



15.2.2017, Offenburg

# **Berechnung und Modellierung für Erdwärmeanlagen – Rückblick, Erfahrungen und Entwicklungen bei Erdwärmesonden und Grundwassernutzung**

**Dr. Burkhard Sanner, Dr. Erich Mands,  
Dipl.-Geol. Marc Sauer, Dipl.-Geol. Edgar Grundmann**

**UBeG Dr. Mands & Sauer GbR  
Reinbergstr. 2, 35580 Wetzlar, Germany  
[www.ubeg.de](http://www.ubeg.de)**

## Inhalt

- Rückblick
  - vor 1960
  - um 1980
- Modellierung
  - Modellansätze
  - Randbedingungen und externe Einflüsse
  - Anwendung auf Erdwärmesonden
- EED Version 4

## Planung und Berechnung von erdgekoppelten Wärmepumpen

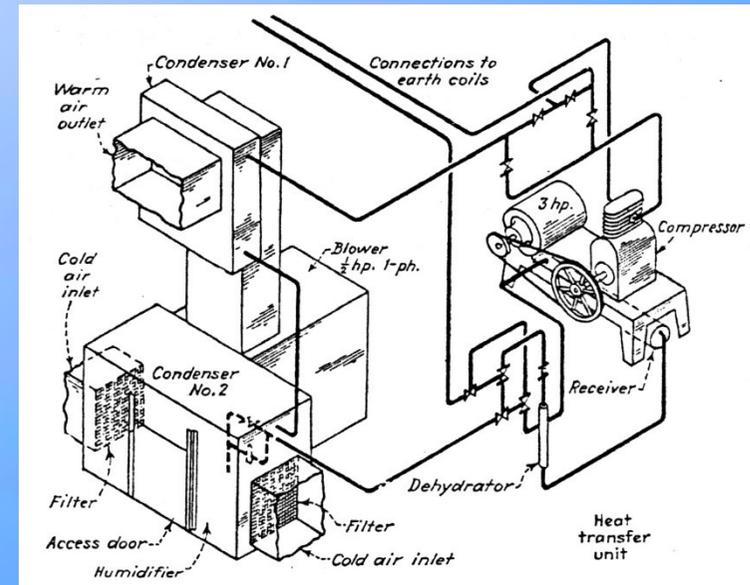
Erste Vorschläge zu Planung und Berechnung gab es bereits um 1950 in den USA, nachdem dort im Jahr 1945 die erste bekannte erdgekoppelte Wärmepumpe in Betrieb gegangen war; sie nahmen Bezug auf die Kelvinsche Linienquellentheorie:

- Ingersoll, L.R. & Plass, H.J. (1948): Theory of the ground pipe source for the heat pump. ASHVE Trans. 54:339-348
- Ingersoll, L. R., Adler, F.T., Plass, H.J. & Ingersoll, A.C. (1950): Theory of earth heat exchangers for the heat pump. ASHVE Trans. 56:167-188

$$T - T_0 = \frac{Q'}{2 \pi k} \int_x^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{Q'}{2 \pi k} I(X)$$

Linienquellen-Formel nach Ingersoll & Plass (1948)

Schema der im Oktober 1945 in Indianapolis in Betrieb genommenen erdgekoppelten Wärmepumpenanlage (aus Crandall, 1946)



## Planung und Berechnung von erdgekoppelten Wärmepumpen

Erste Vorschläge zu Planung und Berechnung gab es bereits um 1950 in den USA, nachdem dort im Jahr 1945 die erste bekannte erdgekoppelte Wärmepumpe in Betrieb gegangen war; sie nahmen Bezug auf die Kelvinsche Linienquellentheorie:

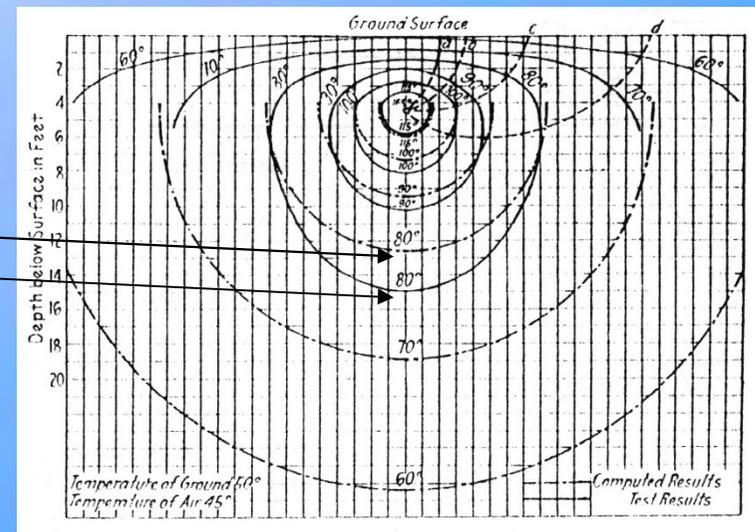
- Ingersoll, L.R. & Plass, H.J. (1948): Theory of the ground pipe source for the heat pump. ASHVE Trans. 54:339-348
- Ingersoll, L. R., Adler, F.T., Plass, H.J. & Ingersoll, A.C. (1950): Theory of earth heat exchangers for the heat pump. ASHVE Trans. 56:167-188

Ähnliche Berechnungen wurden schon vorher z.B. für Erdkabel genannt:

- Allen, J.R. (1920): Theory of Heat Loss from Pipe Buried in the Ground. Journal ASHVE 26:455-469/588-596

berechnet  
gemessen

Isothermen um ein Rohr im  
 Boden mit 165 °F (74 °C)  
 Temperatur, aus Allen (1920)



## Planung und Berechnung von erdgekoppelten Wärmepumpen

Berechnungen mit der ursprünglichen Integralformel waren sehr zeitraubend (ohne PC!), und vereinfachte Methoden wurden vorgeschlagen:

- Guernsey, E.N., Betz, P.L. & Skau, N.H. (1949): Earth as a heat source and storage medium for the heat pump. ASHVE Trans. 55:321-344

Guernsey et al. schlagen eine Approximation der Linienquellentheorie vor (unter Verwendung von Vorarbeiten von Newman, 1931):

$$\theta = \frac{A}{5.4575k} \left[ \log_{10} \frac{\alpha t}{r^2} + 0.106 \frac{r^2}{\alpha t} + 0.351 \right]$$

Original aus der Veröffentlichung Guernsey et al. (1949),  
gültig für US-Einheiten (°F, ft, BTU/hr)

$$\Delta T = \frac{0,1833Q}{\lambda} \left( \log_{10} \frac{\alpha t}{r^2} + 0,106 \frac{r^2}{\alpha t} + 0,351 \right)$$

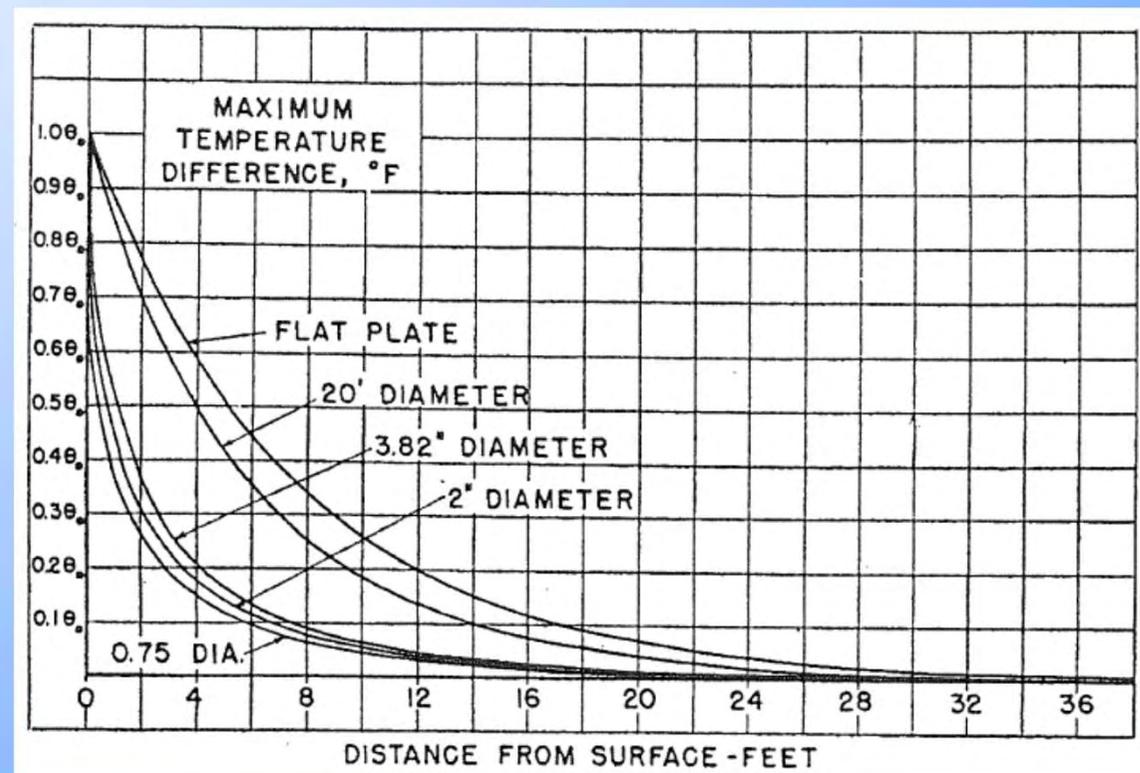
Angepasst für SI-Einheiten (°C, m, W) aus VDI 4640-2 (2001)

## Planung und Berechnung von erdgekoppelten Wärmepumpen

Berechnungen mit der ursprünglichen Integralformel waren sehr zeitraubend (ohne PC!), und vereinfachte Methoden wurden vorgeschlagen:

- Guernsey, E.N., Betz, P.L. & Skau, N.H. (1949): Earth as a heat source and storage medium for the heat pump. ASHVE Trans. 55:321-344

Prozentuale Temperaturabnahme mit der Entfernung vom Wärmeübertrager (Platte bzw. Rohre mit unterschiedlichem Durchmesser), aus Guernsey et al. (1949)



## Planung und Berechnung von erdgekoppelten Wärmepumpen

Berechnungen mit der ursprünglichen Integralformel waren sehr zeitraubend (ohne PC!), und vereinfachte Methoden wurden vorgeschlagen:

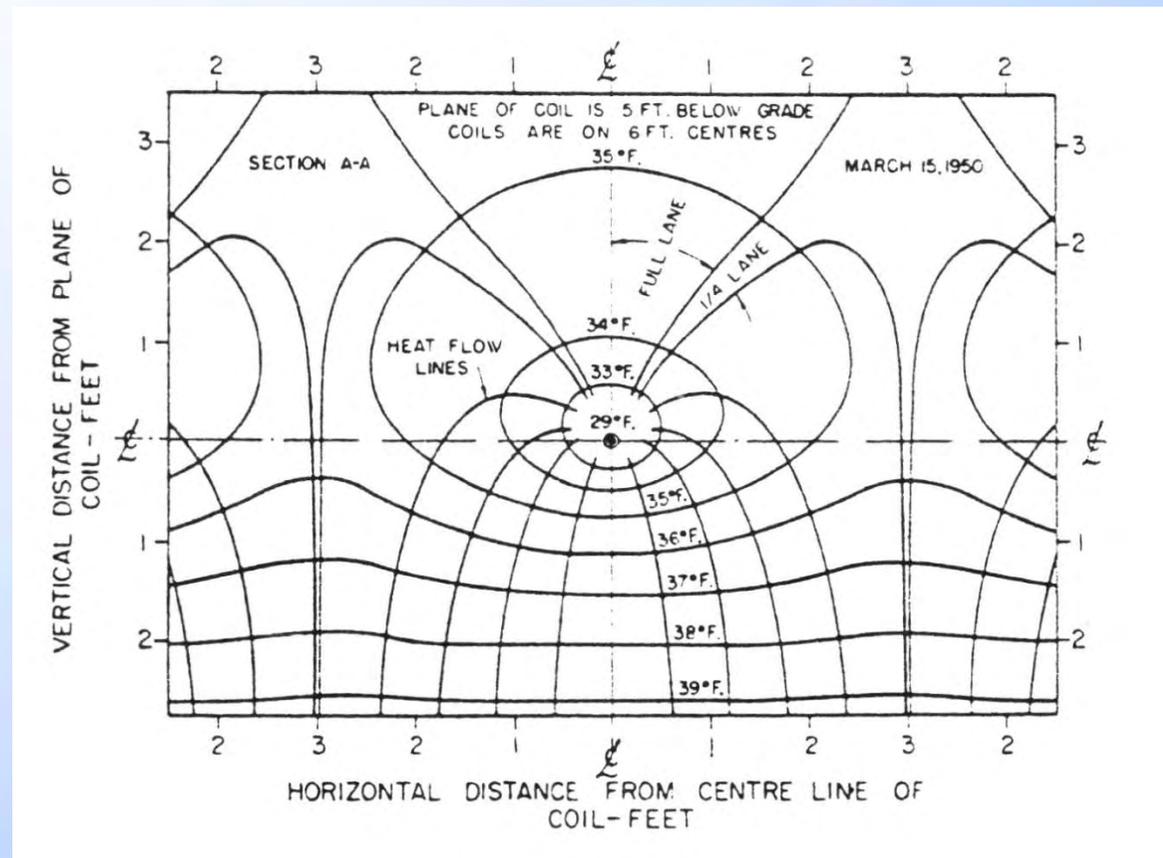
- Guernsey, E.N., Betz, P.L. & Skau, N.H. (1949): Earth as a heat source and storage medium for the heat pump. ASHVE Trans. 55:321-344

