

Dipl.-Ing. Thomas Reimann Dr. Tobias Geyer Dr. Christoph Rehl
 Prof. Dr. Rudolf Liedl Prof. Dr. Martin Sauter Prof. Dr. Steffen Birnbaum
TU Dresden Uni Göttingen Uni Graz

Anwendung von Hybridmodellen in Karstgrundwasserleitern

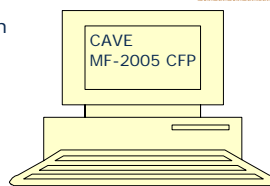
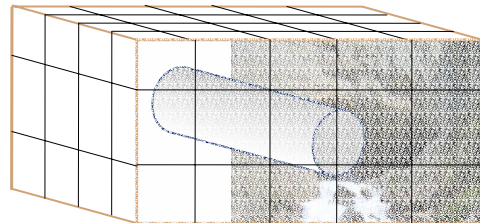
Überblick – Software Evaluierung - Anwendungsbeispiele

Numerische GrundwasserModellierung:
 Konzeption, komplexe Anwendung, Entscheidungsgrundlage – Graz, 24. Juni 2008

Anwendung von Hybridmodellen Schwerpunkte des Vortrags

Hybridmodelle

- Modellkonzept und Übersicht zu Modellwerkzeugen
- Evaluierung zweier Modelle
 - CAVE
 - MODFLOW-2005 CFP
- Anwendungsbeispiele
 - Charakterisierung von Karstgrundwasserleitern
 - Karstgenese



Afgar-Quelle (Foto T. Geyer)



1. Hybridmodelle für Karst-Grundwasserleiter

Überblick

Karstgrundwasserleiter

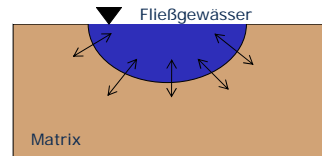
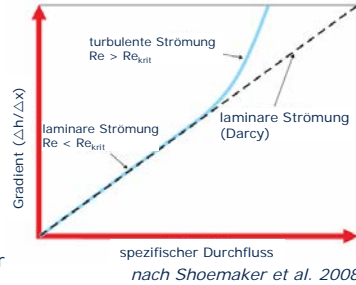
- duales Fließsystem (Röhren ↔ Matrix)
- laminare und turbulente Strömung
- Hybridmodelle

Modelle aus anderen Anwendungen:

- Interaktion Grundwasser – Oberflächenwasser
 - Modbrnch (Modflow – Branch; USGS)
- Interaktion Grundwasser – Kanalisation
 - MIKE SHE / MOUSE

Hybridmodelle für Karstgrundwasserleiter

- CAVE (Carbonate Aquifer Void Evolution)
- MODFLOW-2005 CFP



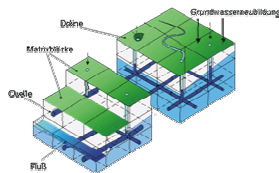
Thomas Reimann

Graz - 24. Juni 2008
3/19

1. Hybridmodelle für Karstgrundwasserleiter

Modellkonzept CAVE / MODFLOW-2005 CFP

Hybridmodell – Kontinuum und diskrete Struktur



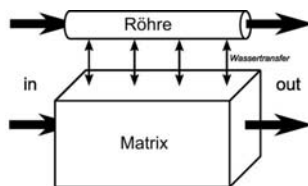
Matrix $\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$ Darcy

Röhrensystem

laminar $v = -\frac{r^2}{8} \frac{\rho g}{\mu} I$ Hagen Poiseuille

turbulent: $v = -2 \log \left(\frac{k_c}{3.71 \cdot d} + \frac{2.51 \cdot \nu}{d \cdot \sqrt{2g \cdot d \cdot I}} \right) \cdot \sqrt{2g \cdot d \cdot I}$ Darcy-Weisbach

Transfer $Q_{ex} = \alpha \cdot (h_c - h_m)$



Zusätzliche Modellparameter

- Röhren: Durchmesser / Rauigkeit / Lage
- Transferkoeffizient α
- Verteilung Grundwasserneubildung (direkt / diffus)

