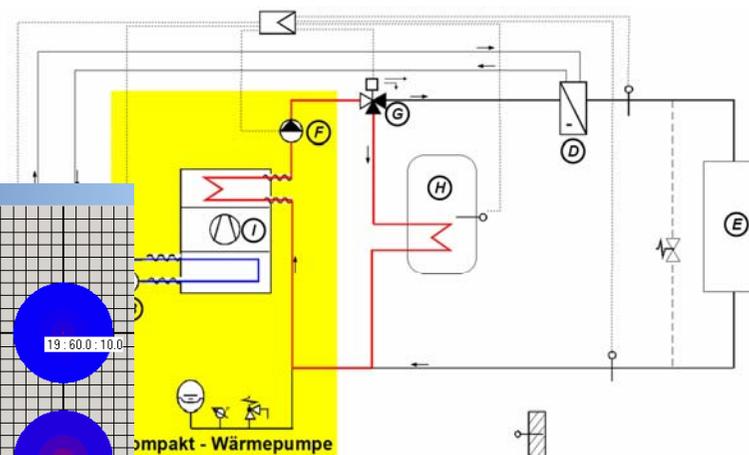
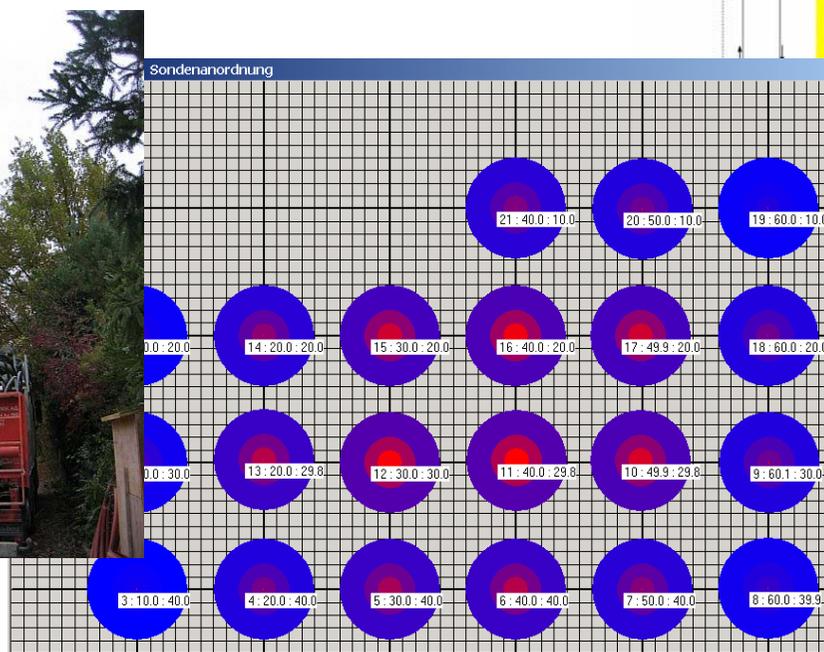


Heizen und Kühlen mit geothermischer Energie

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

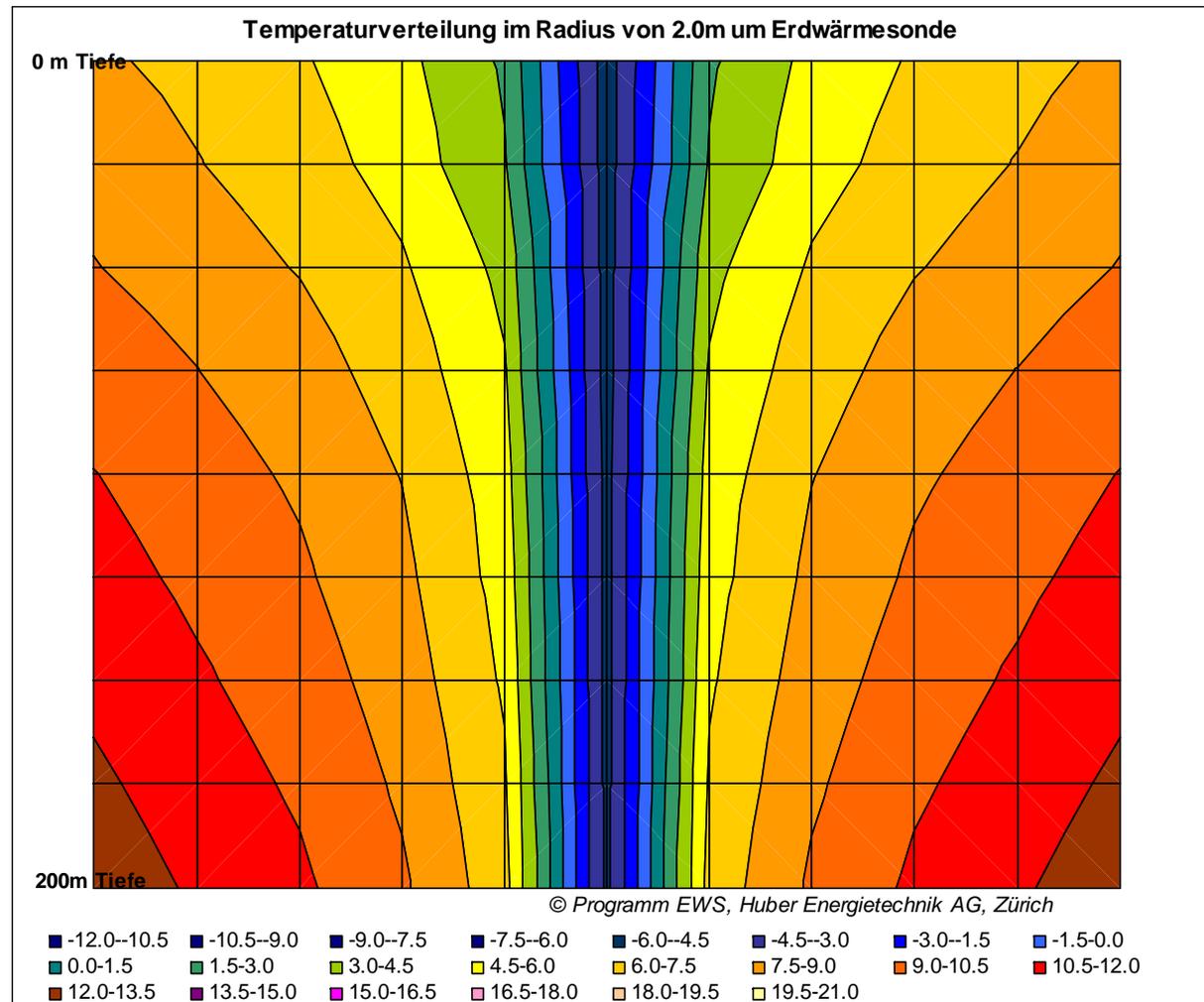
- Auslegung und Optimierung von Komponenten einer Anlage, z. B. Anzahl und Bohrtiefe von Erdwärmesonden
- Variantenvergleiche in der Planung, z. B. Erdsonden oder Erdregister für Gebäudekühlung
- Berechnung von Garantiewerten in der Planungsphase z. B. erreichbare Kühlleistung und Temperaturen mit Erdwärmesonden 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

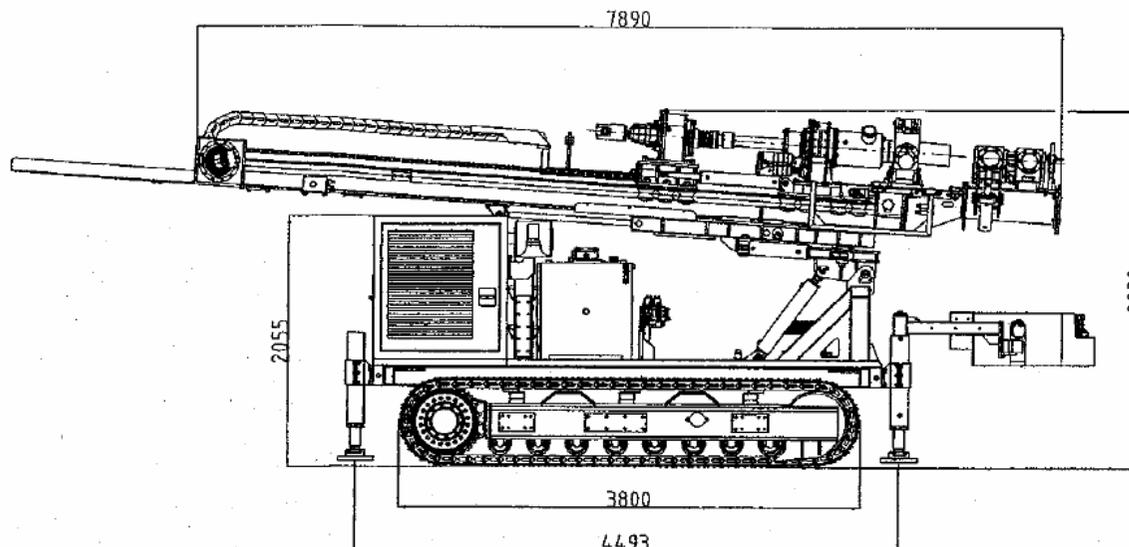
- **AWP-Richtlinie T1**
erlaubt Einsatz
der Erdsonden
nur bis 1'800 h/a

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

Klassische Empfehlung für Erdsonden-Wärmepumpen:

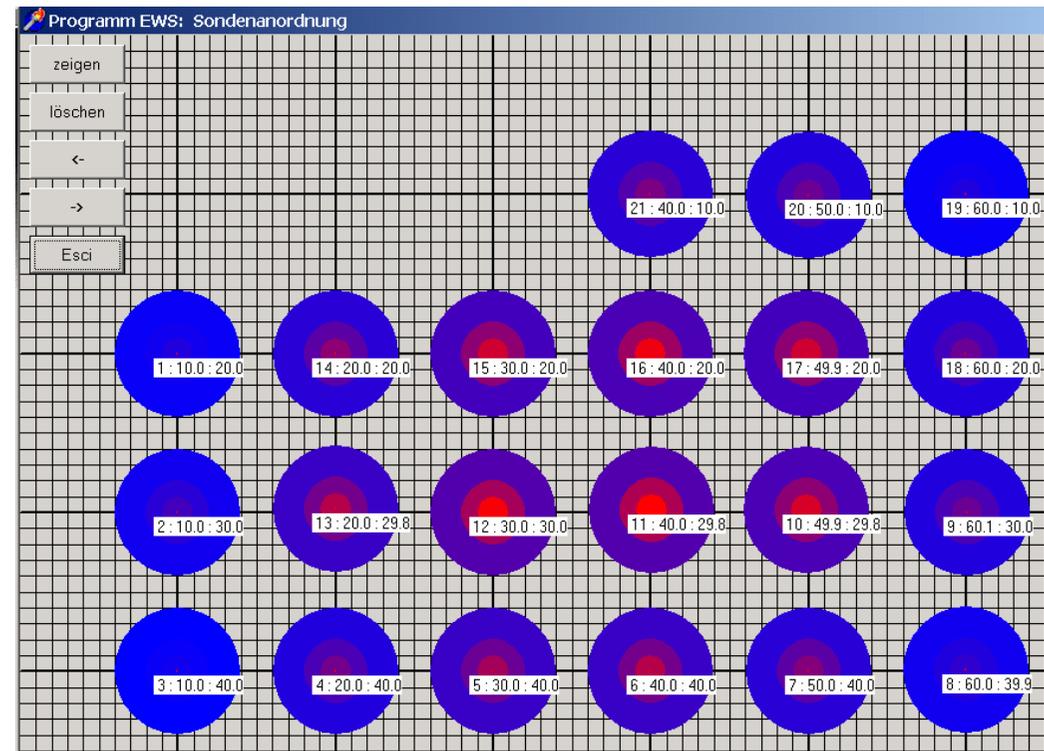
„Man nehme einen durchschnittlich gut leitenden Boden, bohre darin ein Erdwärmesonde, fülle die Sonde mit Frostschutzmittel, hänge eine mittelmässige Wärmepumpe daran und verhindere einen Betrieb von mehr als 1'800 h/a ..“

Und was passiert in allen anderen Fällen ?



Programm EWS

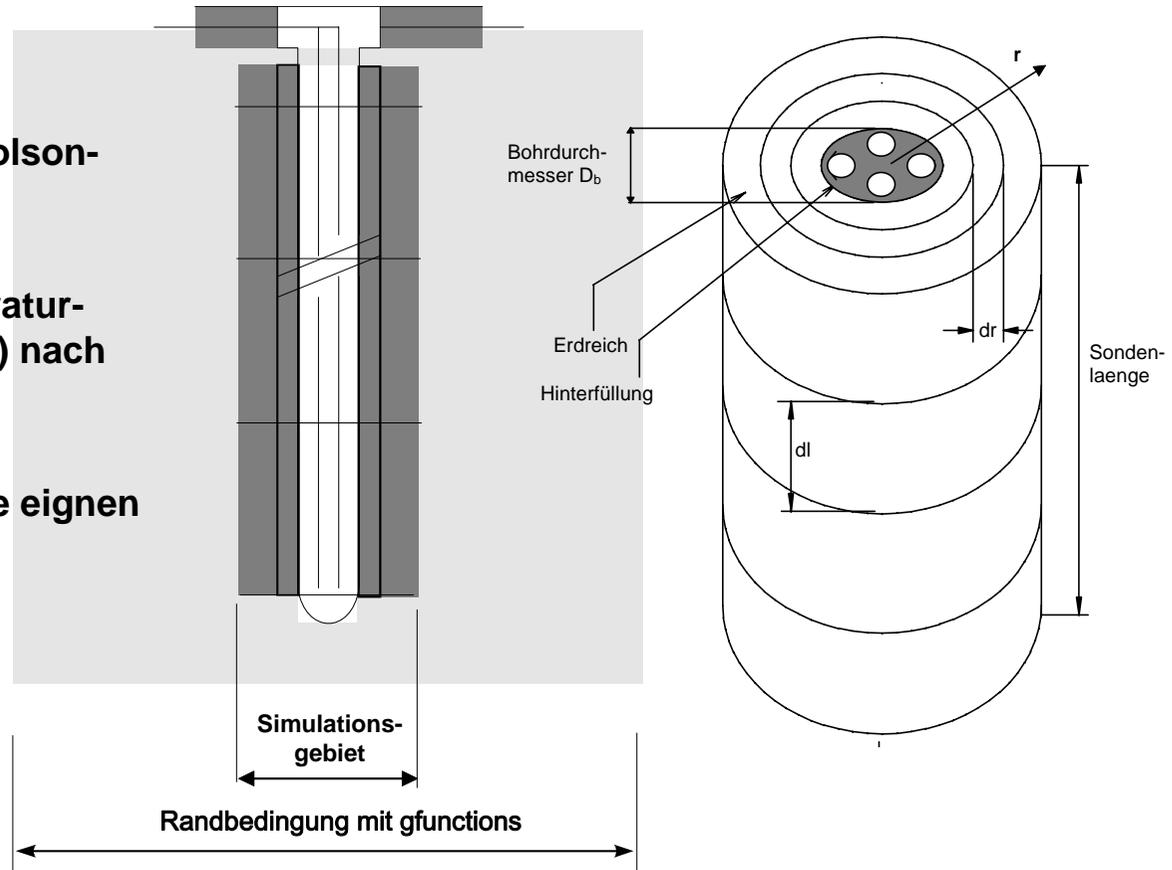
- **Einzelsonden und Sondenfelder**
- **freie Anordnung der Sonden**
- **stationäre und instationäre Rechnung**
- **Zeitschrit 1 Minute – 1 Stunde**
- **Bis 100 Jahre Simulation**
- **Taktender Lastbetrieb**
- **frei definierbare Lastprofile**
- **Sonden-Freecooling und Rückkühlung
mit Temperaturbegrenzung**



www.hetag.ch

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)

ΔT = Temperaturabkühlung gegenüber
unbeeinflussten Zustand [K]

g = dimensionslose Temperaturabkühlung [-]

q = spezifischer Wärmeentzug [W/m]

λ = 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]

ρ = Dichte Erde [kg/m³]

c_p = spezifische Wärmekapazität Erde [J/kgK]