Guernsey et al. schließen aus ihren Berechnungen:

- Reiner Wärmeentzug aus vielen, eng benachbarten Anlagen ist nicht möglich: *„It is clear, therefore, that if heat is withdrawn over a long period with no offsetting return of heat, it would not be feasible for several close neighbors each to draw on the earth's heat”*
- Bei mit einer gleichbleibenden Energiebilanz Sommer/Winter betriebenen Erdwärmesonden errechneten Guernsey et al. einen Abstand von 20-30 ft (6-10 m), bei dem eine gegenseitige Beeinflussung vernachlässigt werden kann

## Planung und Berechnung von erdgekoppelten Wärmepumpen

Messungen von Temperaturen um Erdwärmekollektor-Rohre zum Vergleich mit Berechnungen finden ebenfalls schon um 1950 statt



Temperaturverteilung um  
 Erdwärmekollektor-Rohre  
 (aus Hooper, 1952)

## Planung und Berechnung von erdgekoppelten Wärmepumpen

Mit dem Interesse an erdgekoppelten Wärmepumpen im Gefolge der Ölpreiskrisen gab es auch in Europa Vorschläge zu Berechnungen. Dabei kamen analytische Lösungen sowie FD- und FE-Simulationen zum Einsatz.

- Erdwärmesonden/Kollektoren:  
Blaude (1979), Runesson, Wirberg & Andersson (1979), Claesson & Johansson (1980), Hellström (1983), Gilby & Hopkirk (1985), Lund & Östman (1985), Wijsman & van Meurs (1985), Eskilson (1986), Claesson (1987), Mogensen (1987), Sanner & Brehm (1988)
- Grundwasser:  
Neiss & Winter (1976), Matthey (1979), Pelka (1983), Angehrn, Hanke & Lyons (1985), Kangas, Lund & Laitinen (1985), Pelka & Daniels (1986), Sørensen, Reffstrup & Qvale (1988)

## Planung und Berechnung von erdgekoppelten Wärmepumpen

Zwei Grundtypen von Planungswerkzeugen wurde seit den 1980er-Jahren weiterentwickelt:

- Analytische Berechnungsverfahren
  - Wesentliche Verfahren und Algorithmen gehen auf Arbeiten an der Univ. Lund, Schweden, zurück, z.B. TFSTEP (Claesson & Eskilson, 1988)
  - Diese Programme liefen auf den damals verfügbaren PC
  - Anfang der 1990er-Jahre wurde daraus EED („Earth Energy Designer“) entwickelt

Beim EED Beta-Test-Workshop,  
Schloss Rauischholzhausen,  
1.2.1996



## Planung und Berechnung von erdgekoppelten Wärmepumpen

Zwei Grundtypen von Planungswerkzeugen wurde seit den 1980er-Jahren weiterentwickelt:

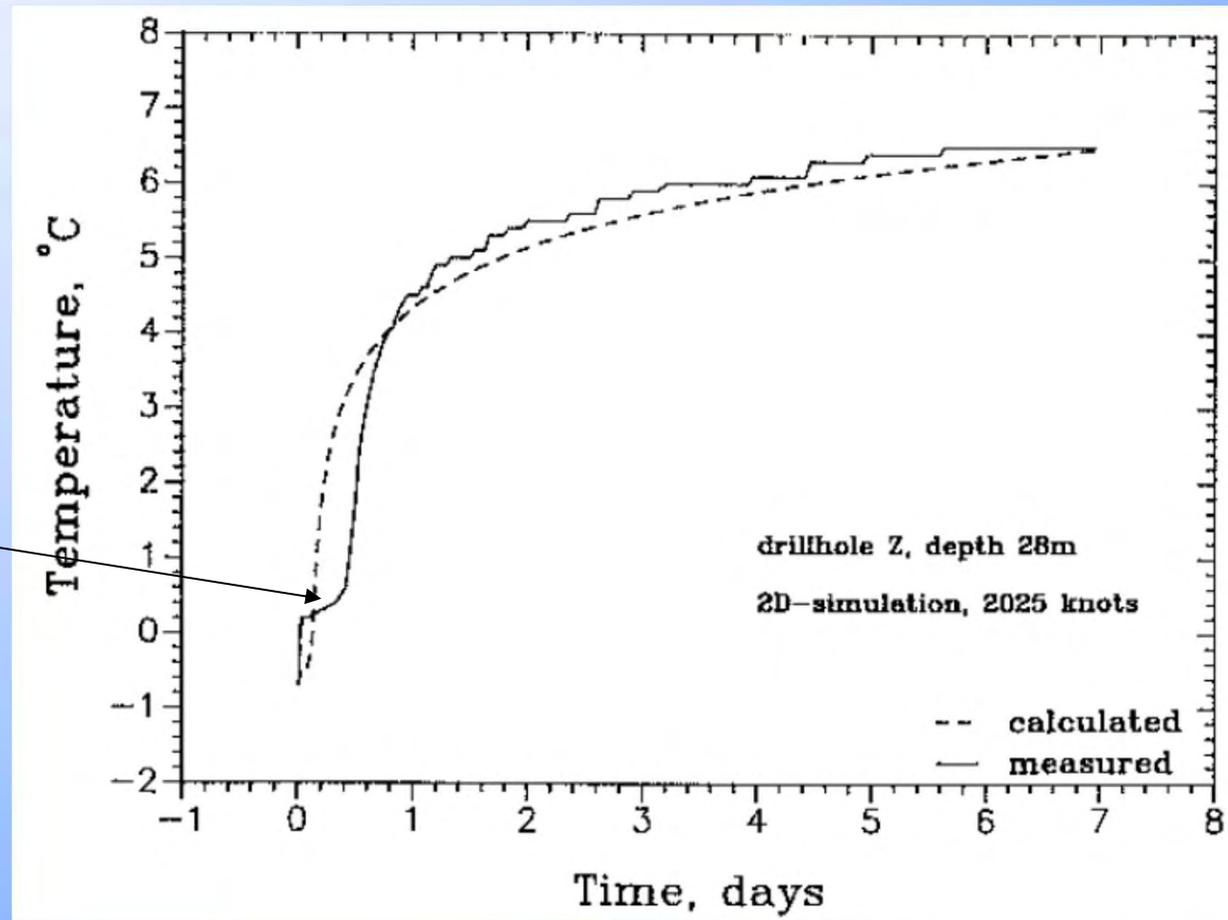
- Analytische Berechnungsverfahren
  - Wesentliche Verfahren und Algorithmen gehen auf Arbeiten an der Univ. Lund, Schweden, zurück, z.B. TFSTEP (Claesson & Eskilson, 1988)
  - Diese Programme liefen auf den damals verfügbaren PC
  - Anfang der 1990er-Jahre wurde daraus EED („Earth Energy Designer“) entwickelt
- Verfahren mit numerischer Simulation
  - Zuerst vor allem mit Finiten Differenzen (FD), wie z.B. das an der Univ. Gießen entwickelte FD-Programm TRADIKON-3D (Brehm, 1989), heute mit Finiten Elementen (FE), meist mit kommerzieller Software wie z.B. FEFLOW
  - Ursprünglich nur auf Großrechnern einsetzbar, heute auch auf leistungsstarken PC

## Planung und Berechnung von erdgekoppelten Wärmepumpen

Vergleich gemessener und mit FD-Modell TRADIKON-3D berechneter Temperaturen der Sole bei der Wiedererwärmung nach einem Monat Dauerbetrieb der Wärmepumpe in der Versuchsanlage Schöffengrund-Schwalbach (1 EWS 50 m tief)

Plateau bei 0 °C, entspricht Auftauen um die Sonde; in späterer Programmversion mit berücksichtigt

Aus Sanner & Brehm (1988)



## Modellansätze

Je nach Fragestellung und geologischen Bedingungen unterschiedliche Komplexität und Aussagegenauigkeit:

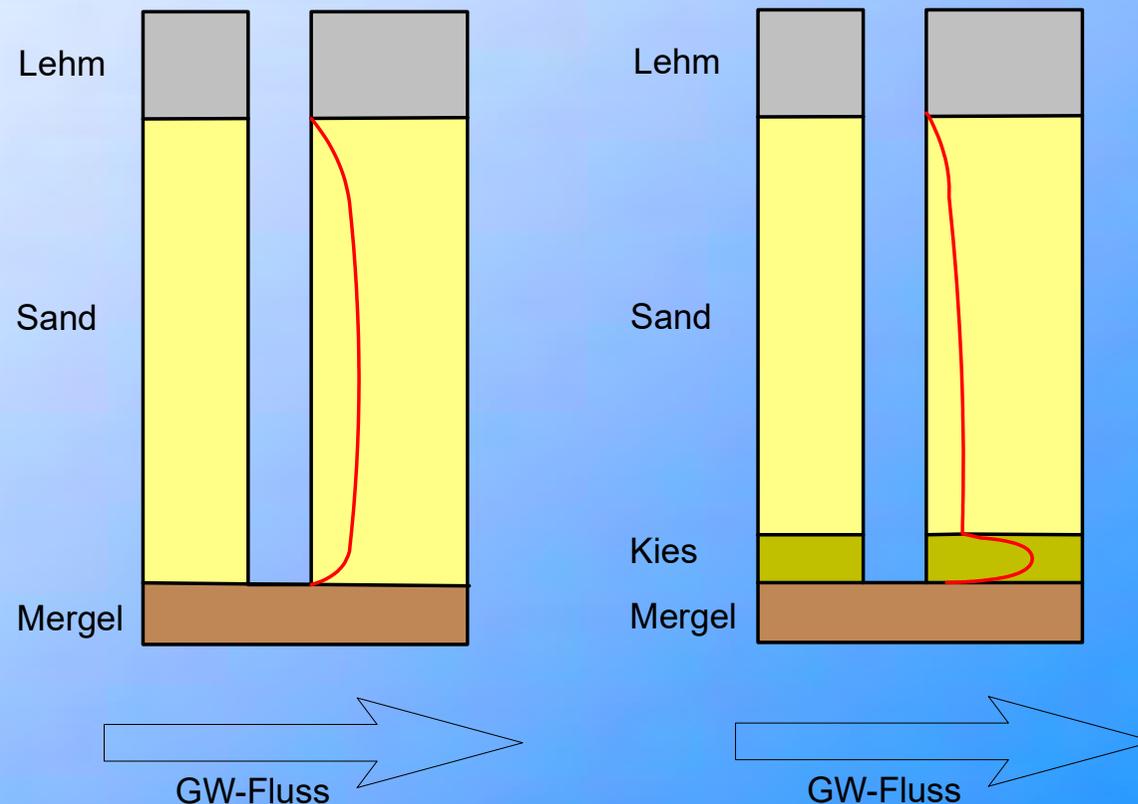
- Rein thermisches Modell (konduktiver Wärmetransport) in undurchlässigem Untergrund
  - Schnelle und einfache Berechnung, Aussagekraft meist auch mit 2D-Modell ausreichend, kann oft durch analytische Berechnung ersetzt werden
- Rein hydraulisches Modell (kein Wärmeeintrag/-entzug)
  - I.d.R. zuverlässige Abbildung, lässt sich meist gut mit GW-Messstellen kalibrieren, vielfältiges Programmangebot aus der Hydrogeologie
- Gekoppeltes hydraulisch-thermisches Modell (Grundwasserfluss, konduktiver, advektiver und ggf. konvektiver Wärmetransport)
  - Hydraulischer Teil wie vor, nur geringer Einfluss des thermischen Feldes (Dichte, Viskosität)
  - Thermische Vorhersage sehr viel anspruchsvoller, da Interaktion Fluid-Gestein u.a. von Porenraum und Fließgeschwindigkeit abhängt; Temperaturfeld zu Simulationsbeginn hat großen und anhaltenden Einfluss

## Gekoppelte thermisch-hydraulische Modelle

Modelle, die das hydraulische Verhalten gut abbilden, sind nicht a priori auch für die Berechnung des Wärmetransports ausreichend.

Für die thermische Berechnung muss ggf. eine höhere Auflösung mit unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften verwendet werden.

