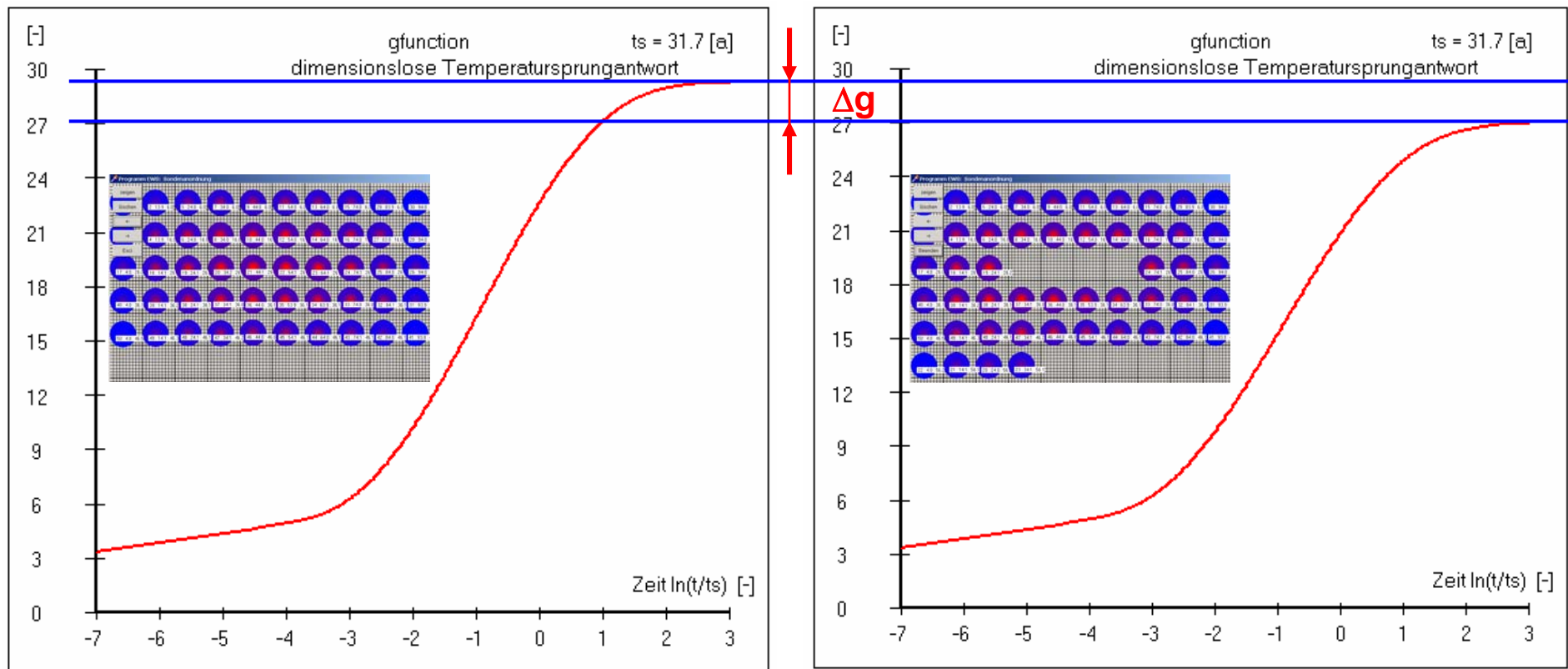
# Beispiel 50 Erdwärmesonden: Sondenanordnung 1



## Beispiel 50 Erdwärmesonden: Sondenanordnung 2



## Beispiel Sondenanordnung (50 Erdwärmesonden)



$$\Delta T(r, t) = \frac{\Delta g(r, t) \cdot \lambda \cdot 2\pi}{\dot{q}}$$

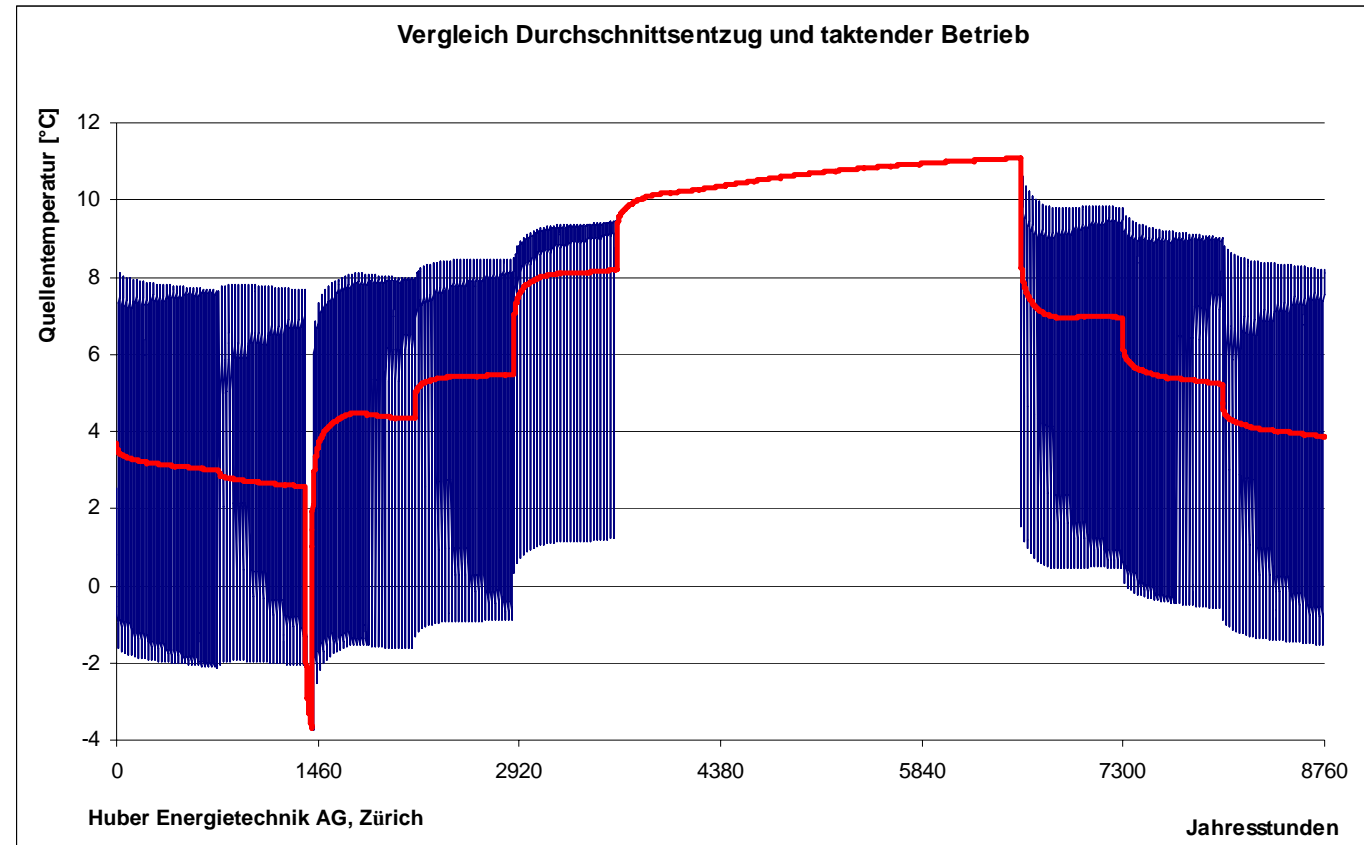


## Vergleich Durchschnittsentzug und taktender Betrieb

Es gibt Programme, die nur mit monatlichen Mittelwerten rechnen

-> Sondentemperaturen sind Mittelwerte über Stillstandszeit und Betriebszeit

Berechnung realistischer Sondentemperaturen erfordert taktenden Betrieb mit Zeitschritt max. 1 h