λ = 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

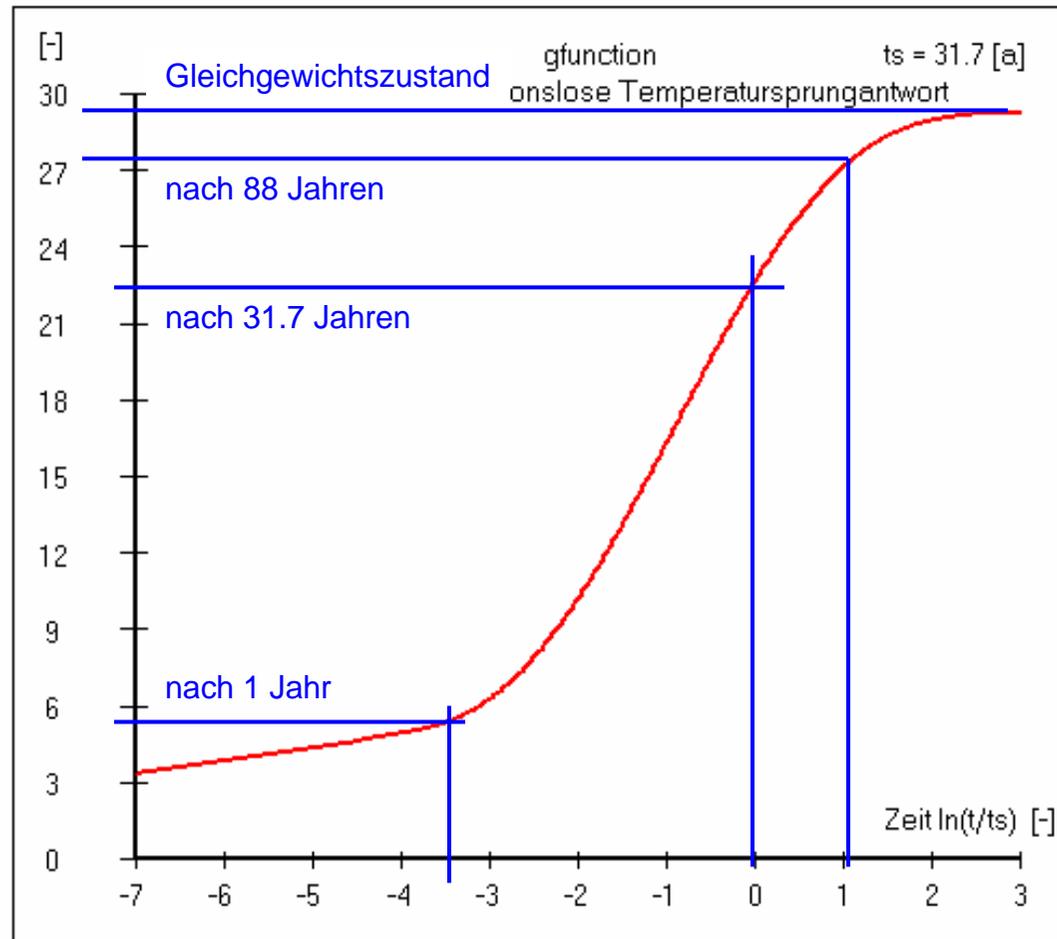
ρ = 2500 kg/m³

c_p = 900 J/kg K

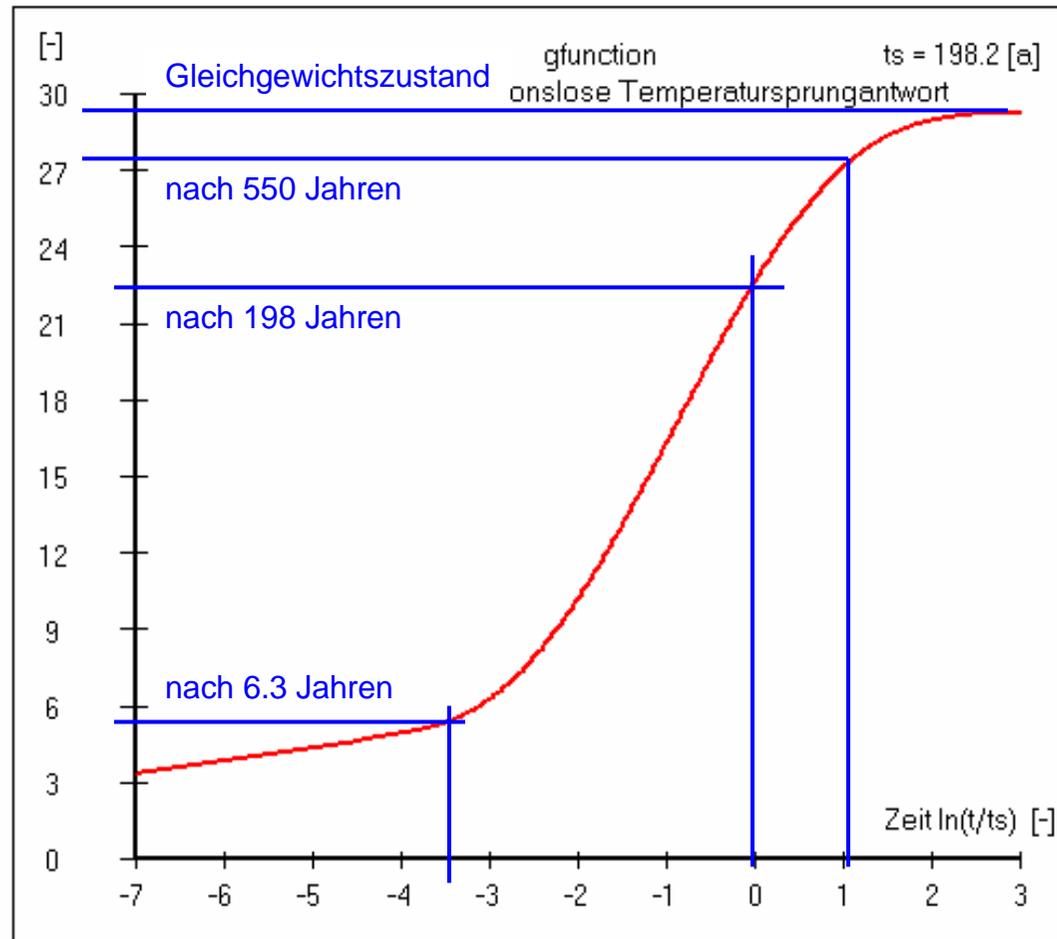
λ = 2.5 W/m K

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

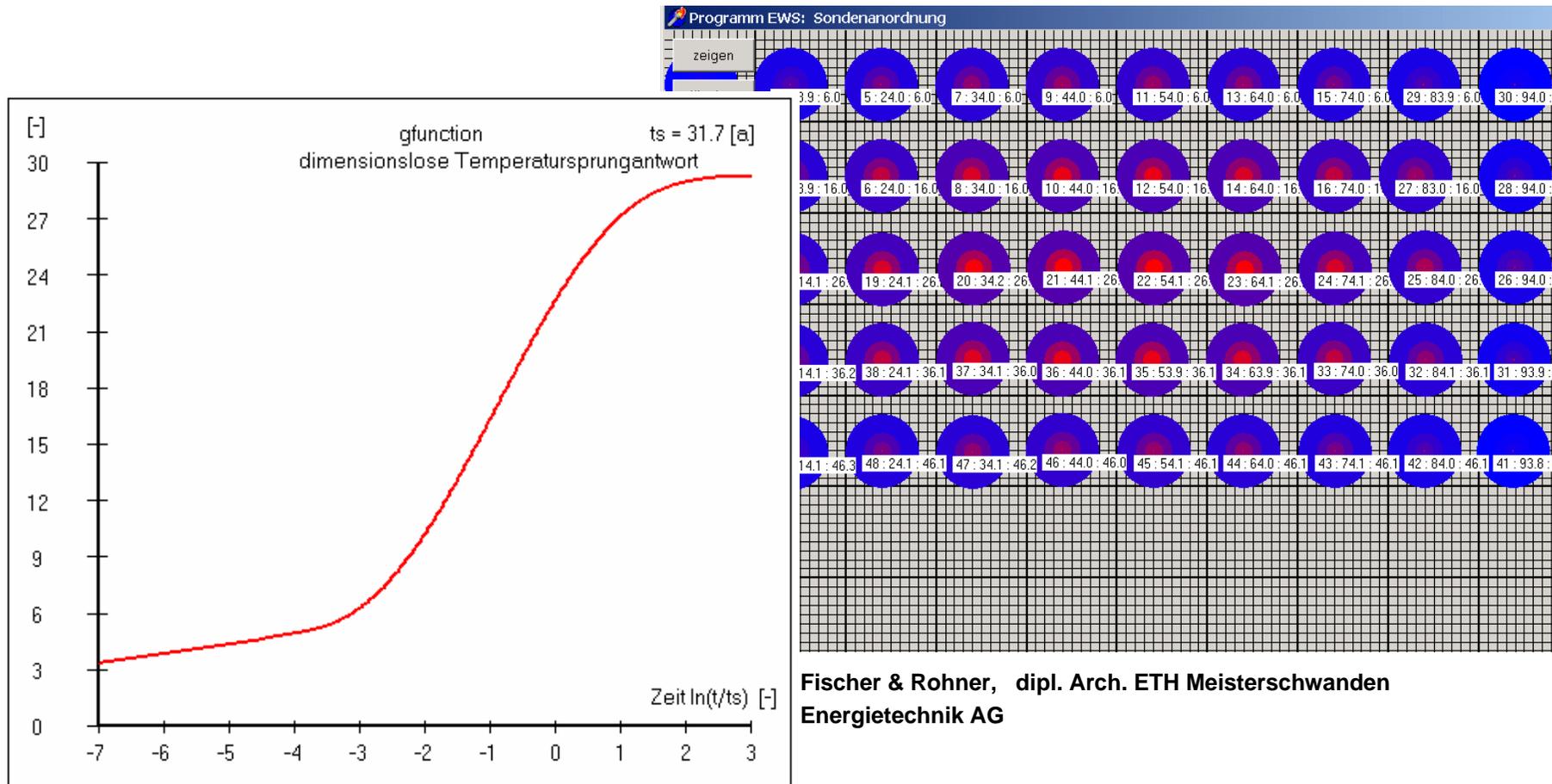
Zeitkonstanten t_s von 100m tiefen Erdwärmesonden



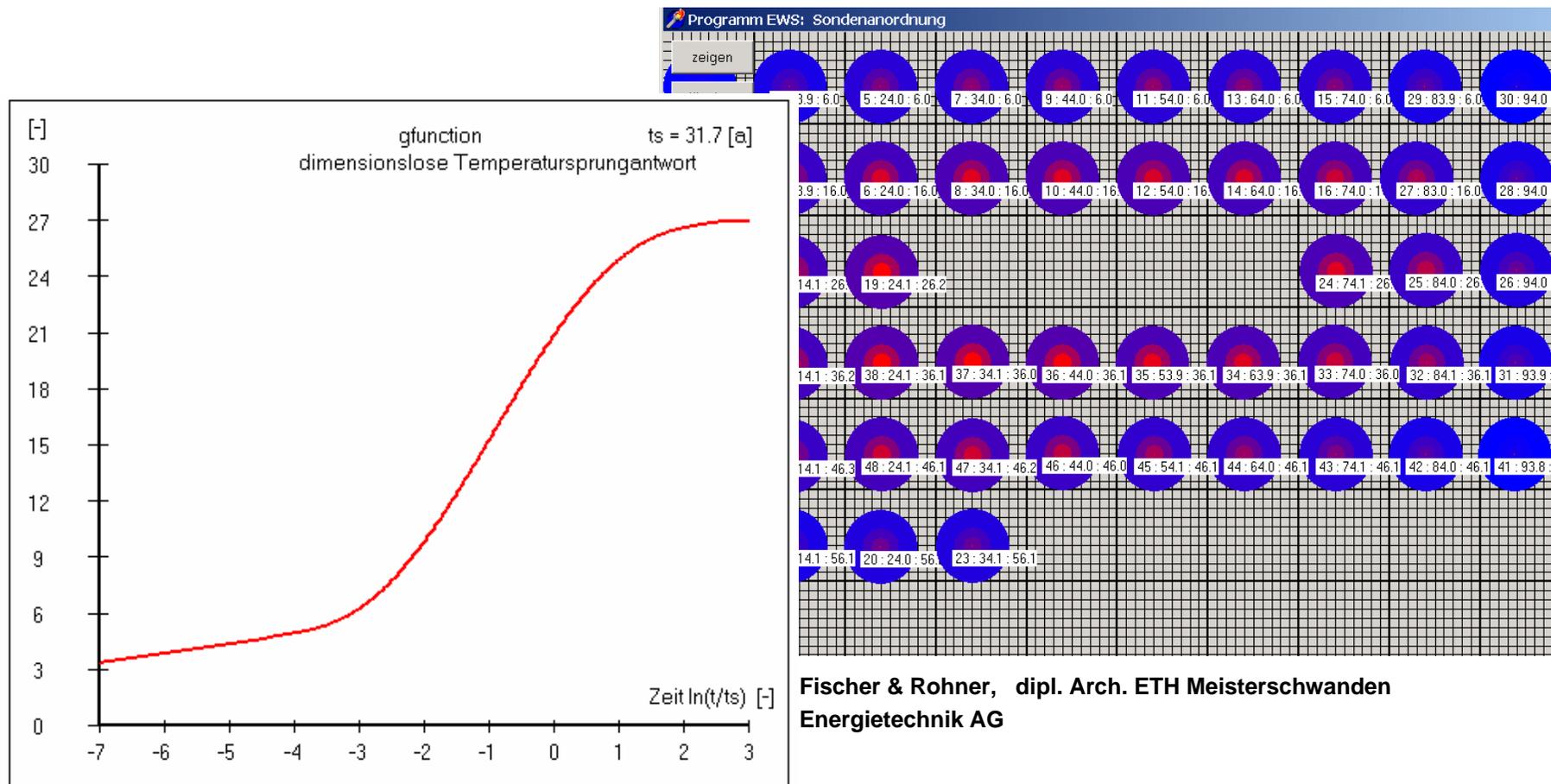
Zeitkonstanten t_s von 250m tiefen Erdwärmesonden