Beispiel:  
 Gleicher mittlerer  $k_f$ -Wert; Wärme kommt bei Basis-schotter schneller in der Beobachtungs-Messstelle an



## Gekoppelte thermisch-hydraulische Modelle

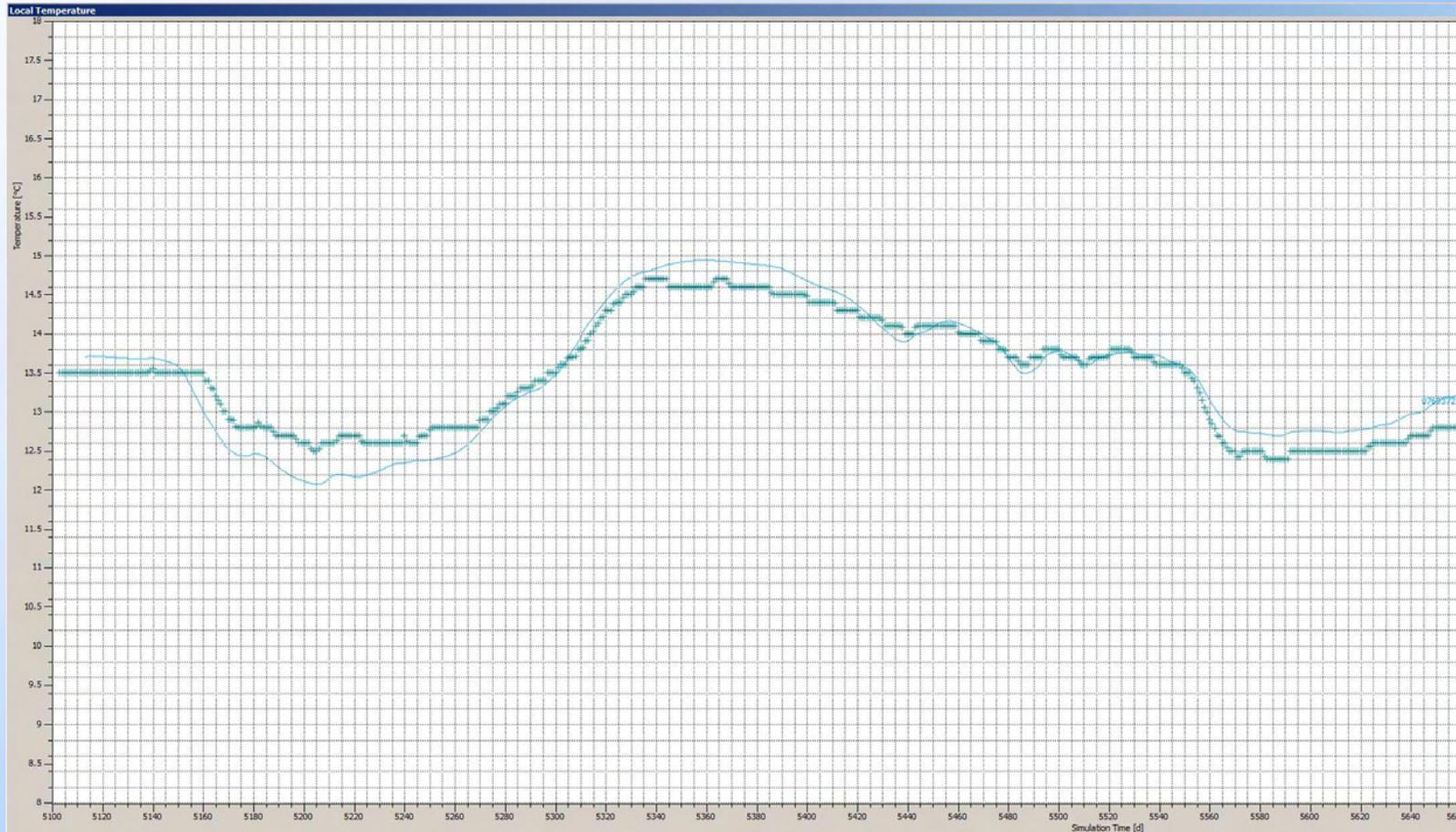
Grundwasser-Druckspiegel („hydraulic head“) in der Beobachtungs-Messstelle lässt sich gut mit Simulation nachvollziehen



Berechnung über 18 Monate; Kreuze sind Messwerte, durchgehende Linie Simulation

## Gekoppelte thermisch-hydraulische Modelle

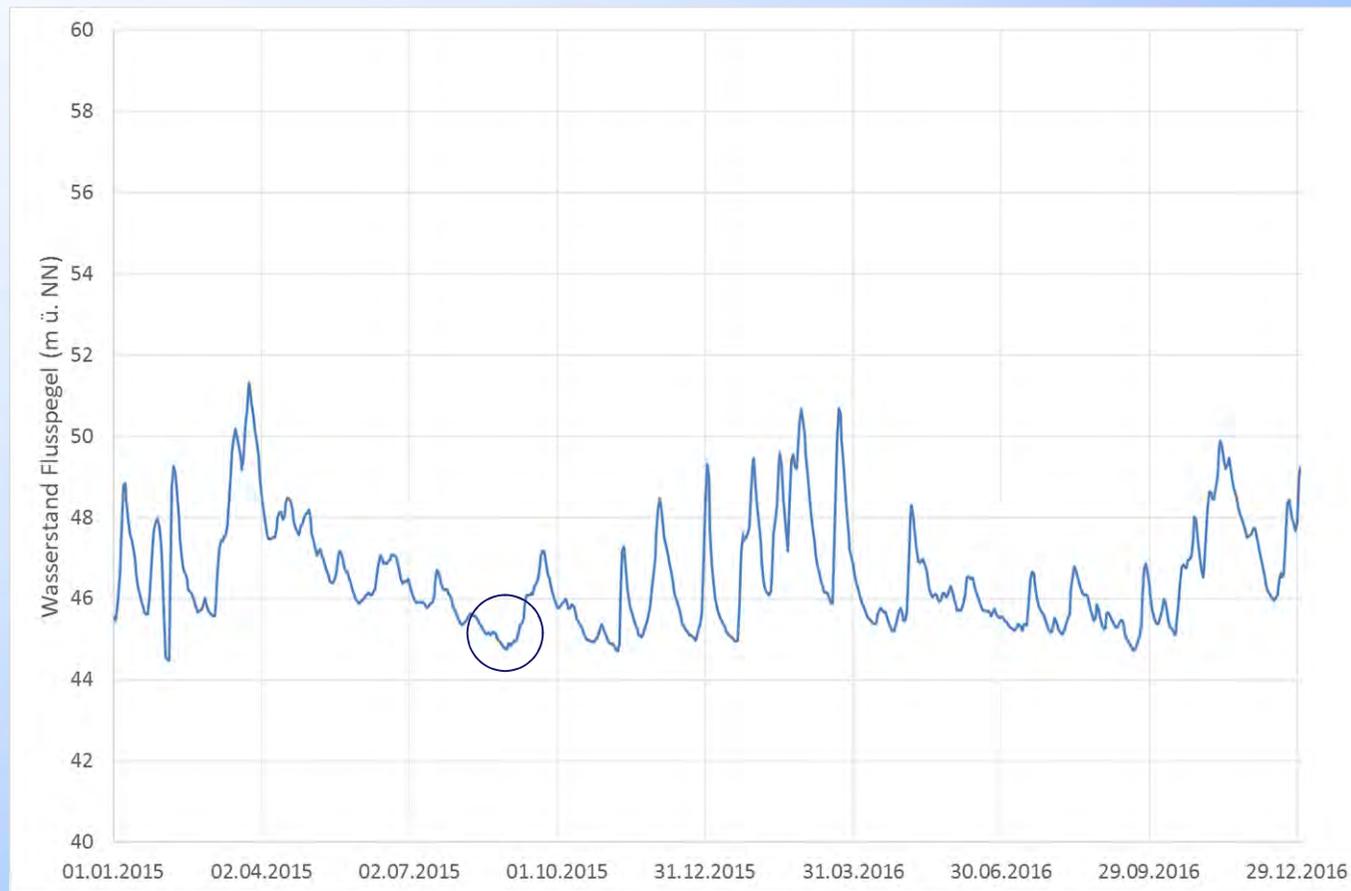
Temperatur in der Beobachtungs-Messstelle weicht in der Simulation um bis zu 1 K von den Messwerten ab



Berechnung über 18 Monate; Kreuze sind Messwerte, durchgehende Linie Simulation

## Randbedingungen und externe Einflüsse

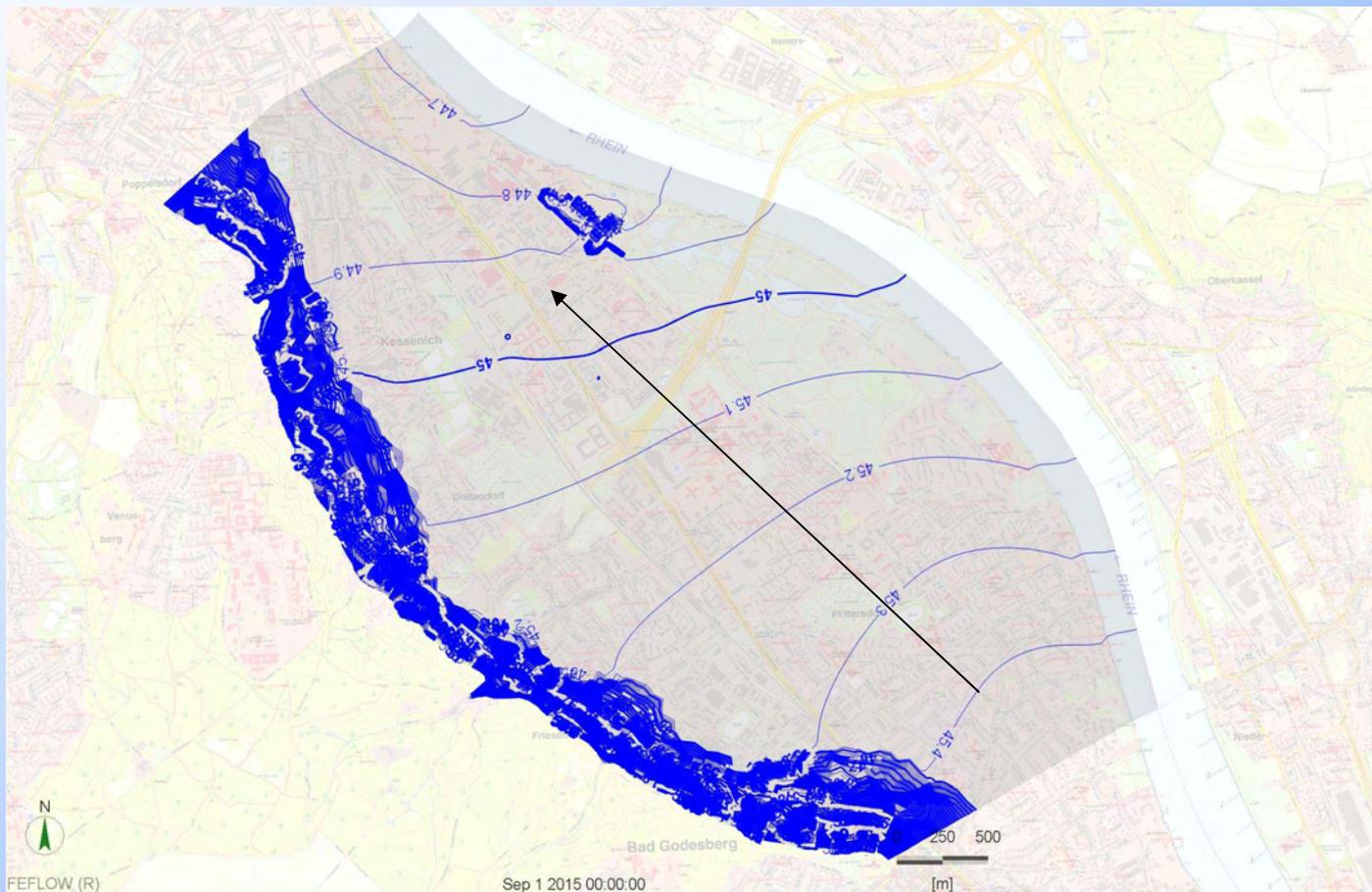
Beispiel eines mit dem Flusspegel korrespondierenden Grundwasserleiters



Wasserstand Flusspegel in m ü. NN (flussaufwärtiger Rand des Modellgebietes)