## Realistische Lastprofile: Woher kommen die Daten?

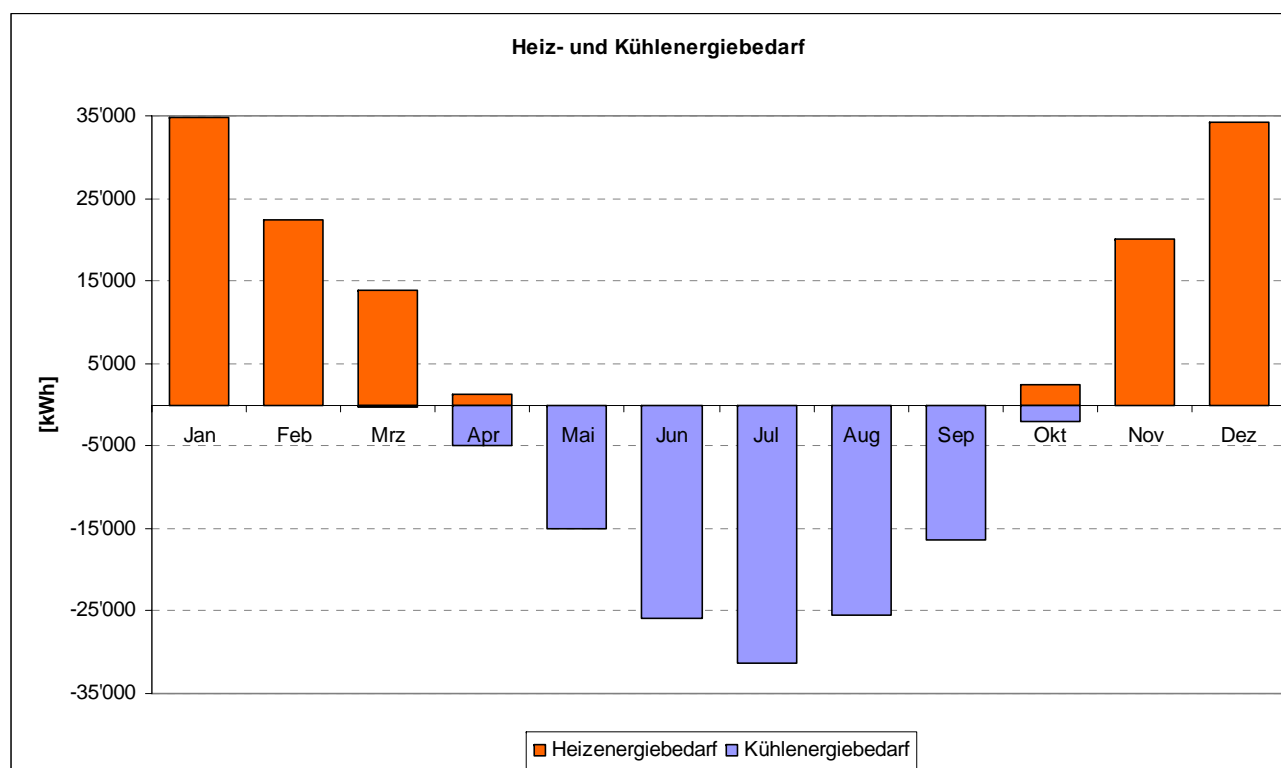
Grundlegendaten: z. B. aus Berechnung Heizwärmebedarf SIA 380/1

nach SIA 380/1:

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Transmissionswärmeverl. [MJ/m <sup>2</sup> a]	38.4	31.5	29.9	20.3	14.1	6.7	3.9	5.9	9.9	18.6	27.9	37.5
Lüftungswärmeverlust [MJ/m <sup>2</sup> a]	11.8	9.6	9.1	6.2	4.3	2	1.2	1.8	3	5.7	8.5	11.5
<b>Gesamtwärmeverlust [MJ/m<sup>2</sup>a]</b>	<b>50.2</b>	<b>41.1</b>	<b>39</b>	<b>26.5</b>	<b>18.4</b>	<b>8.7</b>	<b>5.1</b>	<b>7.7</b>	<b>12.9</b>	<b>24.3</b>	<b>36.4</b>	<b>49</b>
Solarer Wärmegewinn tot [MJ/m <sup>2</sup> a]	-8.2	-11.8	-17.5	-22.2	-24.6	-25.8	-27	-24.1	-20.9	-15.6	-8.9	-7.5
Interne Wärmegewinne [MJ/m <sup>2</sup> a]	-8.3	-7.5	-8.3	-8	-8.3	-8	-8.3	-8.3	-8	-8.3	-8	-8.3
<b>Wärmegewinne total [MJ/m<sup>2</sup>a]</b>	<b>-16.5</b>	<b>-19.3</b>	<b>-25.8</b>	<b>-30.2</b>	<b>-32.9</b>	<b>-33.8</b>	<b>-35.3</b>	<b>-32.4</b>	<b>-28.9</b>	<b>-23.9</b>	<b>-16.9</b>	<b>-15.8</b>
Ausnutzungsgrad f. Gewinne	1	1	0.99	0.84	0.56	0.26	0.14	0.24	0.45	0.92	1	1
<b>nicht genutzte Gewinne [MJ/m<sup>2</sup>a]</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-5</b>	<b>-14</b>	<b>-25</b>	<b>-30</b>	<b>-25</b>	<b>-16</b>	<b>-2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Heizwärmebedarf [MJ/m<sup>2</sup>a]</b>	<b>33.7</b>	<b>21.8</b>	<b>13.5</b>	<b>1.1</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>2.3</b>	<b>19.5</b>	<b>33.2</b>

