

# Ganzheitliches System zur Errichtung von Kleinkläranlagen

## TP 3: Entwicklung eines Entscheidungshilfesystem und Validierung durch Laborversuche

**Bearbeiter:** Prof. Dr.-Ing. Peter-Wolfgang Gräber  
Dipl.-Ing. Cristina Sandhu MSc.  
Dipl.-Ing. Thomas Fichtner  
Dipl.-Ing. Issa Hasan, MBA

# Übersicht

---

1. Gesetzliche Grundlagen
2. Ziele des ESEK - Entscheidungshilfesystems
3. Lösungswege
  - Quantifizieren der Wasser- und Stoffflüsse im Boden hinsichtlich der Versickerungsleistung, des Reinigungs- und Speicherverhaltens
  - Entwicklung von Experten-shells als Werkzeug zur Entscheidungshilfe
4. Schlussfolgerungen und Weiterführung

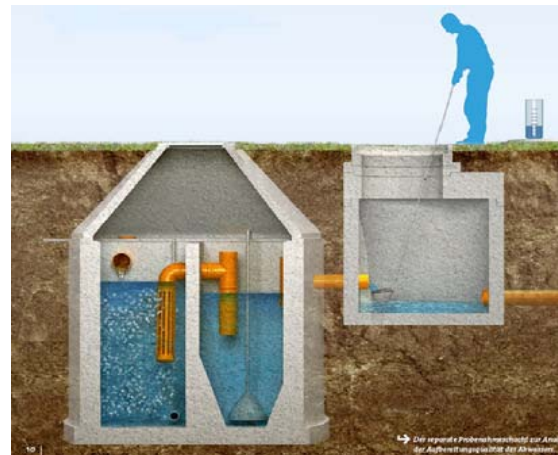
# 1. Gesetzliche Grundlagen

- Keine Richtlinie für die Ableitung von vorgereinigtem Abwasser über die ungesättigten Bodenzone ins Grundwasser
- Keine Baugenehmigung für Kleinkläranlagen bei Entwässerung ins Grundwasser

## Errichtung



## Probenahme



## Überwachung

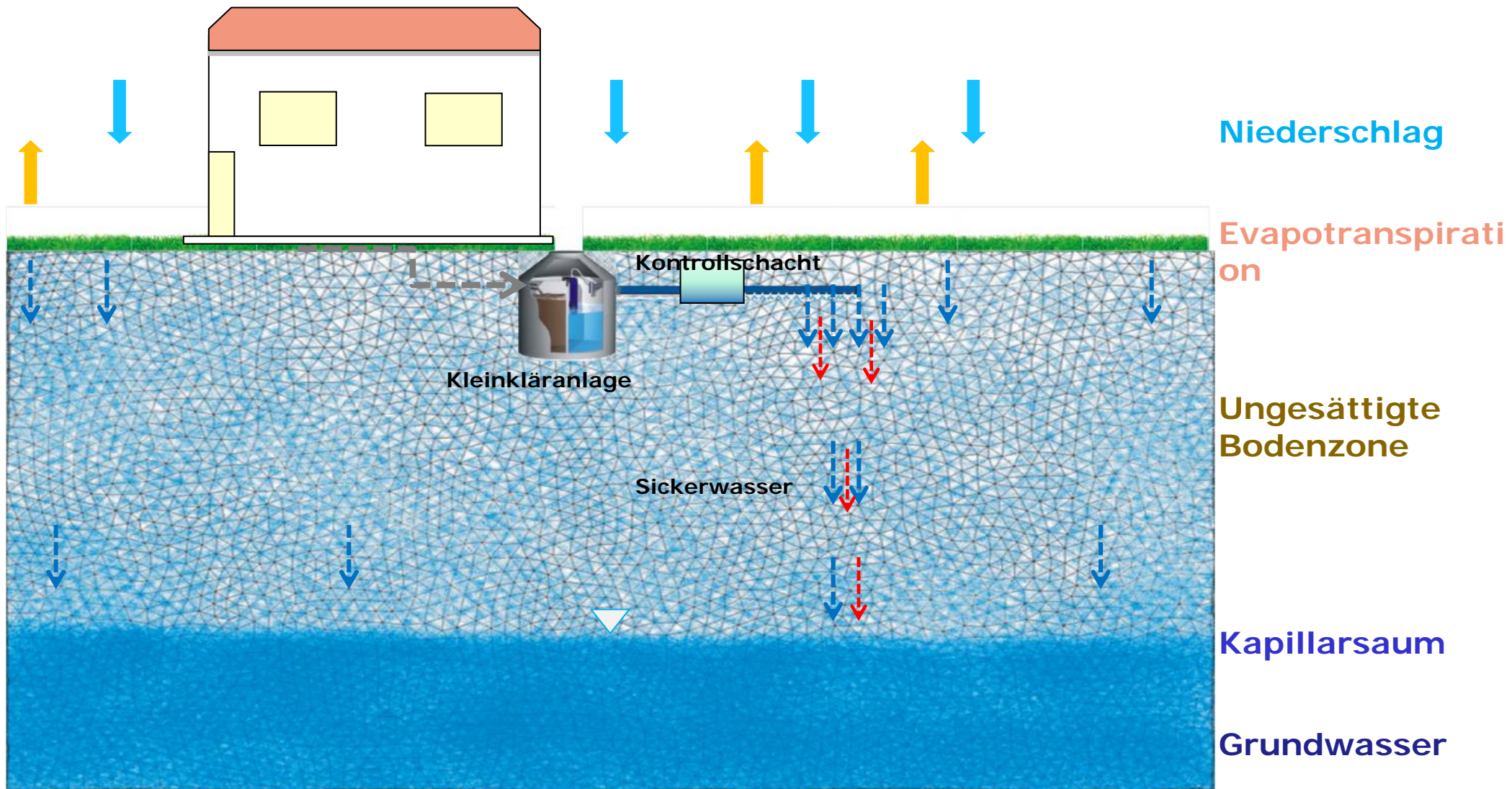


## 2. Ziele des ESEK - Entscheidungshilfesystems

---

- Schutz und Verbesserung des Zustands der Ökosysteme und des Grundwassers durch die Reduzierung der Stofffracht ins Grundwasser unter Ausnutzung natürlicher Reinigungsleistung des Bodens
- Beitrag zur künstlichen Grundwasserneubildung und Erhalt der lokalen Grundwasservorräte
- Verbesserung der Grundwasser Stabilität in ariden Gebieten durch Infiltration behandelte Abwasser
- Definition einer Richtlinie zur Errichtung und Betrieb von dezentralen Abwasserentsorgungsanlagen (KKA) für Deutschland (und EU)

# Problemstellung und Zielsetzung



Versickerung von gereinigtem Abwasser durch Kleinkläranlagen

# 3. Lösungsweg

---

## 3.1 Entwicklung von Expertenshells auf der Basis von PCSiWaPro<sup>®</sup> als Werkzeug zur Entscheidungshilfe

- Erweiterung der Stoff- und Bodendatenbank für relevante Abwasserinhaltsstoffe, KKA-Klassen, Bodenparameter, Sorptionsparameter
- Programmierungsarbeit der Middleware: Kopplung mit PHREEQC, Daten- und Parameterübergabe & Austausch von Parametern für beide Moduls, Erweiterung des „Assistent Modules“
- Neue visuelle Schnittstelle (Interface) für PCSiWaPro<sup>®</sup> - KKA nach DIN EN ISO 9241-110: 2006 : Datenübergabe, Ergebniswerte
- Verifizierung und Validierung an realen Beispielen

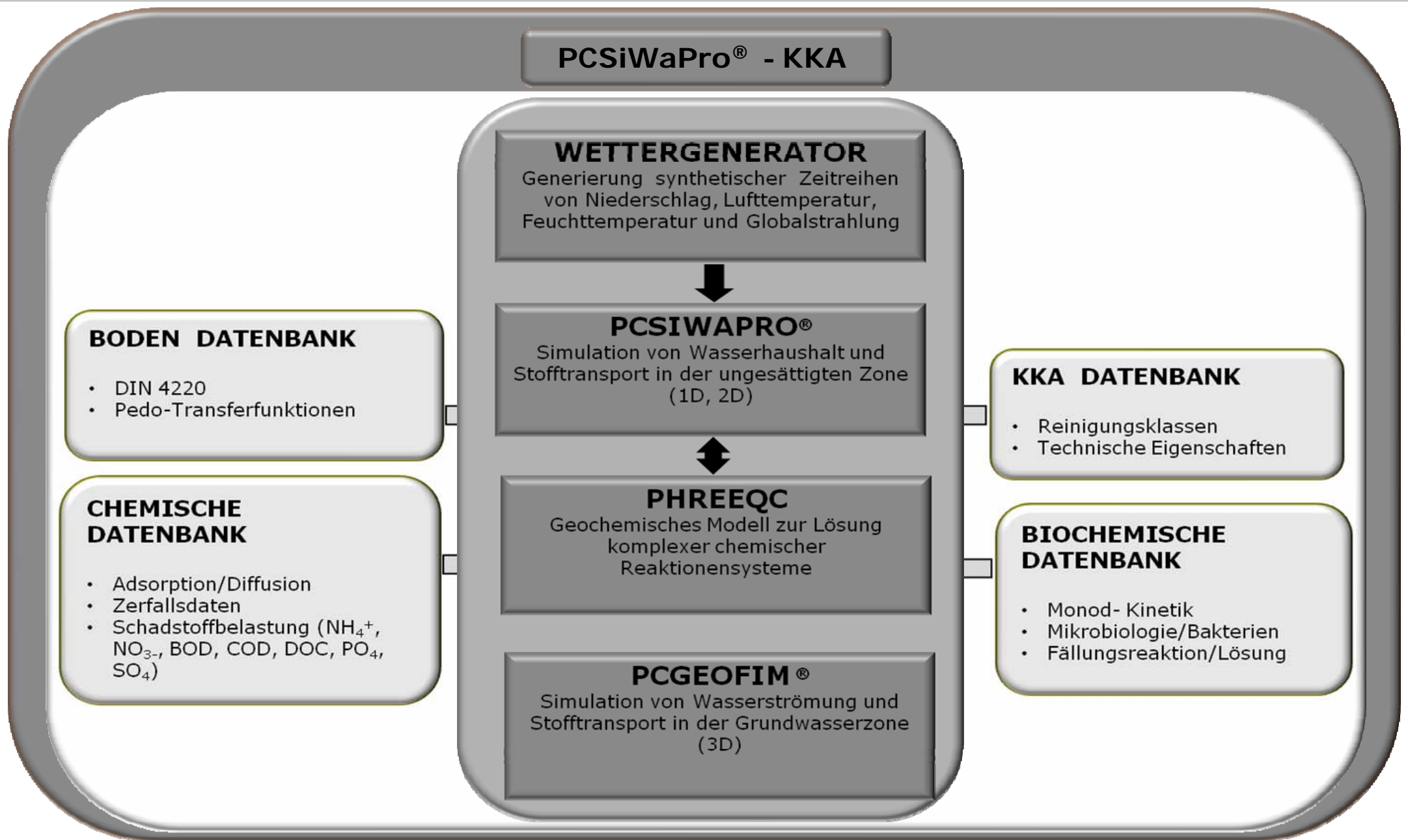
# 3. Lösungsweg

---

## 3.2 Quantifizieren der Wasser- und Stoffflüsse im Boden hinsichtlich der Versickerungsleistung, des Reinigungs- und Speicherverhaltens

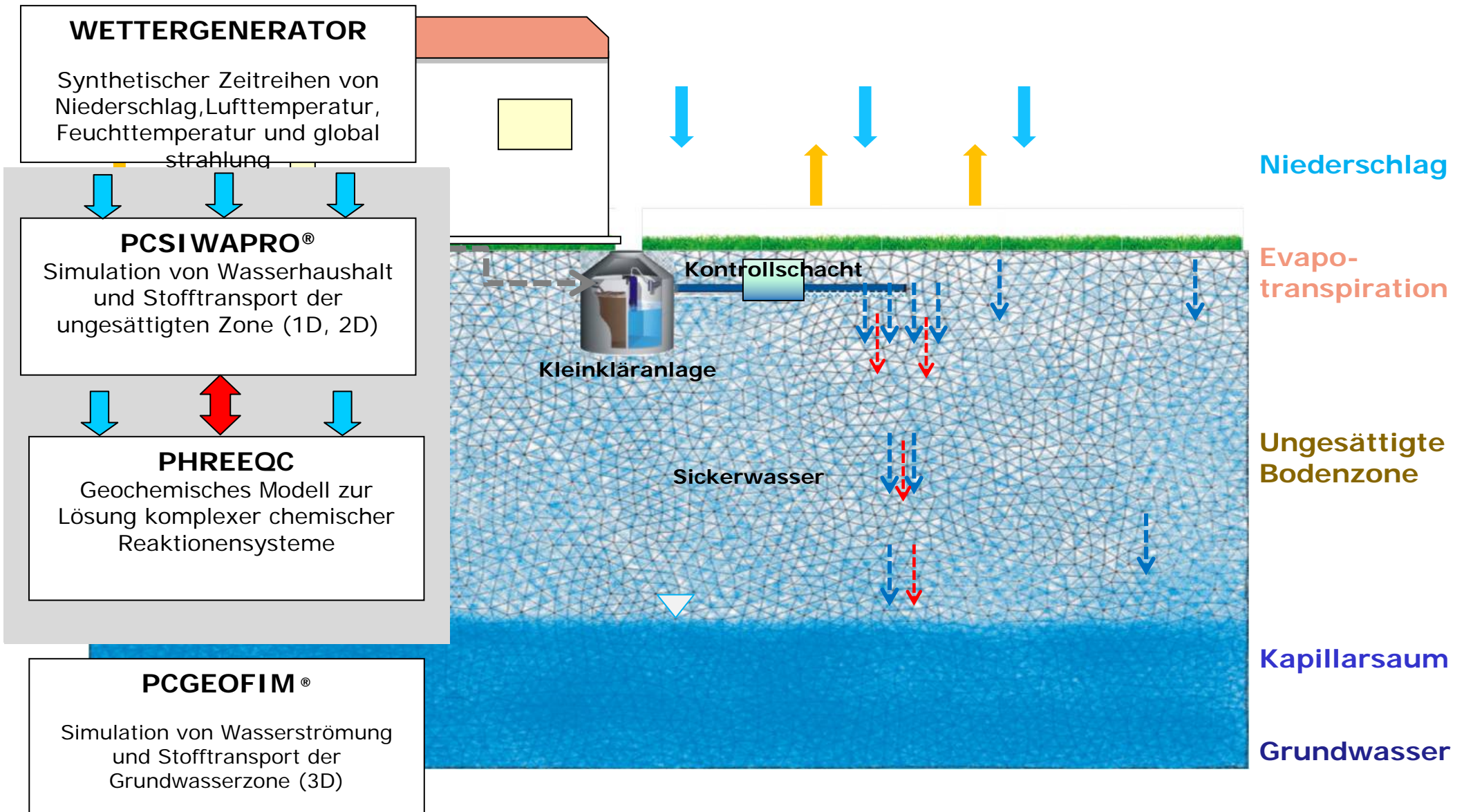
- Szenarienanalyse des Bodenwasserhaushaltes sowie des Abbaus organischer Abwasserinhaltsstoffe bei verschiedenen Randbedingungen → 1D Laborversuche
- Simulation der Laborsäulen- und Feldversuche mittels PCSiWaPro®
- Berücksichtigen der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Versickerungsquelle → 2D Sensitivitätsanalyse mittels PCSiWaPro®

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - KKA





# PCSiWaPro® - KKA - Konzept



# PCSiWaPro<sup>®</sup> - Entscheidungshilfesystem

Das Strömungsmodell der ungesättigten Bodenzone ist durch die RICHARDS-Gleichung (PDGL) und durch die VAN GENUCHTEN-LUCKNER-Gleichung gegeben:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K \left( K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S$$