## Randbedingungen und externe Einflüsse

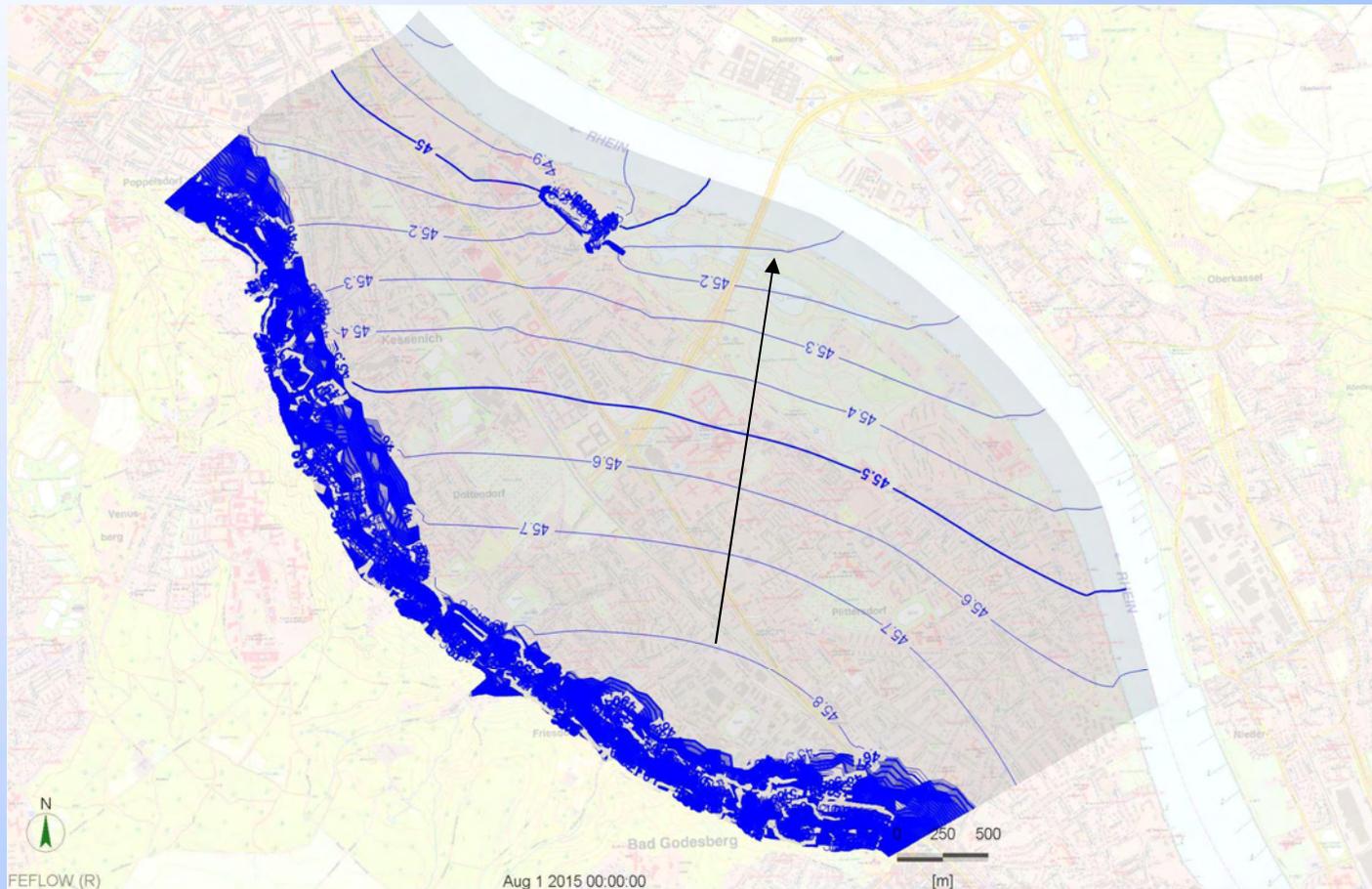
Beispiel eines mit dem Flusspegel korrespondierenden Grundwasserleiters



Trockenwetterabfluss, kein Anteil aus Randhügeln

## Randbedingungen und externe Einflüsse

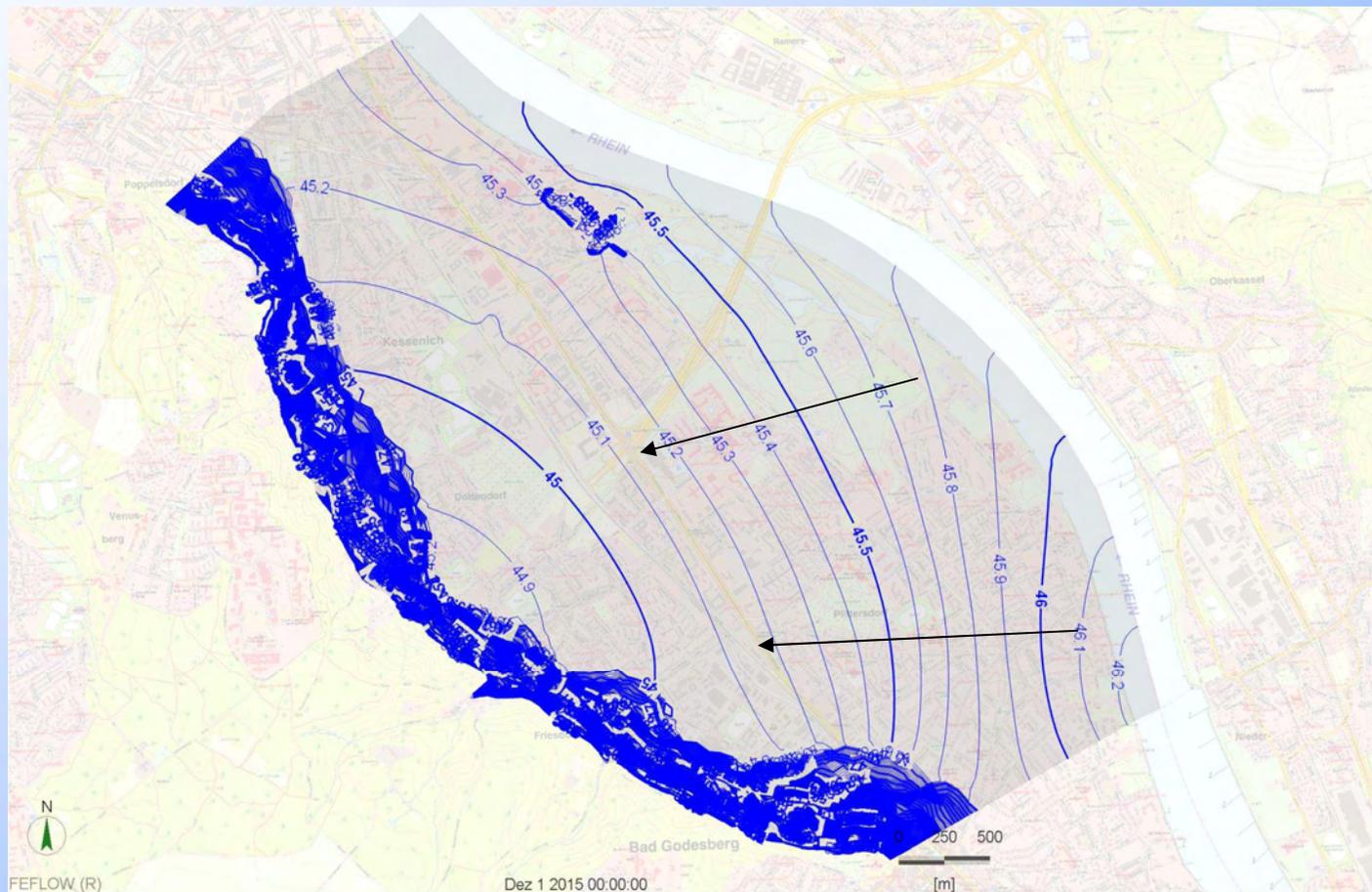
Beispiel eines mit dem Flusspegel korrespondierenden Grundwasserleiters



Normaler Abfluss mit Anteil aus Randhügeln

## Randbedingungen und externe Einflüsse

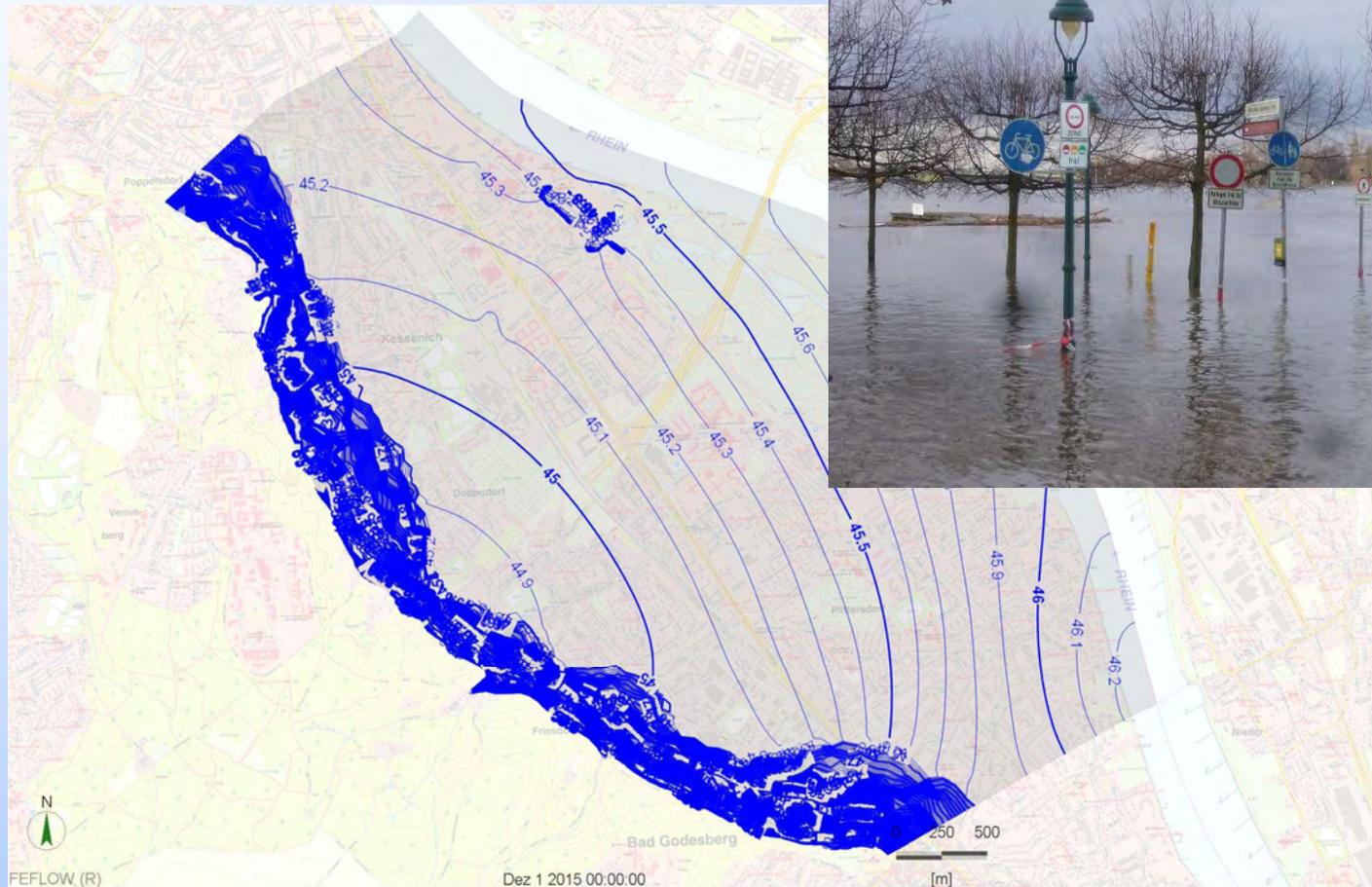
Beispiel eines mit dem Flusspegel korrespondierenden Grundwasserleiters



Abfluss während einer Hochwasserwelle

## Randbedingungen und externe Einflüsse

Beispiel eines mit dem Flusspegel korrespondierenden Grundwasserleiters

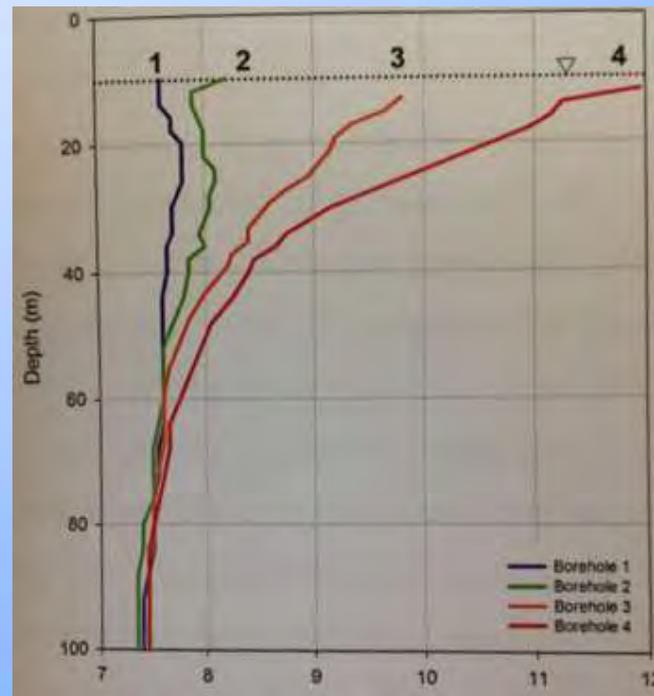
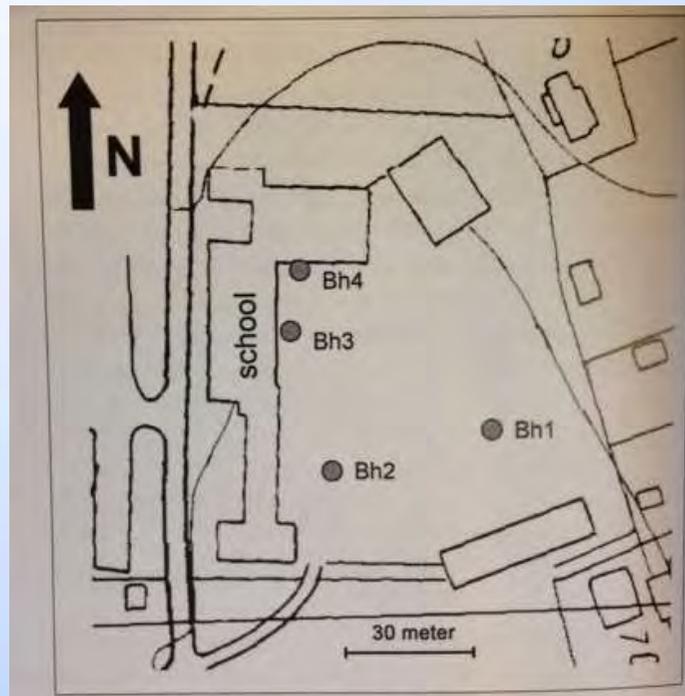


