



Modellierung von Kälte- und Wärmefahnen in der oberflächennahen Geothermie

Philipp Blum, Valentin Wagner, Jozsef Hecht-Méndez, Peter Bayer

INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN
ABTEILUNG INGENIEURGEOLOGIE



KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

www.kit.edu

Übersicht

1. Einführung

- Zunahme der Anlagen
- Mindestabstände

2. Methoden

- Analytische Lösungen
- Numerische Modelle

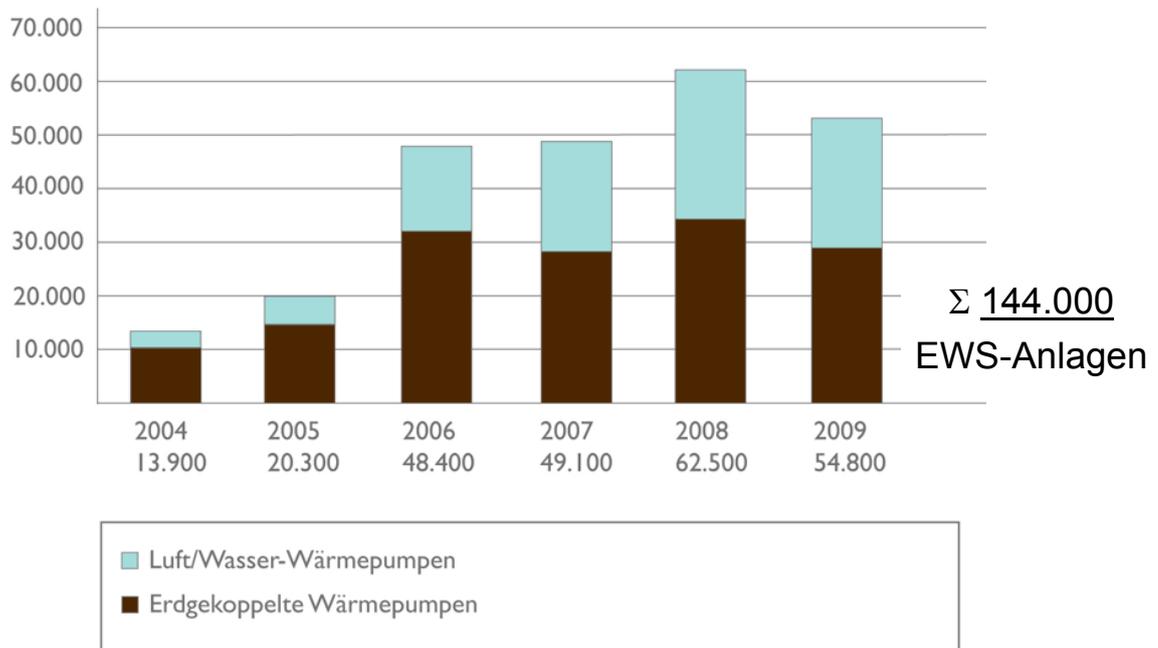
3. Validierung

- VEGAS / Bad Wurzach
- Testfeld Kilchberg

4. Zusammenfassung

Permanent hohe Absatzzahlen in Deutschland

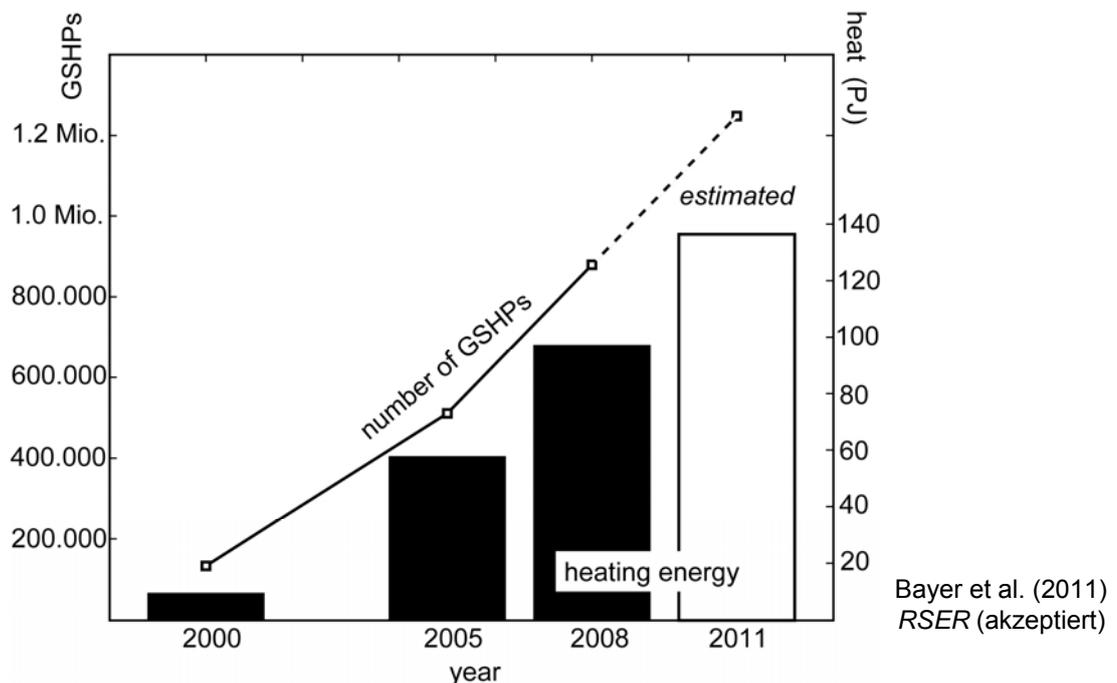
Absatzzahlen von Heizungswärmepumpen in Deutschland von 2004 bis 2009



Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. (2010)

Zunahme der Absatzzahlen in Europa

Anzahl an Erdwärmesonden in 19 europäischen Ländern



In Europa sind derzeit bereits > 900.000 EWS-Anlagen installiert!

Unterschiedliche Mindestabstände

Grenz- und Mindestabstände in Deutschland



Wie lang werden die Kältefahrten?
Ist mein Grundstück groß genug?
Besteht ein Konflikt mit anderen Anlagen?