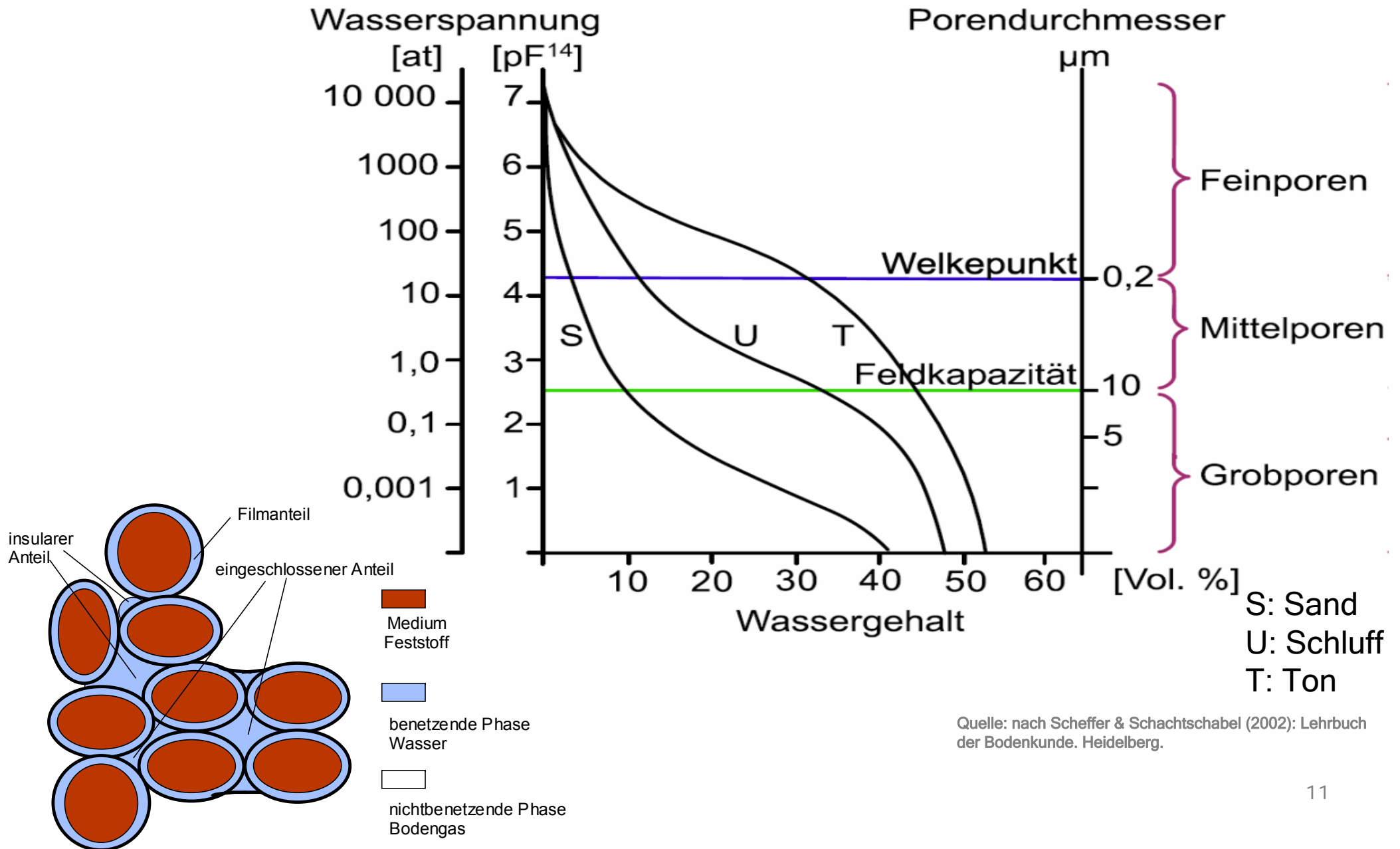
$$\theta = \theta_{r,W} + \frac{\phi - \theta_{r,W} - \theta_{r,L}}{\left[ 1 + (\alpha \cdot h_c)^n \right]^{\frac{1}{n}}}$$

$\theta$  - volumetrischer Wassergehalt  
 $t$  - Zeit  
 $x_i$  ( $x_1=x$ ,  $x_2=z$ ) -  
Raumkoordinaten  
 $K$  - hydraulische Leitfähigkeit  
 $h$  - Druckhöhe  
 $S$  - Quellen-/Senkenterm

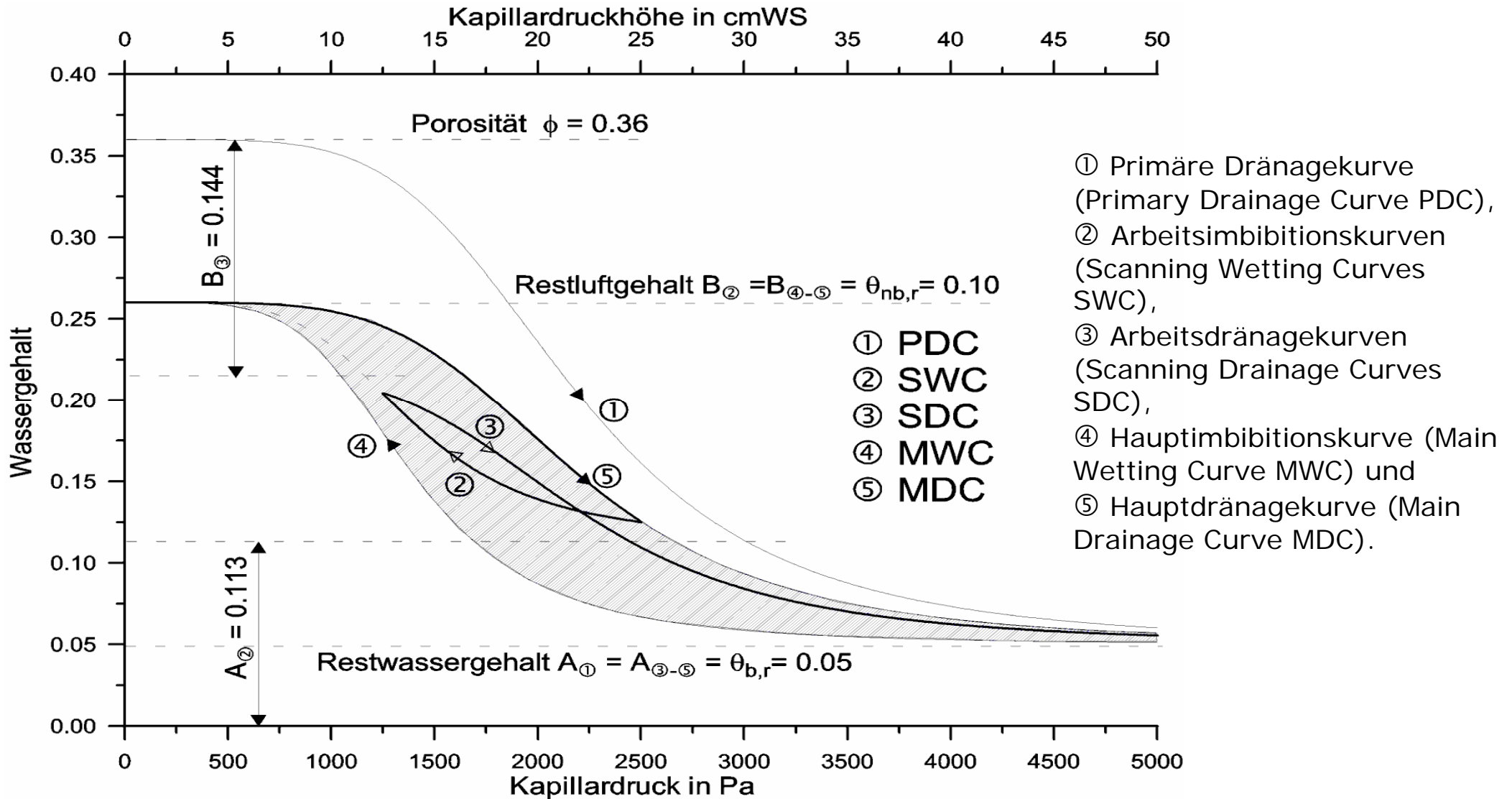
$\phi$  - Porosität  
 $\theta_{r,W}$  - Restwassergehalt  
 $\theta_{r,L}$  - Restluftgehalt  
 $\alpha$  - Skalierungsfaktor  
 $n$  - Anstiegsfaktor  
 $h_c$  - Kapillardruckhöhe

- Die abhängigen Variablen sind die Druckhöhe und der volumetrische Wassergehalt,
- Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit  $K$  ist abhängig vom Wassergehalt im Boden,  $K = K(\theta)$ .

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - Entscheidungshilfesystem



# PCSiWaPro<sup>®</sup> - Entscheidungshilfesystem



Zustandsfunktion  $\theta_b = f(p_{c,b} - n_b)$

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - Entscheidungshilfesystem

## Stofftransportprozesse

### Konvektions-Dispersions-Gleichung:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial r} \left( D \cdot \frac{\partial s_{fl,m}}{\partial r} \right)}_{\text{Dispersion} + \text{Diffusion}} - \underbrace{\frac{\partial (u \cdot s_{fl,m})}{\partial r}}_{\text{Konvektion}} = \underbrace{\frac{\partial s_m}{\partial t}}_{\text{Speicheränderung}} + \underbrace{\mu_m \cdot s_m + \gamma_m \cdot \theta}_{\text{Abbau (interne Reaktion)}} - \underbrace{q_m}_{\text{Quellen/Senken}}$$

<b>r</b>	Ortskoordinate	$m_R$
<b>t</b>	Zeit	s
	Volumetrischer Wassergehalt	$m_{fl}^3 / m_R^3$
<b>D</b>	Dispersionkoeffizient	$m_R^2 / s$
<b>S<sub>m</sub></b>	Spezifische Schadstoffmasse ( $S_m = S_{fl,m} + S_{s,m}$ )	$Kg / m_R^3$
<b>S<sub>fl,m</sub></b>	Spezifische Schadstoffmasse in der flüssigen Phase	$Kg / m_R^3$
<b>S<sub>s,m</sub></b>	Spezifische Masse an der festen Phase	$Kg / m_R^3$
<b>u</b>	Mittlere Fließgeschwindigkeit	$m_R / s$
$\gamma_m$	Zerfallskonstante für Abbauvorgang 0. Ordnung	$Kg / (m_{fl}^3 \cdot s)$
	Zerfallskonstante für Abbauvorgang 1. Ordnung	$s^{-1}$

# PCSiWaPro® - Entscheidungshilfesystem

- Sorption und Desorption der Wasserinhaltsstoffe an der Bodenmatrix
- Beschreibung durch Isotherme

## → Sorption **Isotherme**

- **HENRY**: linear, für niedrige Konzentrationen

$$s_m = \theta \cdot \rho_{fl,m} + \rho_b \cdot K_d \cdot \rho_{fl,m} = (\theta + \rho_b K_d) \rho_{fl,m}$$

- **FREUNDLICH**: exponentiell, für begrenzte Sorptionsfähigkeit

$$s_m = \theta \cdot \rho_{fl,m} + K_F \cdot \rho_{fl,m}^q$$

- **LANGMUIR**: nicht-linear, für hohe Konzentrationen

$$s_m = \theta \cdot \rho_{fl,m} + \frac{K_L \cdot \rho_{fl,m}}{1 + K_L \cdot \rho_{fl,m}} \cdot s_{s,max}$$

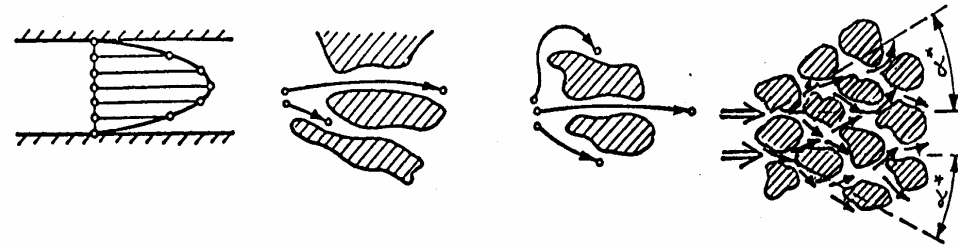
$s_m$  – adsorbed mass on the solid phase

$\theta$  – water content,  $\rho_b$  – soil bulk density,  $\rho_{fl,m}$  – partial mass density in the fluid phase

$K_d$  – partitioning-(HENRY)-coefficient,  $q$  – constant parameter,  $K_F$  – FREUNDLICH-coefficient

$s_{s,max}$  – max. adsorbed mass on the solid phase,  $K_L$  – LANGMUIR-coefficient

## Dispersion/ Diffusion



- Hydraulische Dispersion infolge unterschiedlicher Fließwege
- Diffusion durch **BROWNsche Bewegung**

## Konvektion

- Transport durch Wasserströmung

## 0./1. Ordnung interner Reaktionen

→ Interne Erzeugung und Abbau

$$\frac{ds_m}{dt} = -\mu_m \cdot s_m$$

→ Beispiel: exponentieller Zerfall

$$s_m = s_{m,0} \cdot e^{-\mu_m \cdot t}$$

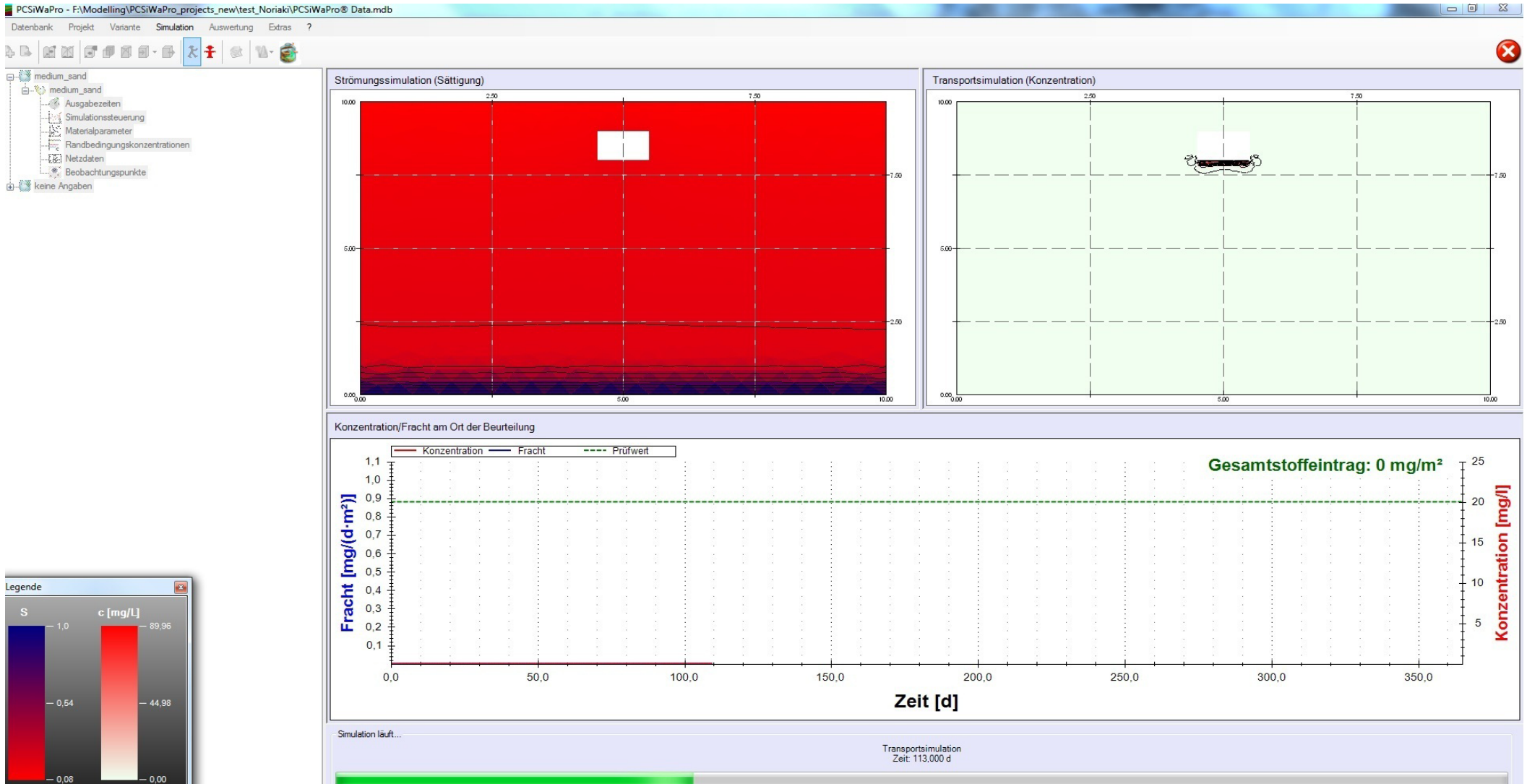
## Quell-Senkenterm

→ Randbedingungen (Schadstoffeinträge)