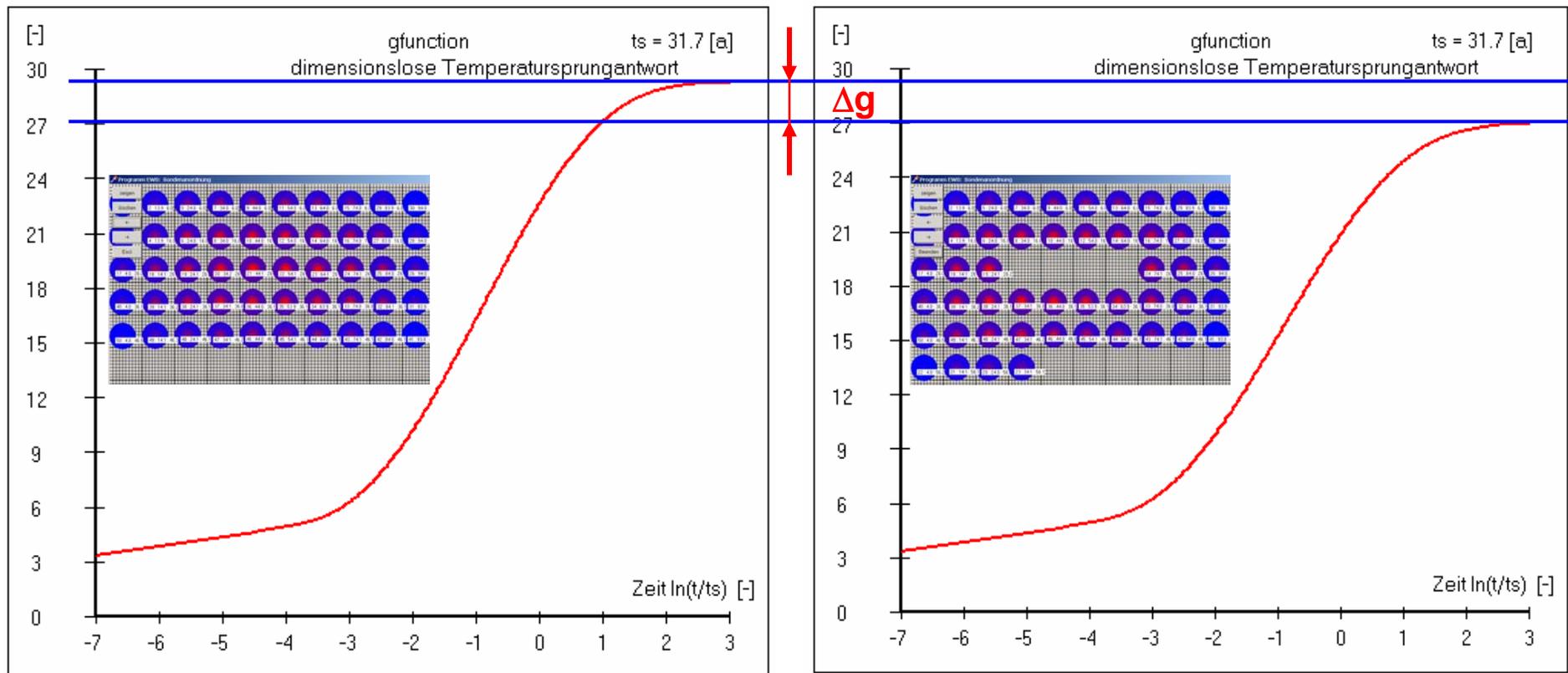
Beispiel 50 Erdwärmesonden: Sondenanordnung 1



Beispiel 50 Erdwärmesonden: Sondenanordnung 2



Beispiel Sondenanordnung (50 Erdwärmesonden)



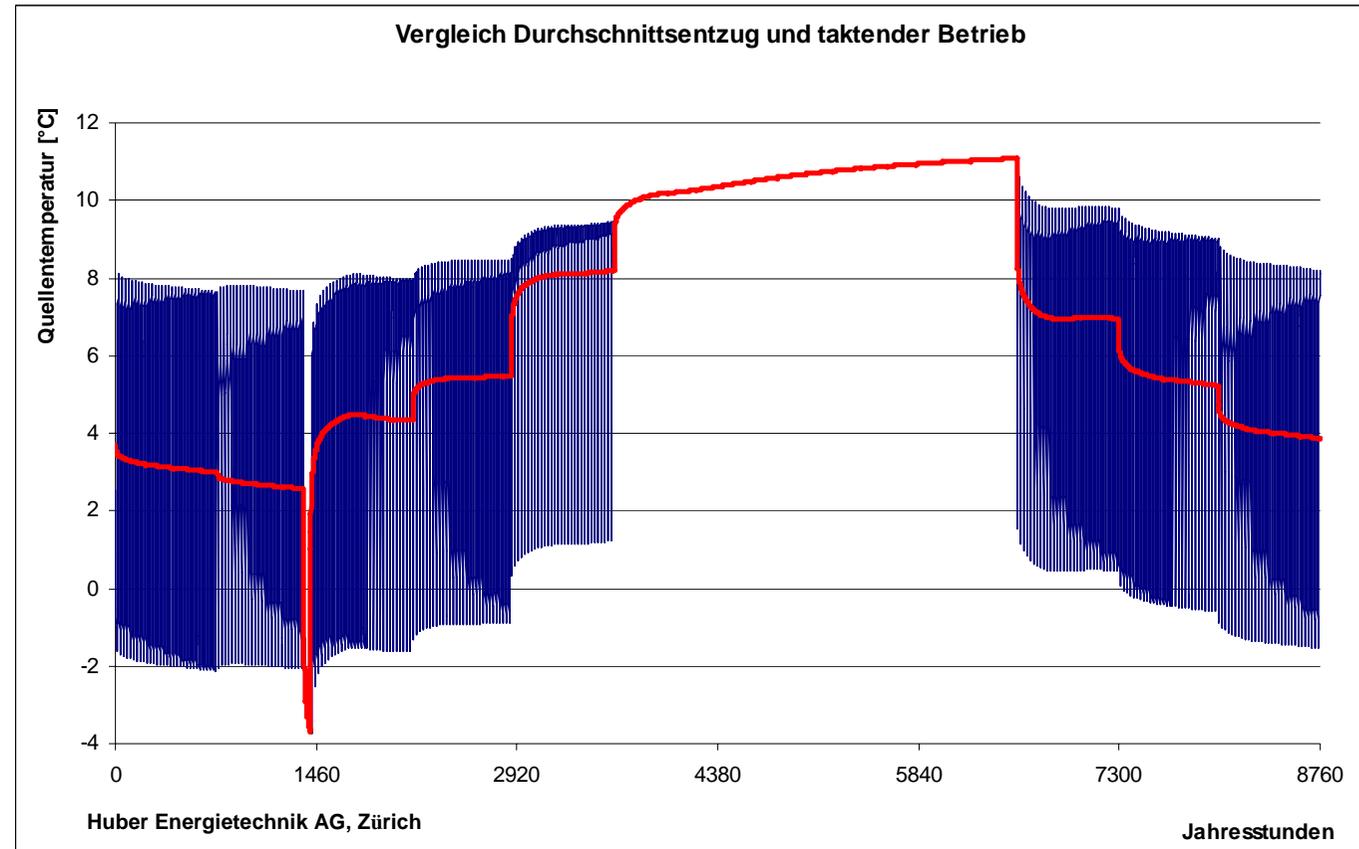
$$\Delta T(r, t) = \frac{\Delta g(r, t) \cdot \lambda \cdot 2\pi}{\dot{q}}$$

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?

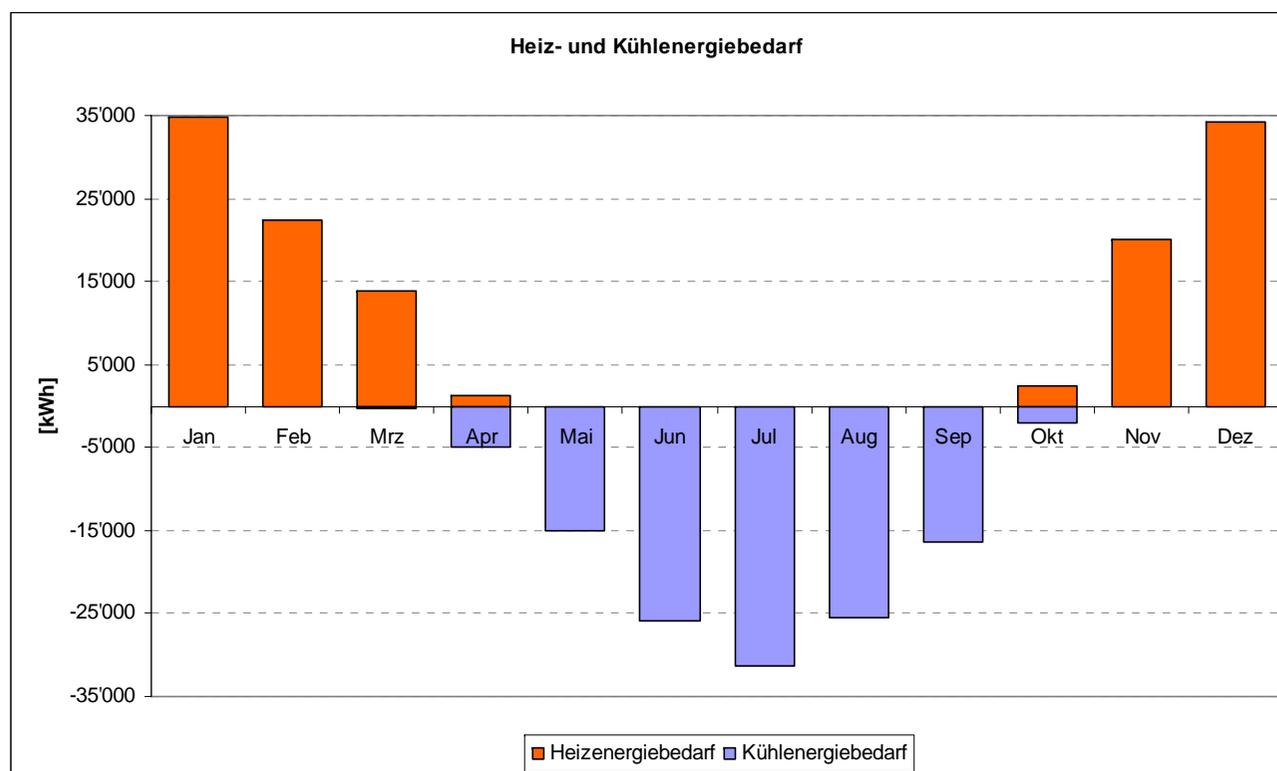
Grundlegendaten: z. B. aus Berechnung Heizwärmebedarf SIA 380/1

nach SIA 380/1:

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Transmissionswärmeverl. [MJ/m ² 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 ² a]	11.8	9.6	9.1	6.2	4.3	2	1.2	1.8	3	5.7	8.5	11.5
Gesamtwärmeverlust [MJ/m²a]	50.2	41.1	39	26.5	18.4	8.7	5.1	7.7	12.9	24.3	36.4	49
Solarer Wärmegewinn tot [MJ/m ² 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 ² a]	-8.3	-7.5	-8.3	-8	-8.3	-8	-8.3	-8.3	-8	-8.3	-8	-8.3
Wärmegewinne total [MJ/m²a]	-16.5	-19.3	-25.8	-30.2	-32.9	-33.8	-35.3	-32.4	-28.9	-23.9	-16.9	-15.8
Ausnutzungsgrad f. Gewinne	1	1	0.99	0.84	0.56	0.26	0.14	0.24	0.45	0.92	1	1
nicht genutzte Gewinne [MJ/m²a]	0	0	0	-5	-14	-25	-30	-25	-16	-2	0	0
Heizwärmebedarf [MJ/m²a]	33.7	21.8	13.5	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	19.5	33.2

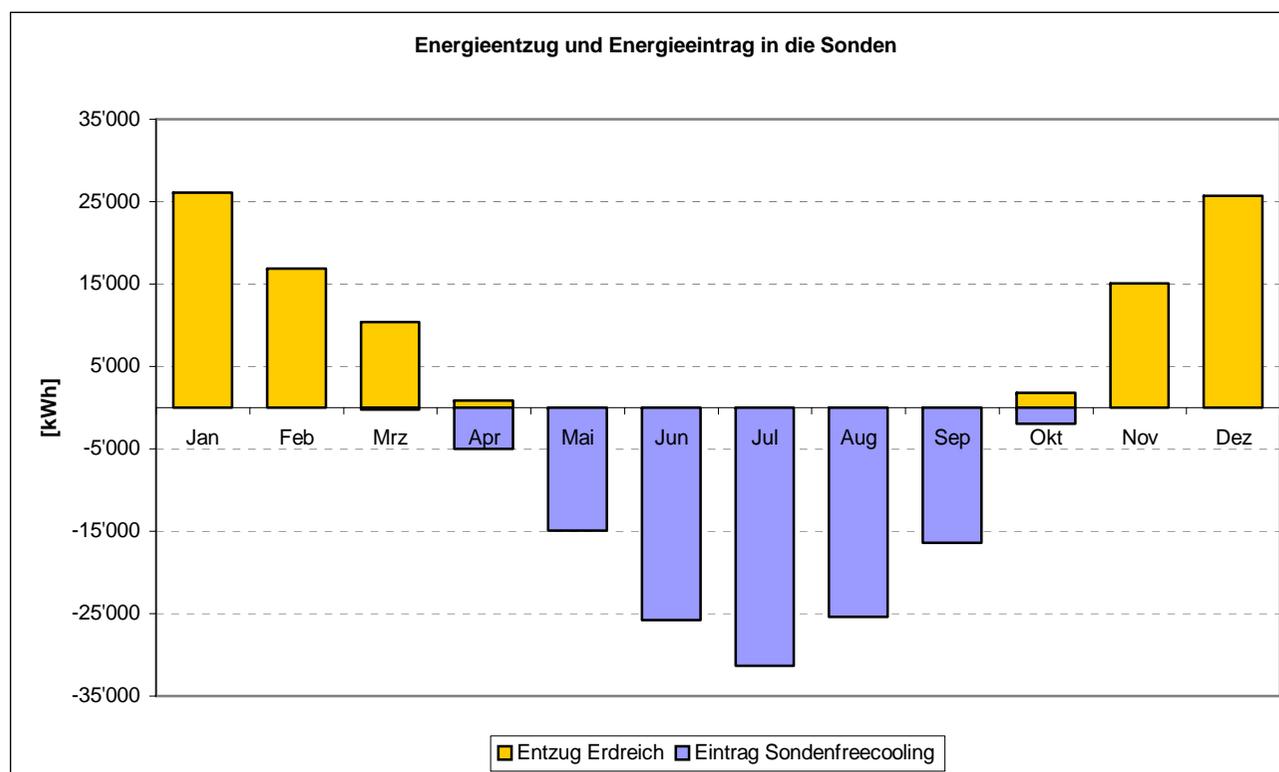
Realistische Lastprofile: Woher kommen die Daten?

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



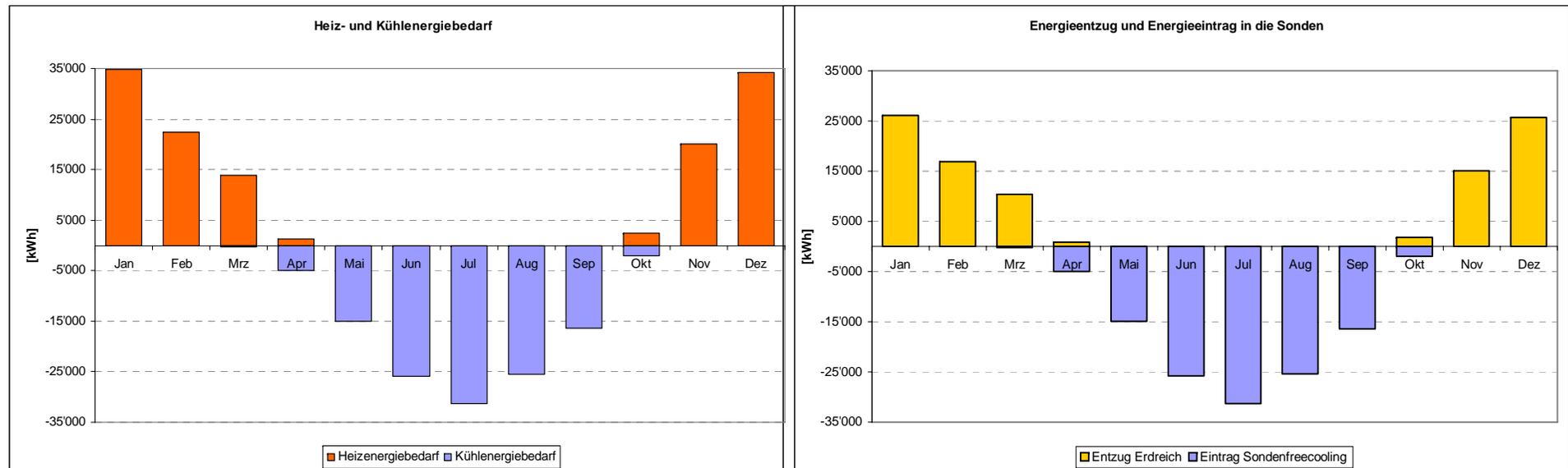
Realistische Lastprofile: Woher kommen die Daten?

Beispiel Sondenbilanz Entzug / Einspeisung (Sonden-Freecooling):



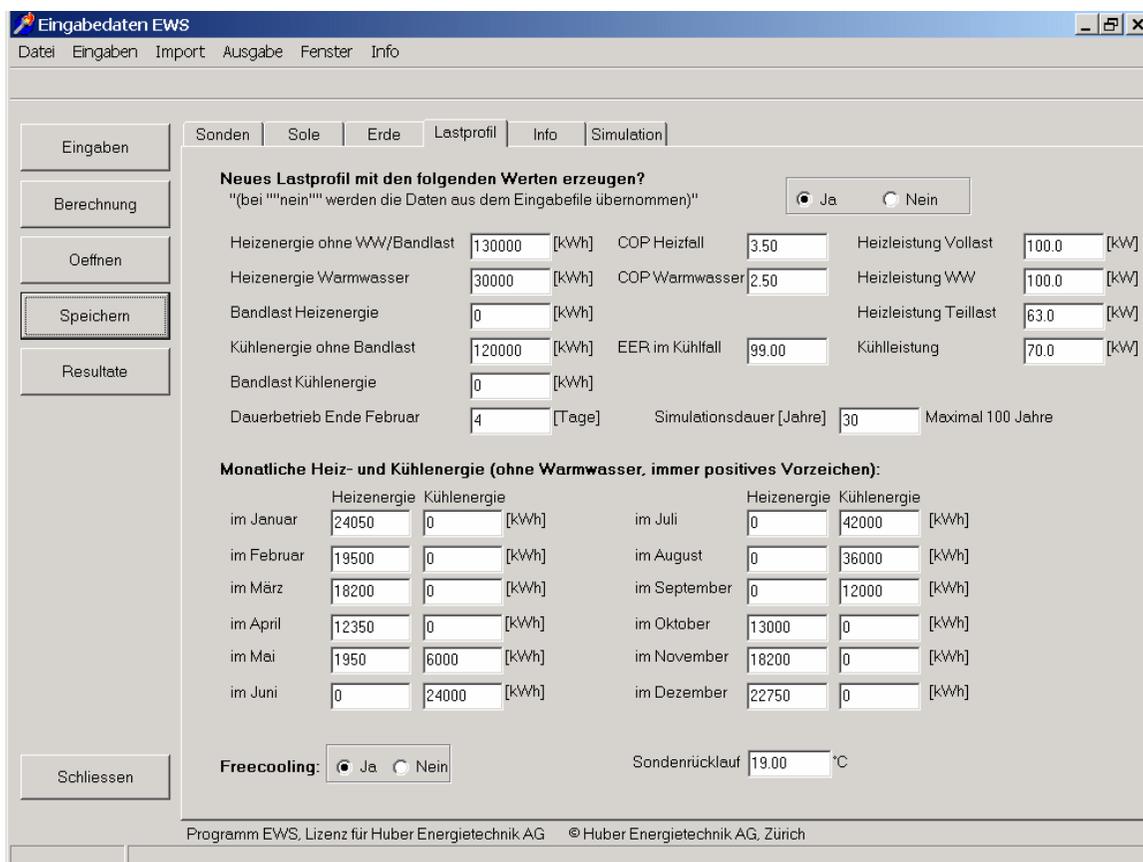
Realistische Lastprofile: Woher kommen die Daten?