Thomas Reimann

Graz - 24. Juni 2008
4/19

1. Hybridmodelle für Karstgrundwasserleiter

Focus: CAVE / CFP

	CAVE	MODFLOW-2005 CFP
Autoren	Clemens, Hückinghaus, Birk, Bauer, Liedl, Sauter	Shoemaker et al. (USGS)
Röhren	1D Strömung, Vollfüllung - laminar - turbulent	1D Strömung, Vollfüllung - laminar - turbulent
Matrix	3D Kontinuum (MODFLOW96) - laminar	3D Kontinuum (MODFLOW2005) - laminar - turbulente Strömung möglich
Transport	1D Transport in Röhren - Advektion / Dispersion /Diff. - Wärme	-
Besonderheiten	Karstgenese, Epikarst, lange Zeiträume	Turbulente Strömung im Kontinuum, teilgefüllte Röhren

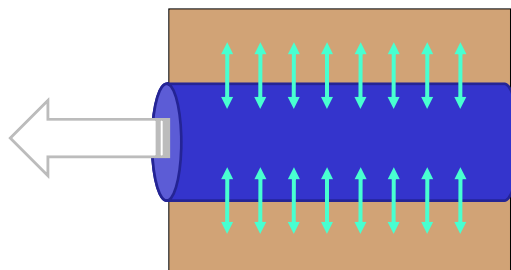
- Pre- / Postprocessing eingeschränkt
- keine Anschaffungskosten

USGS TM 6 / A14 release 04/2008

2. Validierung von CAVE und CFP

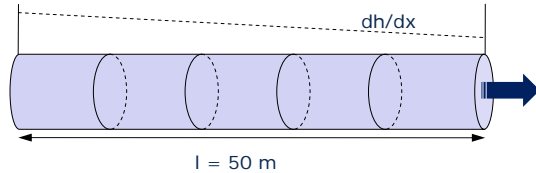
Benchmark Szenarien

Werden die physikalischen Prozesse korrekt wiedergegeben?

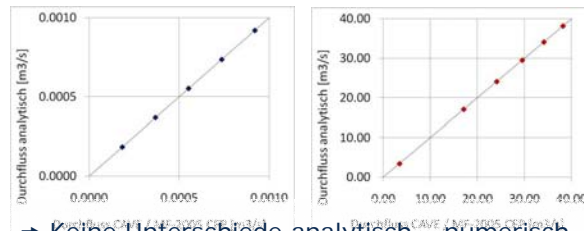


Einzelröhre laminar / turbulent → Einzelröhre mit Transfer → synth. Grundwasserleiter

2. Validierung von CAVE und CFP Benchmark – Einzelröhre



- 5 Röhren á 10 m
- Durchmesser: 1 m
- Gradient: $1 \cdot 10^{-9} \dots 1$



→ Keine Unterschiede analytisch – numerisch

→ Keine Unterschiede zwischen CAVE und MODFLOW-2005 CFP

Thomas Reimann

24. Juni 2008



2. Validierung von CAVE und CFP Benchmark – Einzelröhre + Austausch

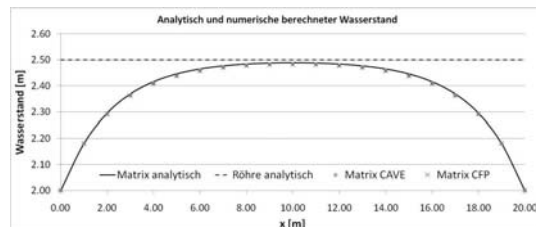
Analytische Lösung

Matrix

$$h_m(x) = h_m^* - \frac{h_m^* - h_c^*}{1+c} \cdot \left[1 - \frac{e^{\sqrt{d(1+c)}x} + e^{\sqrt{d(1+c)}(L-x)}}{e^{\sqrt{d(1+c)}L} + 1} \right]$$

Röhre

$$h_c(x) = h_c^* + \frac{c \cdot (h_m^* - h_c^*)}{1+c} \cdot \left[1 - \frac{e^{\sqrt{d(1+c)}x} + e^{\sqrt{d(1+c)}(L-x)}}{e^{\sqrt{d(1+c)}L} + 1} \right]$$