→ Quellfunktionsterm

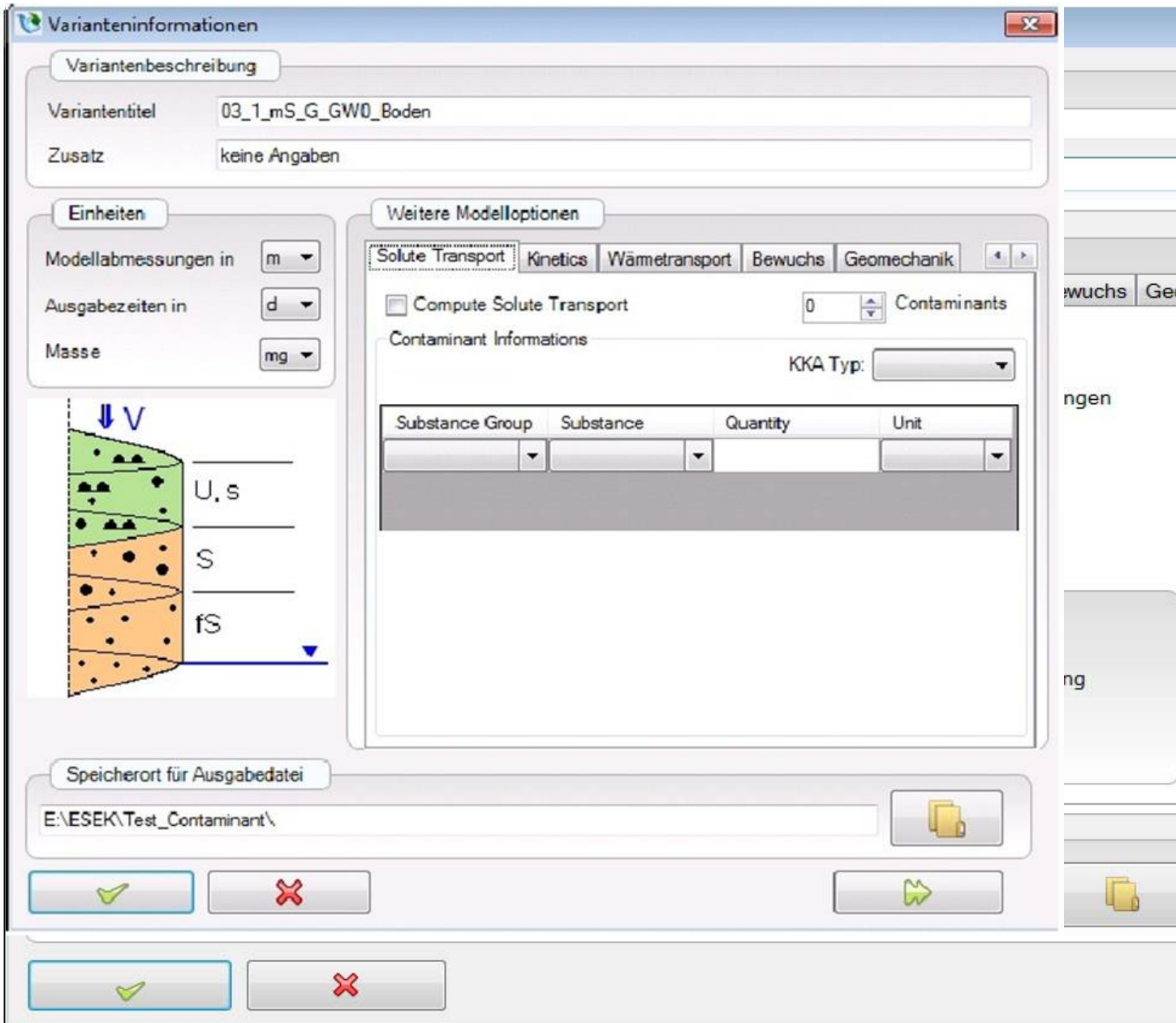


# PCSiWaPro<sup>®</sup> - KKA



Datenbanken (Boden- und Stoffparameter)

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - KKA



## Einstellungen

- Modeloptionen
- KKA Typ
- Materialparameter
- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

## Geometrie

## Ergebnisse

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - KKA

**Varianteninformationen**

**Variantenbeschreibung**

Variantentitel: Test-ESEK

Zusatz: T12

**Einheiten**

Modellabmessungen in: m

Ausgabezeiten in: a

Masse: mg

**Weitere Modelloptionen**

Strömung | Stofftransport | Wärmetransport | Bewuchs | Geor

Instationäre Strömung

Verwendung zeitabhängiger Randbedingungen

Spezialrandbedingungen

Parameteridentifikation

Dual Porosity (Durner)

**Koordinatensystem der Variante**

Horizontale Strömung

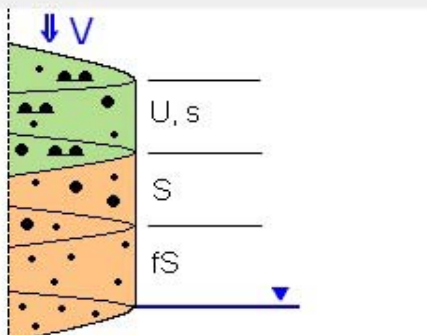
Rotationssymmetrische vertikale Strömung

1D - Vertikale Strömung (Säule)

2D - vertikal ebene Strömung

**Speicherort für Ausgabedatei**

C:\Users\Cristina\Documents\



## Einstellungen

- Modelloptionen
- KKA Typ
- Materialparameter
- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

## Geometrie

## Ergebnisse

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - KKA

The screenshot displays the 'Materialparameter' window in the PCSiWaPro software. The interface is divided into several sections:

- Navigation:** Includes a '1/1' page indicator and navigation arrows.
- Parameters:** Fields for 'Schichtansprache (DIN 4022)', 'Bodenart (DIN 4220)' (set to KRB10), and 'Schadstoff' (set to Ammonium (NH4+)).
- Hydraulik / Stofftransport:** A tabbed interface with sub-sections:
  - Bodenhydraulische Parameter:** Porosität  $\phi$  (0.38), Durchlässigkeit  $k_0/k_f$  (1400 m/a), Restwassergehalt  $\theta_{r,w}$  (0), Restluftgehalt, Wassergehalt bei.
  - van Genuchten Parameter:** Drainage  $\alpha^d$  (20.000 1/m), Imbibition  $\alpha^i$  (40.000 1/m), Anstiegsparameter  $n$  (1.23).
  - Schätzfunktionen:** Buttons for 'Parameter nach DIN4220', 'Pedotransferfunktionen', and 'Bodenparameterdatenbank'.
- Estimation Dialog:** A modal window titled 'Abschätzung nach DIN 4220' is open, showing a dropdown menu for 'Norm' (DIN 4220, USST, LABOR-ESEK) and 'Bodenart'. It also displays 'Abgeschätzte Parameter':  $\theta_s$  (0.39),  $\theta_{r,w}$  (0),  $\alpha$  (0.264 1/cm),  $n$  (1.35), and 'Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit' (1,00e-5 m/s). A 'Trockenrohddichte' dropdown is set to 'sehr gering (<1,2  $\zeta$ )'. A green checkmark button is visible.
- Graphs:** Two plots are shown at the bottom:
  - Wassergehalt vs. Kapillardruckhöhe [m]:** Shows a curve for 'PDC' (red) and a blue curve, with a y-axis from 0.0 to 0.3 and an x-axis from 0.00 to 0.12.
  - Relative Permea vs. Wassergehalt:** Shows a red curve that remains near zero until a water content of approximately 0.30, then rises sharply. The y-axis is 'Relative Permea' (0.0 to 0.6) and the x-axis is 'Wassergehalt' (0.00 to 0.35).

## Einstellungen

- Modeloptionen
- KKA Typ

## Materialparameter

- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

## Geometrie

## Ergebnisse

# PCSiWaPro® - KKA

The screenshot displays the 'Materialparameter' window in PCSiWaPro. The interface is divided into several sections:

- Navigation:** Includes a page indicator '1/1' and a trash icon.
- Parameters:** Fields for 'Schichtansprache (DIN 4022)', 'Bodenart (DIN 4220)' (set to KRB10), and 'Schadstoff' (set to Ammonium (NH4+)).
- Hydraulik / Stofftransport:** Contains sub-sections for 'Bodenspezifische Parameter' (Trockenrohddichte, Diffusionskoeffizient, etc.), 'Reaktionsparameter' (Zerfallskonstante), and 'Sorptionparameter' (Henry-Koeffizient, etc.).
- Abschätzung der Schadstoffeigenschaften:** A pop-up dialog box for 'Abwasser' (wastewater) showing properties like 'Schadstoff: Ammonium (NH4+)', 'Corg: 0,1%', 'pH: 6', and 'Ton: 5%'. It also lists 'Stoffeigenschaften' such as 'Diffusionskoeffizient: 0 m²/s', 'Halbwertszeit: 0 a', and 'Freundlich - Exponent: 0,8'.
- Abschätzfunktionen:** A button labeled 'Schadstoffdatenbank'.
- Graph:** A plot titled 'Sorbierete Stoffe' vs 'Konzentration in der Lösung [µg/l]'. The y-axis ranges from 0 to 600, and the x-axis from 0 to 50. A red curve shows a very low, nearly constant sorption value across the concentration range.