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

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

Heizenergie ohne WW/Bandlast [kWh] COP Heizfall Heizleistung Vollast [kW]

Heizenergie Warmwasser [kWh] COP Warmwasser Heizleistung WW [kW]

Bandlast Heizenergie [kWh] Heizleistung Teillast [kW]

Kühlenergie ohne Bandlast [kWh] EER im Kühlfall Kühlleistung [kW]

Bandlast Kühlenergie [kWh]

Dauerbetrieb Ende Februar [Tage] Simulationsdauer [Jahre] Maximal 100 Jahre

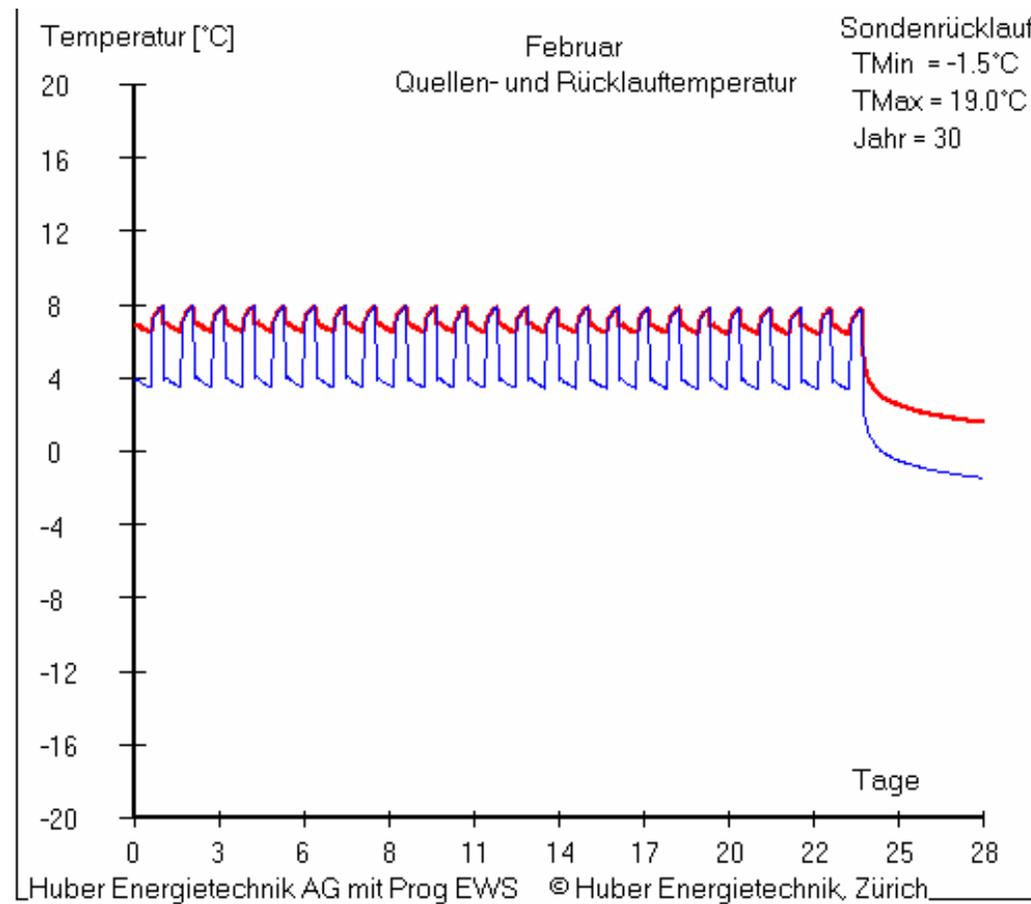
Monatliche Heiz- und Kühlenergie (ohne Warmwasser, immer positives Vorzeichen):

	Heizenergie	Kühlenergie		Heizenergie	Kühlenergie
im Januar	<input type="text" value="24050"/> [kWh]	<input type="text" value="0"/> [kWh]	im Juli	<input type="text" value="0"/> [kWh]	<input type="text" value="42000"/> [kWh]
im Februar	<input type="text" value="19500"/> [kWh]	<input type="text" value="0"/> [kWh]	im August	<input type="text" value="0"/> [kWh]	<input type="text" value="36000"/> [kWh]
im März	<input type="text" value="18200"/> [kWh]	<input type="text" value="0"/> [kWh]	im September	<input type="text" value="0"/> [kWh]	<input type="text" value="12000"/> [kWh]
im April	<input type="text" value="12350"/> [kWh]	<input type="text" value="0"/> [kWh]	im Oktober	<input type="text" value="13000"/> [kWh]	<input type="text" value="0"/> [kWh]
im Mai	<input type="text" value="1950"/> [kWh]	<input type="text" value="6000"/> [kWh]	im November	<input type="text" value="18200"/> [kWh]	<input type="text" value="0"/> [kWh]
im Juni	<input type="text" value="0"/> [kWh]	<input type="text" value="24000"/> [kWh]	im Dezember	<input type="text" value="22750"/> [kWh]	<input type="text" value="0"/> [kWh]

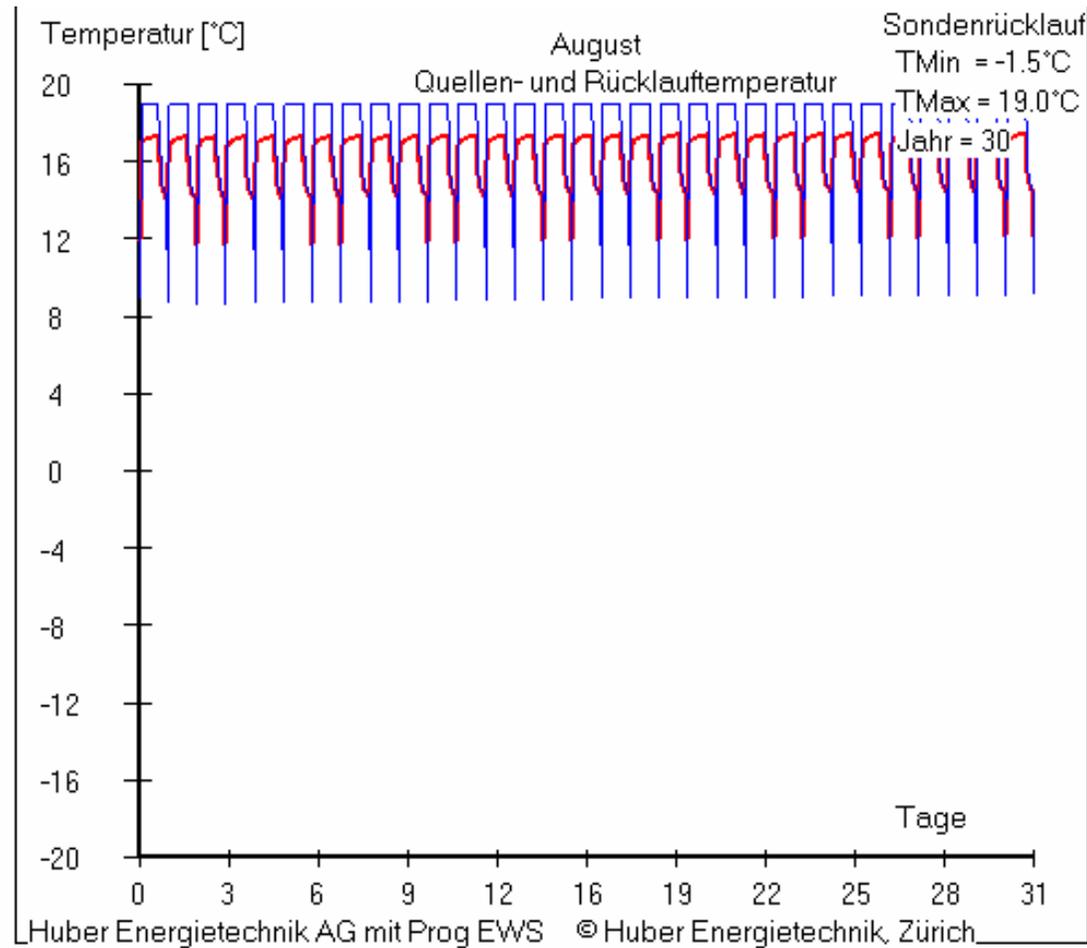
Freecooling: Ja Nein Sondenrücklauf °C

Program EWS, Lizenz für Huber Energiertechnik AG © Huber Energiertechnik AG, Zürich

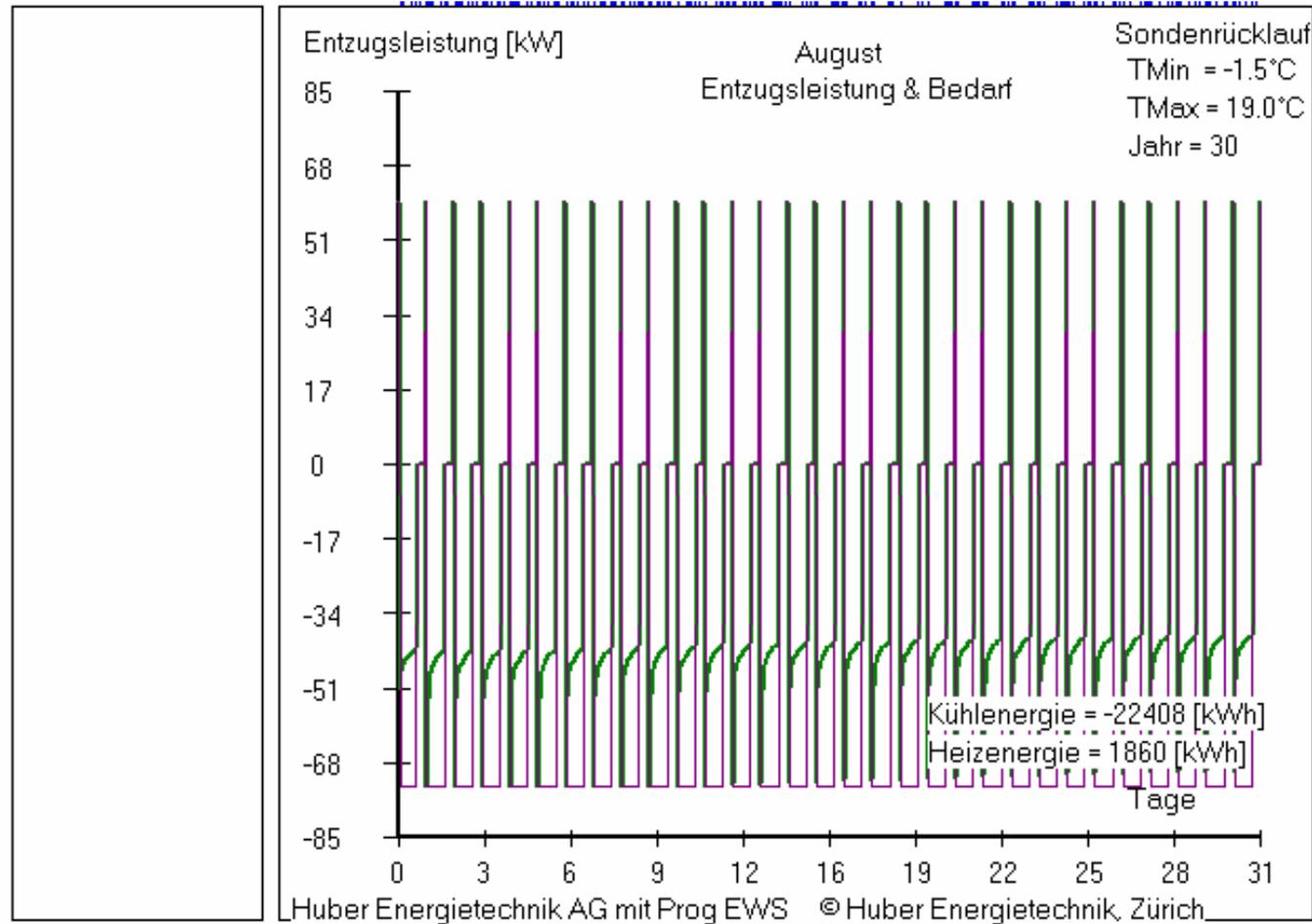
Resultate einer Simulation: Minimaltemperatur Rücklauf