Abfluss während einer Hochwasserwelle

## Randbedingungen und externe Einflüsse

Das Temperaturfeld zu Beginn der Simulation hat einen wesentlichen Einfluss:

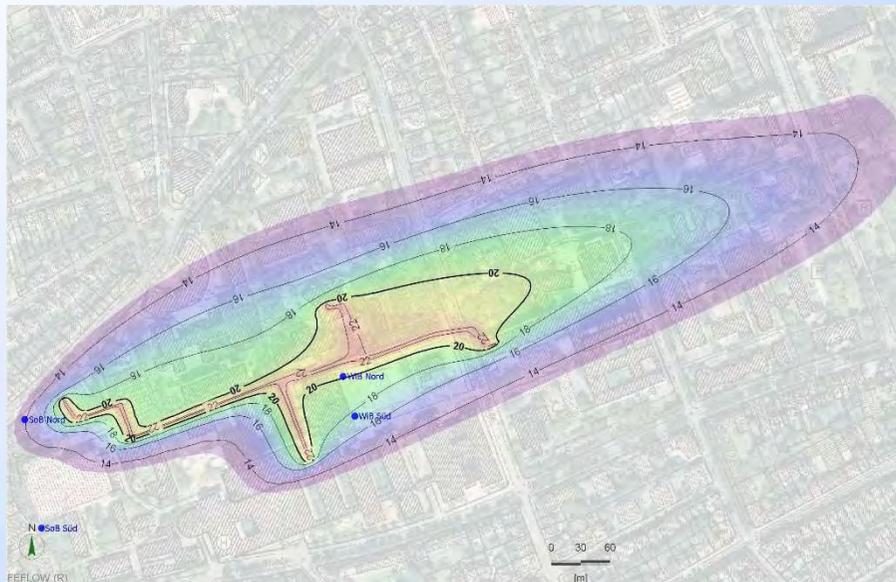
- In Städten und bebautem Gelände oft gestört
- Künstliche Wärmequellen müssen berücksichtigt werden



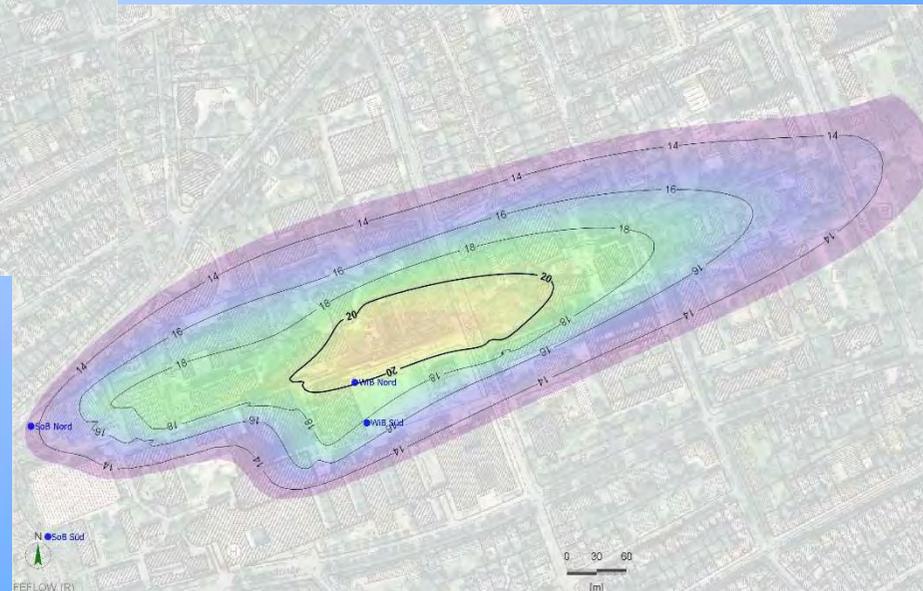
Beeinflussung durch Gebäude (aus Hellström & Gehlin, Vortrag EGC 2016)

## Randbedingungen und externe Einflüsse

Einfluss eines wärmeemittierenden Kanals in bis zu 7 m Tiefe, bis in Tiefe von gut 20 m nachweisbar



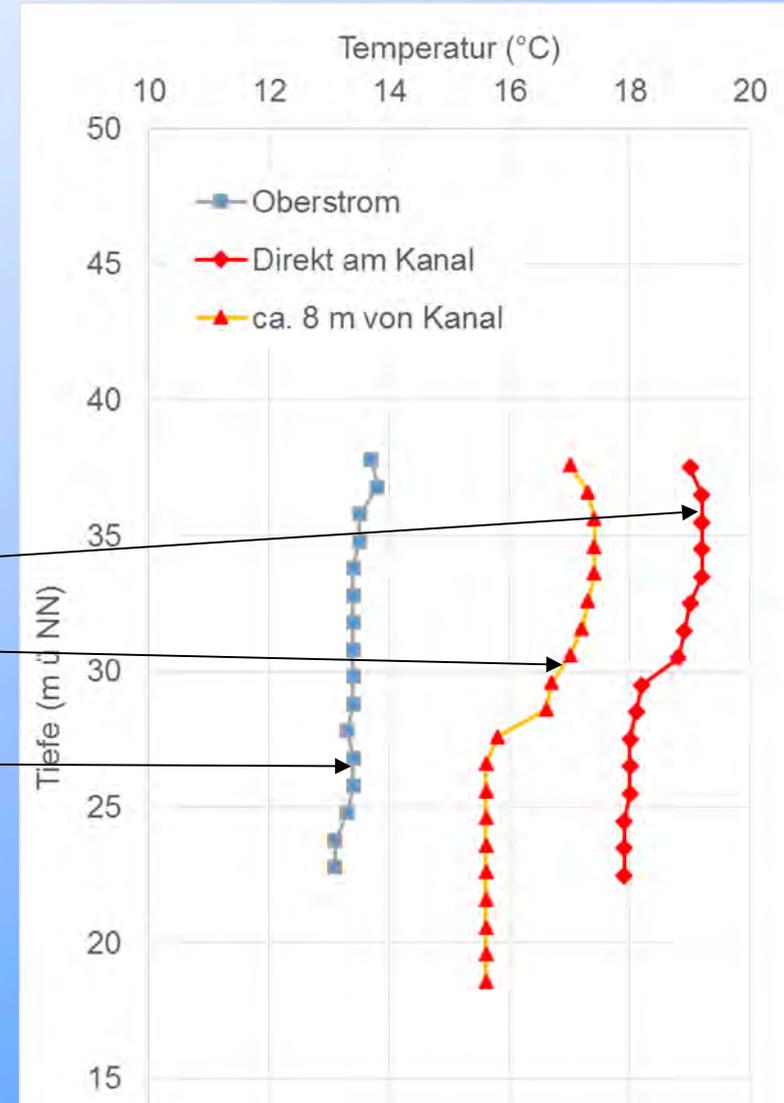
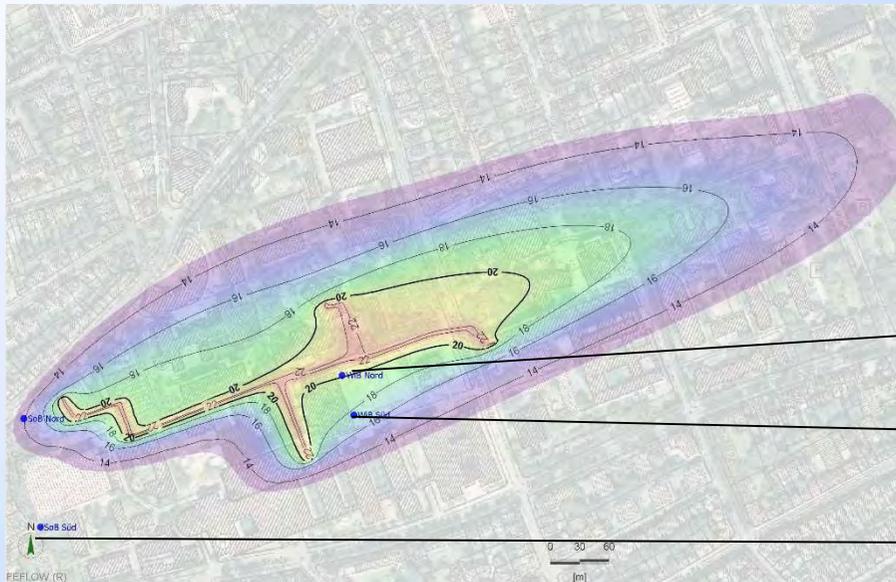
Auf Kanalniveau (ca. 5 m)



Ca. 20 m Tiefe

## Randbedingungen und externe Einflüsse

Einfluss eines wärmeemittierenden Kanals in bis zu 7 m Tiefe, bis in Tiefe von gut 20 m nachweisbar



Gemessene Temperaturen in Beobachtungspegeln

## Anwendung für Erdwärmesonden

Oft reicht ein Modell mit konduktivem Wärmetransport:

- Während bei thermischer Grundwassernutzung immer ein advektiver Wärmetransport stattfindet (Pumpen induziert Grundwasserfluss), ist der Übertritt von Wärme in und aus der Erdwärmesonde durch die Rohrwand immer konduktiv.
- Advektiver Wärmetransport wird durch Erdwärmesonden nicht induziert, kann aber durch Grundwasserbewegung aus anderen Gründen (natürliches Fließen, Brunnen in der Umgebung) um die Sonde herum stattfinden.

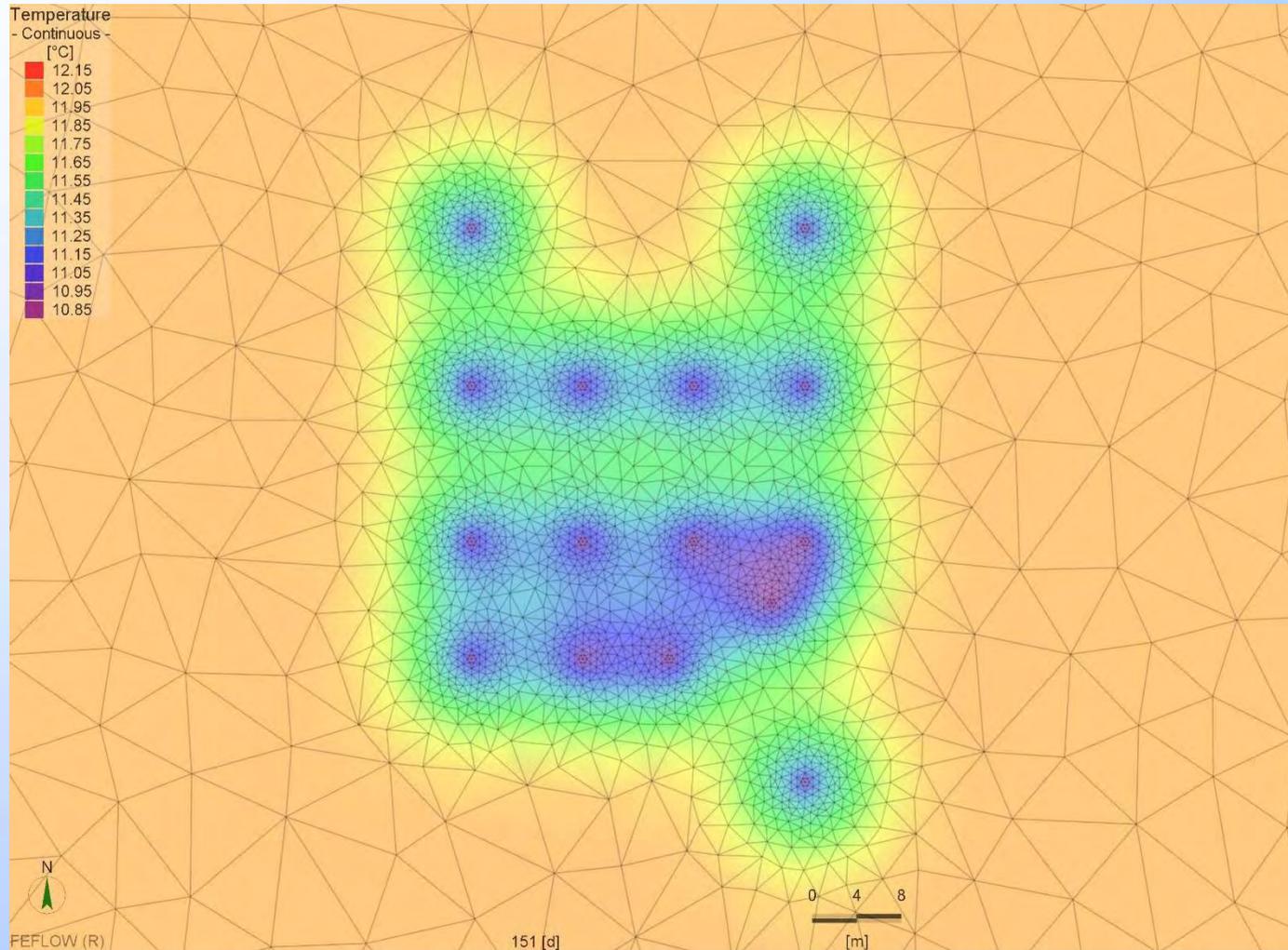
Die Erdwärmesonde selbst kann in der Regel nicht aus einzelnen Elementen dargestellt werden, da Durchmesser, Wandstärke etc. zu klein im Verhältnis zum gesamten Modellgebiet sind.