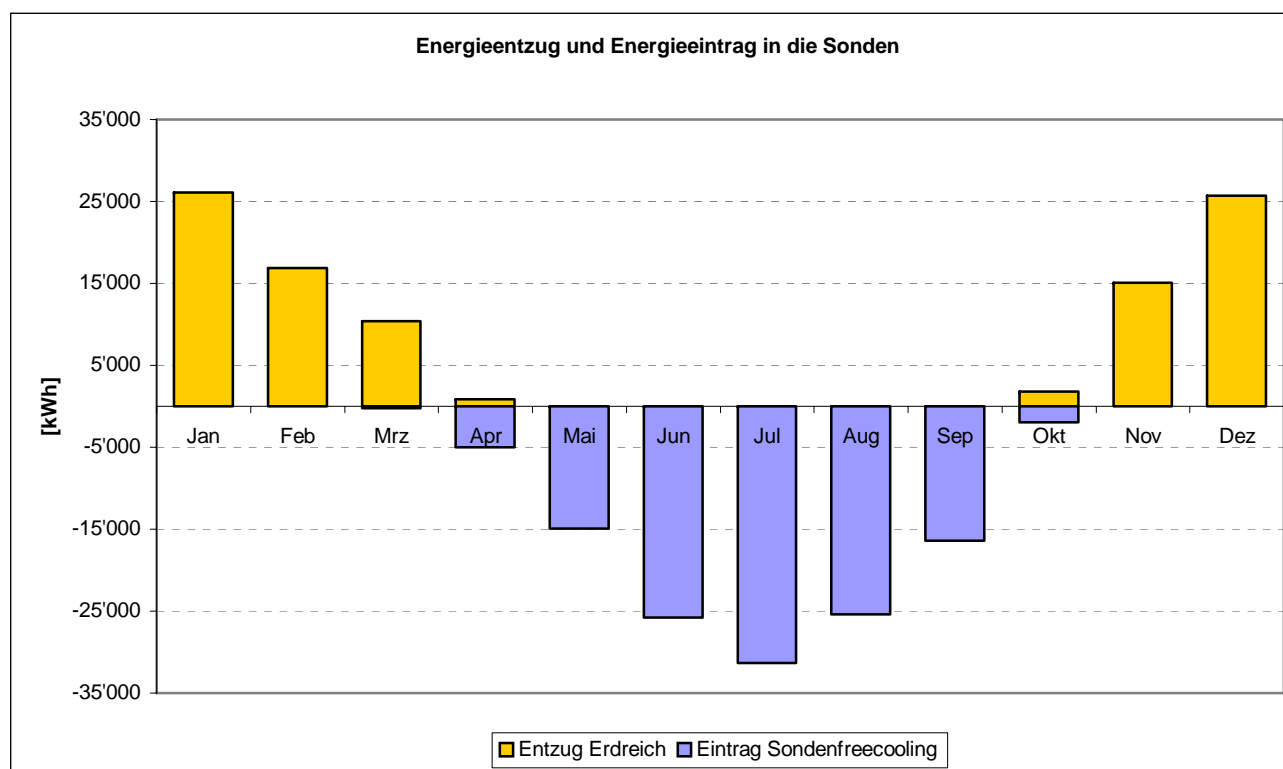
## Realistische Lastprofile: Woher kommen die Daten?

Beispiel Energiebilanz (Heizenergiebedarf / Kühlenergiebedarf) für Gebäude mit 15 Sonden:



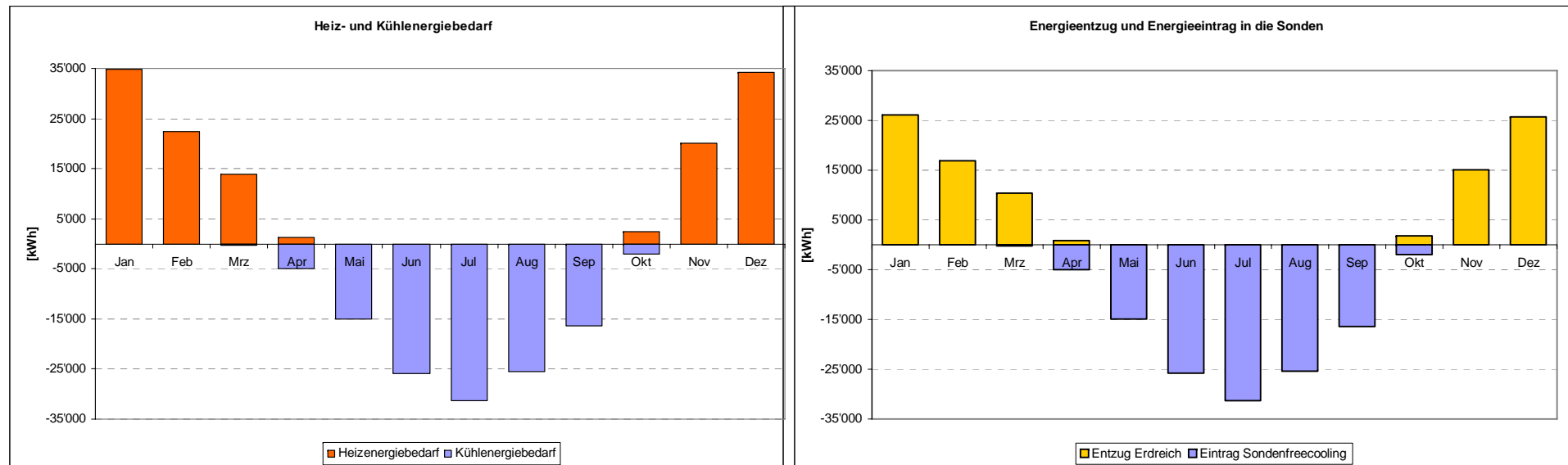
# Realistische Lastprofile: Woher kommen die Daten?

Beispiel Sondenbilanz Entzug / Einspeisung (Sonden-Freecooling):



# Realistische Lastprofile: Woher kommen die Daten?

Beispiel Sondenbilanz Entzug / Einspeisung (Sonden-Freecooling):



# Realistische Lastprofile: Was macht man mit den Daten?

## Beispiel Eingabe des Lastprofils in Programm EWS

**Eingabedaten EWS**

Datei Eingaben Import Ausgabe Fenster Info

Sonden Sole Erde **Lastprofil** Info Simulation

**Eingaben**  
Berechnung  
Öffnen  
**Speichern**  
Resultate  
Schliessen

**Neues Lastprofil mit den folgenden Werten erzeugen?**  
"(bei ""nein"" werden die Daten aus dem Eingabefile übernommen)"  Ja  Nein

Heizenergie ohne WW/Bandlast 130000 [kWh] COP Heizfall 3.50 Heizleistung Vollast 100.0 [kW]  
 Heizenergie Warmwasser 30000 [kWh] COP Warmwasser 2.50 Heizleistung WW 100.0 [kW]  
 Bandlast Heizenergie 0 [kWh] Heizleistung Teillast 63.0 [kW]  
 Kühlenergie ohne Bandlast 120000 [kWh] EER im Kühlfall 99.00 Kühlleistung 70.0 [kW]  
 Bandlast Kühlenergie 0 [kWh]  
 Dauerbetrieb Ende Februar 4 [Tage] Simulationsdauer [Jahre] 30 Maximal 100 Jahre