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%

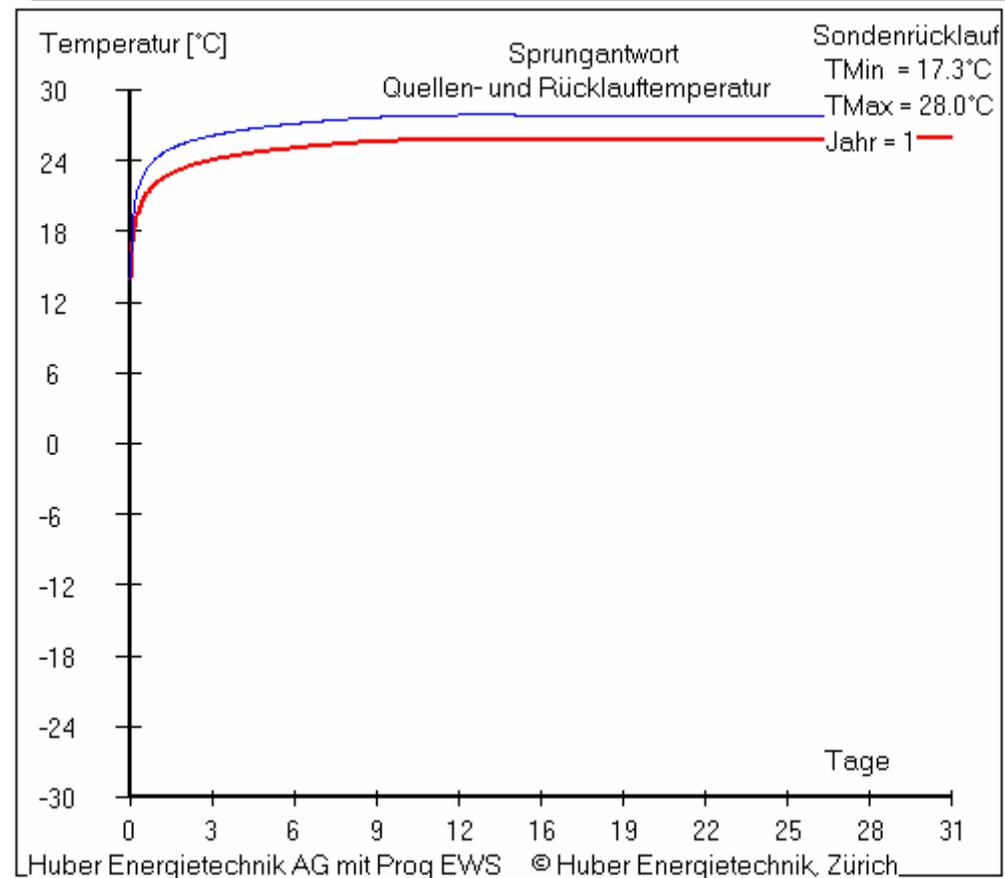
Response – Test: Berechnete Sprungantwort

Ziele:

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

B) Parameteridentifikation

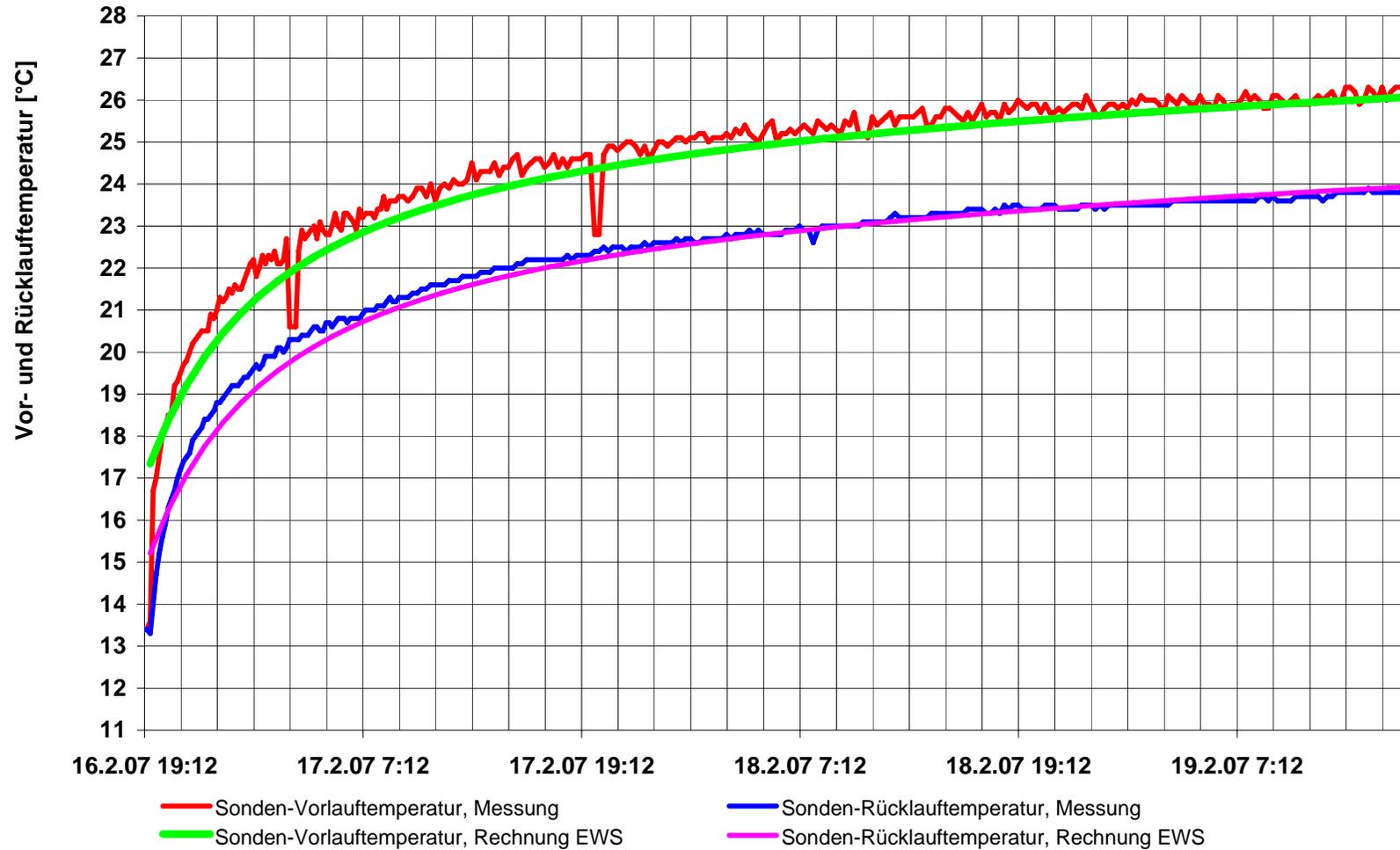
- Wärmeleitfähigkeit
- Bohrlochwiderstände Ra und Rb
- Erdreichtemperaturen ungestört (Jahresmitteltemperatur Oberfläche und Temperaturgradient)



Programm EWS, www.hetag.ch

Response – Test: Vergleich Messung - Rechnung

Sprungantwort Beispiel, Doppel-U-Sonde, 32 mm, Leistung = 4.12 kW, Durchsatz 1.65 m³/h