Daher wird z.B. bei FEFLOW mit einem Erdwärmesondenmodul gearbeitet, das auf den gleichen Algorithmen wie die Lund-Programme basiert.



## Anwendung für Erdwärmesonden

### Erdwärmesondenanlage Hörsaalgebäude Salzgitter

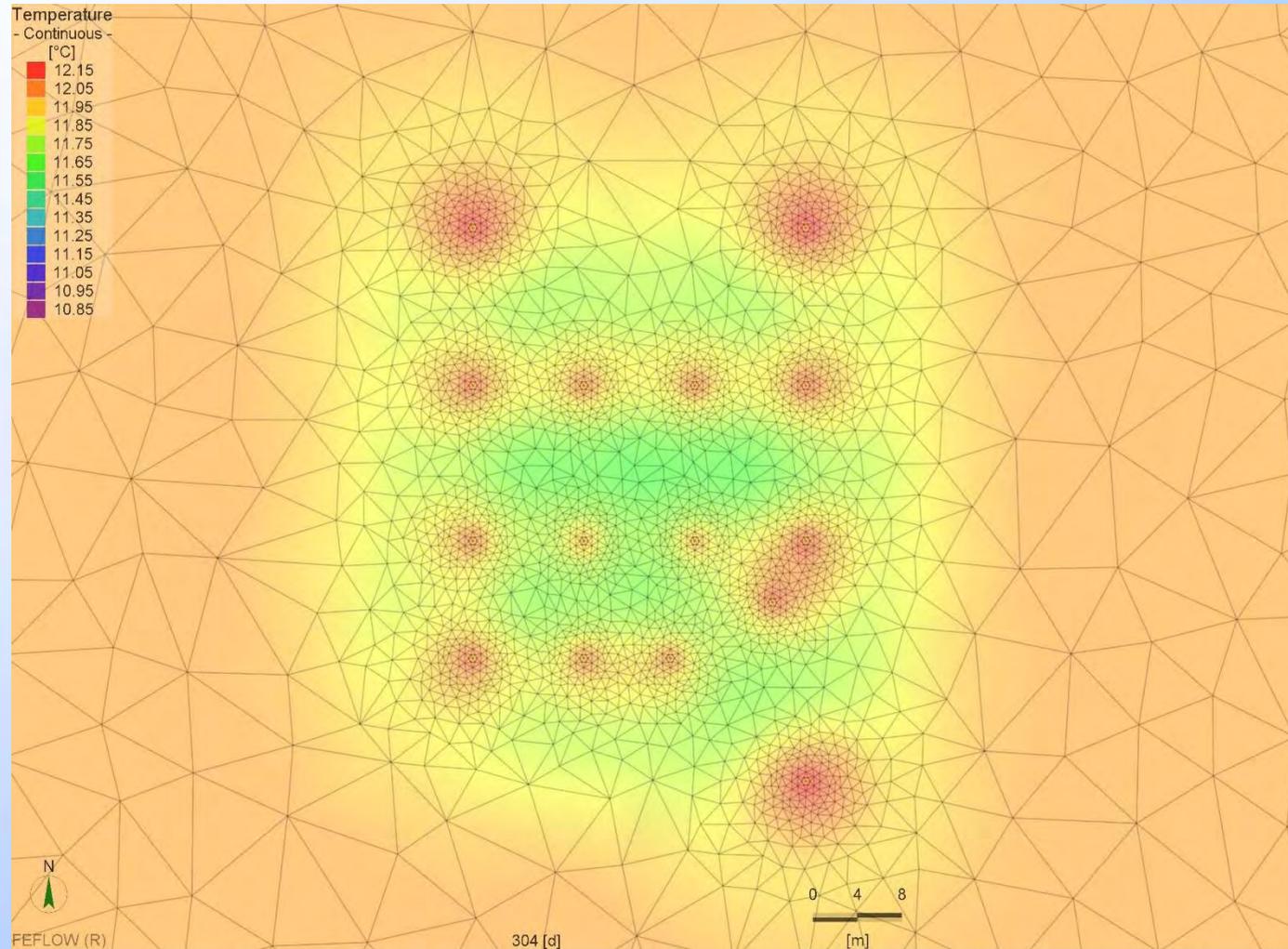


Situation  
Ende Mai



## Anwendung für Erdwärmesonden

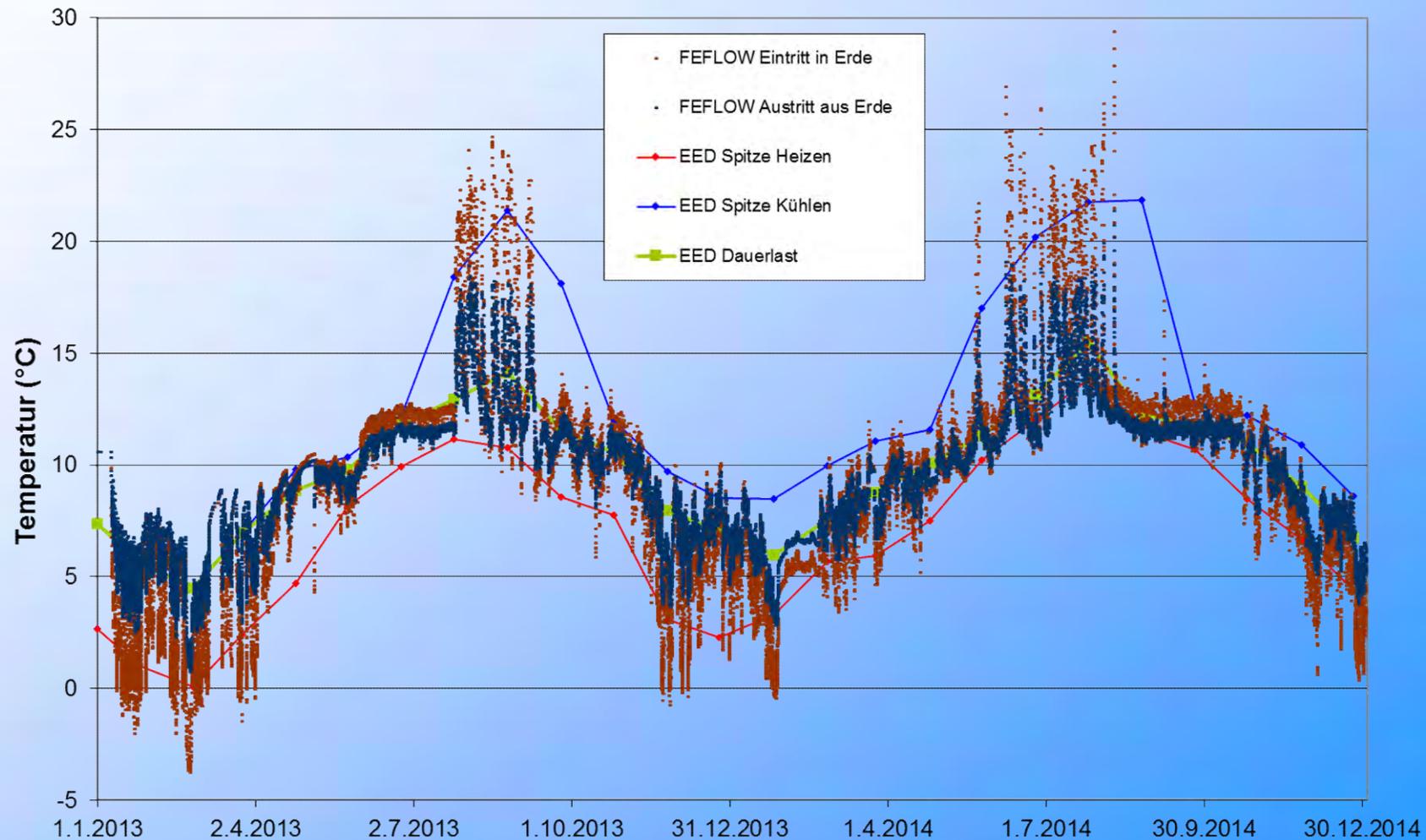
### Erdwärmesondenanlage Hörsaalgebäude Salzgitter