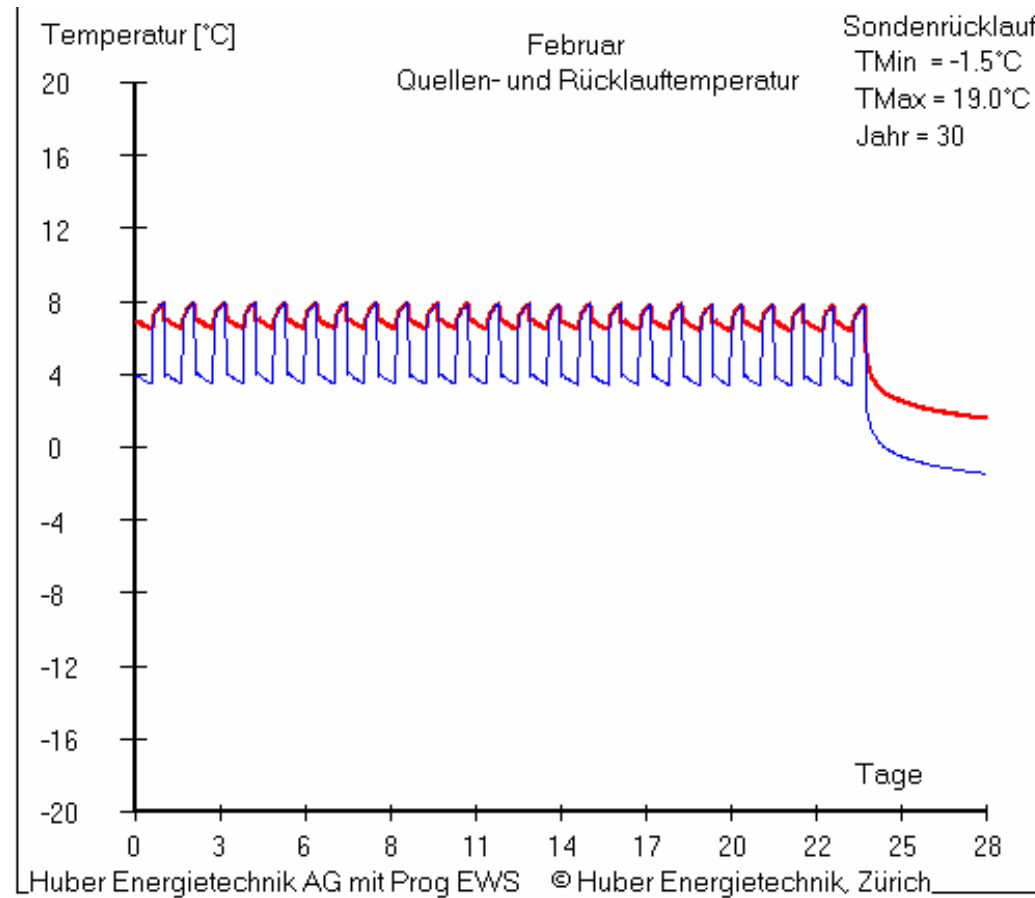
**Monatliche Heiz- und Kühlenergie (ohne Warmwasser, immer positives Vorzeichen):**

	Heizenergie	Kühlenergie		Heizenergie	Kühlenergie
im Januar	24050 [kWh]	0 [kWh]	im Juli	0 [kWh]	42000 [kWh]
im Februar	19500 [kWh]	0 [kWh]	im August	0 [kWh]	36000 [kWh]
im März	18200 [kWh]	0 [kWh]	im September	0 [kWh]	12000 [kWh]
im April	12350 [kWh]	0 [kWh]	im Oktober	13000 [kWh]	0 [kWh]
im Mai	1950 [kWh]	6000 [kWh]	im November	18200 [kWh]	0 [kWh]
im Juni	0 [kWh]	24000 [kWh]	im Dezember	22750 [kWh]	0 [kWh]

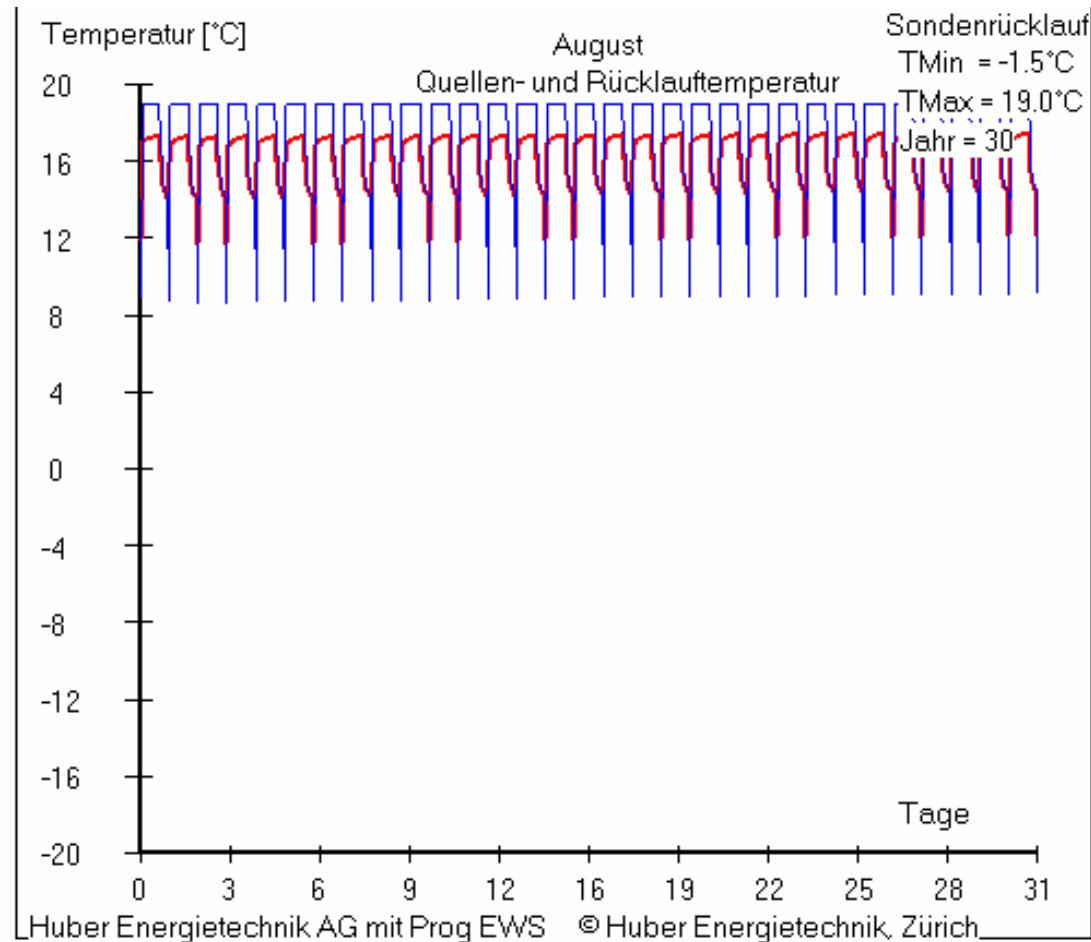
Freecooling:  Ja  Nein Sondenrücklauf 19.00 °C

Programm EWS, Lizenz für Huber Energietechnik AG © Huber Energietechnik AG, Zürich