⇒ Grenz- und Mindestabstände

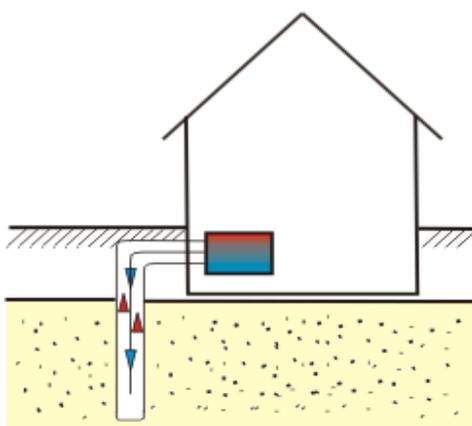
Grenzabstände: 5 m (z. B. Hessen)

Sondenabstände: 3 m (Saarland)
bis 10 m (z. B. Baden-Württemberg)

Hähnlein et al. (2010, 2011) *Grundwasser*

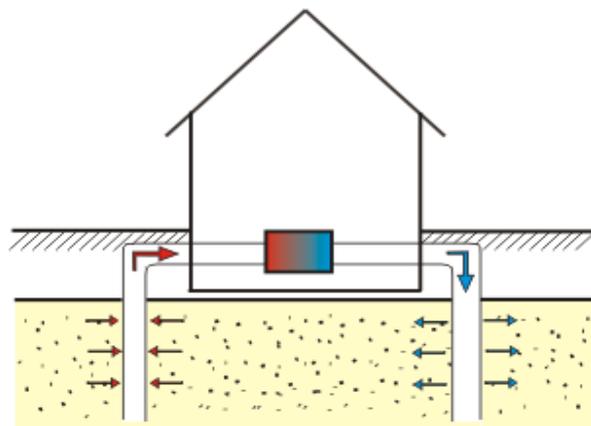
Untiefe geothermische Anlagen

Geschlossene Systeme



Erdwärmesonden

Offene Systeme



Grundwasserwärmepumpen

Analytische und numerische Modelle

Geschlossene Systeme

Offene Systeme

Analytische Lösungen

- Linienquellen

Analytische Lösungen

- Leitfaden BW (2009)
- Ingerle (1998) / Rauch (1992)

Verifizierung und Validierung!

Numerische Modelle

- MODFLOW MT3DMS
- SEAWAT
- FEFLOW

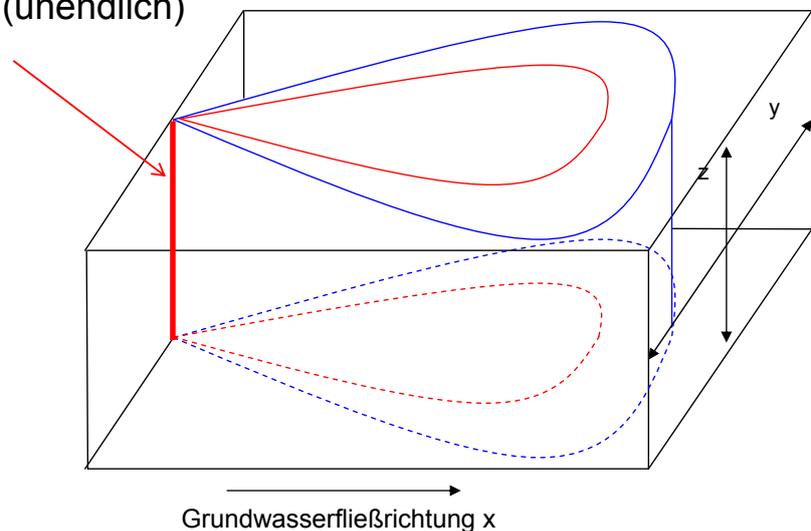
Numerische Modelle

- MODFLOW MT3DMS
- SEAWAT
- FEFLOW

Analytische Lösung für geschlossene Systeme

Linienquelle

- Geschlossene Systeme (Erdwärmesonden)
- 2D und 3D
- Vertikale **Linienquelle** (unendlich)
- Konvektion
- Wärmedispersion



Kältefahnen für geschlossene Systeme

Fahnenlänge

$$x = \left(\frac{F_0^2}{8\pi(\rho_m c_m)^2 D_y v_T \Delta T^2} \right) \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{8\pi(\rho_m c_m)^2 D_y^2 \Delta T^2}{q_L^2}} \right)$$

x	Fahnenlänge	[m]
F_0	Wärmeentzug	[W/m]
v_T	Thermische Geschwindigkeit	[m/s]
n	Porosität	[-]
c_m	Wärmekapazität des Mediums	[J/(m ³ K)]
ρ_m	Dichte des Mediums	[kg/m ³]
D_y	Wärmedispersionskoeffizient	[m ² /s]
ΔT	Temperaturdifferenz	[K]
α_t	Transversale Dispersivität	[m]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]

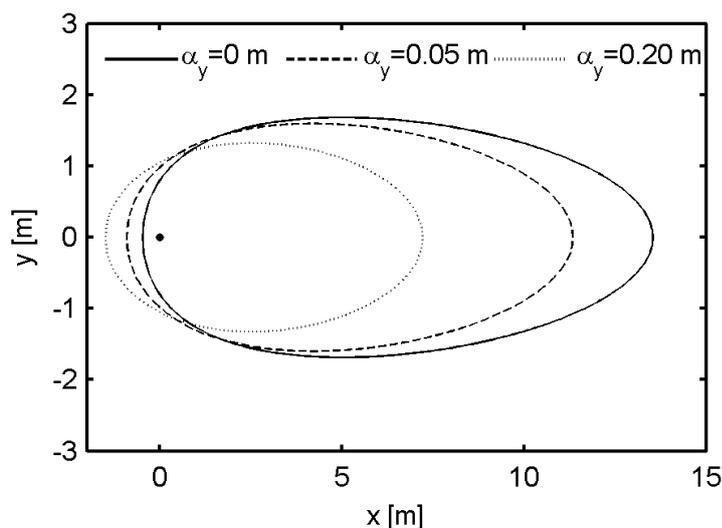
$$D_y = \frac{\lambda}{\rho_m c_m} + \alpha v_T$$