Situation  
Ende Oktober

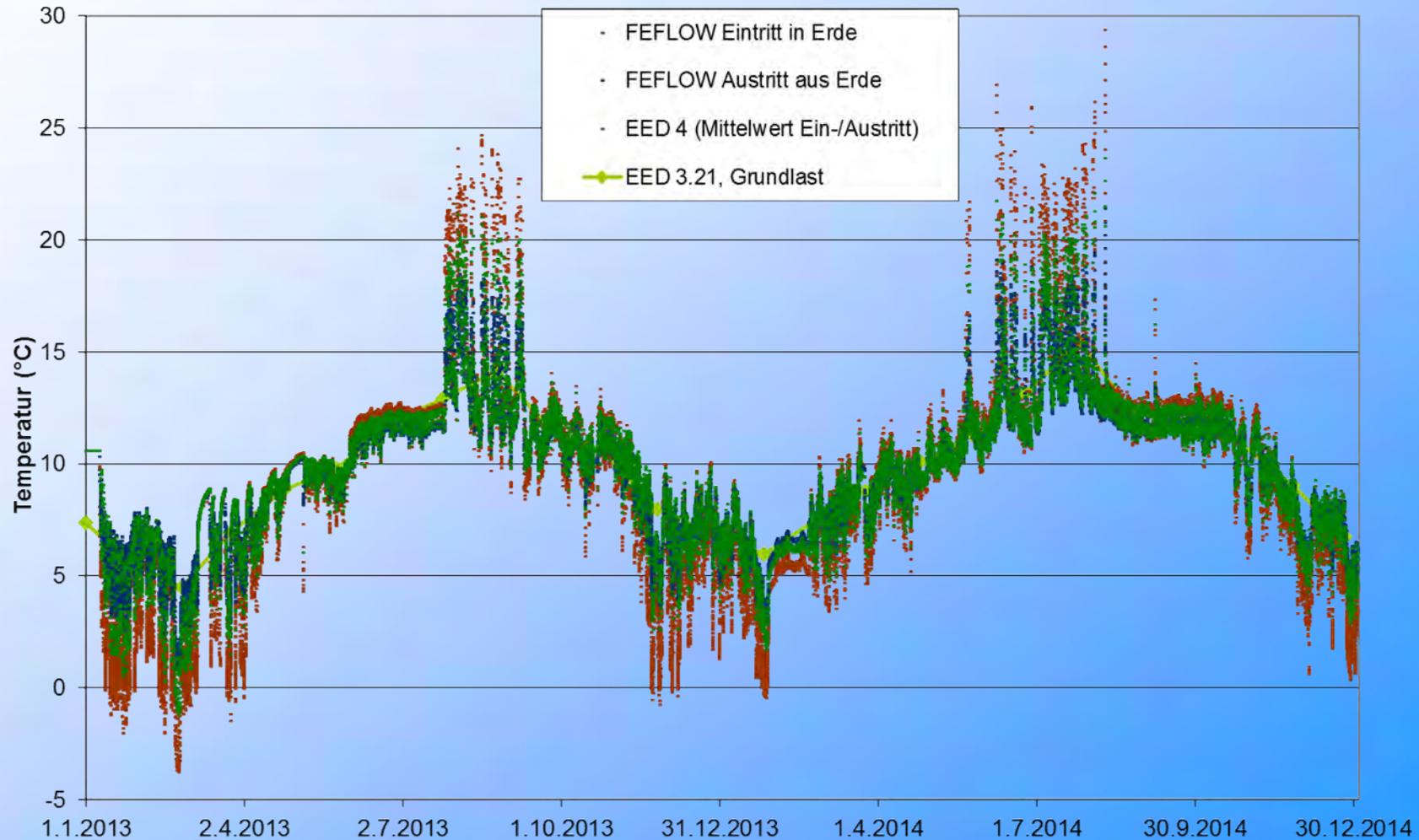
## Anwendung für Erdwärmesonden

Erdwärmesondenanlage Hörsaalgebäude Salzgitter, Soletemperatur



## Anwendung für Erdwärmesonden

Erdwärmesondenanlage Hörsaalgebäude Salzgitter, Soletemperatur



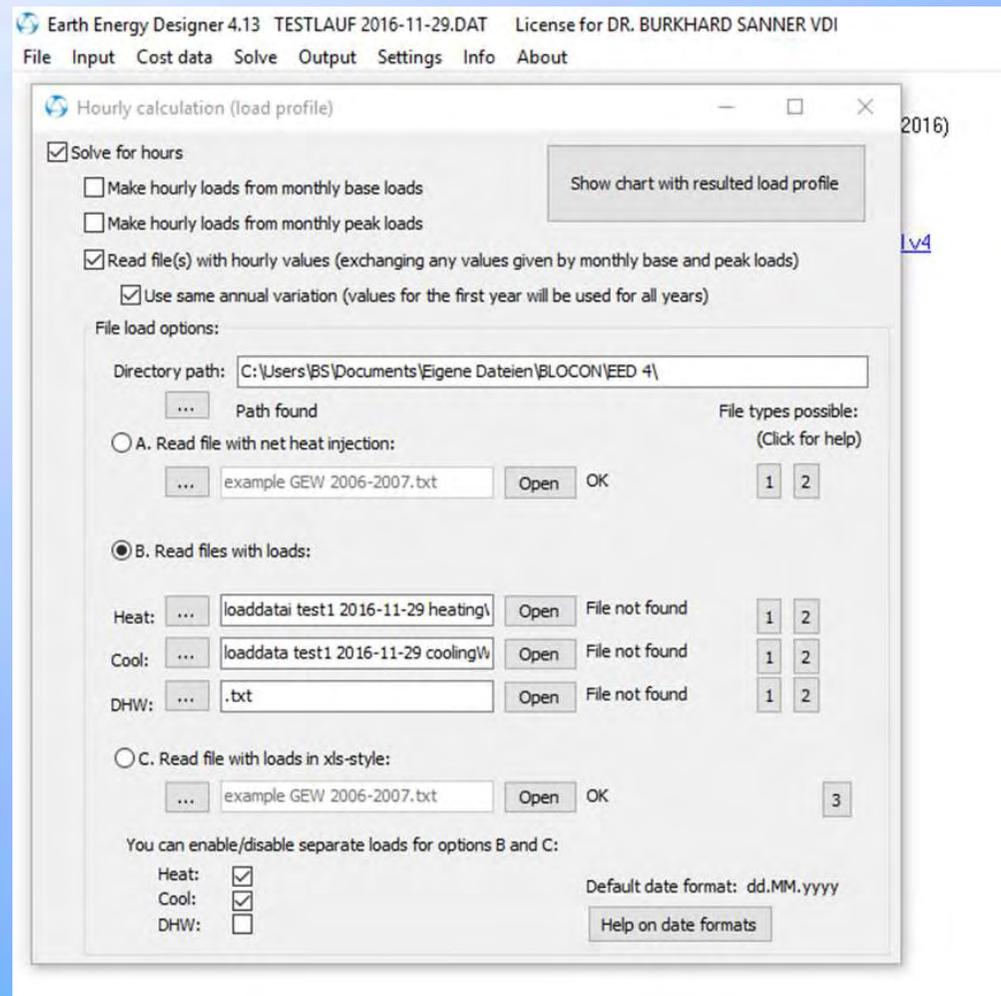
## EED 4 – Berechnung mit stündlichen Leistungswerten

Die neueste Version von EED erlaubt bei rein konduktiven Bedingungen eine Berechnung, die für die Soletemperaturen einer numerischen Simulation gleichkommt.

Dies geschieht durch Superposition von analytischen Berechnungen.

Eine Simulation der Temperaturen um die Sonden herum ist damit aber nicht möglich.

Eingabemaske für stündliche Leistungswerte bei EED 4





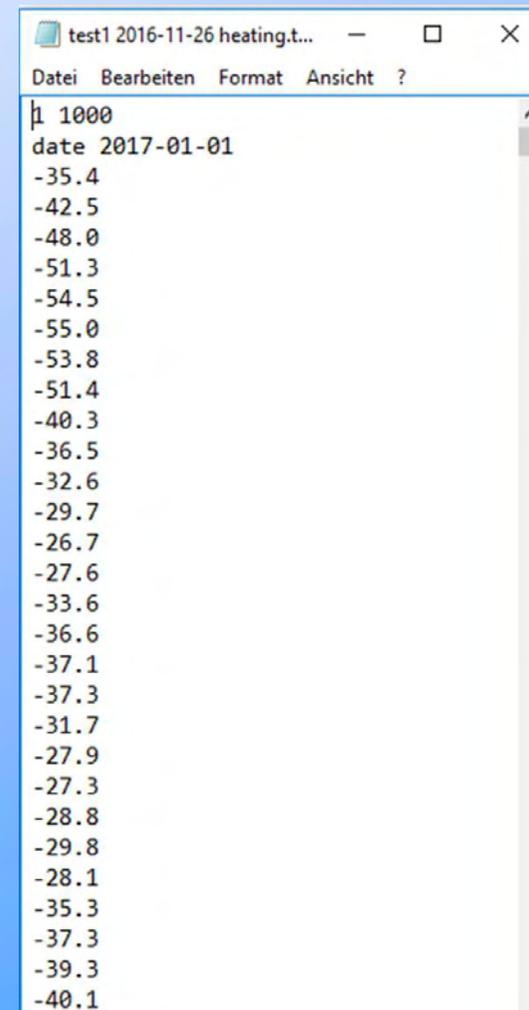
## EED 4 – Berechnung mit stündlichen Leistungswerten

Die neueste Version von EED erlaubt bei rein konduktiven Bedingungen eine Berechnung, die für die Soletemperaturen einer numerischen Simulation gleichkommt.

Dies geschieht durch Superposition von analytischen Berechnungen.

Eine Simulation der Temperaturen um die Sonden herum ist damit aber nicht möglich.

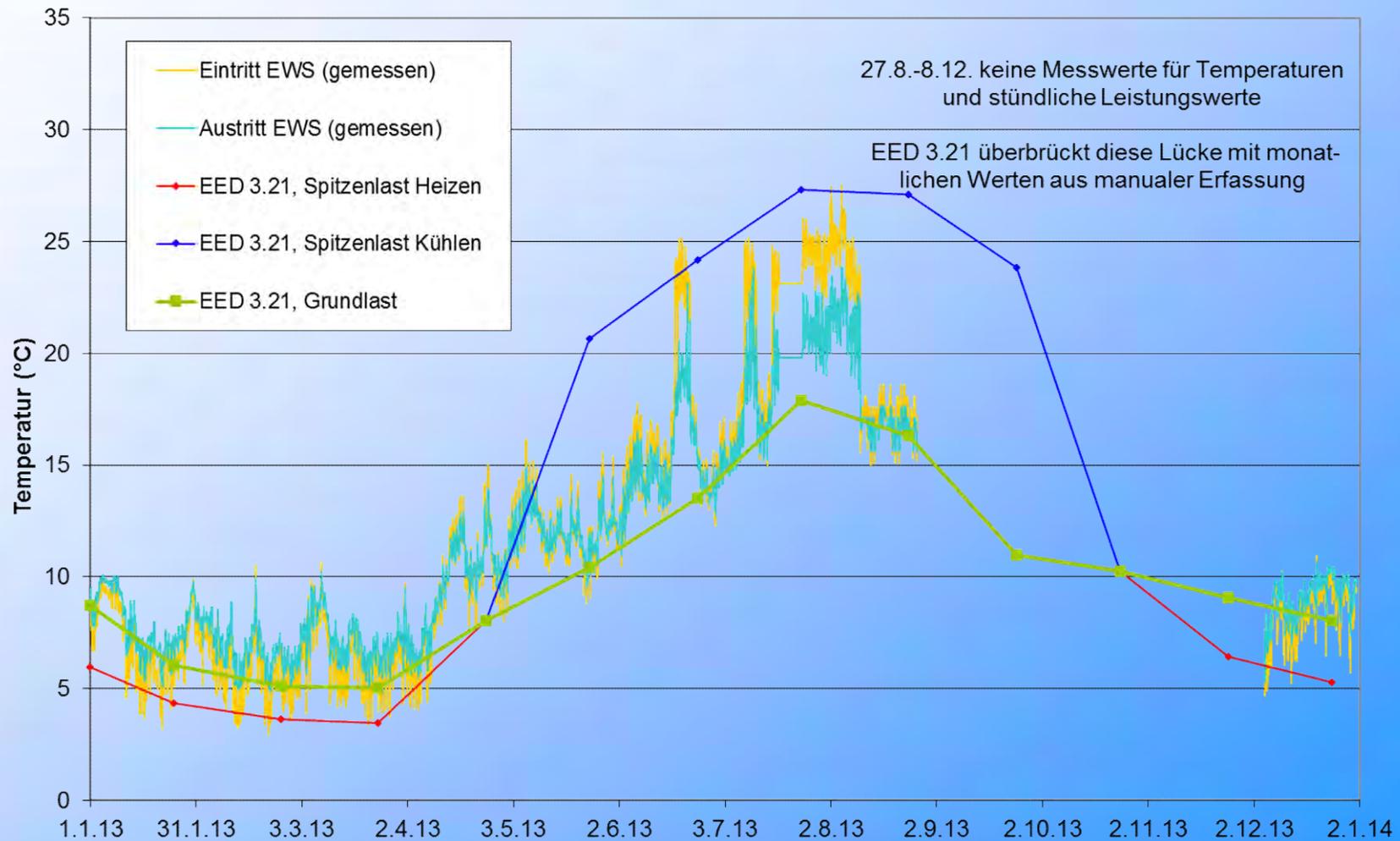
Beispiel für stündliche Leistungswerte Heizen bei EED 4



```
test1 2016-11-26 heating.t... - □ ×
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
| 1000
date 2017-01-01
-35.4
-42.5
-48.0
-51.3
-54.5
-55.0
-53.8
-51.4
-40.3
-36.5
-32.6
-29.7
-26.7
-27.6
-33.6
-36.6
-37.1
-37.3
-31.7
-27.9
-27.3
-28.8
-29.8
-28.1
-35.3
-37.3
-39.3
-40.1
```