## Resultate einer Simulation: Minimaltemperatur Rücklauf

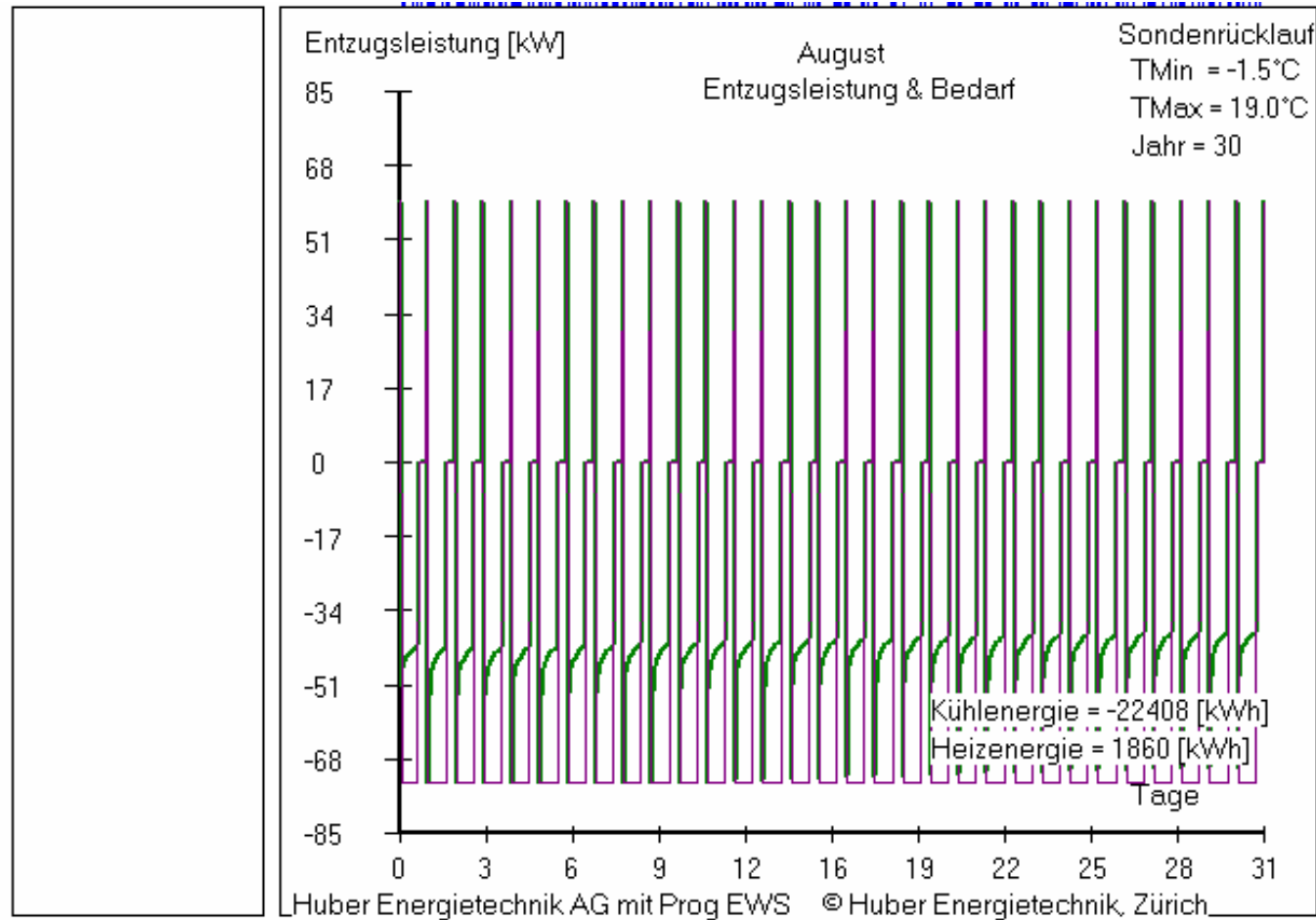


## Resultate einer Simulation: Kühltemperaturen im Sommer





## Resultate einer Simulation: Bedarf und Bedarfsdeckung



## Resultate einer Simulation: Bedarf und Bedarfsdeckung

**Resultate Programm EWS**

Programm EWS, Lizenz von Huber Energietechnik AG © Huber Energietechnik, Zürich

**Fallbeschreibung:** C:\Dokumente und Einstellungen\arthur\Desktop\Vortrag\_EMPA1\EWS\_Lenzburg\_neu.txt  
Projekt Erdwärmesonden  
Programm EWS, Ver 3.8 mit 13 x 160 m

**Eingabedaten:**

Wärmeleitfähigkeit Erde =	2.4	W/mK
Anzahl Erdwärmesonden =	13	
Bohrtiefe der Erdwärmesonden =	160.0	m
Sondenabstand =	8.0	m
Sonden-Aussendurchmesser =	40	mm
Entzugsleistung aus Erdwärmesonden =	71.4	kW
Rückkühlleistung in Erdwärmesonden =	60.0	kW
Dauerentzug Ende Februar =	3	Tage
Entzugsleistung im Dauerbetrieb =	70.0	kW
Max. benötigte Kühlleistung =	0.0	kW
Max. benötigte Heizleistung =	0.0	kW
Zulufterwärmung im Ventilator =	0.0	°C
Wirkungsgrad der WRG der Zuluft =	0.00	
el. Leistung der Sondenpumpe =		W
Wärmeleistung der Zusatzheizung =		kW
COP der Wärmepumpe bei -5°C =		

**Resultate:**

Wärmeeintrag in Erdwärmesonden =	-84619	kWh
Wärmeentzug aus Erdwärmesonden =	117992	kWh
Jahres-Kühlene		kWh
Kühlbedarf des Deckungsbeitrags	-118127	kWh
Minimale Sondenbelastung	71.6	%
Maximale Sondenbelastung	-1.5	°C
Maximale Kühlleistung	19.0	°C
Maximale Heizleistung der Sonden =	-77.8	kW
mittlere Sondenbelastung Juli / August =	71.4	kW
Anzahl Stunden über der Zuluft-Solltemperatur =	-16.6	W/m
Kälte aus Kühlmaschine =	0	h
Wärmeertrag der Wärmerückgewinnung WRG =	0	kWh
Wärmebedarf total =	0	kWh
Fehlende Wärme der Wärmepumpe =	117992	kWh
- davon gedeckt durch Zusatzheizung =	0	kWh

**Deckung Kühlbedarf 71.6%**

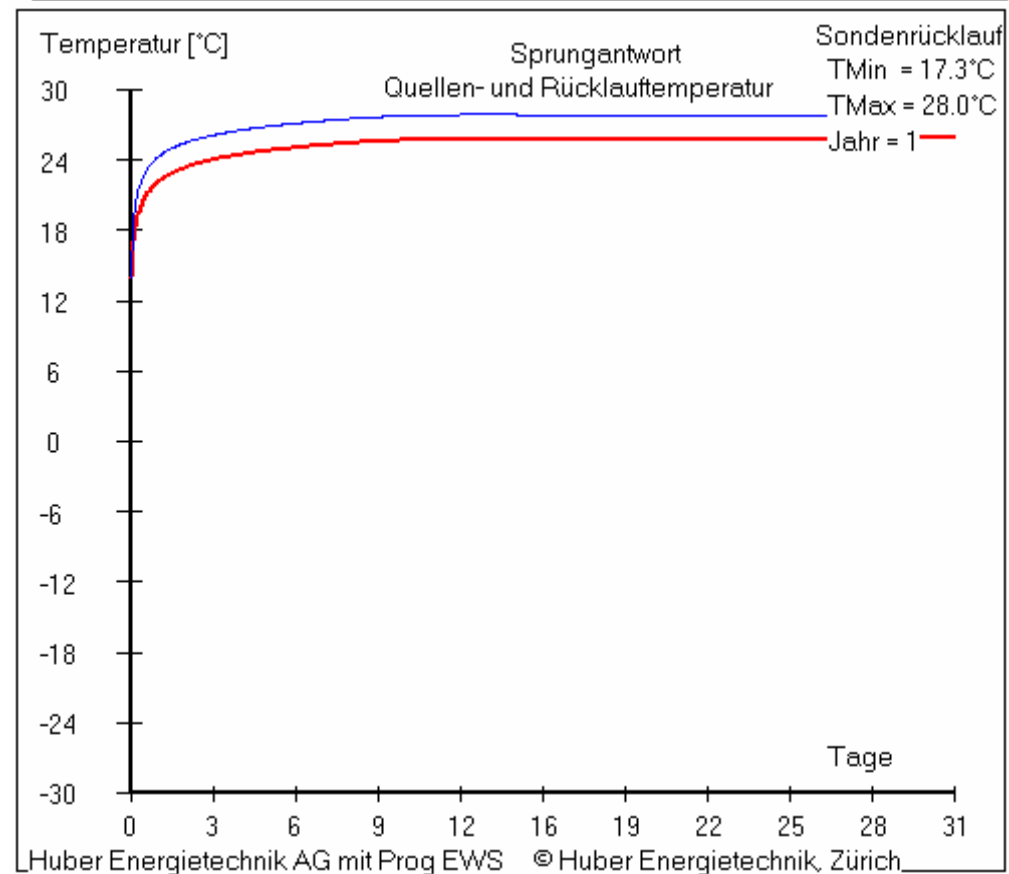
## Response – Test: Berechnete Sprungantwort