## Einstellungen

- Modeloptionen
- KKA Typ

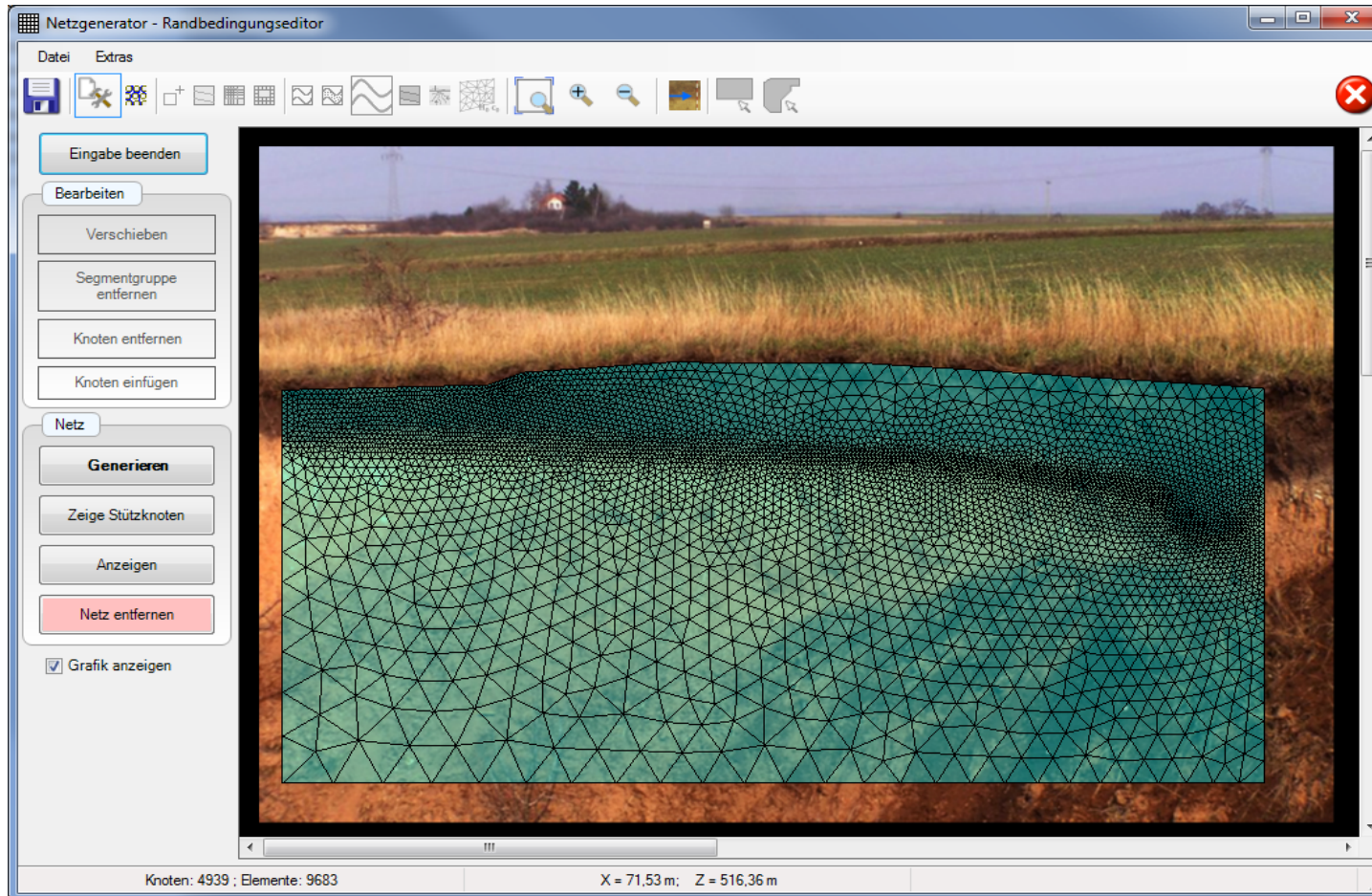
## Materialparameter

- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

## Geometrie

## Ergebnisse

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - KKA



## Einstellungen

- Modeloptionen
- KKA Typ

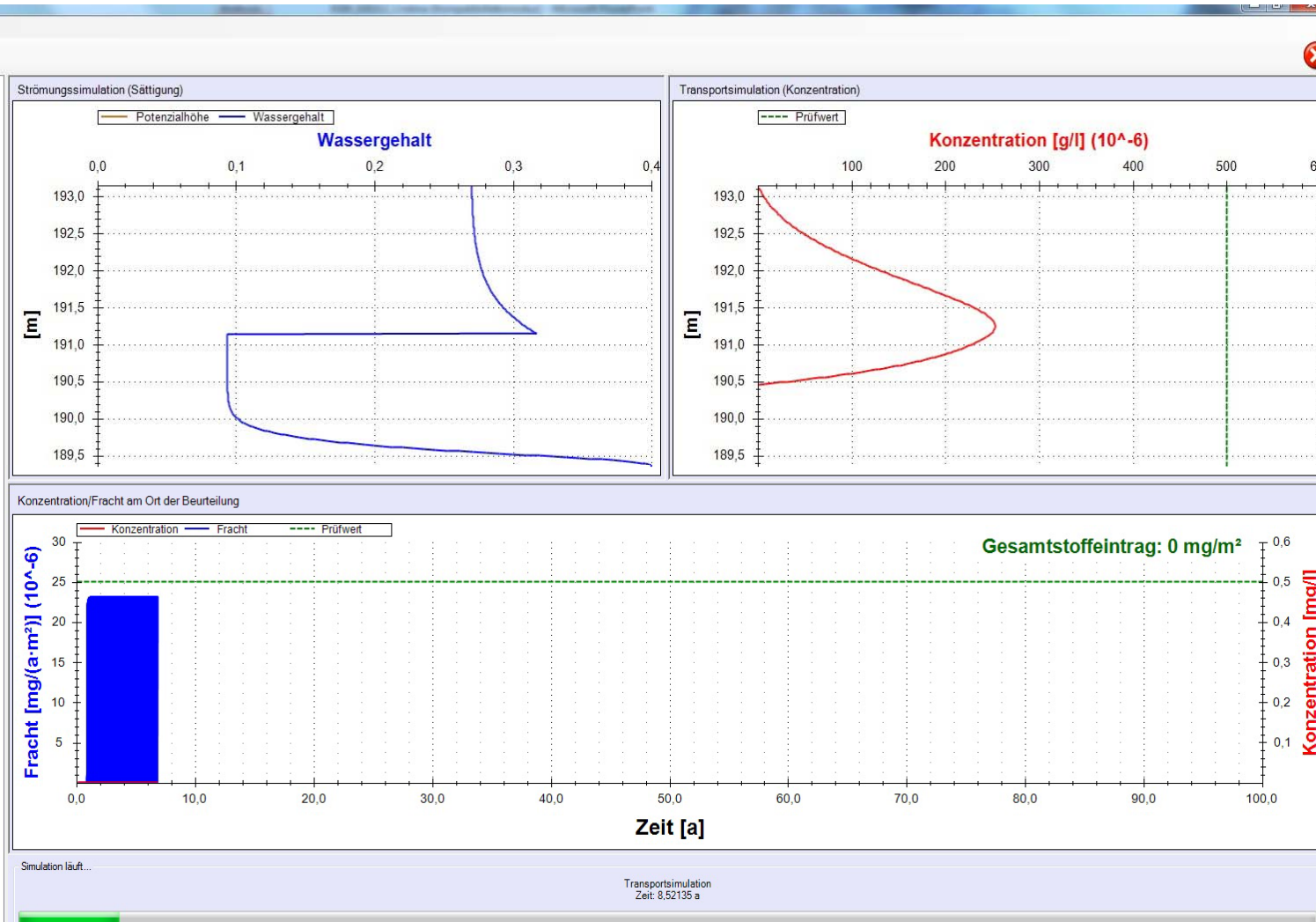
## Materialparameter

- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

## Geometrie

## Ergebnisse

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - KKA



## Einstellungen

- Modeloptionen
- KKA Typ

## Materialparameter

- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

## Geometrie

## Ergebnisse

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - KKA

### Abwasserprognose gemäß Abwasserverordnung

Programmname:PCSiWaPro<sup>®</sup>      Version: 1.8.1.0

**Vorhaben:**      **Beispiel Ammonium**  
**Variante:**      Aufschluss: B2      **KKA Typ:**

Az:      123456

**Eingabedaten:**      **Stoff/Stoffgruppe:**  
 Geometrie und Prognosezeitraum      Ammonium (NH4+)

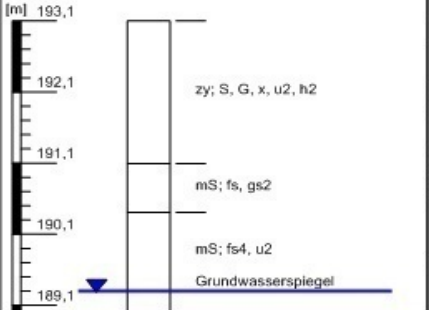


Diagramm zur Geometrie und Prognosezeitraum. Die vertikale Achse zeigt die Tiefe in Metern (m) von 189,1 bis 193,1. Die horizontale Achse zeigt die Zeit in Jahren (a) von 0 bis 100. Die Schichten sind wie folgt definiert: Schicht 1 (zy; S, G, x, u2, h2) von 193,1 bis 192,1 m; Schicht 2 (mS; fs, gs2) von 192,1 bis 190,1 m; Schicht 3 (mS; fs4, u2) von 190,1 bis 189,1 m. Der Grundwasserspiegel ist bei 189,1 m eingezeichnet.

Oberkante:       $z_o = 193,15 \text{ m}$   
 Ort der Beurteilung:       $z_u = 189,35 \text{ m}$

Grundwasserneubildung:       $v_{GWN} = 206,4 \text{ mm/a}$

Quellterm:  
 > Konzentration:       $c_o = 1,5 \text{ g/l}$   
 > Dauer der Schadstofffreisetzung:       $t_D = 21,0 \text{ a}$

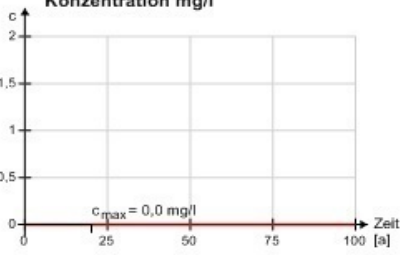
Simulationszeitraum:       $t_{max} = 100,0 \text{ a}$

Lfd. Nr.	Schichtansprache DIN 4022	Bodenart DIN 4220	Mächtigkeit		Bodenphysikalische Parameter						Stofftransportparameter		
			M	$\phi$	$\theta_{w,r}$	$\alpha$	n	$k_f$	$\rho$	$\delta$	$K_D$	$t_{50}$	
			m		1/m		m/s	g/cm <sup>3</sup>	m	l/kg	a		
1	zy; S, G, x, u2, h2		2,01	0,40	0,13	2,700	1,50	4,14E-6	1,70	0,38	0,10	-	
2	mS; fs, gs2		0,69	0,40	0,02	5,000	2,50	9,51E-6	1,70	0,38	0,10	-	
3	mS; fs4, u2		1,11	0,40	0,02	5,000	2,50	9,51E-6	1,70	0,38	0,10	-	

**Legende:**  
 M - Mächtigkeit der Schicht       $\phi$  - Porosität       $\rho$  - Rohdichte  
 $\theta_{w,r}$  - Restwassergehalt       $\delta$  - Dispersivität  
 $\alpha$  - Massstabsfaktor       $K_D$  - Sorptionskoeffizient  
 n - Anstiegsparameter  
 $k_f$  - Durchlässigkeitsbeiwert       $t_{50}$  - Halbwertszeit

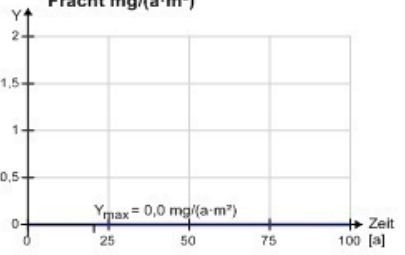
#### Prognoseergebnis für den Ort der Beurteilung

**Konzentration mg/l**



Zeitpunkt des Auftretens der Maximalkonzentration: 20,1 a  
 Der Prüfwert von 0,50 µg/l wird während der Simulationsdauer nicht überschritten!

**Fracht mg/(a·m²)**



Zeitpunkt des Auftretens der Maximalfracht: 20,4 a  
 Gesamtstoffeintrag: 0,0000000 mg/m²

Datum: 18.03.2013

## Einstellungen

- Modeloptionen
- KKA Typ

## Materialparameter

- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

## Geometrie

## Ergebnisse



# PCSiWaPro<sup>®</sup> - KKA Kopplung mit PHREEQC

The screenshot displays the PHREEQC Interactive software interface. The main window is titled "PHREEQC Interactive - [Phrqc1]". The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Options, Window, Help), a toolbar, and a status bar at the bottom.

The left sidebar shows a tree view of the project structure:

- Input files
  - Phrqc1
    - Simulation 1
      - Phrqc1
        - Simulation 1
          - SOLUTION 1
          - KINETICS 1
          - TRANSPORT

The main window is divided into two panels:

### SOLUTION

General | Individual element input | Isotopes (Advanced)

Default units: **mg/L** Charge balance: **[none]**

Select elements/redox states

Select majors | Select trace | Custom select | Modify custom...

<input type="checkbox"/> Al	<input type="checkbox"/> C	<input checked="" type="checkbox"/> Cl	<input checked="" type="checkbox"/> Fe	<input type="checkbox"/> Li	<input type="checkbox"/> N	<input checked="" type="checkbox"/> Na	<input type="checkbox"/> HS-
<input checked="" type="checkbox"/> Alkalinity	<input type="checkbox"/> CO3-2	<input type="checkbox"/> Cu	<input type="checkbox"/> Fe+2	<input checked="" type="checkbox"/> Mg	<input checked="" type="checkbox"/> N2	<input type="checkbox"/> O2	<input checked="" type="checkbox"/> SO4-
<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> CH4	<input type="checkbox"/> Cu+	<input type="checkbox"/> Fe+3	<input type="checkbox"/> Mn	<input checked="" type="checkbox"/> NO2-	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input type="checkbox"/> Si
<input type="checkbox"/> Ba	<input checked="" type="checkbox"/> Ca	<input type="checkbox"/> Cu+2	<input type="checkbox"/> H2	<input type="checkbox"/> Mn+2	<input checked="" type="checkbox"/> NH4+	<input type="checkbox"/> Pb	<input type="checkbox"/> Sr
<input type="checkbox"/> Br	<input type="checkbox"/> Cd	<input checked="" type="checkbox"/> F	<input checked="" type="checkbox"/> K	<input type="checkbox"/> Mn+3	<input checked="" type="checkbox"/> NO3-	<input type="checkbox"/> S	<input type="checkbox"/> Zn

	Element	Conc.	[Units]	[Phase]	[S.I.]	[As / GFW]	[Redox]
1	Alkalinity	0	(Default)				
2	Cl	65.7	(Default)				
3	S(6)	0	(Default)				
4	F	0.6	(Default)				
5	Fe	0	(Default)				
6	N(5)	0	(Default)				
7	N(-3)	4.3	(Default)				

Description of input

Concentration units -- Default concentration units. Three groups of concentration units are allowed, concentration (1) per liter ("L"), (2) per kilogram solution ("kg"), or (3) per kilogram water ("kgw"). All concentration units for a solution must be within the same group. Within a group, either grams or moles may be used, and prefixes milli (m) and micro (u) are acceptable. Parts per thousand, "ppt"; parts per million, "ppm"; and parts per billion, "ppb", are acceptable in the "per kilogram solution" group. Default is

OK Abbrechen

### KINETICS

Define rates | Steps

Starting number	Ending number	Description
1		

Defined rates:

Albite  Organic\_C  Pyrite

K-feldspar  Pyrolusite

	Rate name
1	Organic_C
2	Calcite
3	
4	

Organic\_C | Calcite

General parameters:

Initial moles (m0)   
 Moles (m)   
 Tolerance (tol)

Formula:

	Formula or phase name	Stoich. coef.
1	Organic_C	1
2		
3		
4		
5		
6		
7		

User parameters:

PARAM(1)	PARAM(2)	PARAM(3)	PARAM(4)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

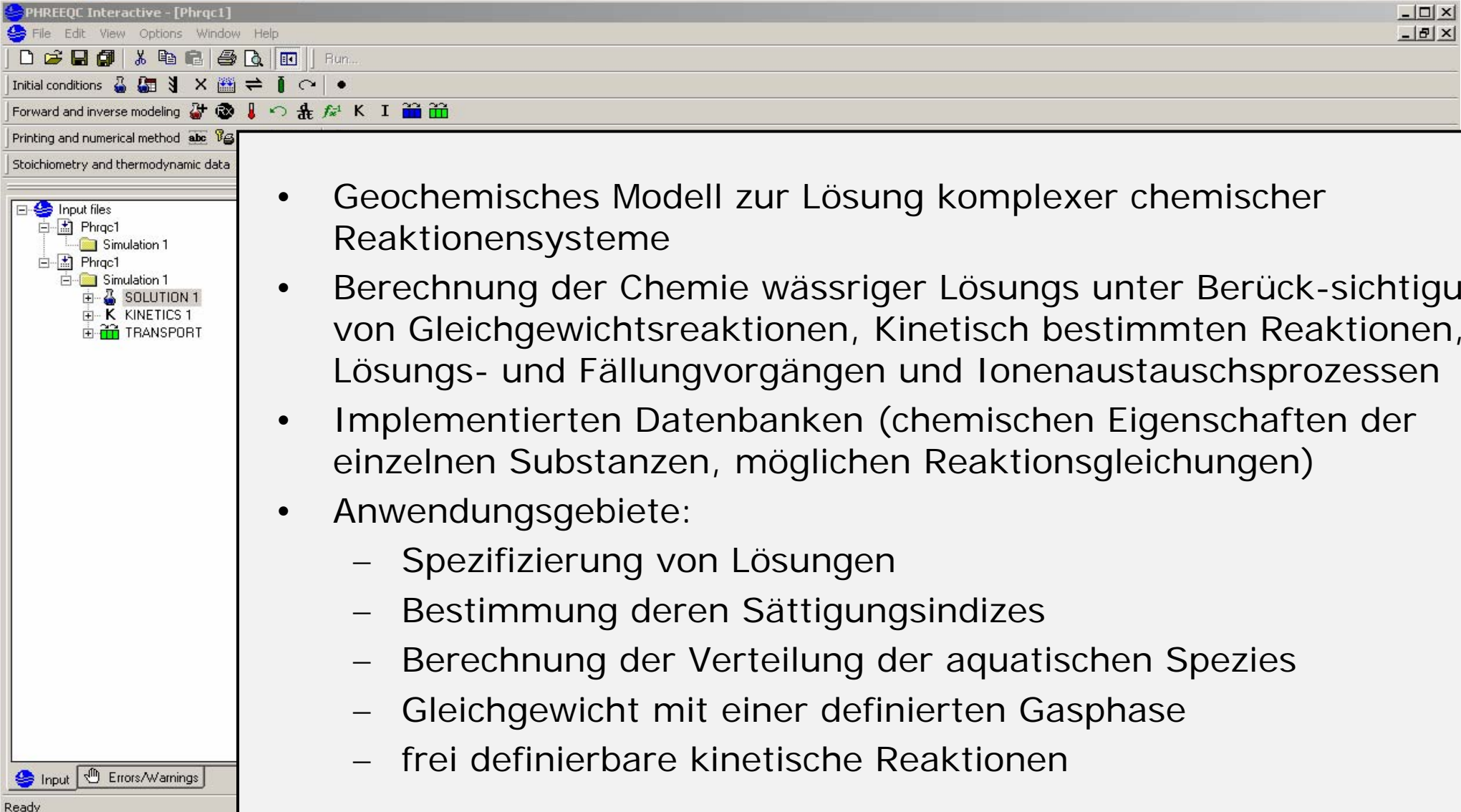
Description of input

Positive number to designate the following set of kinetic reactions.