→ Keine Unterschiede analytisch – numerisch

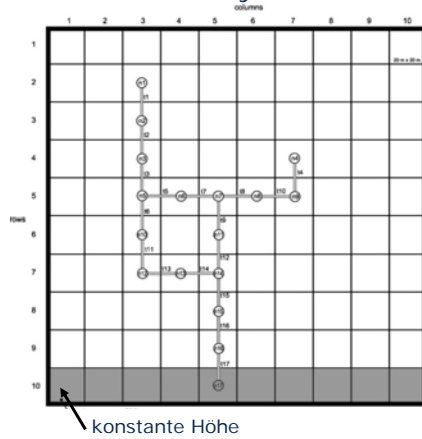
→ Keine Unterschiede zwischen CAVE und MODFLOW-2005 CFP

Thomas Reimann

24. Juni 2008



2. Validierung von CAVE und CFP Benchmark – Synthetischer Grundwasserleiter



Eigenschaften Modell

Matrix

- Hydraulische LF. $K = 1E-6$
- Mächtigkeit 100 m
- ungespannt

Röhren

- Durchmesser $D = 1.0$ m
- Austauschkoefizient $\alpha = 0.001$ m²s⁻¹
- Rauigkeit 0.001 m
- vermaschtes System

Modell

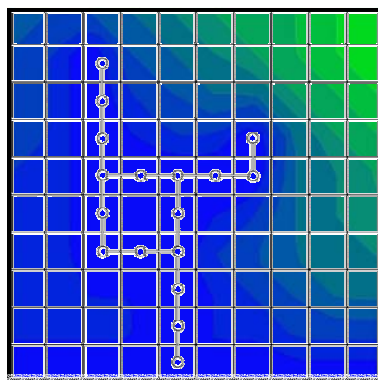
- 200 mm a⁻¹ GWN (50 % Direkt in Röhren)
- 10 x 10 Zellen á 20 x 20 m²

Thomas Reimann

Graz - 24. Juni 2008
9/19



2. Validierung von CAVE und CFP Benchmark – Synthetische Grundwasserleiter



Ergebnisse Modell

Isohyphen

Wasserbilanz

- INPUT 100 % GWN
- OUTPUT 80 % Röhren
- 20 % Matrix

→ Ergebnisse numerisches Modell plausibel

→ Keine Unterschiede zwischen CAVE und MODFLOW-2005 CFP

Thomas Reimann

Graz - 24. Juni 2008



10/19

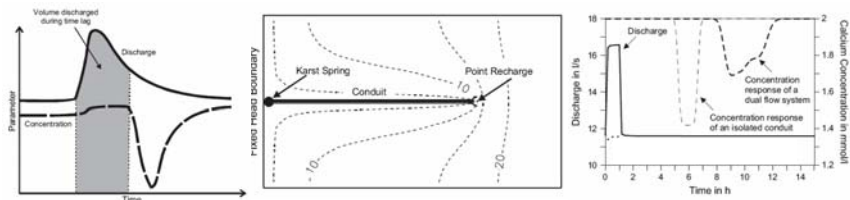
3. Anwendung von Hybridmodellen

3.1 Charakterisierung von Karstgrundwasserleitern

Röhrenvolumen (Birk et al. 2006)

Neubildungsereignis: Schüttung reagiert schneller als physiko-chemische Parameter

- Differenz der Reaktion Schüttung \Leftrightarrow Reaktion physiko-chemische Parameter = Röhrenvolumen (*Ashton 1966*)
- Hybridmodell: berücksichtigt Interaktion Röhren \Leftrightarrow Matrix

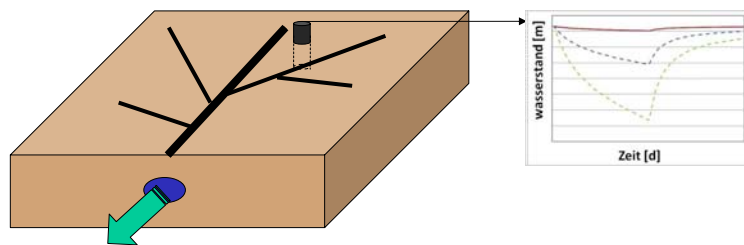


Röhrenvolumen kann abgeschätzt werden **ABER** \rightarrow Geometrie Röhrensystem?