### Ziele:

**A) Planung Responsetest (Leistung, Durchsatz, etc.)**

**B) Parameteridentifikation**

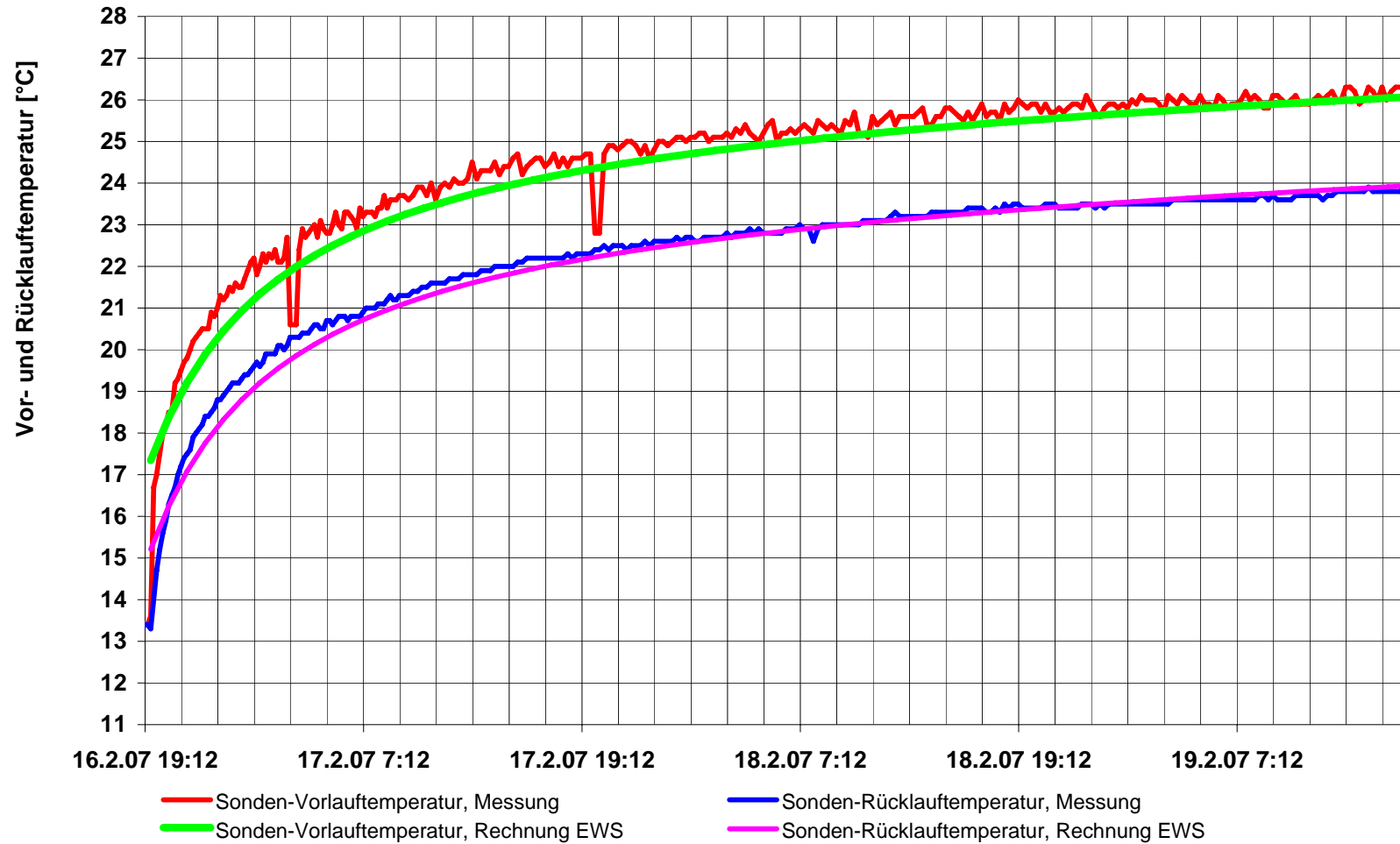
- **Wärmeleitfähigkeit**
- **Bohrlochwiderstände Ra und Rb**
- **Erdreichtemperaturen ungestört (Jahresmitteltemperatur Oberfläche und Temperaturgradient)**



Programm EWS, [www.hetag.ch](http://www.hetag.ch)

# Response – Test: Vergleich Messung - Rechnung

Sprungantwort Beispiel, Doppel-U-Sonde, 32 mm, Leistung = 4.12 kW, Durchsatz 1.65 m<sup>3</sup>/h