OK Abbrechen Hilfe

Ready CAP NUM

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - KKA Kopplung mit PHREEQC



- Geochemisches Modell zur Lösung komplexer chemischer Reaktionensysteme
- Berechnung der Chemie wässriger Lösungen unter Berücksichtigung von Gleichgewichtsreaktionen, Kinetisch bestimmten Reaktionen, Lösungs- und Fällungvorgängen und Ionenaustauschprozessen
- Implementierten Datenbanken (chemischen Eigenschaften der einzelnen Substanzen, möglichen Reaktionsgleichungen)
- Anwendungsgebiete:
  - Spezifizierung von Lösungen
  - Bestimmung deren Sättigungsindizes
  - Berechnung der Verteilung der aquatischen Spezies
  - Gleichgewicht mit einer definierten Gasphase
  - frei definierbare kinetische Reaktionen

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - Assistent

Assistent Sickerwasserprognose

① — ② — ③ — ④ — ⑤

Geometrie | Bodenparameter | Grundwasserneubildung | Transportparameter | Quelltermfunktion

Auswahl der Quelltermfunktion

- zeitlich konstanter Stoffeintrag
- Exponentialfunktion

Funktionsparameter der Quelltermfunktion

Konzentration  $c$   $c_0$    $\mu\text{g/l}$

Dauer des Schadstoffeintrags  a

zeitl. Konst. Eintrag

Konzentration  $c$  [ $\mu\text{g/l}$ ]

Simulationzeit [a]

Navigation:

Geometrie

Bodenparameter

Grundwasserneubildung

Transportparameter

Quelltermfunktion

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - Assistent

Assistent Sickerwasserprognose

① — ② — ③ — ④ — ⑤

Geometrie | Bodenparameter | Grundwasserneubildung | Transportparameter | Quelltermfunktion

Auswahl der Quelltermfunktion

- zeitlich konstanter Stoffeintrag
- Exponentialfunktion

Funktionsparameter der Quelltermfunktion

Konzentration  $c$        $c_0$     100     $\mu\text{g/l}$

Dauer des Schadstoffeintrags    10    a

zeitl. Konst. Eintrag

Konzentration  $c$  [ $\mu\text{g/l}$ ]

Simulationzeit [a]

Navigation: ◀ ▶ ✖

Geometrie

Bodenparameter

Grundwasserneubildung

Transportparameters

Quelltermfunktion

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - Assistent

Assistent Sickerwasserprognose

① — ② — ③ — ④ — ⑤

Geometrie | Bodenparameter | Grundwasserneubildung | Transportparameter | Quelltermfunktion

Auswahl der Quelltermfunktion

- zeitlich konstanter Stoffeintrag
- Exponentialfunktion

Funktionsparameter der Quelltermfunktion

Konzentration  $c$   $c_0$    $\mu\text{g/l}$

Dauer des Schadstoffeintrags  a

zeitl. Konst. Eintrag

Konzentration  $c$  [ $\mu\text{g/l}$ ]

Simulationzeit [a]

Navigation:

Geometrie

Bodenparameter

Grundwasserneubildung

Transportparameters

Quelltermfunktion

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - Assistent

Assistent Sickerwasserprognose

① — ② — ③ — ④ — ⑤

Geometrie | Bodenparameter | Grundwasserneubildung | Transportparameter | Quelltermfunktion

Auswahl der Quelltermfunktion

- zeitlich konstanter Stoffeintrag
- Exponentialfunktion

Funktionsparameter der Quelltermfunktion

Konzentration  $c$   $c_0$    $\mu\text{g/l}$

Dauer des Schadstoffeintrags  a

zeitl. Konst. Eintrag

Konzentration  $c$  [ $\mu\text{g/l}$ ]

Simulationzeit [a]

Navigation:

Geometrie

Bodenparameter

Grundwasserneubildung

Transportparameters

Quelltermfunktion

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - Assistent

Assistent Sickerwasserprognose

① — ② — ③ — ④ — ⑤

Geometrie | Bodenparameter | Grundwasserneubildung | Transportparameter | Quelltermfunktion

Auswahl der Quelltermfunktion

- zeitlich konstanter Stoffeintrag
- Exponentialfunktion

Funktionsparameter der Quelltermfunktion

Konzentration  $c$   $c_0$    $\mu\text{g/l}$

Dauer des Schadstoffeintrags  a

zeitl. Konst. Eintrag

Konzentration  $c$  [ $\mu\text{g/l}$ ]

Simulationzeit [a]

Navigation:

Geometrie

Bodenparameter

Grundwasserneubildung

Transportparameters

Quelltermfunktion

# PCSiWaPro<sup>®</sup> - Assistent

Assistent Sickerwasserprognose

① — ② — ③ — ④ — ⑤

Geometrie | Bodenparameter | Grundwasserneubildung | Transportparameter | Quelltermfunktion

Auswahl der Quelltermfunktion

- zeitlich konstanter Stoffeintrag
- Exponentialfunktion

Funktionsparameter der Quelltermfunktion

Konzentration  $c$        $c_0$     100     $\mu\text{g/l}$

Dauer des Schadstoffeintrags    10    a

zeitl. Konst. Eintrag

Konzentration  $c$  [ $\mu\text{g/l}$ ]

Simulationzeit [a]

Navigation: ◀ ▶ ✖

Geometrie

Bodenparameter

Grundwasserneubildung

Transportparameters

Quelltermfunktion



# 3. Lösungsweg

---

**Quantifizieren der Wasser- und Stoffflüsse im Boden hinsichtlich der Versickerungsleistung, des Reinigungs- und Speicherverhaltens**

- **Scenariumanalyse des Bodenwasserhaushaltes sowie des Abbaus organischer Abwasserinhaltsstoffe bei verschiedenen Randbedingungen  
→ 1D Laborversuche**
- Simulation des 1D Laborversuches mittels PCSiWaPro®
- Berücksichtigen der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Versickerungsquelle → 2D Sensitivitätsanalyse mittels PCSiWaPro®

# 3. 2. Säulenversuche

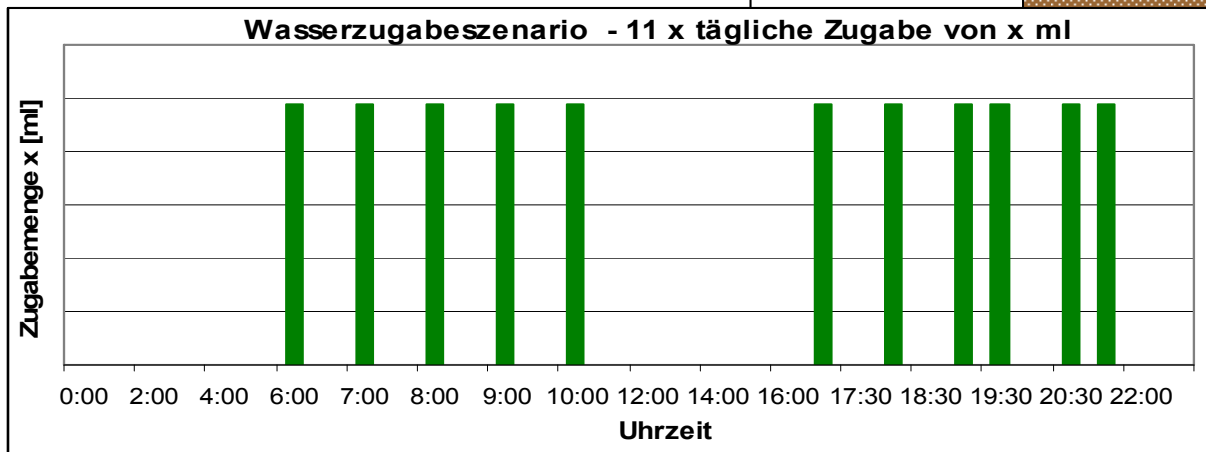
Zeitschaltuhr

Standort	Bodenart	$K_f$ [ $ms^{-1}$ ]	Laufzeit [d]
Biehein	Grobsand bis Kies	$2 \cdot 10^{-4}$	365
	Schwachschluffiger Sand	$2 \cdot 10^{-5}$	365
	Schluffiger Sand	$< 1 \cdot 10^{-7}$	Ausschluss
	Sandiger Ton	$< 1 \cdot 10^{-7}$	Ausschluss
Kleinopitz	Mittelschluffiger Sand	$1 \cdot 10^{-6}$	185

## Abwasserqualität Säulenzulauf

	Einheit	Zulauf	Grenzwerte Trinkwasser-verordnung 2011
pH	-	6,46	6,5-9,5
LF	$\mu S\ cm^{-1}$	1065	2790
AFS	$mg\ L^{-1}$	0,12	
CSB	$mg\ L^{-1}$	90	
DOC	$mg\ L^{-1}$	18,5	
$NO_2^- - N$	$mg\ L^{-1}$	1,02	0,15
$NO_3^- - N$	$mg\ L^{-1}$	57,6	11,3
$NH_4^+ - N$	$mg\ L^{-1}$	15,2	0,39
TKN	$mg\ L^{-1}$	16,5	
$P_{ges}$	$mg\ L^{-1}$	19,2	
$SO_4^{2-}$	$mg\ L^{-1}$	112,3	250
$Cl^-$	$mg\ L^{-1}$	109,6	250
E.Coli	/100 ml	269	0

Wasserzugabe für 24 h nach Tagesganglinie Wasserverbrauch



behälter



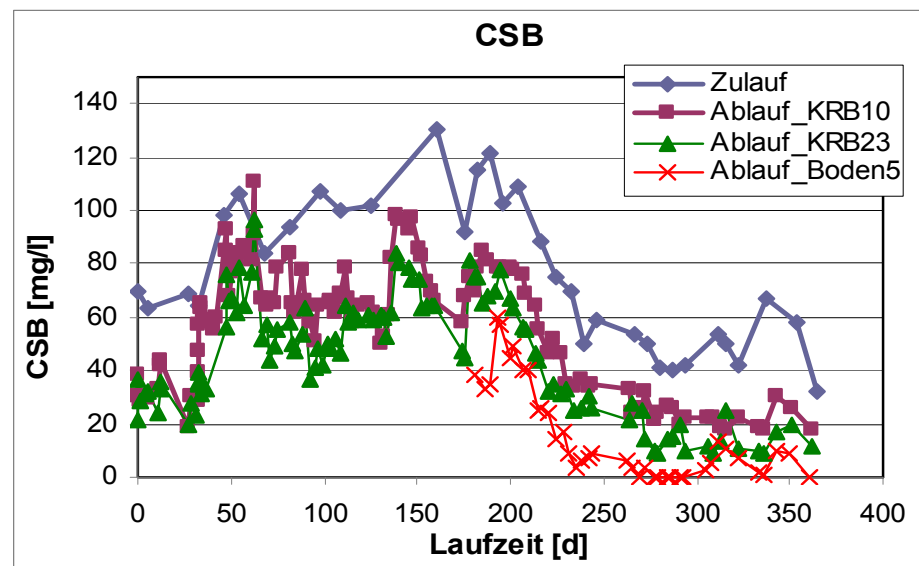
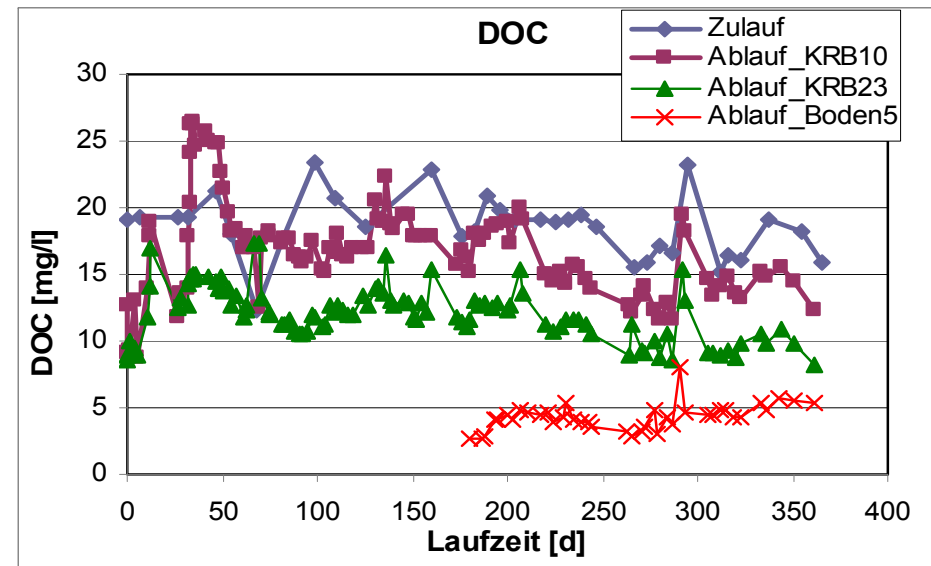
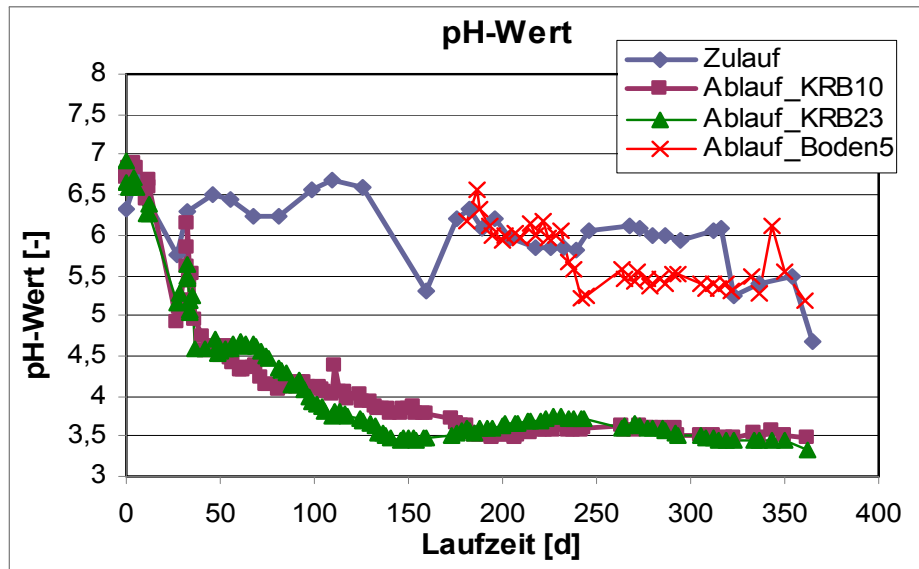
## Untersuchung Bodenwasserhaushalt sowie Abbau organischer Abwasserinhaltsstoffe unter Variation verschiedener Randbedingungen → 1D Laborversuche

---

- Beschickung der Versuchssäulen mit gereinigtem Abwasser unterschiedlicher Qualität in Abhängigkeit von den Größenklassen der Kleinkläranlagen
- Variation der Beschickungsmenge in Abhängigkeit von den Größenklassen der Kleinkläranlagen
- Variation der klimatologischen Randbedingungen (Winter 10°C – Sommer 20°C)
- Kontinuierliche/diskontinuierliche Beschickung der Versuchssäulen mit gereinigtem Abwasser
- Untersuchung weiterer Prozesse wie z.B. Sorption, Fällung, Clogging und Kolmation

# Untersuchung Bodenwasserhaushalt sowie Abbau organischer Abwasserinhaltsstoffe unter Variation verschiedener Randbedingungen → 1D Laborversuche

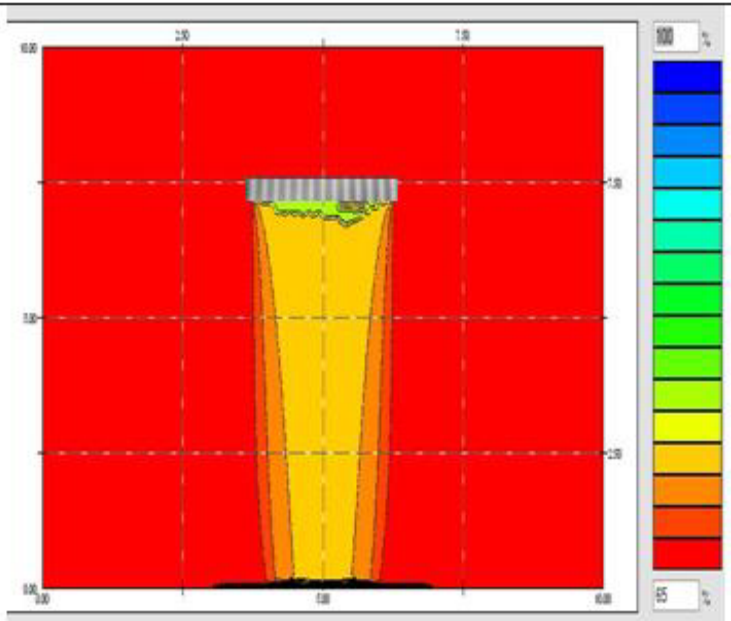
## Ergebnisse – Abwasserinhaltsstoffe



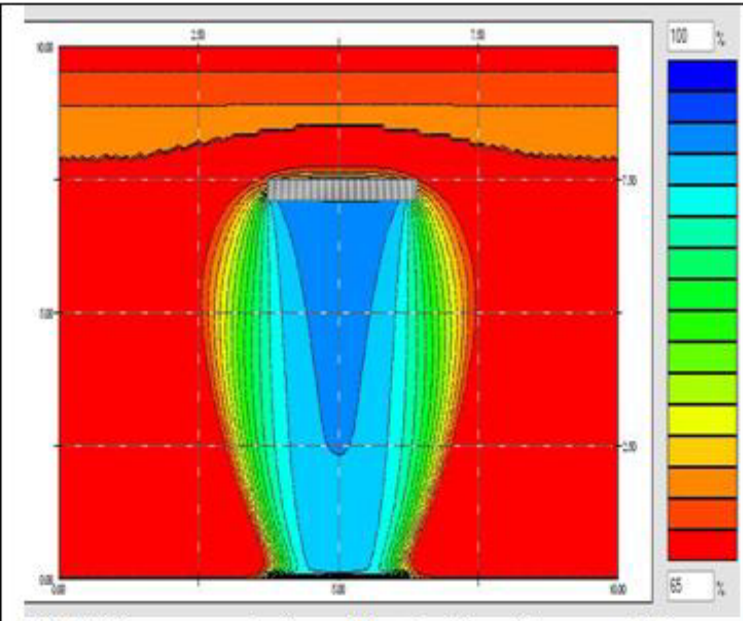
Extreme pH-Wert Absenkung in KRB10 und KRB23 – Ursache geringe Pufferkapazität  
Boden - negative Auswirkungen auf Abbau

Reduzierung DOC .....