Konduktion
Konvektion

Molina-Giraldo et al. (2011a) *International Journal of Thermal Sciences*

Kältefahnen für geschlossene Systeme

Fahnenlänge

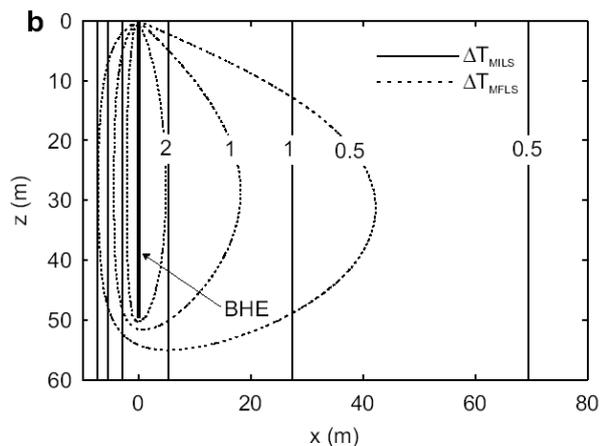
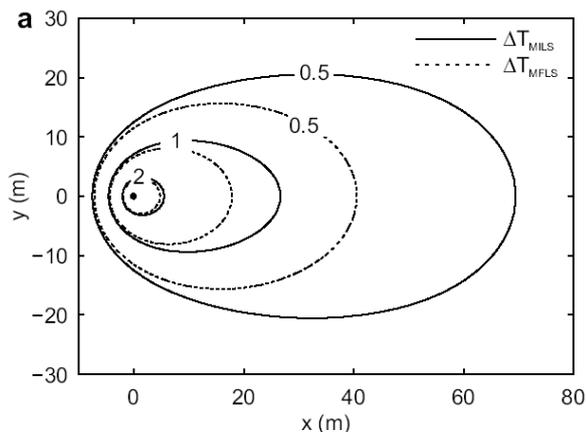


Grobsand: $\lambda = 2.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\Delta T = 1 \text{ K}$, $F_0 = 60 \text{ W m}^{-1}$, $q = 2.0 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$

Molina-Giraldo et al. (2011a) *International Journal of Thermal Sciences*

Kältefahrten für geschlossene Systeme

Moving finite line source model (axiale Effekte)



50 m lange Erdwärmesonde

Sand: $\lambda = 2.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $F_0 = 60 \text{ W m}^{-1}$, $Pe = 8$;

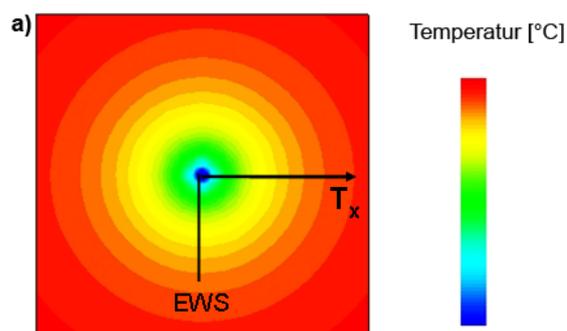
Molina-Giraldo et al. (2011b) *International Journal of Thermal Sciences*