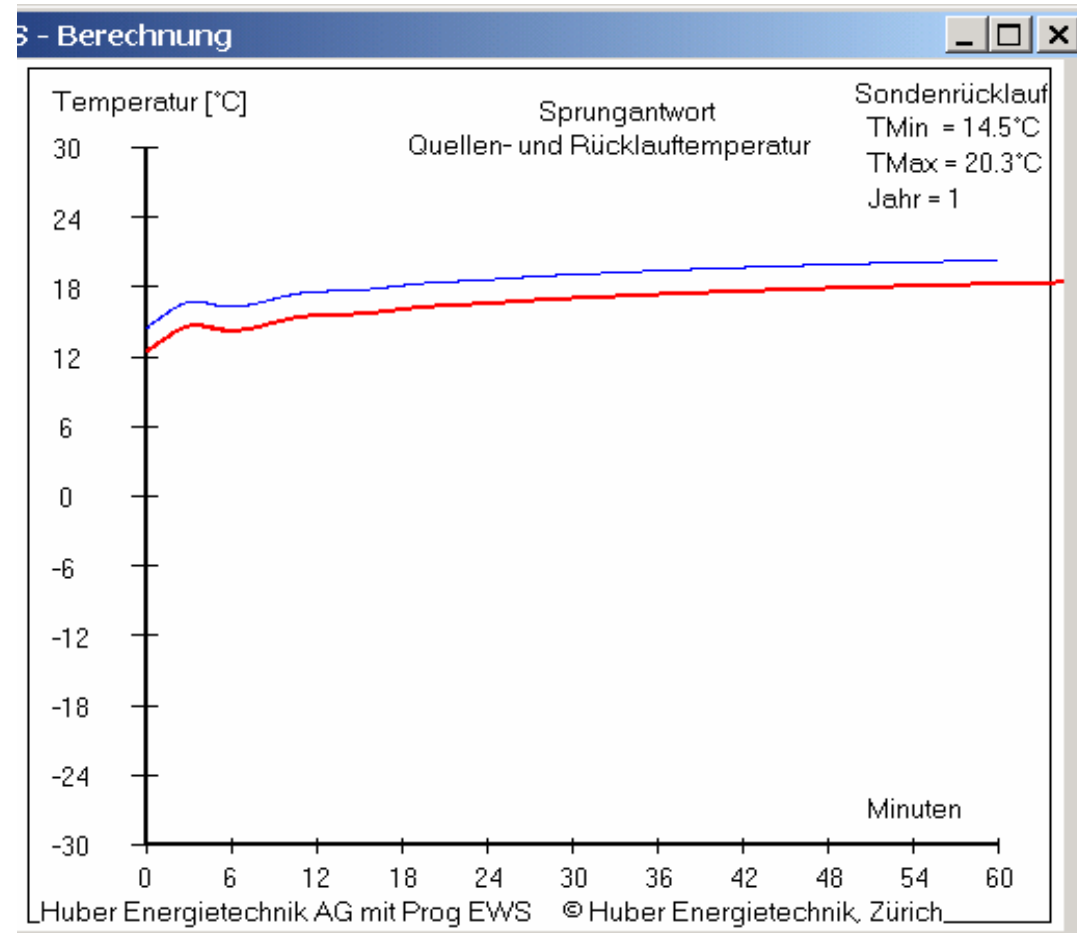


## Response – Test: Anfahrverhalten simuliert

Einfluss der Bohrlochwiderstände wird unterschätzt

Bohrlochwiderstände  $R_a$  und  $R_b$  zeigen sich am ausgeprägtesten im Anfahrprozess

Künftig: Schichtweise Identifikation der Wärmeleitfähigkeit



Programm EWS, [www.hetag.ch](http://www.hetag.ch)

# Programm EWSDRUCK

- Berechnung Druckabfall Sondenkreislauf
- Pumpenauslegung
- Einfluss Zuleitung / Verteiler
- Einfluss Verdampfer
- Stoffwerte Sondenfluid
- Kostenlos

Pumpen-Auslegungsprogramm für Erdsonden	
Objekt: <input type="text"/>	
<b>Gebäude und Standort</b>	
Wärmebedarf	<input type="text"/> kW
Warmwasserbedarf	<input type="text"/> kW
Andere	<input type="text"/> kW
Gebäude Total	0.0 kW
Lage	Mittelland 500m
Jahresmitteltemperatur	<input type="text"/> °C
Wärmeleitfähigkeit der Erde	<input type="text"/> W/mK
mittlere Erdreichtemperatur	<input type="text"/> °C
<b>Wärmepumpe</b>	
Fabrikat:	<input type="text"/> Typ: <input type="text"/>
Nennleistung Wärmepumpe	<input type="text"/> kW
COP bei obiger Nennleistung	-
Nenndruckverlust Verdampfer	<input type="text"/> kPa
Nennmassenstrom Verdampfer	<input type="text"/> kg/h
Entzugsprofil / Schaltintervall	Mittel (5 Tage)
Leistungsaufnahme (elektrisch)	<input type="text"/> kW
Massenstrom Verdampfer	<input type="text"/> kg/h
<b>Sondenparameter</b>	
spezifische Sondenleistung	<input type="text"/> W/m
Bohrtiefe	<input type="text"/> m
Anzahl Sonden	<input type="text"/> 1
Temperaturdifferenz Vorl./Rückl.	<input type="text"/> K
Bohrlochdurchmesser	<input type="text"/> cm
Rohrdimension	32 mm Doppel-U
<b>Strömungswerte (für 1 Sonden-Rohr)</b>	
Massenstrom in Sondenrohr	<input type="text"/> kg/h
Geschwindigkeit in Sondenrohr	<input type="text"/> m/s
Art der Strömung (laminar/turbul.)	
mittlerer spezifischer Druckverlust	<input type="text"/> Pa/m
Druckverlust im Sondenrohr	<input type="text"/> kPa
<b>Stoffwerte Sondenfluid</b>	
Wasser	4 °C
Dichte $\rho$	1000 kg/m <sup>3</sup>
Kinematische Viskosität $\nu$	1.604 mm <sup>2</sup> /s
spez. Wärmekapazität $c_p$	4.22 kJ/(kg·K)
Frost bei	0 °C
Wärmeübergangskoeffizient $\alpha$	0 W/m <sup>2</sup> K
<b>Druckverluste in Verteiler, Zuleitung und Sonde</b>	
Verteiler Nenndruckverlust	<input type="text"/> kPa
Verteiler Nennmassenstrom	<input type="text"/> kg/h
Vol.strommesser Nenndruckverlust	<input type="text"/> kPa
Vol.strommesser Nennmassenstrom	<input type="text"/> kg/h
Sonstige Elemente Nenndruckverlust	<input type="text"/> kPa
Sonstige Elemente Nennmassenstrom	<input type="text"/> kg/h
Sondenanschlüsse Innendurchmesser	<input type="text"/> mm
Sondenanschlüsse Länge horizontale	<input type="text"/> m
Sonden am Bohrkopf zusammengefasst	nein
Bogen 90° ( $\zeta = 2$ )	<input type="text"/> Stk.
Tauchhülsen ( $\zeta = 1$ )	<input type="text"/> Stk.
Sonstige $\zeta$ -Werte oder $\Sigma \zeta$	-
Methode Berechn. Druckverlustkoeff. $\xi$	Petukhov (empfohlen)
<b>Sonden - Umwälzpumpe</b>	
Fabrikat:	<input type="text"/> Typ: <input type="text"/>
<b>Totaler Druckabfall</b>	<input type="text"/> kPa
<b>Volumenstrom</b>	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h
benötigte Leistung der Pumpe	<input type="text"/> W
Wirkungsgrad der Pumpe	<input type="text"/> %
Leistungsaufnahme Pumpe	<input type="text"/> W
<b>Anteil der Pumpenenergie am Stromverbrauch</b>	
<b>Anteil Sondenpumpe:</b>	<b>0.0 %</b>

Huber, A.; Ochs, M. (2007): Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen mit der Software „EWSDRUCK“ Version 2.0. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Geothermie, Bern.