3. Charakterisierung von Karstgrundwasserleitern

Anwendung von Hybridmodellen

Hydraulischer Stress



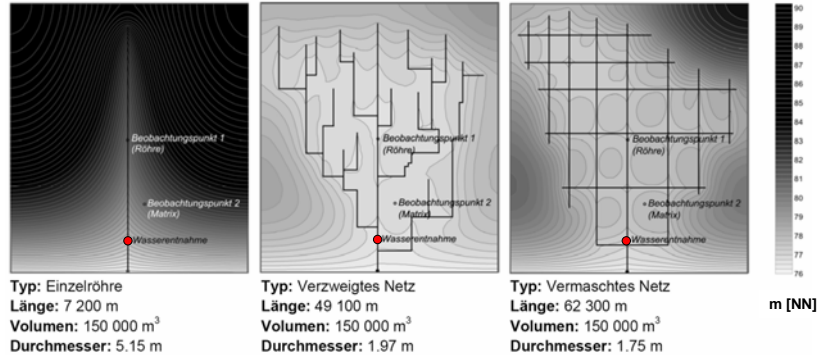
Verschiedene Karstsysteme \rightarrow **Pattern Matching** (Muster erkennen)

3. Charakterisierung von Karstgrundwasserleitern Anwendung von Hybridmodellen

Hydraulischer Stress

Beispiel: Synthetischer Grundwasserleiter, Parameter naturnah (mediterranean Karst)

- 7 km x 8 km
- 500 m Mächtig
- $dx = dy = 100$ m



Situation (Isohypsen) ohne aktive Wasserentnahme

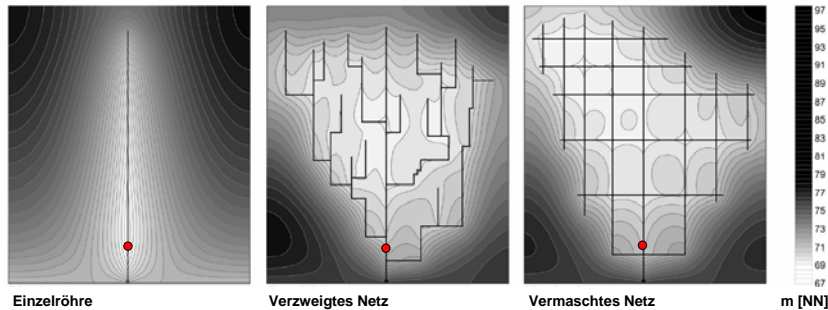
Thomas Reimann

Graz - 24. Juni 2008
13/19

3. Charakterisierung von Karstgrundwasserleitern Anwendung von Hybridmodellen

Hydraulischer Stress (aktive Wasserentnahme 1 m³s⁻¹)

Beispiel: Synthetischer Grundwasserleiter, Parameter naturnah (mediterranean Karst)



• Wasserentnahme

Situation (Isohypsen) mit aktiver Wasserentnahme

Thomas Reimann

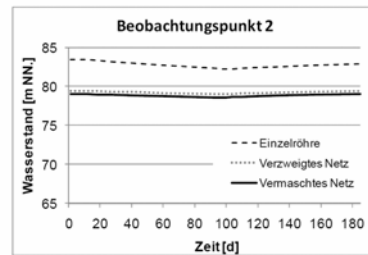
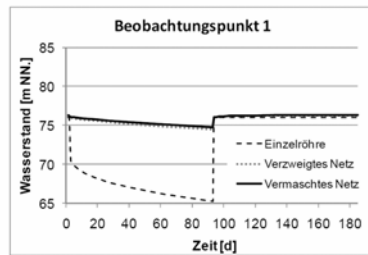
Graz - 24. Juni 2008
14/19

3. Charakterisierung von Karstgrundwasserleitern Anwendung von Hybridmodellen

Hydraulischer Stress (aktive Wasserentnahme 1 m³s⁻¹) Simulierter Wasserstand an Beobachtungspunkten

Röhre

Matrix



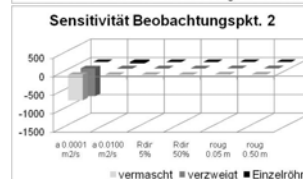
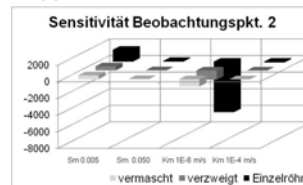
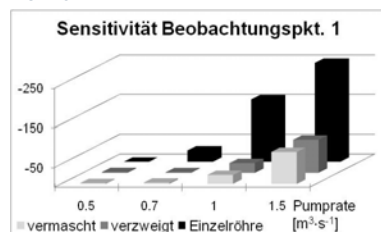
→ Unterschiedliche Reaktion des Systems auf hydraulischen Stress!