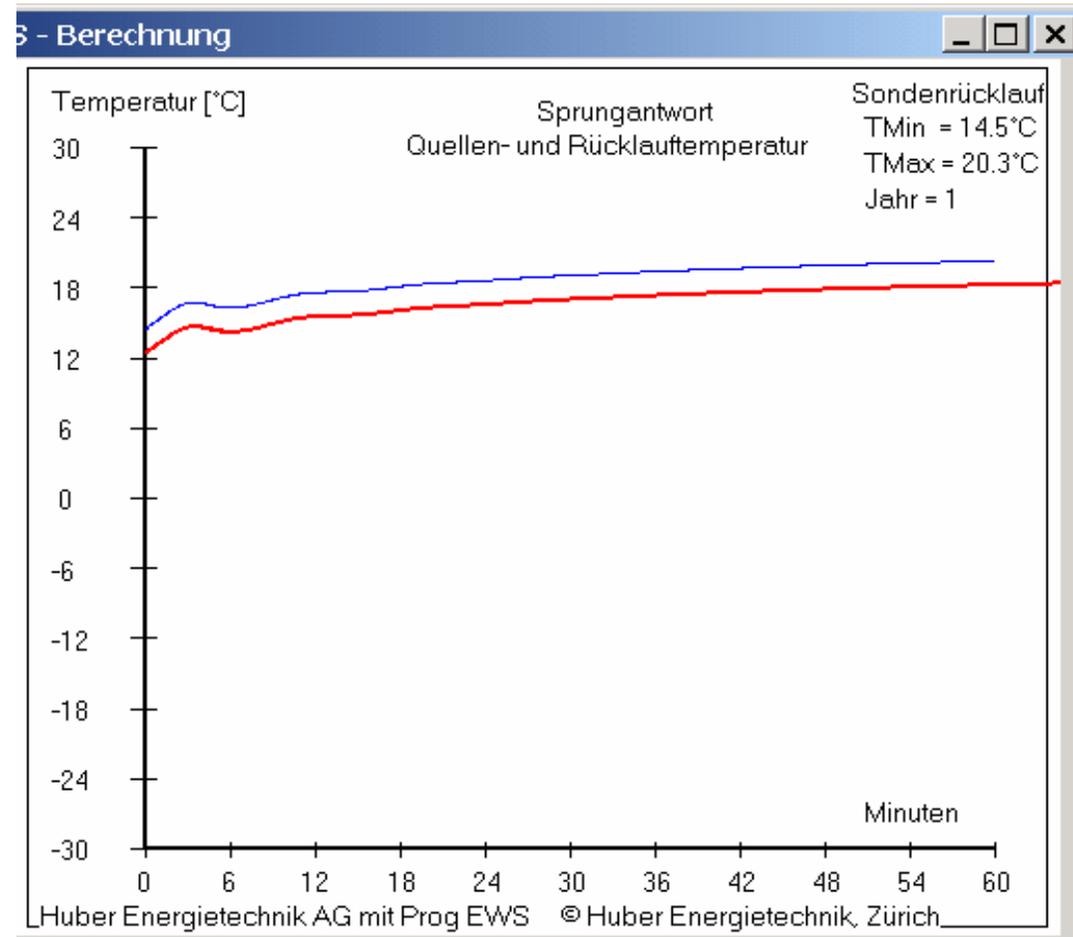


Response – Test: Anfahrverhalten simuliert

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

Programm EWSDRUCK

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

Pumpen-Auslegungsprogramm für Erdsonden	
Objekt: <input type="text"/>	
Gebäude und Standort	
Wärmebedarf	<input type="text"/> kW
Warmwasserbedarf	<input type="text"/> kW
Andere	<input type="text"/> kW
Gebäude Total	0.0 kW
Lage	Mittelland 500m <input type="text"/>
Jahresmitteltemperatur	<input type="text"/> °C
Wärmeleitfähigkeit der Erde	<input type="text"/> W/mK
mittlere Erdreichtemperatur	<input type="text"/> °C
Wärmepumpe	
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) <input type="text"/>
Leistungsaufnahme (elektrisch)	<input type="text"/> kW
Massenstrom Verdampfer	<input type="text"/> kg/h
Sondenparameter	
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 <input type="text"/>
Strömungswerte (für 1 Sonden-Rohr)	
Massenstrom in Sondenrohr	<input type="text"/> kg/h
Geschwindigkeit in Sondenrohr	<input type="text"/> m/s
Art der Strömung (laminar/turbul.)	<input type="text"/>
mittlerer spezifischer Druckverlust	<input type="text"/> Pa/m
Druckverlust im Sondenrohr	<input type="text"/> kPa
Stoffwerte Sondenfluid	
Wasser <input type="text"/>	4 °C <input type="text"/>
Dichte ρ	1000 kg/m ³
Kinematische Viskosität ν	1.604 mm ² /s
spez. Wärmekapazität c_p	4.22 kJ/(kg·K)
Frost bei	0 °C
Wärmeübergangskoeffizient α	0 W/m ² K
Druckverluste in Verteiler, Zuleitung und Sonde	
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 <input type="text"/>
Bogen 90° ($\zeta = 2$)	<input type="text"/> Stk.
Tauchhülsen ($\zeta = 1$)	<input type="text"/> Stk.
Sonstige ζ -Werte oder $\Sigma \zeta$	-
Methode Berechn. Druckverlustkoeff. ξ	Petukhov (empfohlen) <input type="text"/>
Sonden - Umwälzpumpe	
Fabrikat:	<input type="text"/> Typ: <input type="text"/>
Totaler Druckabfall	<input type="text"/> kPa
Volumenstrom	<input type="text"/> m ³ /h
benötigte Leistung der Pumpe	<input type="text"/> W
Wirkungsgrad der Pumpe	<input type="text"/> %
Leistungsaufnahme Pumpe	<input type="text"/> W
Anteil der Pumpenenergie am Stromverbrauch	
Anteil Sondenpumpe:	0.0 %

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

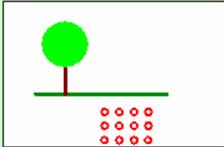
Programm WKM

- 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

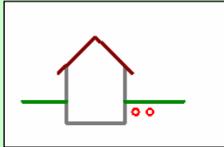
Gewählte Anordnung:



A Mehrere Rohre neben- und untereinander



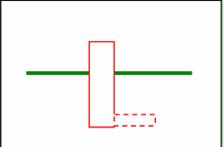
B Mehrere Rohre neben- und untereinander unter Gebäude



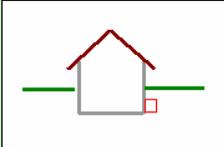
C Rohre neben unterkellertem Gebäude

Auswahl der Rohre Teil 1

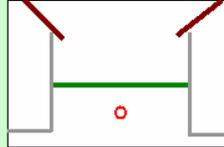
Zurück zur Objektseite



D Vertikaler Schacht



E Viereckiges Rohr an Kellerwand



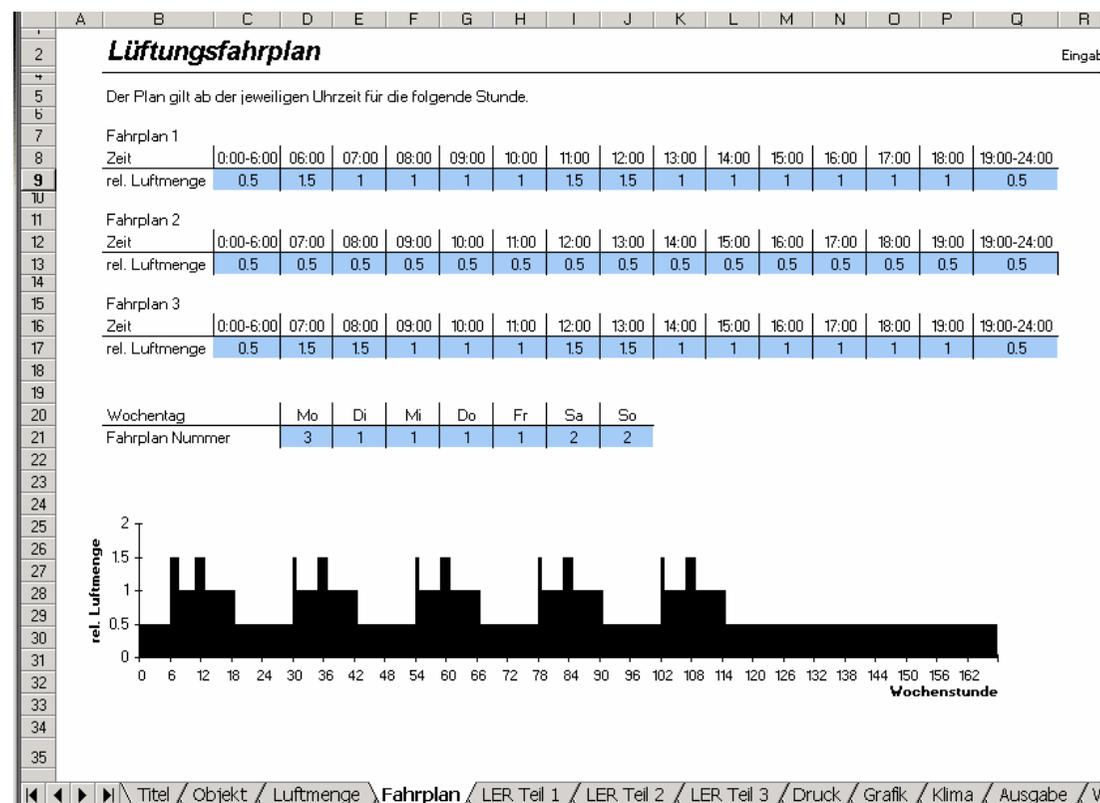
F Rohr zwischen unterkellerten Gebäuden

Simulationsparameter:	Vorschlagswert WKM	Wert Benutzer	Berechnung
Anteil Erde	1.000	0	1.000
Anteil adiabat	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

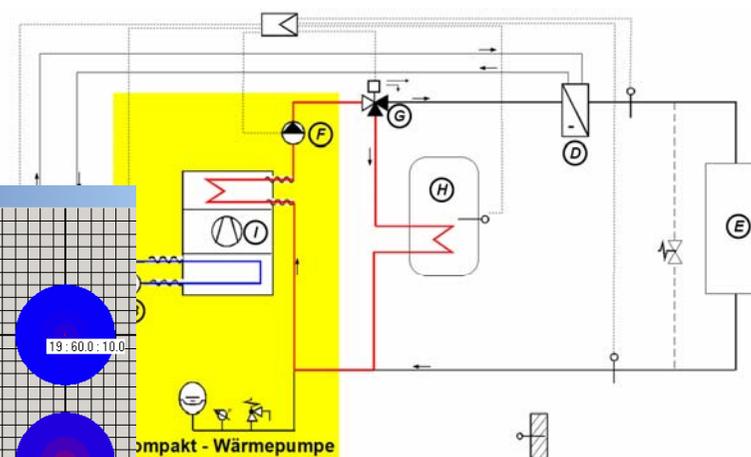
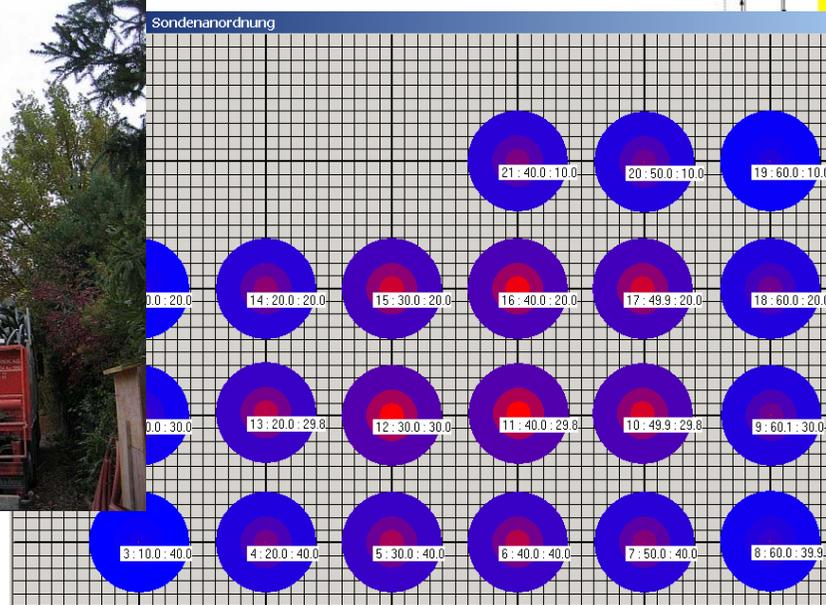
Programm WKM

- 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>