Verifizierung anhand der analytischen Lösung

MODFLOW MT3DMS

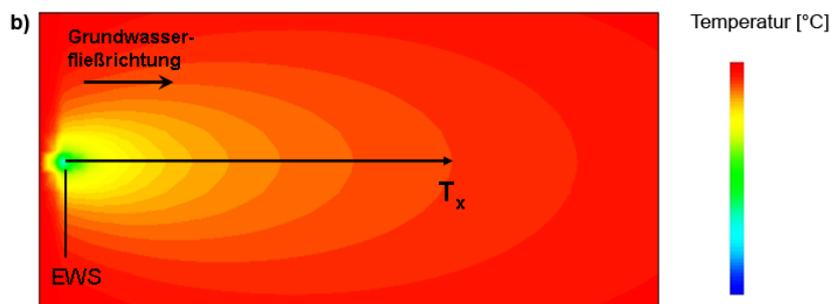
Konduktion

Wärmeleitung, Wärmediffusion



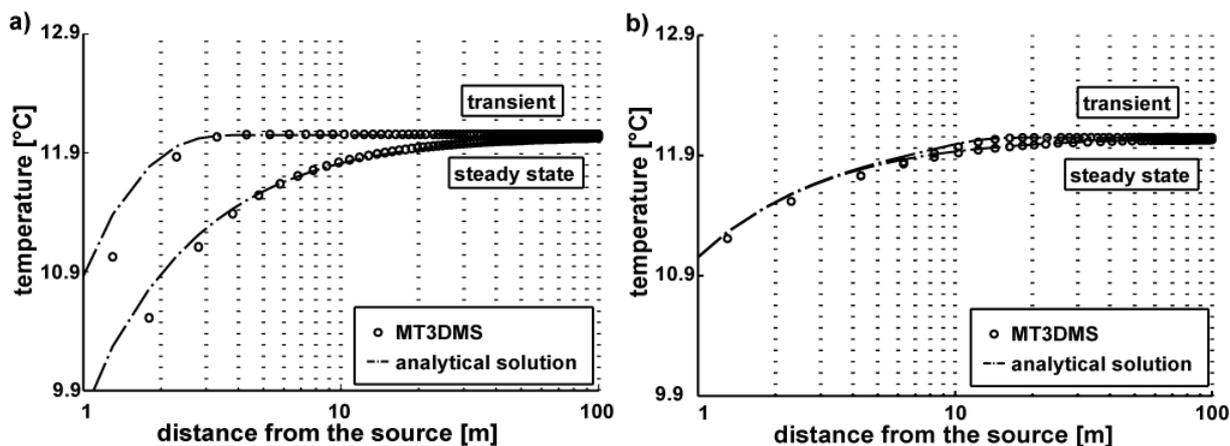
Konvektion

Wärmeaustausch durch Konvektionsstrom



Verifizierung anhand der analytischen Lösung

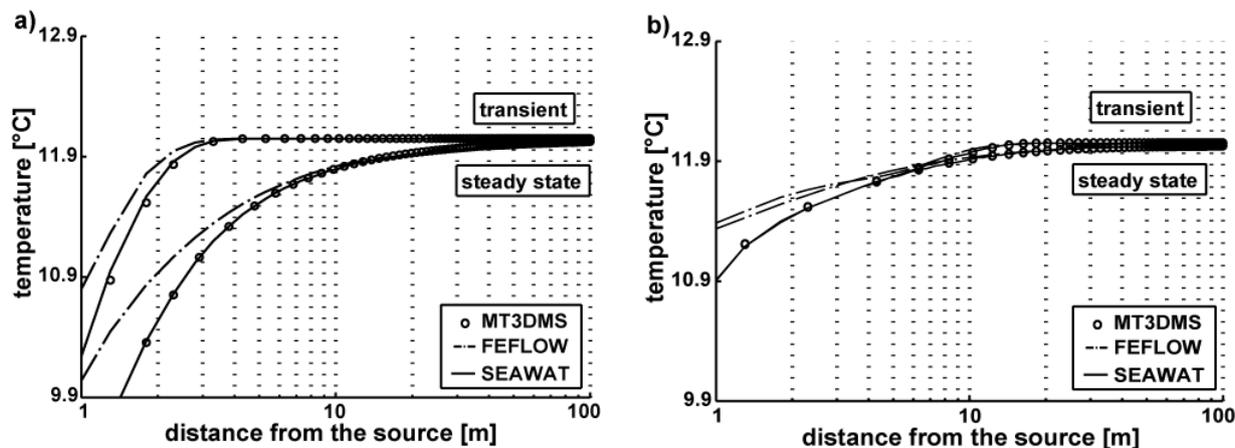
MODFLOW MT3DMS



Hecht-Méndez et al. (2010) *Ground Water*

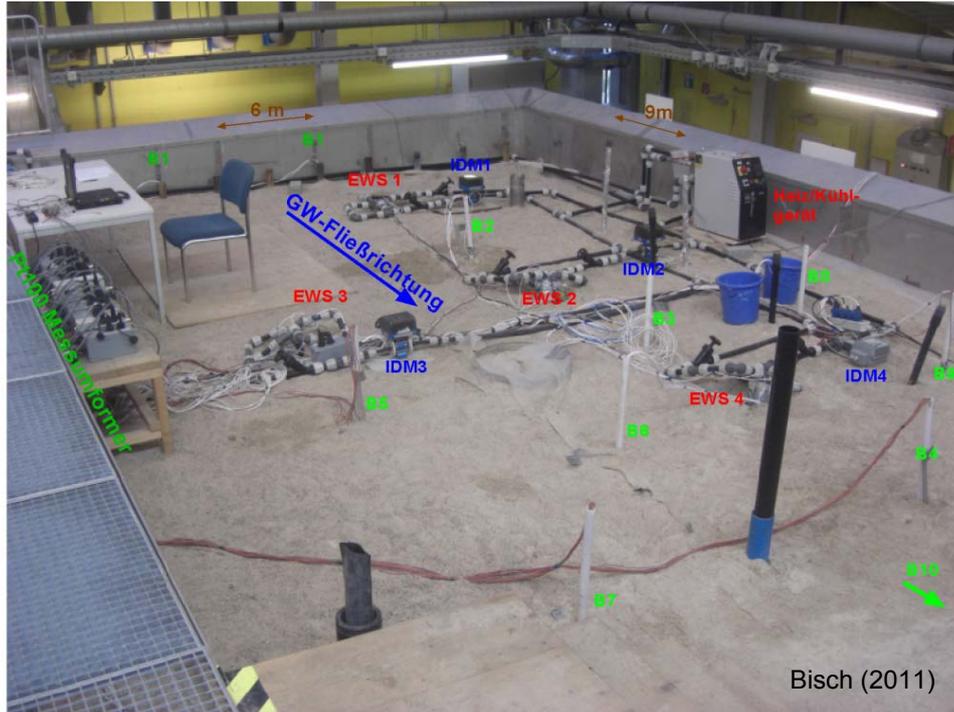
Verifizierung anhand numerischer Modelle