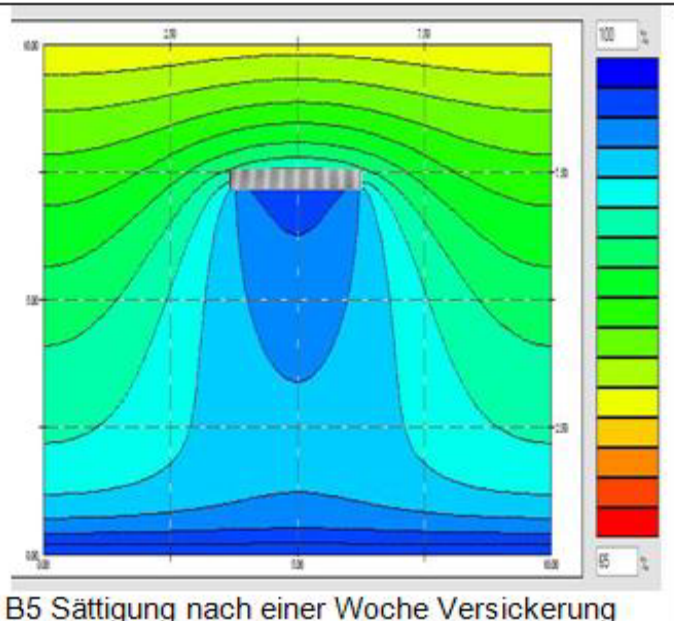
Reduzierung CSB ...



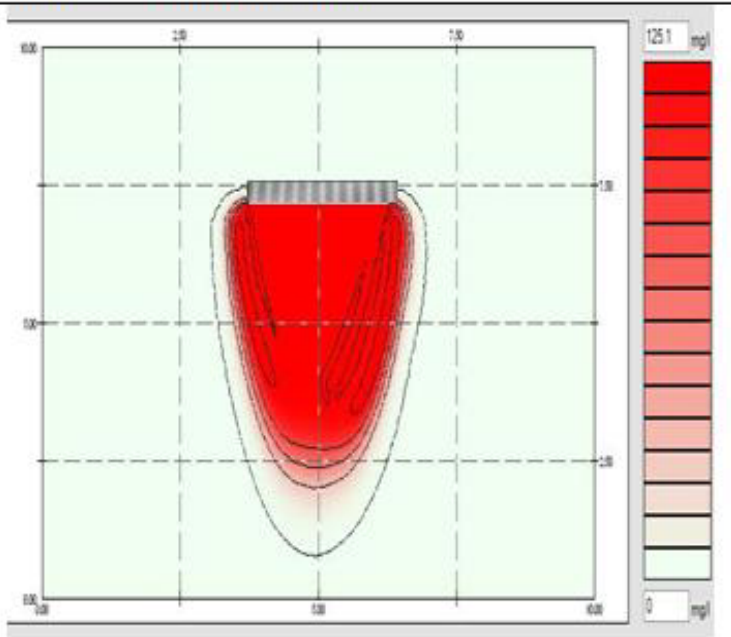
B4 Sättigung nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)



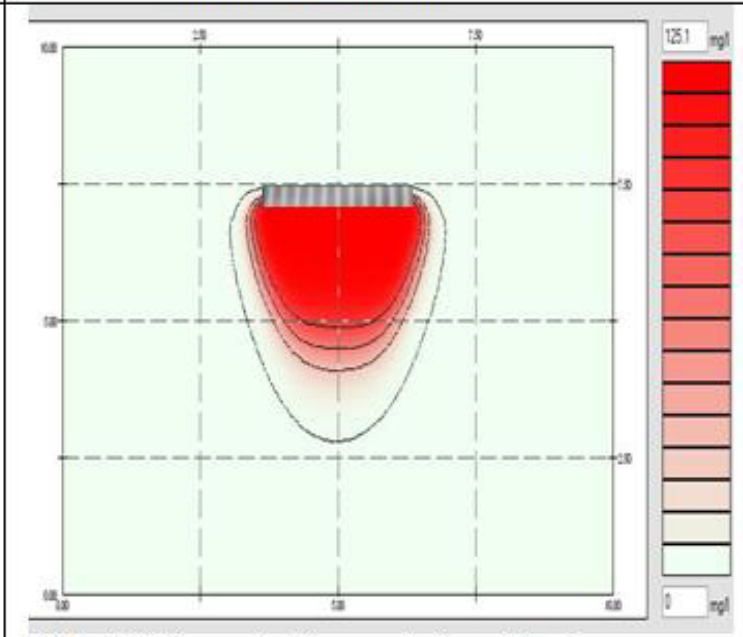
B3 Sättigung nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)



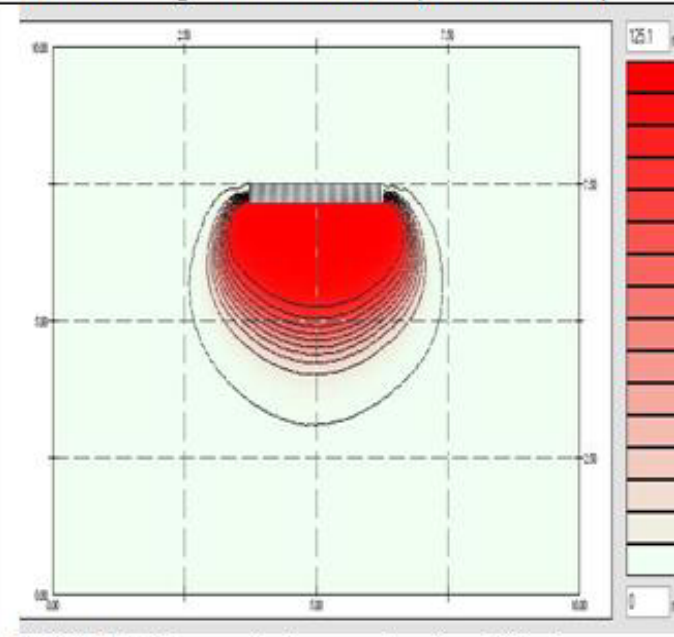
B5 Sättigung nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)



B4 Sulfat-Konzentration nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)



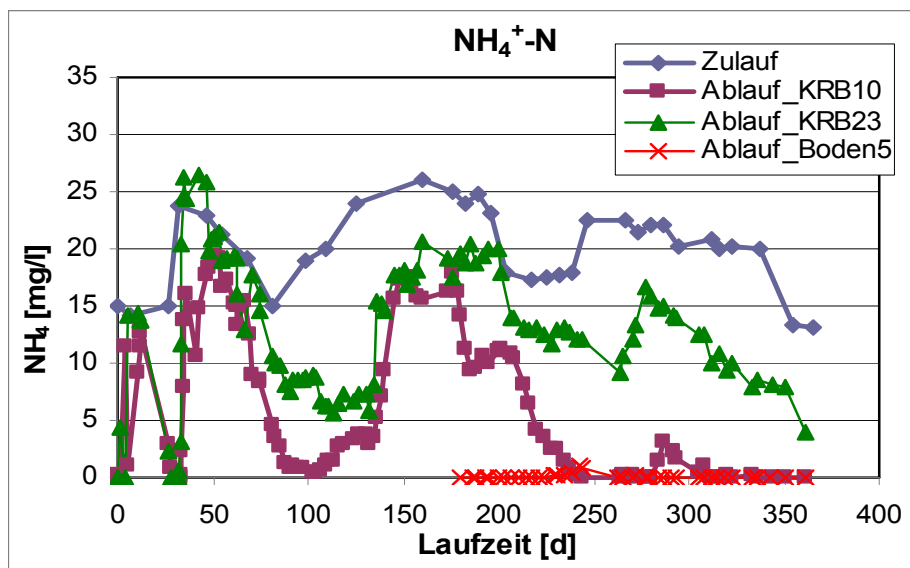
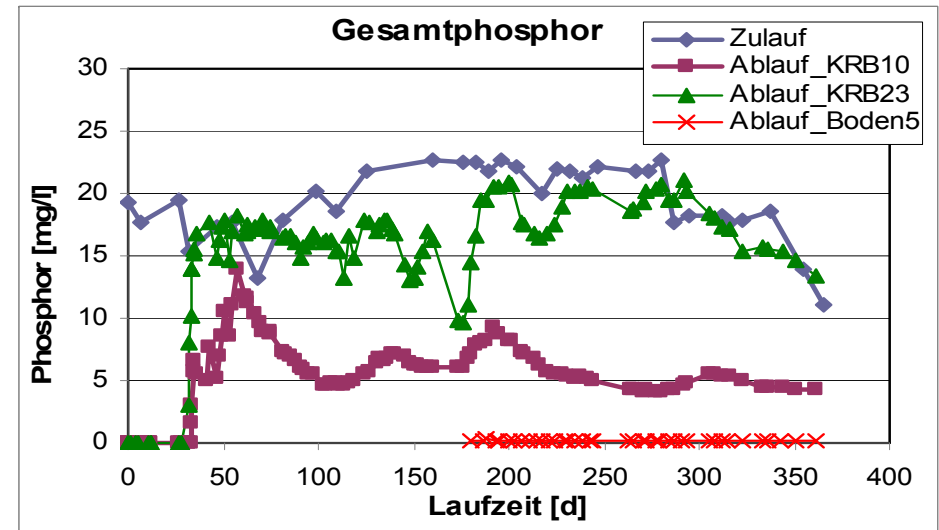
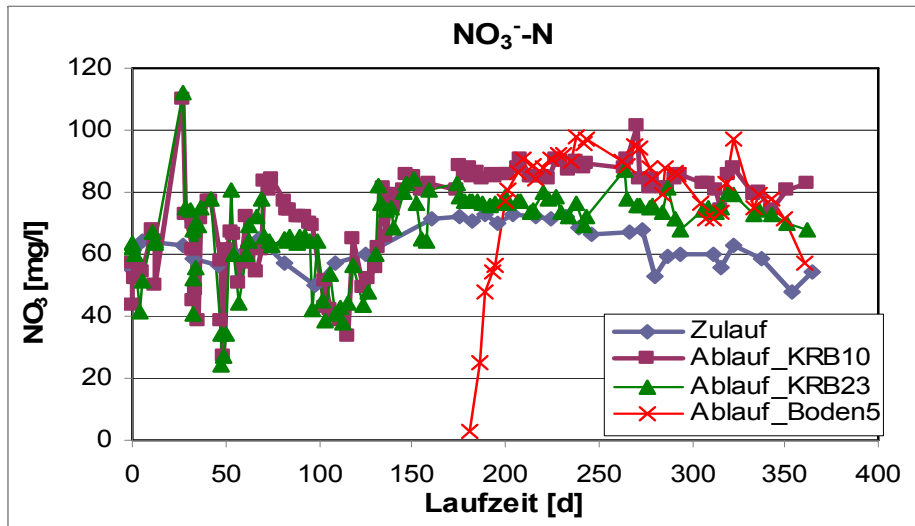
B3 Sulfat-Konzentration nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)



B5 Sulfat-Konzentration nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)

# Untersuchung Bodenwasserhaushalt sowie Abbau organischer Abwasserinhaltsstoffe unter Variation verschiedener Randbedingungen → 1D Laborversuche

## Ergebnisse – Abwasserinhaltsstoffe



Reduzierung Ammonium .....

Durch Nitrifikation Anstieg  
Nitratkonzentration

Reduzierung Phosphor .....

# 3. Lösungsweg

---

## Quantifizieren der Wasser- und Stoffflüsse im Boden hinsichtlich der Versickerungsleistung, des Reinigungs- und Speicherverhaltens

- Szenariumanalyse des Bodenwasserhaushaltes sowie des Abbaus organischer Abwasserinhaltsstoffe bei verschiedenen Randbedingungen → 1D Laborversuche
- **Simulation des 1D Laborversuches mittels PCSiWaPro®**
- Berücksichtigen der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Versickerungsquelle → 2D Sensitivitätsanalyse mittels PCSiWaPro®

# Schritte der Modellierung mit PCSiWaPro®

PCSiWaPro - C:\Dokumente und Einstellungen\Issa Hasan\Desktop\SiWaPro\_KKA\Säulenversuch\_Biehai\SiWaPro Daten.mdb

Datenbank Projekt Variante Simulation Auswertung Extras ?

Säulenversuch

- B3\_schwach schluffiger Sand\_Stromrate825 ml/d\_Minutenweise
  - Ausgabezeiten
  - Simulationssteuerung
  - Materialparameter
  - Zeitabhängige Randbedingungen
  - Netzdaten
- B4-Kies\_Stromrate 1650 ml/d\_Minutenweise
- doppelteSR\_ B3
- doppelteSR\_ B4
- ADH-15\_ B3\_schwach schluffiger Sand\_Stromrate825 ml/d\_Minutenweise
- 8Tage\_ B3\_schwach schluffiger Sand\_Stromrate825 ml/d\_Minutenweise
- ADH-10-12\_ B3\_schwach schluffiger Sand\_Stromrate825 ml/d\_Minutenweise
- Parameteridentifikation von B3\_schwach schluffiger Sand

Varianteninform

Variantenbesch

Variantentitel

Zusatz

Einheiten

Modellabmessung

Ausgabezeiten in

Masse

Speicherort für

C:\Dokumente und

Zeitabhängige Randbedingungen

Zeit [min]	Niederschlagsmenge [cm/min]	Pot. Evaporation [cm/min]	Pot. Transpiration [cm/min]	Grundwasserspiegel [cm]	Potential (RB 8) [cm]
299	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0
301	0.0005	0	0	0	0
302	0.0005	0	0	0	0
303	0.0005	0	0	0	0
304	0.0005	0	0	0	0
305					
306					
307					
308					
309					
310					
311					
312					
313					
314					
315					
316					
317					
318					
319					
320					
321					
322					
323					
324					
325					
326					

Materialparameter

1/1

Hydraulik Stofftransport Kinetik

Bodenhydraulische Parameter

Porosität  $\phi$  0.44

Durchlässigkeit  $k_0/k_f$  0.3

Restwassergehalt  $\theta_{w,r}$  0

Restluftgehalt  $\theta_{L,r}$  0

Wassergehalt bei  $k_0/k_f$  0.44

Wassergehalt

Kapillardruck

Materialparameter

1/1

Hydraulik Stofftransport Kinetik

Bodenspezifische Parameter

Trockenrohdichte  $\rho_b$  1.5 g/cm<sup>3</sup>

Diffusionskoeffizient  $D_M$  0.00011 cm<sup>2</sup>/min

Diffusionskoeffizient in Luft  $D_L$  0 cm<sup>2</sup>/min

Longitudinale Dispersivität  $\delta_L$  6.5 cm

Transversale Dispersivität  $\delta_T$  0.6 cm

Sorptionsparameter

Sorptionsisotherme FREUNDLICH-Isothe

Freundlich - Koeffizient  $K_F$  1.2  $\mu\text{g}^{(1-n)}/\text{kg}$

Freundlich - Exponent  $q$  1.4

Henry-Koeffizient (Gasphase)  $K$  0 [-]

Abschätzfunktionen

Schadstoffdatenbank

Schichtansprache (DIN 4022) schwach schluffiger

Bodenart (DIN 4220) Su2

Schadstoff Sulfat

Reaktionsparameter

Zerfallskonstante 0. Ordnung (gelöst)  $\gamma_w$  0 [-]