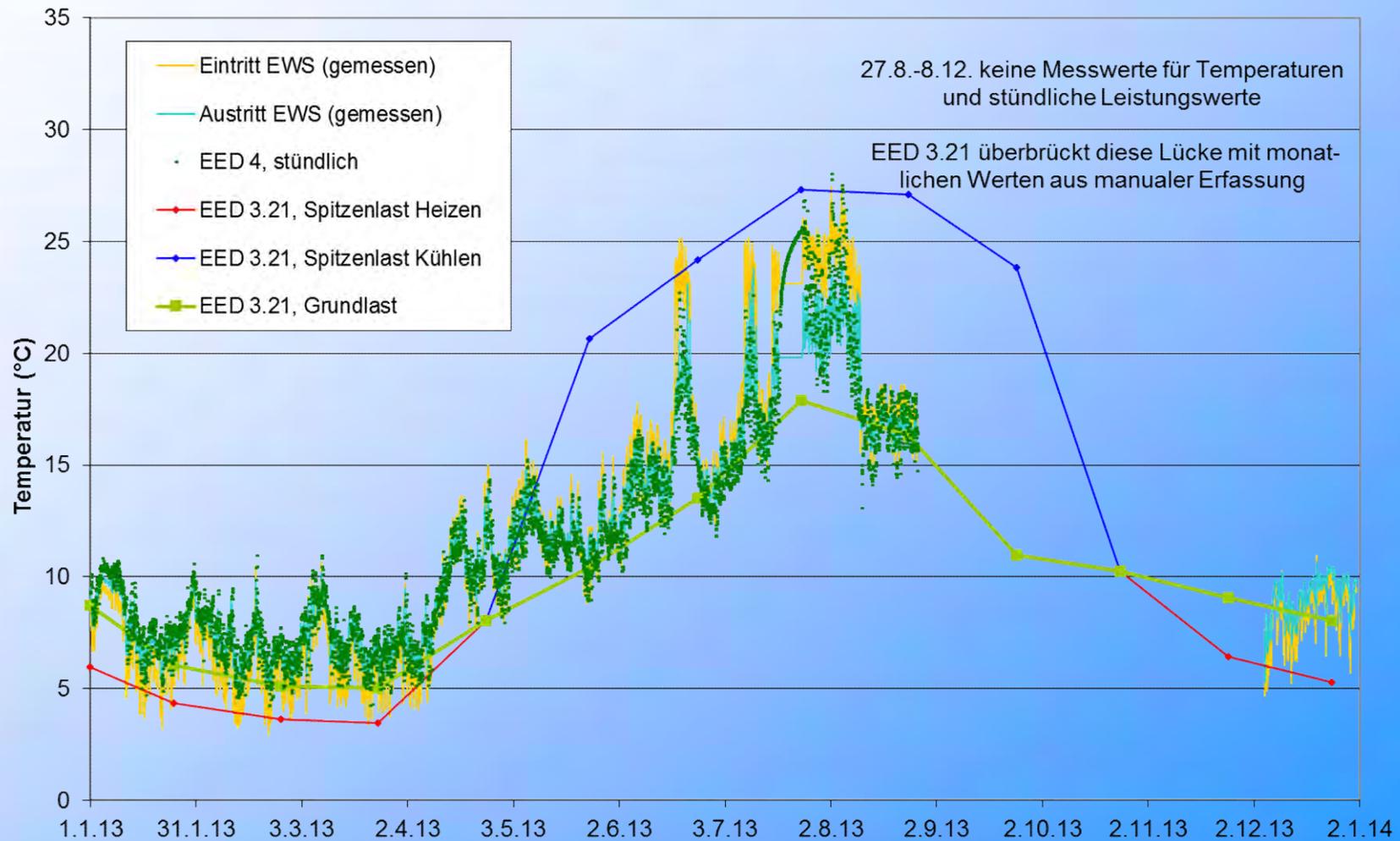
## EED 4 – Berechnung mit stündlichen Leistungswerten

### Erdwärmesondenanlage Gelsenwasser, Soletemperatur



## EED 4 – Berechnung mit stündlichen Leistungswerten

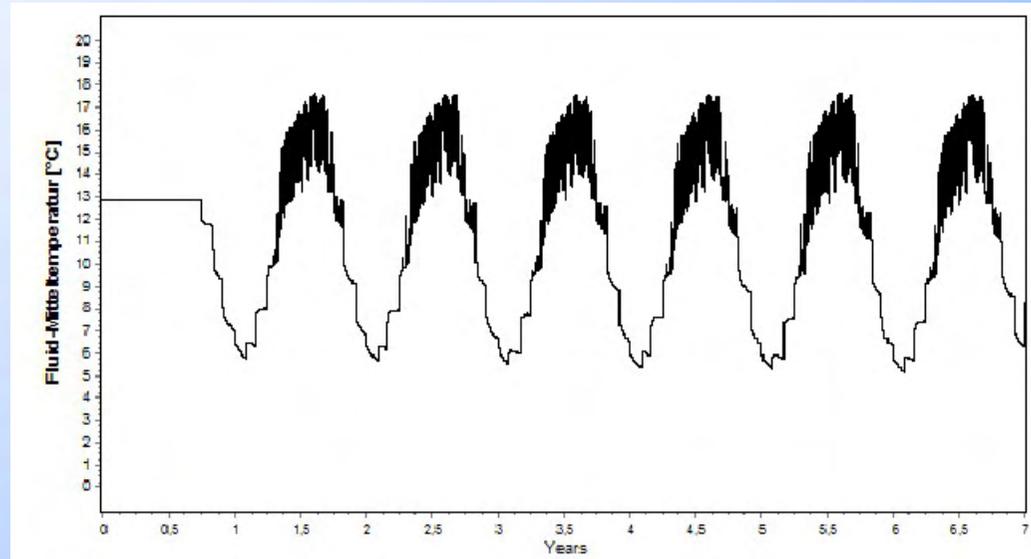
### Erdwärmesondenanlage Gelsenwasser, Soletemperatur



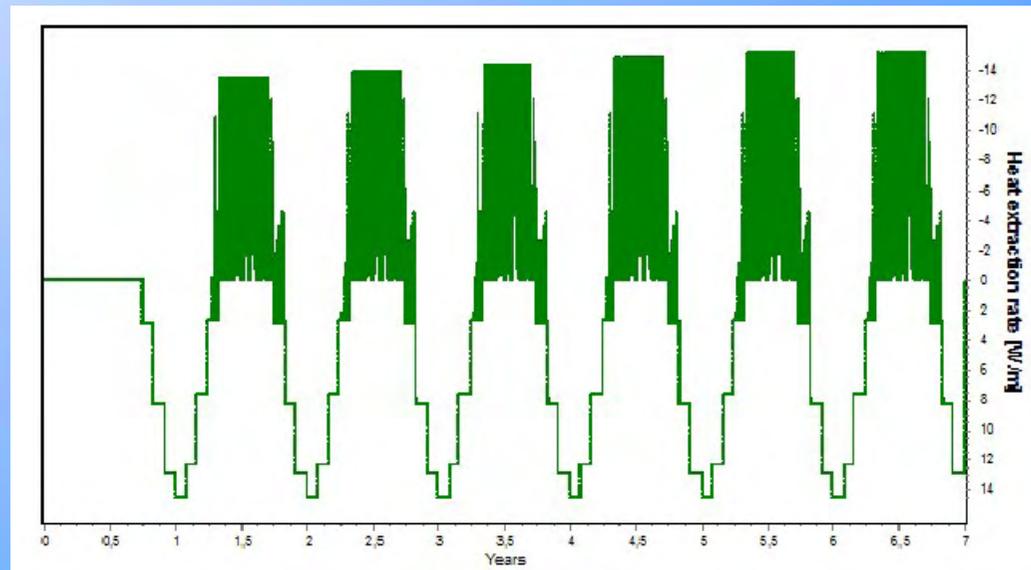
## EED 4 – Berechnung mit stündlichen Leistungswerten

Beispiel der Berechnung einer Erdwärmesondenanlage für Kühlzwecke mit winterlicher Kältespeicherung (monatliche Mittelwerte) und stündlichem Datenfile Kühlleistung

Soletemperatur



Spezifische Leistung



## Zusammenfassung

- Für Anlagen mit Grundwassernutzung sind numerischen Modelle gut geeignet. Wichtig ist eine gute Kalibrierung sowohl der hydraulischen als auch der thermischen Vorgänge, und die Berücksichtigung aller externen Einflüsse mit ihrem zeitlichen Verlauf.
- Für Erdwärmesonden sind numerische Modelle nur erforderlich, wenn deutliche Grundwasserbewegung vorliegt oder wenn die Ausbreitung von Temperaturänderungen im Untergrund erfasst werden soll.
- Erdwärmesonden werden in numerischen Modellen am besten als einzelne Module eingesetzt und nicht als einzelne Elemente des FE-Netzes aufgebaut.
- Durch Superposition von analytischen Berechnungen kann eine gute Vorhersage der Temperaturentwicklung in der Sole erfolgen, die wesentlich schneller ist als numerische Simulation; ein Beispiel hierfür ist das soeben erschienene EED 4.

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**



Die erste Briefmarke zur oberflächennahen Geothermie (2010)

## Literaturliste Vortrag Sanner et al., Geotherm 2017

- Allen, J.R. (1920): Theory of Heat Loss from Pipe Buried in the Ground. Journal ASHVE 26:455-469/588-596
- Angehrn, P., Hanke, J. & Lyons, T.C. (1985): Energetische Grundwasserbewirtschaftung im Kanton Nidwalden unter Verwendung des hydrothermischen Grundwasserströmungsmodells HYDOTHERM. - Wasser-Energie-Luft 77, H. 3/4, S. 70-74, Baden
- Blaude, P. (1979): Use of the Ground as a Cold Source for Heat Pump, Development of a Calculation Model. - Proc. Nordic Symposium of Earth Heat Pump Systems, S. 72-80, Göteborg
- Brehm, D.R. (1989): Entwicklung, Validierung und Anwendung eines dreidimensionalen, strömungsgekoppelten finite Differenzen Wärmetransportmodells. - Giessener Geologische Schriften 43, 120 S., Lenz-Verlag, Giessen
- Claesson, J. & Johansson, M. (1980): Continuous heat source model for ground heat storage. - SCBR D34:1980, Stockholm
- Claesson, J. (1987): Computer Models for and analysis of thermal processes in the ground. - Proc. WS on GSHP Albany, Rep. HPC-WR-2, pp. 201-204, Karlsruhe
- Claesson, J. & Eskilson, P. (1988): PC Design Model for Heat Extraction Boreholes. - Proc. 4th int. Conf. Energy Storage JIGASTOCK 88, S. 135-137, AFME, Paris
- Crandall, A.C. (1946): House Heating with Earth Heat Pump. - Electrical World 126/19, S. 94-95, New York
- Eskilson, P. (1986): Superposition Borehole Model. - University of Lund, Lund
- Gilby, D.J. & Hopkirk, R.J. (1985): The coaxial vertical heat probe with solar recharge, numerical simulation and performance evaluation. - Proc. 2nd WS on SAHPGCS Wien, S. 443-456, Ispra
- Guernsey, E.N., Betz, P.L. & Skau, N.H. (1949): Earth as a heat source and storage medium for the heat pump. ASHVE Trans. 55:321-344
- Hellström, G. (1983): Comparison between theoretical models and field experiments for ground heat systems. - Proc. Int Conf Subs Heat Storage, S. 102-115, SCBR, Stockholm
- Hooper, F.C. (1952): An Experimental Residential Heat Pump. - Canadian Journal of Technology 30, S. 180-197, Ottawa
- Ingersoll, L.R. & Plass, H.J. (1948): Theory of the ground pipe source for the heat pump. ASHVE Trans. 54:339-348
- Ingersoll, L. R., Adler, F.T., Plass, H.J. & Ingersoll, A.C. (1950): Theory of earth heat exchangers for the heat pump. ASHVE Trans. 56:167-188
- Kangas, M.T., Lund, P.D. & Laitinen, T. (1985): Comparison of Long-Term ATES Experiments to 3-D Computer Simulations. - Proc. 3rd Int. Conf. Energy Storage ENERSTOCK 85, S. 90-94, PWC, Ottawa
- Lund, P.D. & Östman, M.B. (1985): A numerical model for seasonal storage of solar heat in the ground by vertical pipes. - Solar Energy Vol. 14, S. 351-366, Oxford
- Matthey, B. (1979): Interseasonal Heat Accumulators in the Ground for Solar Energy, Results of Numerical Simulations. - Proc. Nordic Symposium of Earth Heat Pump Systems, S. 236-246, Göteborg
- Mogensen, P. (1987): Small Computer Programs for GSHP Design. - Proc. WS on GSHP Albany, Rep. HPC-WR-2, pp. 159-171, Karlsruhe
- Neiss, J. & Winter, E.R.F. (1976): Analyse der instationären Wärmeleitung zwischen den Wärmetauscherrohren einer Wärmepumpe und dem Erdreich. - Wärme- und Stoffübertragung 9, S. 39-48

- Newman, A.B. (1931): Temperature Distribution in Internally Heated Cylinders. - Industrial and Engineering Chemistry 23, S. 19
- Pelka, W. (1983): Numerical Method for Calculating Heat Transport in Saturated-Unsaturated Groundwater Flow. - Proc. Int Conf Subs Heat Storage, S. 469-475, SCBR, Stockholm
- Pelka, W. & Daniels, H. (1986): Die Berechnung der Wärmeausbreitung im Grundwasser. - Z. Angew. Geowiss. H. 7, S. 101-128, Giessen
- Runesson, K., Wirberg, N.-E. & Andersson, O. (1979): Energy Transport and Energy Storage in Earth analysed by the Finite Element Method. - Proc. Nordic Symposium of Earth Heat Pump Systems, S. 226-235, Göteborg
- Sanner, B. & Brehm, D.R. (1988): Measurement and simulation of heat transport in rocks at a site in the Rhenish Massif, FRG. - Proc. 4th Can/Am Conf Hydrogeology, Banff, S. 279-283, National Water Well Assoc., Dublin OH
- Sørensen, S., Reffstrup, J. & Qvale, B. (1988): Full-Scale Experimental Evaluation of Simplified Mathematical Reservoir Models for single- and double-well Groundwater Heat Pumps and low-temperature Aquifer Heat Stores. - Proc. 4th int. Conf. Energy Storage JIGASTOCK 88, S. 97-99, AFME, Paris
- Wijsman, A.J.T.M. & van Meurs, G.A.M. (1985): Validation of "Duct-Store" Models with Experimental Data from the Groningen Project. - Proc. 3rd Int. Conf. Energy Storage ENERSTOCK 85, S. 295-299, PWC, Ottawa