MODFLOW MT3DMS

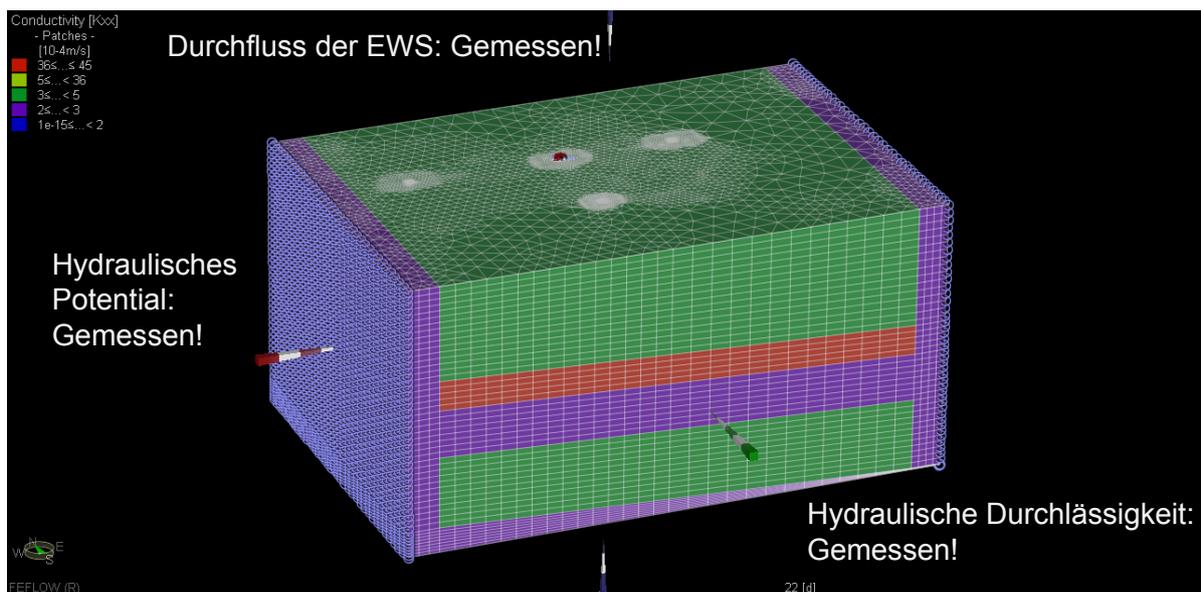


Hecht-Méndez et al. (2010) *Ground Water*

Validierung der Modelle durch Tankexperimente in VEGAS

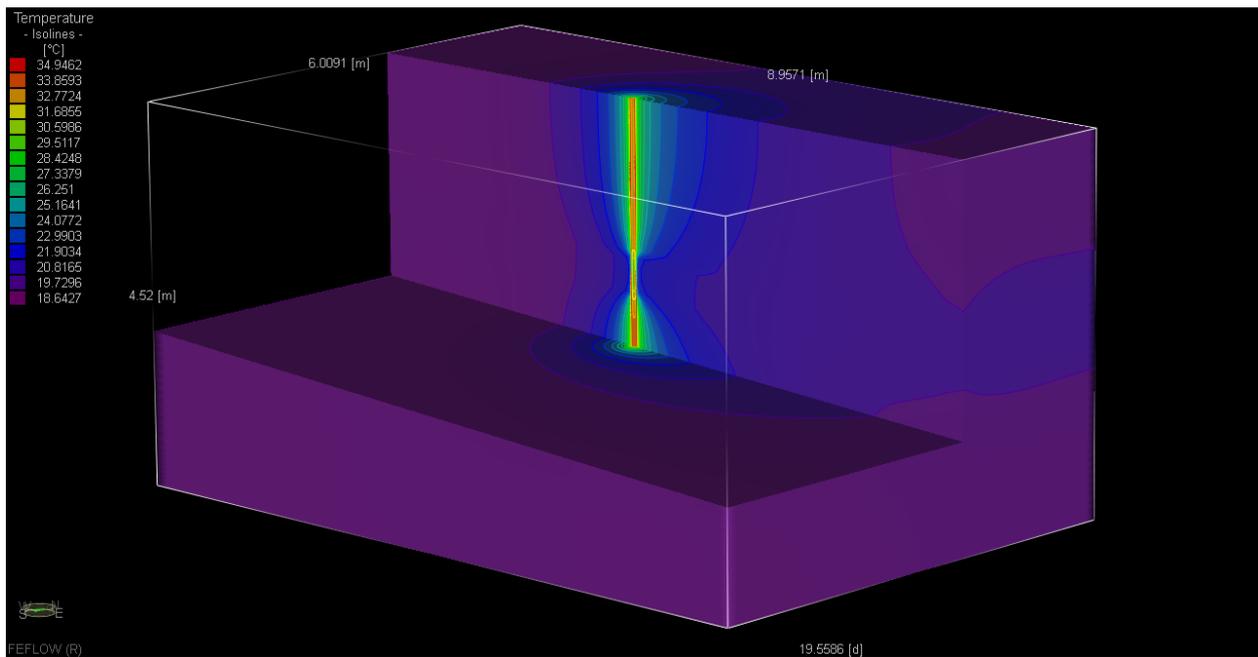


Validierung der Modelle (FEFLOW) durch Tankexperimente in VEGAS



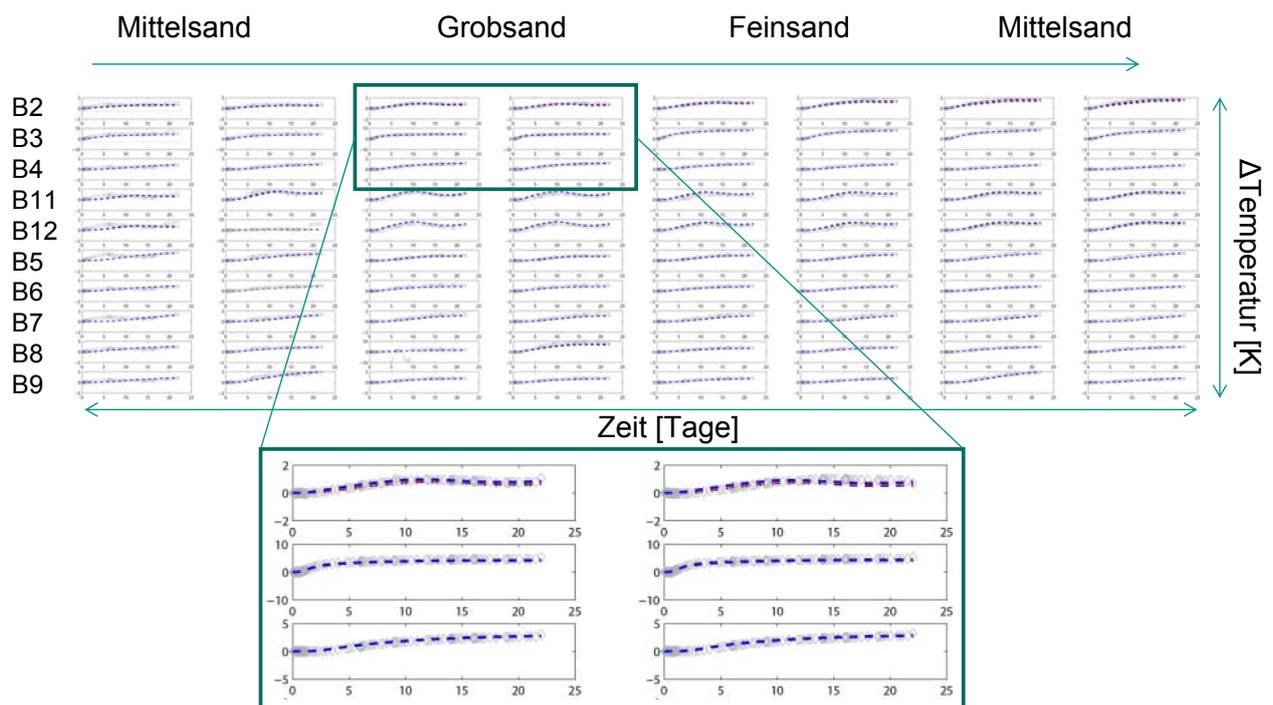
Validierung der Modelle (FEFLOW)