3. Charakterisierung von Karstgrundwasserleitern Anwendung von Hybridmodellen

Hydraulischer Stress (aktive Wasserentnahme 1 m³s⁻¹) Parameterstudien / Sensitivität

Röhre

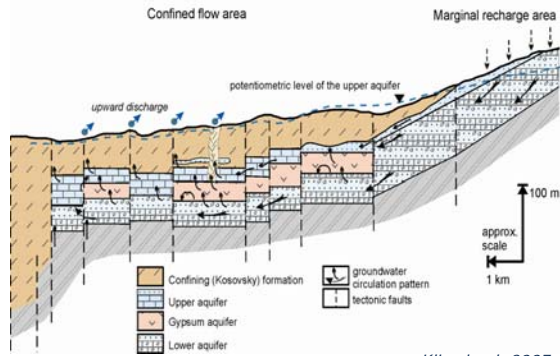
Matrix



4. Karstgenese Anwendung von Hybridmodellen

Karstgenese in der Westukraine (Rehrl et al.)

Konzeptionelle Modellvorstellung



Thomas Reimann

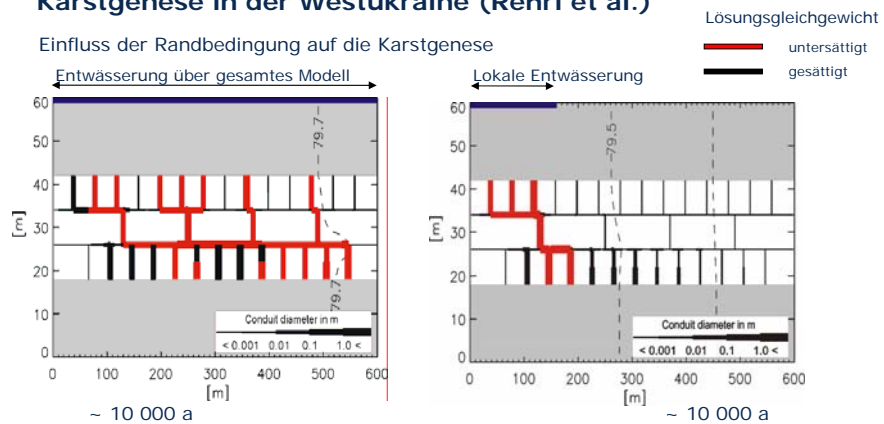
Klimchouk 2007

Graz - 24. Juni 2008
17/19

4. Karstgenese Anwendung von Hybridmodellen

Karstgenese in der Westukraine (Rehrl et al.)

Einfluss der Randbedingung auf die Karstgenese



Thomas Reimann

Graz - 24. Juni 2008
18/19

5. Zusammenfassung und Ausblick

Aktueller Stand

Hybridmodelle für verschiedene Anwendungen vorhanden → Karstgrundwasserleiter

- CAVE
- MODFLOW-2005 CFP

Anwendung:

- Parameterstudien / Karstgenese / Charakterisierung von Grundwasserleitern
- zukünftig: Anwendung für existierende Einzugsgebiete

Schwerpunkte für weitere Modellentwicklung

- Druck- und Freispiegelabfluss in Karströhren → Speicherverhalten
- Verbesserte Gleichungslöser
- Berücksichtigung von Dichtegetriebener Strömung (Küstengebiete)
- Pre- und Postprocessing (Benutzerfreundlichkeit)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dank an:

Steffen Birk
Tobias Geyer
Rudolf Liedl
Christoph Rehr
Martin Sauter
Barclay Shoemaker (USGS)
DFG (u.a. LI 727/11-1 and SA 501/24-1)