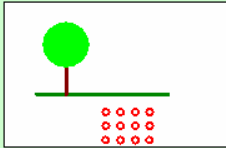
# Programm WKM

- Berechnung von Luft-Erdregistern
- gegenseitiger Einfluss von Registern (adiabate Randbedingung)
- Einfluss von Gebäuden
- Einfluss von Grundwasser
- Bodeneigenschaften
- Einfluss von Rohrdimensionen und Verlegetiefe
- Beitrag von Sammelschächten

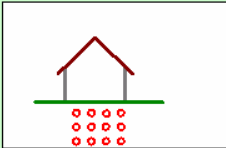
**Anordnung der Rohre, Teil 1** Eingabe vom: 05

Zutreffende Anordnung anklicken

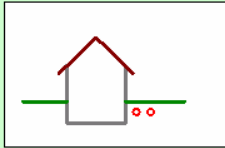
**Gewählte Anordnung:**



A Mehrere Rohre neben- und untereinander



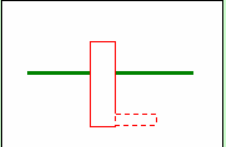
B Mehrere Rohre neben- und untereinander unter Gebäude



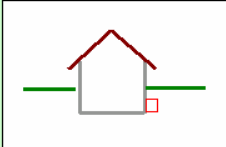
C Rohre neben unterkellertem Gebäude

Auswahl der Rohre Teil 1

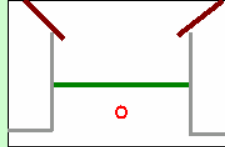
Zurück zur Objektseite



D Vertikaler Schacht



E Viereckiges Rohr an Kellerwand



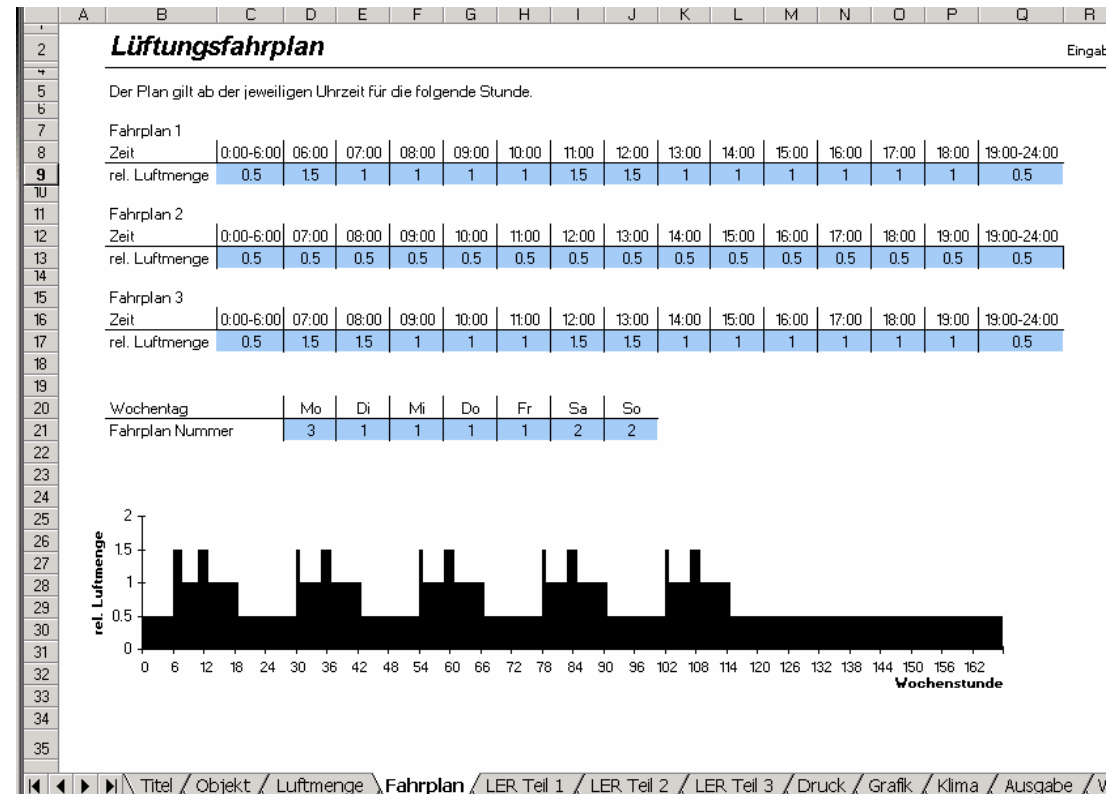
F Rohr zwischen unterkellerten Gebäuden

Simulationsparameter:	Vorschlagswert WKM	Wert Benutzer	Berechnung
Anteil Erde	1.000	0	1.000
Anteil adiabate	0.000		0.000
Anteil Keller	0.000		0.000
Anteil Grundwasser	0.000		0.000
Starttemperatur der Erde	0 °C		0.0 °C

www.hetag.ch

# Programm WKM

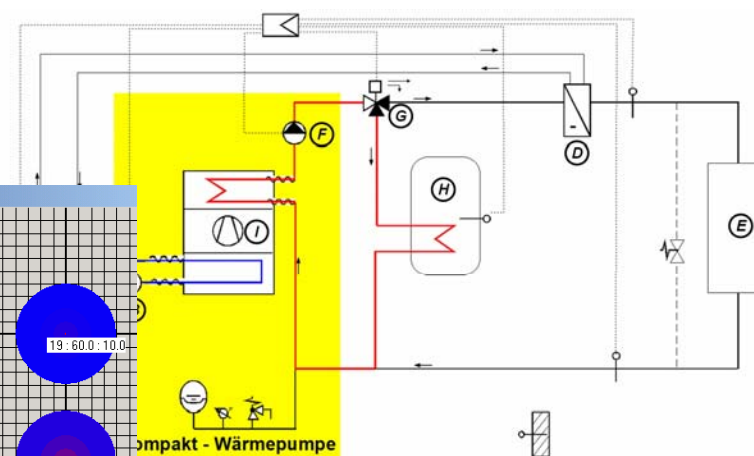
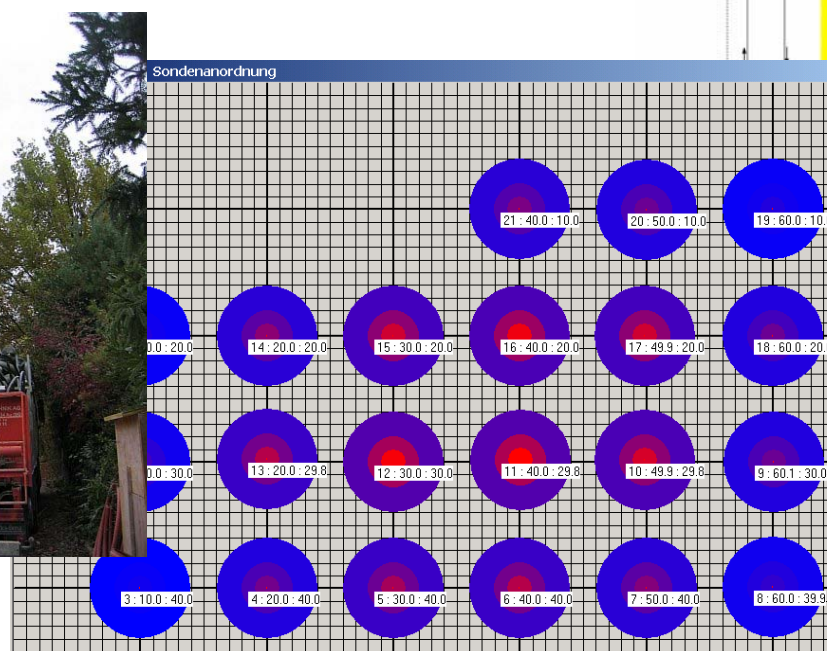
- Lüftungsfahrplan
- Wetterdaten aus Meteonorm einlesbar
- Druckabfallberechnung





# Heizen und Kühlen mit geothermischer Energie

## Tools zur Auslegung von Erdwärmesonden und Luft-Erdregistern



Arthur Huber  
Huber Energietechnik AG  
Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich  
huber@hetag.ch

<http://www.hetag.ch>