durch Tankexperimente in VEGAS

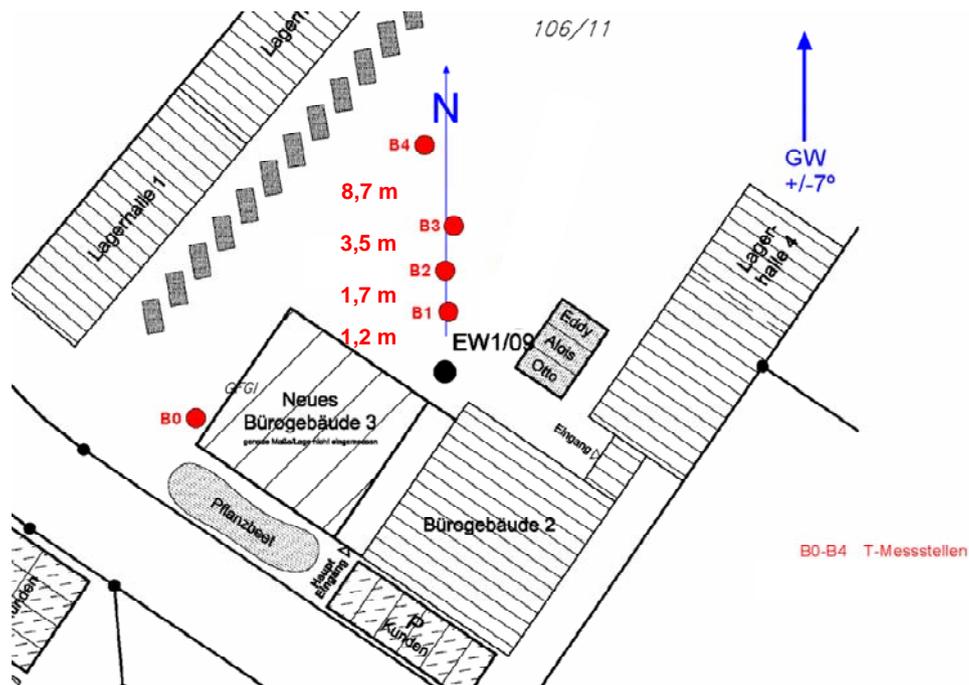


Validierung

Vergleich der Modelresultate mit den Messergebnissen



Validierung der Modelle mit dem Testfeld in Bad Wurzach



Analytische und numerische Modelle

Geschlossene Systeme

Analytische Lösungen

- Linienquellen ✓

Numerische Modelle

- MODFLOW MT3DMS ✓
- SEAWAT ✓
- FEFLOW ✓

Offene Systeme

Analytische Lösungen

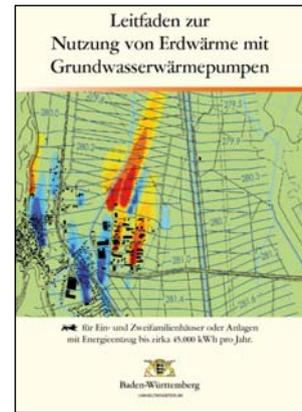
- Leitfaden BW (2009)
- ÖWVA (2009)

Numerische Modelle

- MODFLOW MT3DMS
- SEAWAT
- FEFLOW

Kältefahren offener Systeme

Leitfaden Baden-Württemberg (2009)



- 2D
- Stationär/Instationär
- Konvektion
- Wärmedispersion

$$\Delta T(x, y, t) = \frac{Q\Delta T_E}{4n_f m v_a \sqrt{\pi\alpha_T}} \cdot \exp\left(\frac{x-r}{2\alpha_L}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r - v_a t / R}{2\sqrt{v_a \alpha_L t / R}}\right)$$

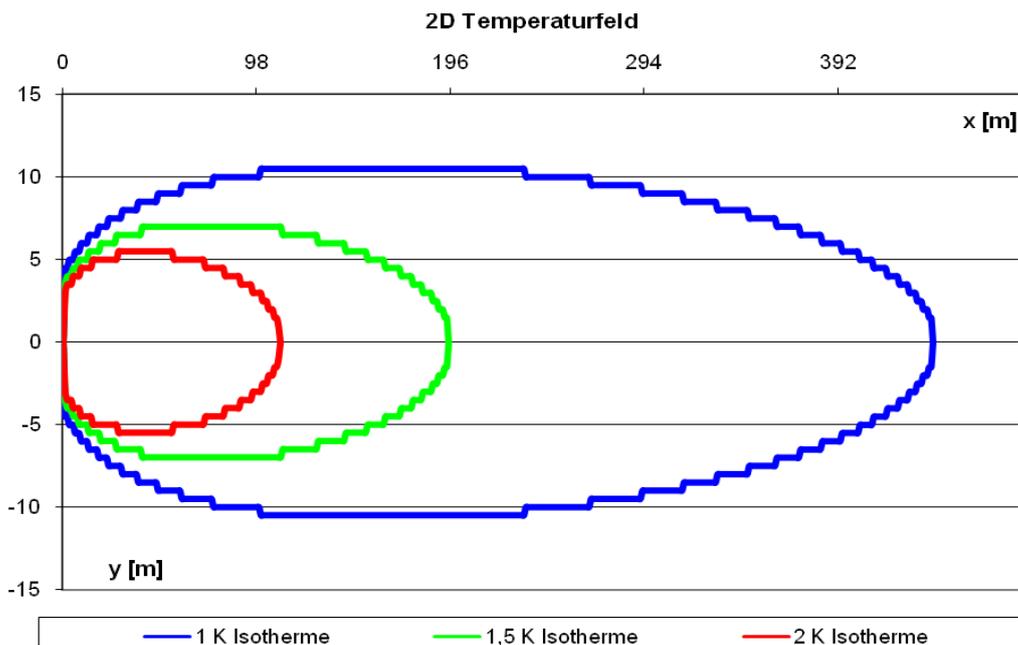
mit: $r = \sqrt{x^2 + y^2} \frac{\alpha_L}{\alpha_T}$

Kinzelbach (1987)

$v_a > 1$ m pro Tag; Oberflächeneinfluss und Brunnenausbau!

Kältefahren offener Systeme

Leitfaden Baden-Württemberg (2009)



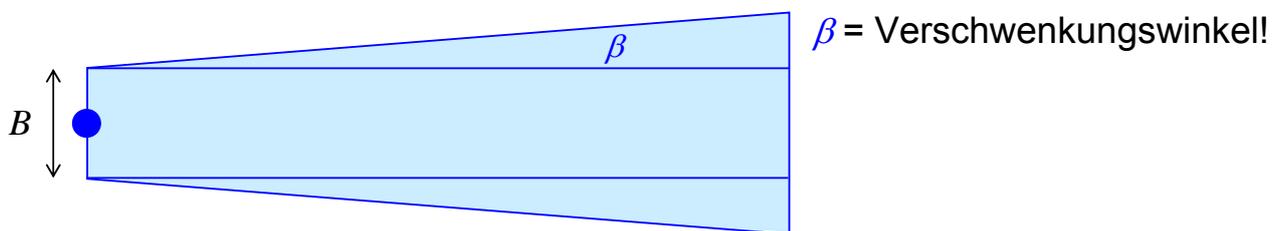
Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH

Kältefahnen offener Systeme

Regelblatt 207 (ÖWAV) nach Rauch (1992) und Ingerle (1988)

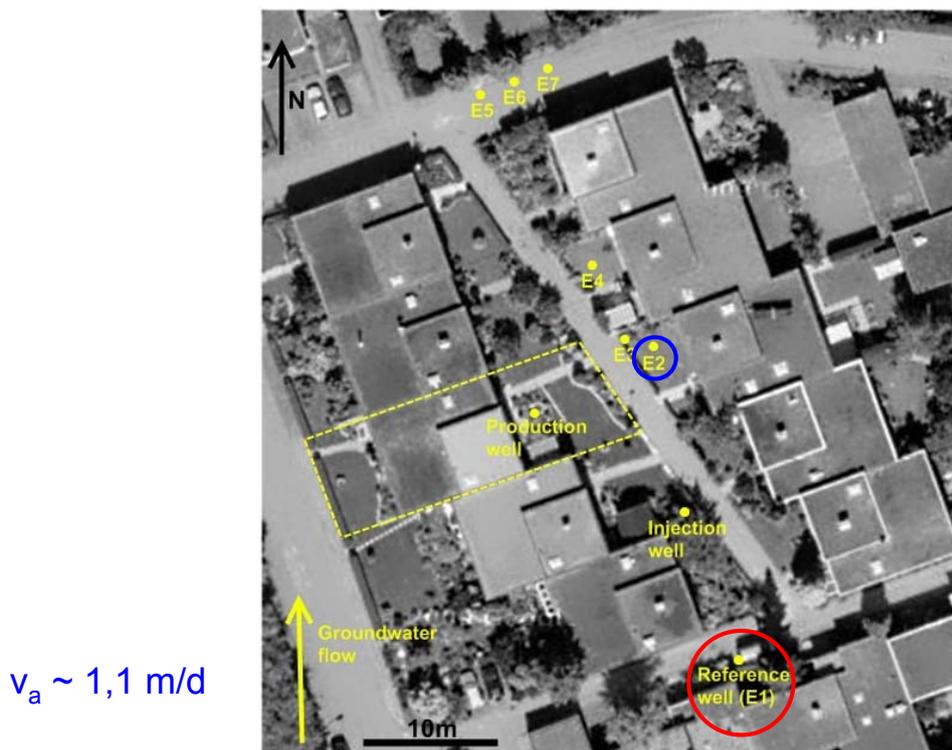
- Offene Systeme (Grundwasserwärmepumpen)
- 2D
- Ingerle (1988) betrachtet auch den vertikalen Wärmeeintrag (w_i)
- Regelblatt 207, ÖWAV (Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband):

$$T_{i+1} = \frac{T_i \cdot \left(B_i - \frac{w_i}{2} \right) + T_u \cdot (2 \cdot \Delta x \cdot \tan \beta + w_i)}{\left(B_{i+1} + \frac{w_i}{2} \right)}$$



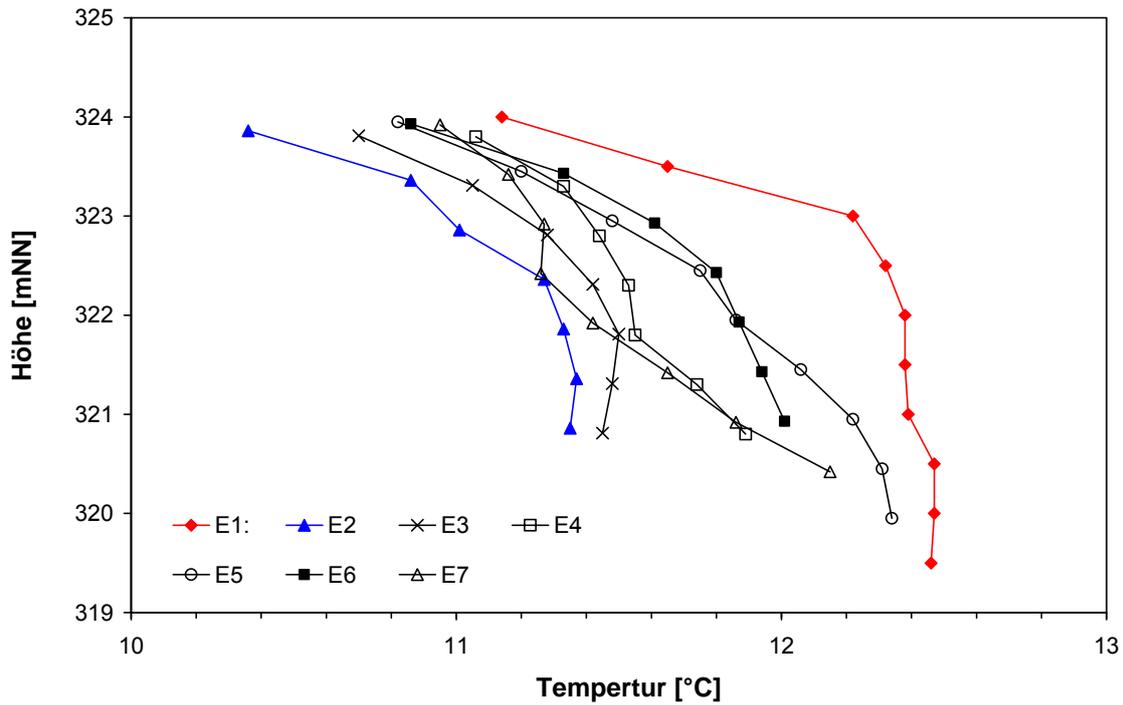
Testfeld Kilchberg bei Tübingen

Messstellen und vermutete Grundwasserfließrichtung



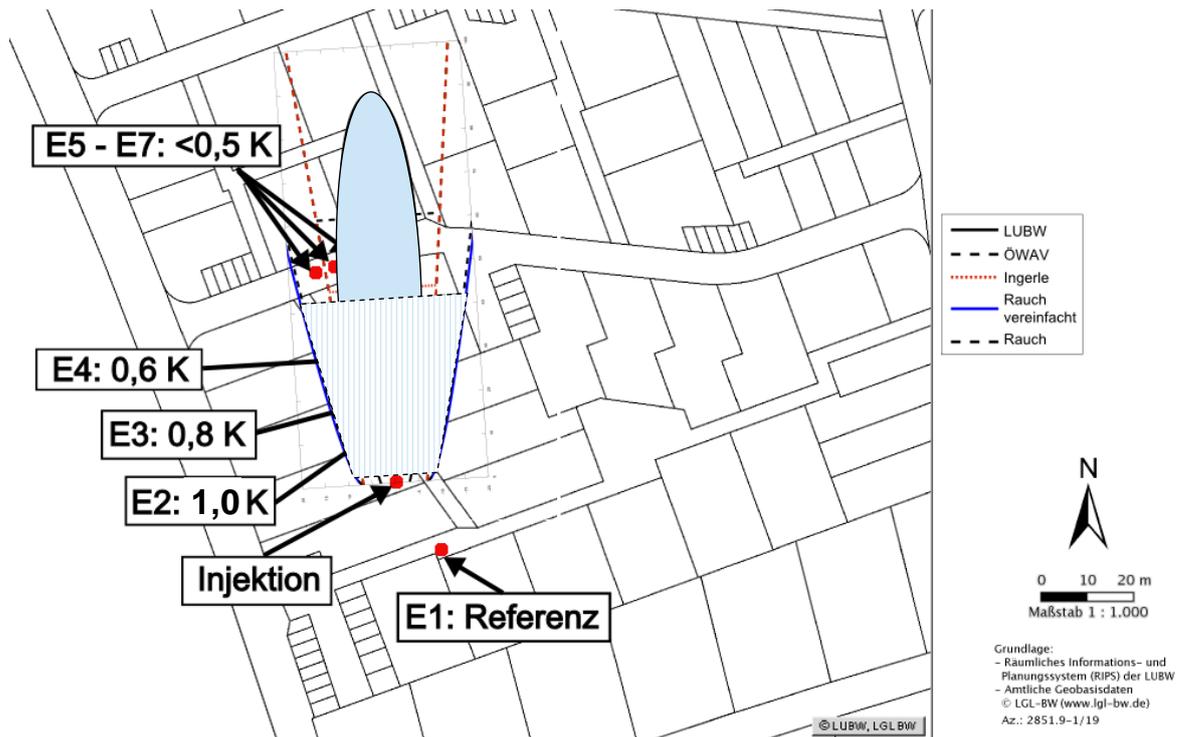
Testfeld Kilchberg bei Tübingen

Vertikale Grundwassertemperaturprofile vom 8. März 2010
(E1 = Referenzmessstelle)



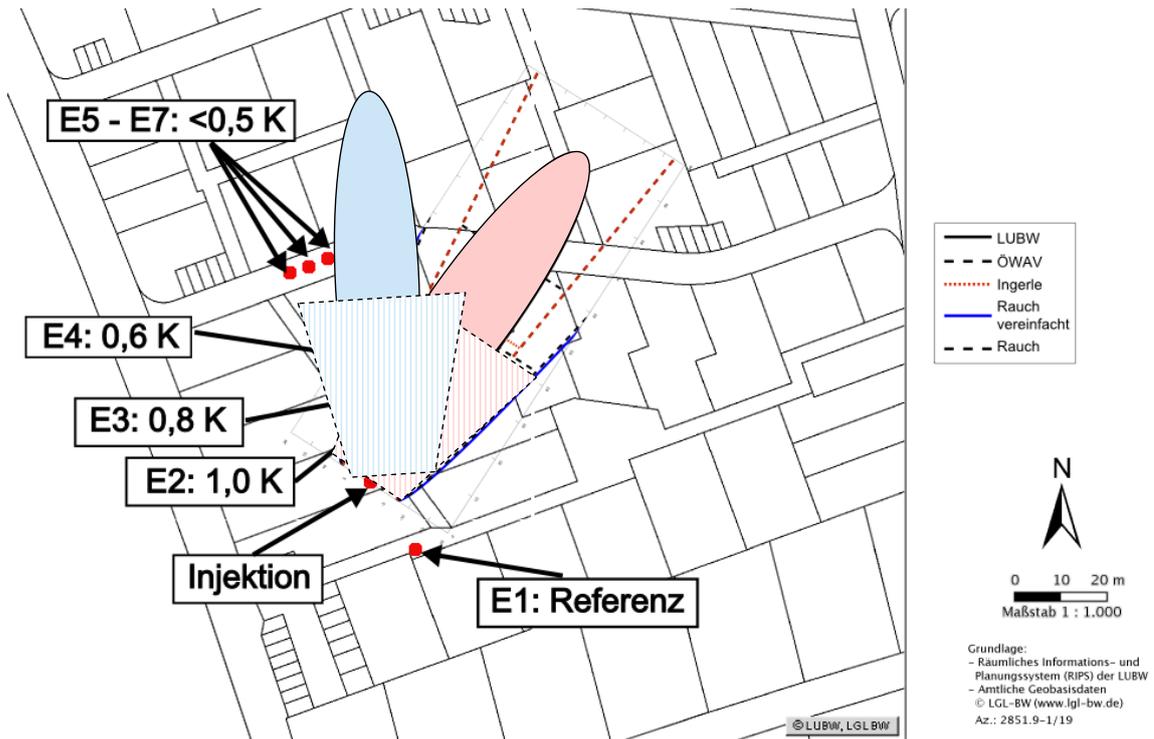
Validierung im Feld

„Amtliche“ Grundwasserfließrichtung



Validierung im Feld

„Tatsächliche“ Grundwasserfließrichtung!



Analytische und numerische Modelle

Geschlossene Systeme

Offene Systeme

Analytische Lösungen

- Linienquellen ✓

Analytische Lösungen

- Leitfaden BW (2009) ✓
- ÖWVA (2009) ✓

Numerische Modelle

- MODFLOW MT3DMS ✓
- SEAWAT ✓
- FEFLOW ✓

Numerische Modelle

- MODFLOW MT3DMS
- SEAWAT
- FEFLOW

Zusammenfassung

- Analytische Lösungen für geschlossene als auch offene Systeme vorhanden;
- Die vorhandenen analytischen Lösungen wurden weiterentwickelt (z. B. thermische Dispersion, axiale Effekte);
- Die Validierung der analytischen und numerischen Modelle wurde im Technikum (VEGAS) und im Feld (offenes System in Kilchberg) durchgeführt;
- Grundwassertemperaturen wurden in Kilchberg gemessen. Diese zeigen eine Abkühlung von ~ 1 K im Abstand von 18 m;
- Die Validierung der analytischen Lösungen (offene Systeme) ist jedoch nur bedingt möglich!
 - Die simulierte Temperaturanomalie ist stark abhängig vom gewählten Modellansatz (LUBW und ÖWAV);
 - Eine große Unsicherheit ist jedoch auch die tatsächlich lokale Grundwasserfließrichtung!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