Zerfallskonstante 0. Ordnung (fest)  $\gamma_s$  0 [-]

Zerfallskonstante 0. Ordnung (Gasphase)  $\gamma_g$  0 [-]

Zerfallskonstante 1. Ordnung (gelöst)  $\mu_w$  0.000 1/min

Zerfallskonstante 1. Ordnung (fest)  $\mu_s$  0.000 1/min

Zerfallskonstante 1. Ordnung (Gasphase)  $\mu_g$  0 1/min

Sorbierte Stoffmenge [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ]

Konzentration in der Lösung [ $\mu\text{g}/\text{l}$ ]

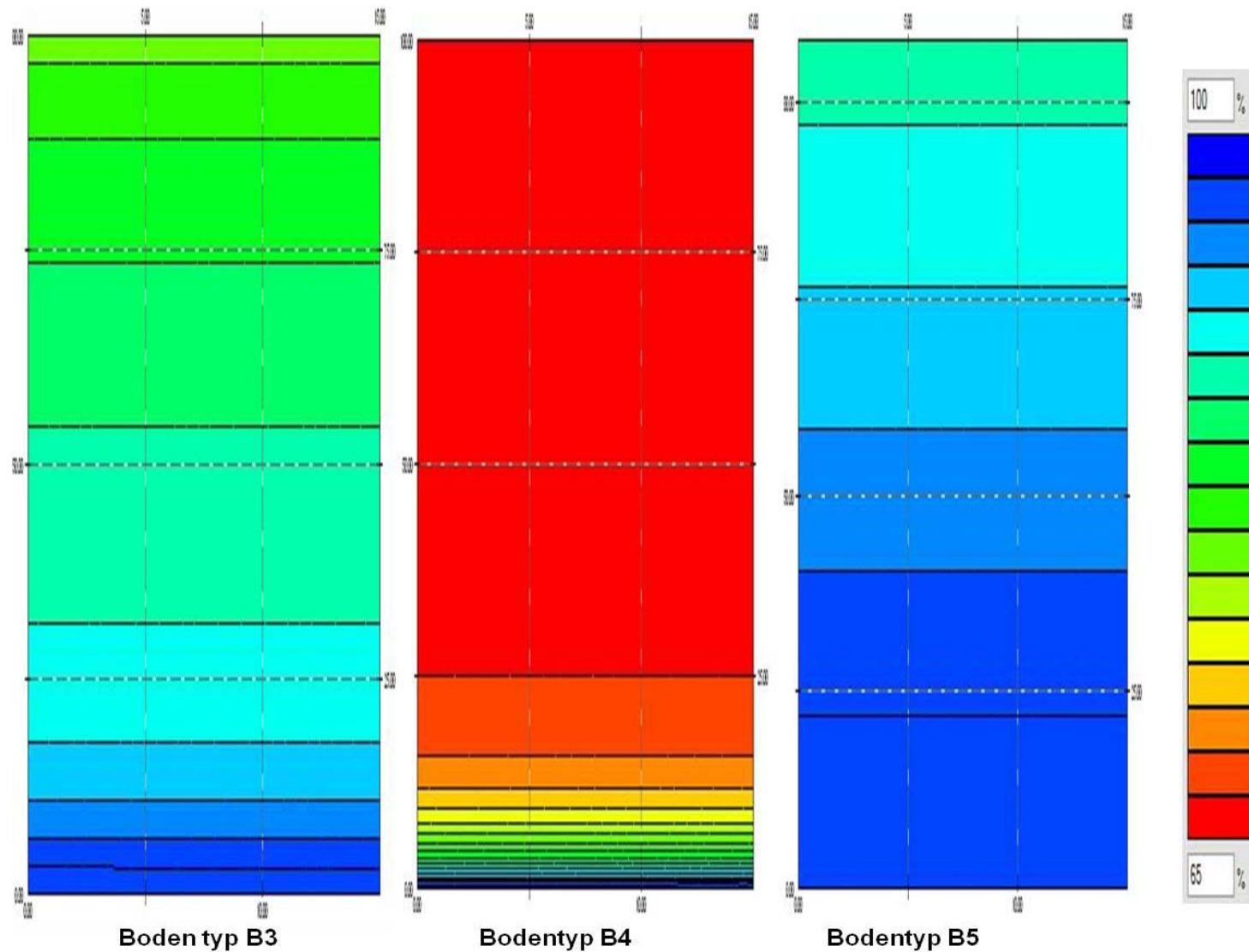
Maximal erlaubte Druck

TATM: Zeit für den RB-Wechs

Variantenbeschreibung, zeitabhängige RB und Materialparameter

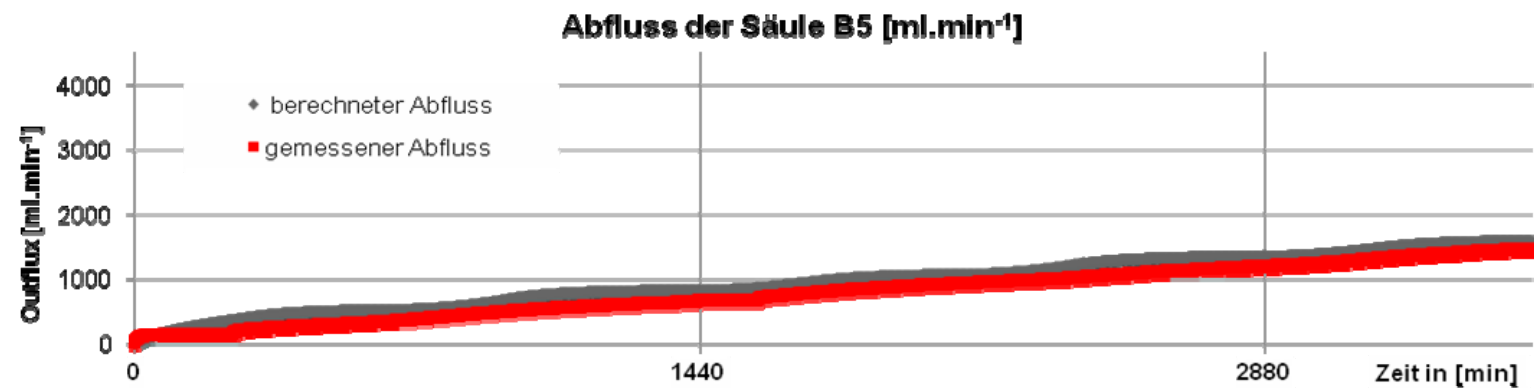
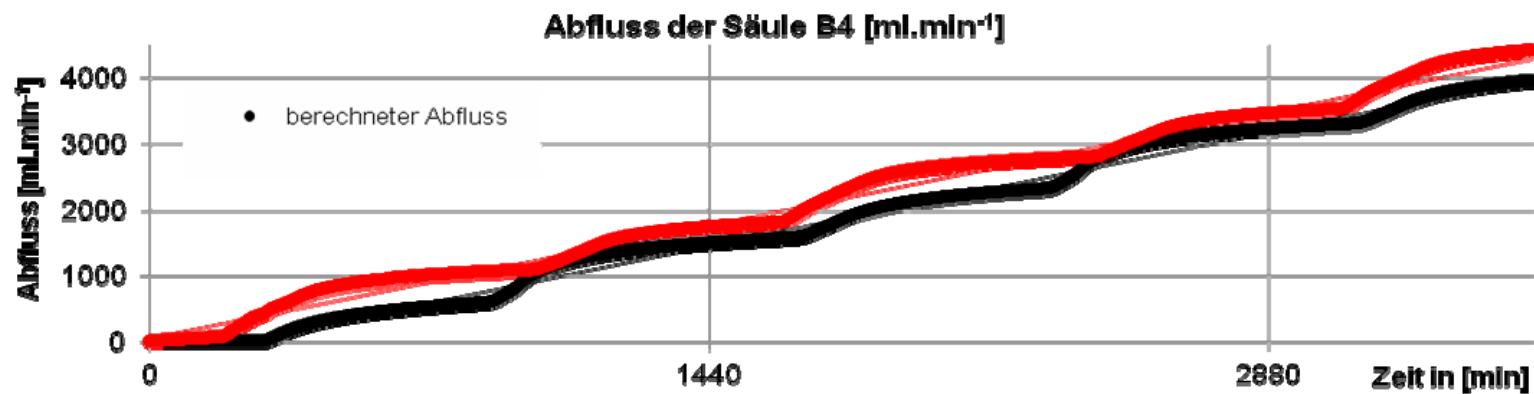
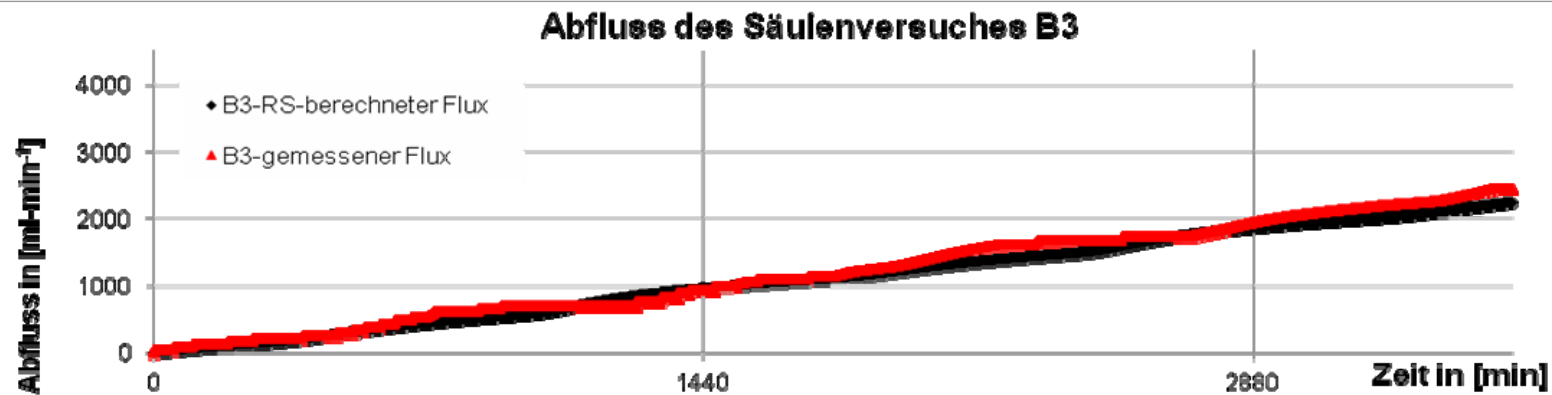


# Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®



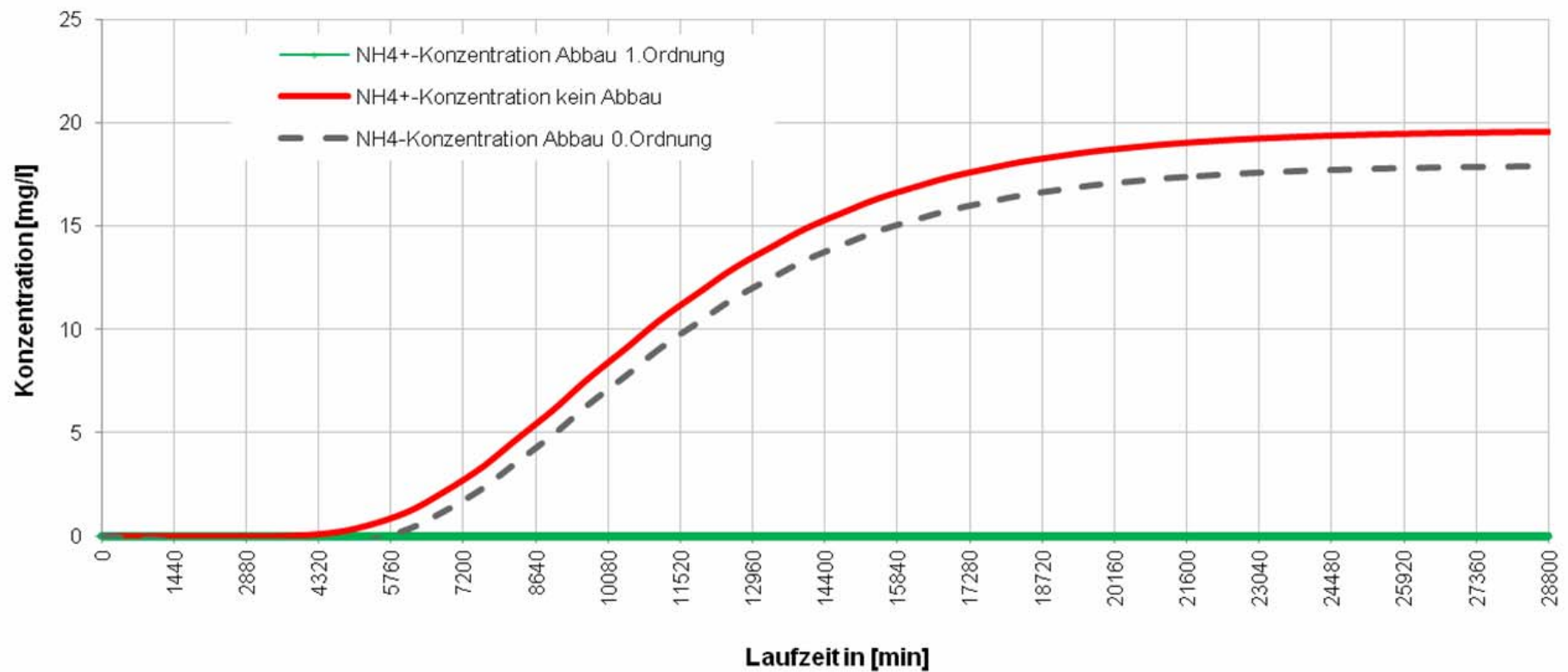
Verteilung der Wassersättigung nach einem Tag Infiltration der untersuchten Böden

# Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®

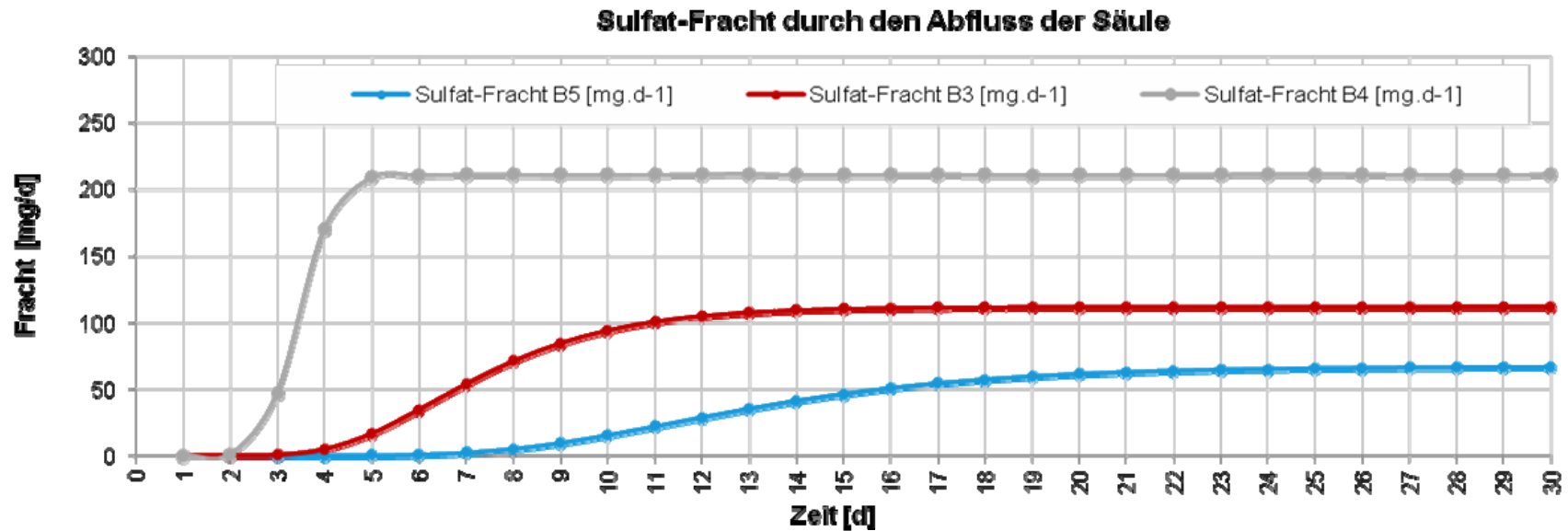
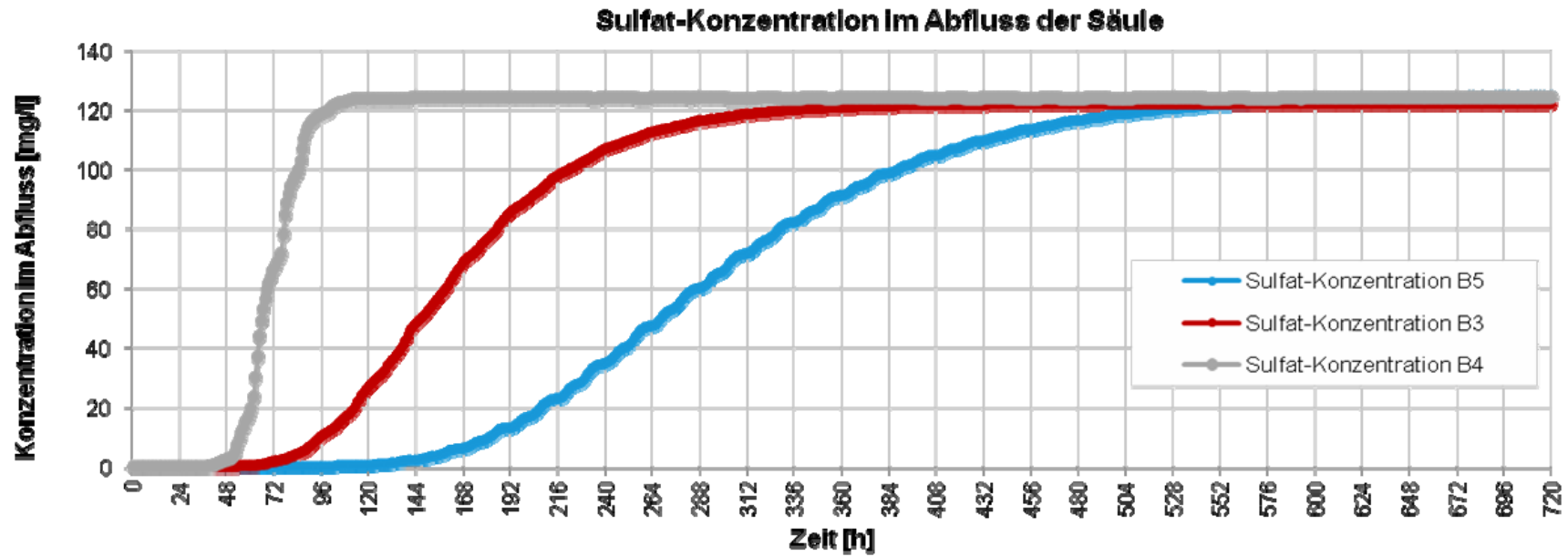


# Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®

## NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Konzentration im Ablauf der Säule für Boden 5

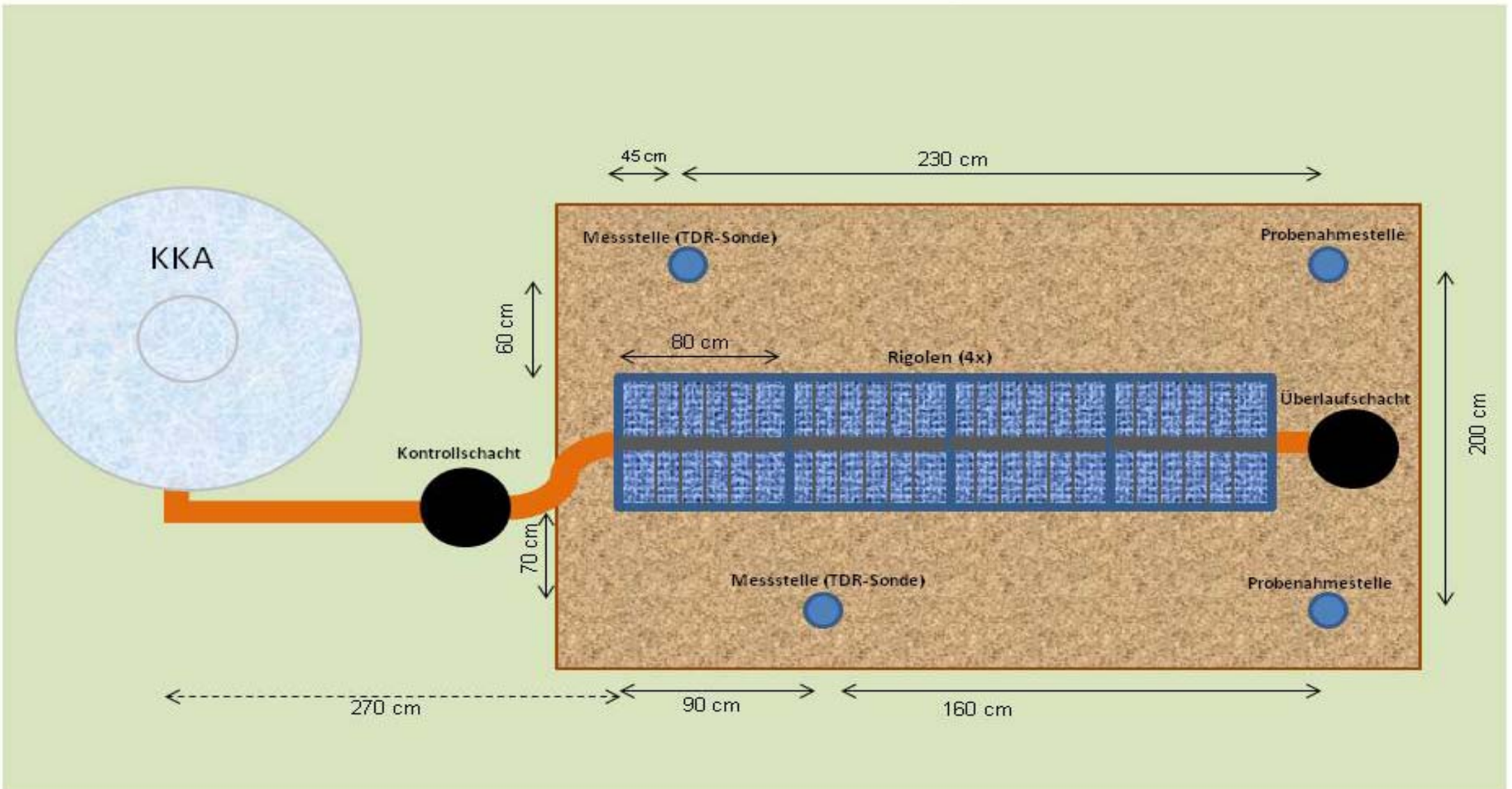


# Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®



# Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®

## Skizze des Feldversuches in Kleinopitz

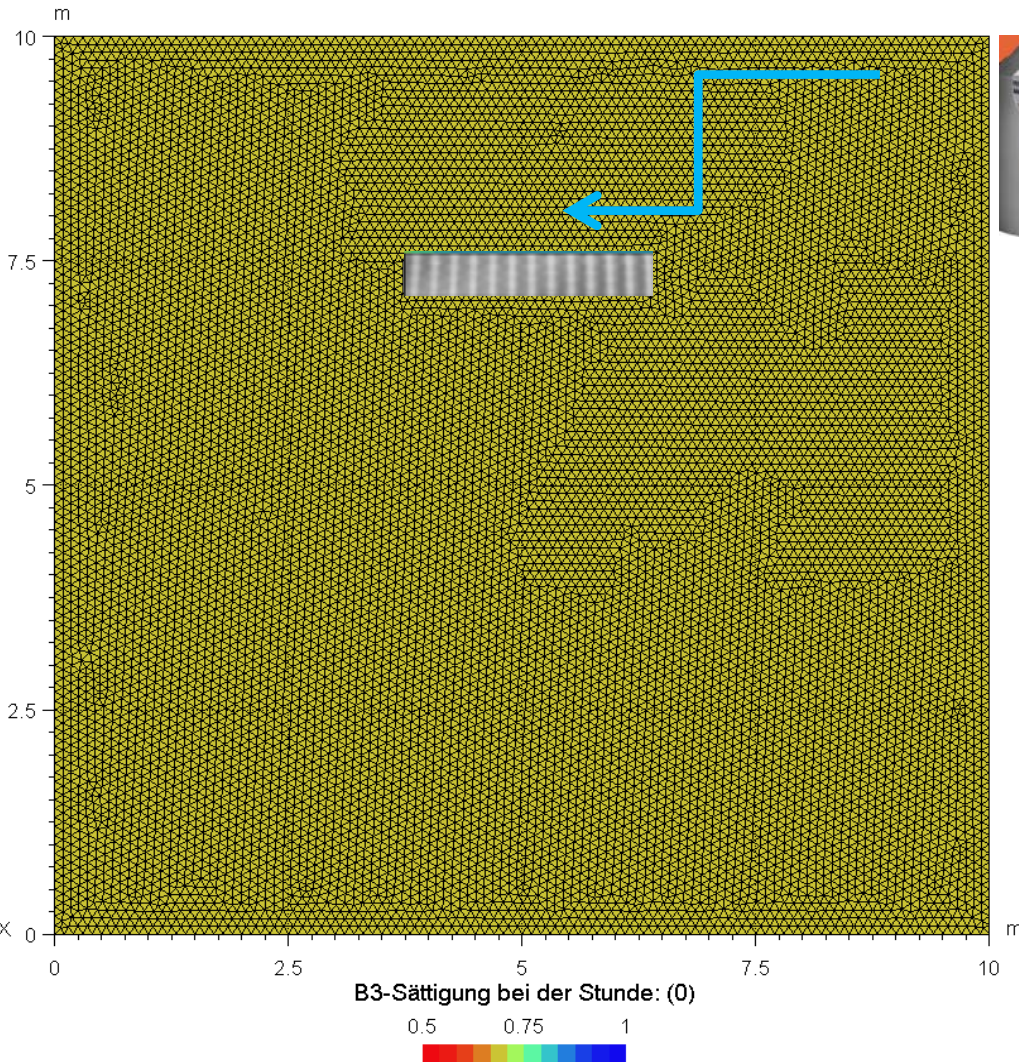




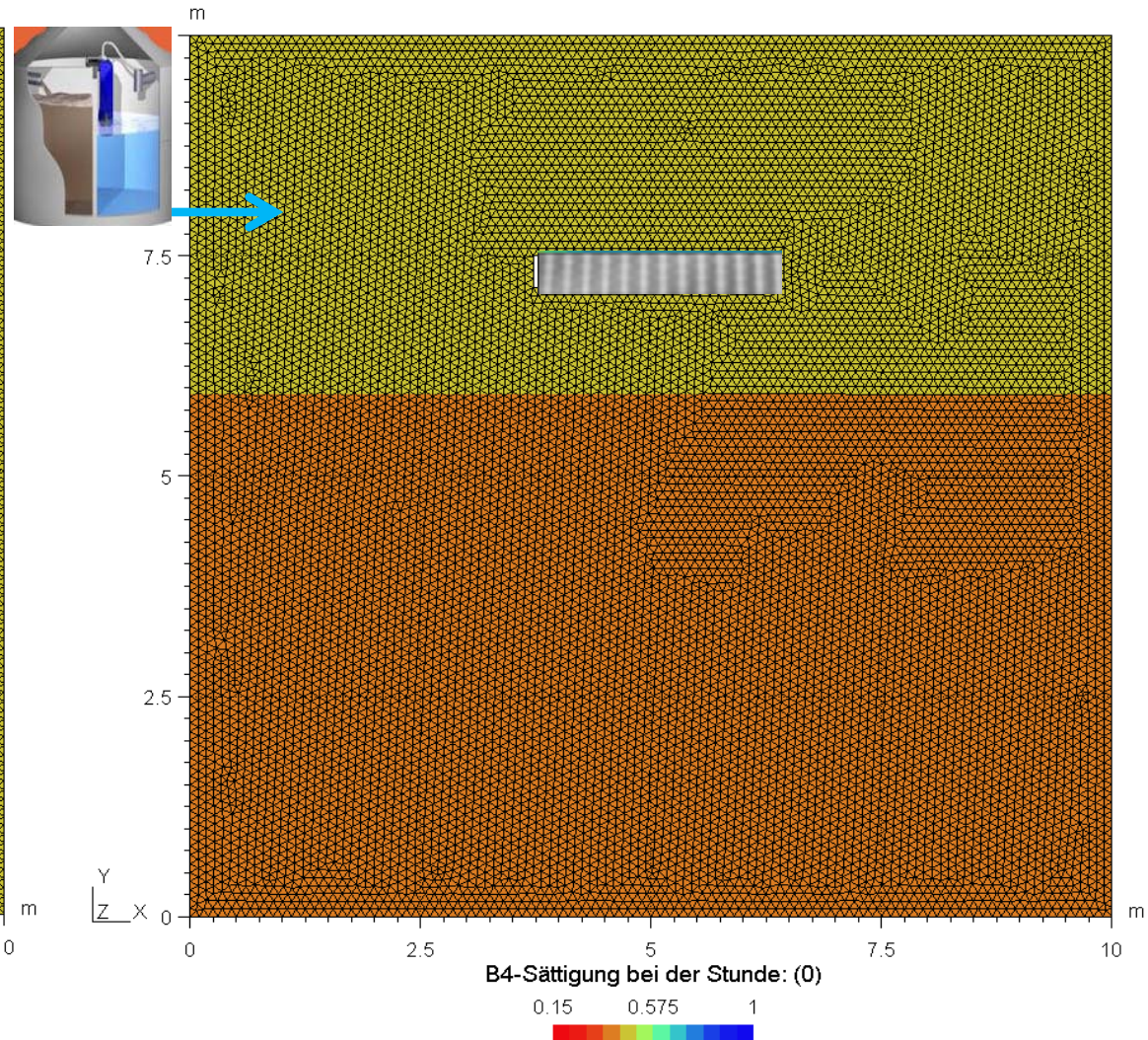
2012/4/24 9:16

# Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®

Wassersättigung bei (schwach schluffiger Sand) B3 und (Grobsand/Kies) B4 unter Berücksichtigung der atmosphärischen Bedingungen mit 400l/d Abwassermenge

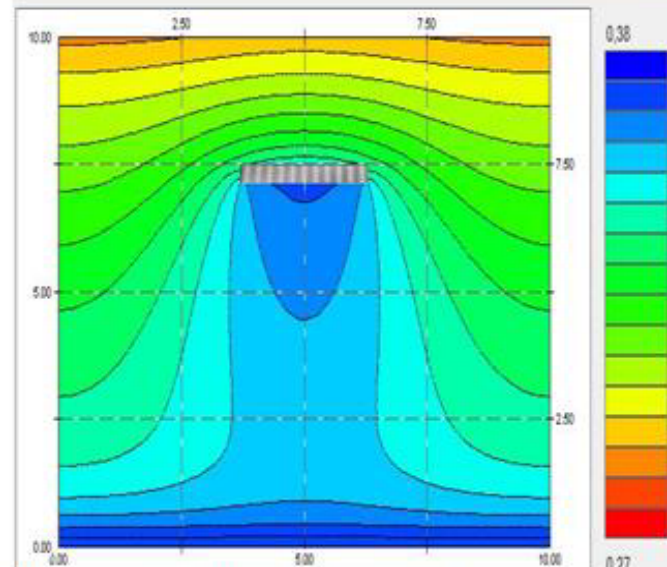
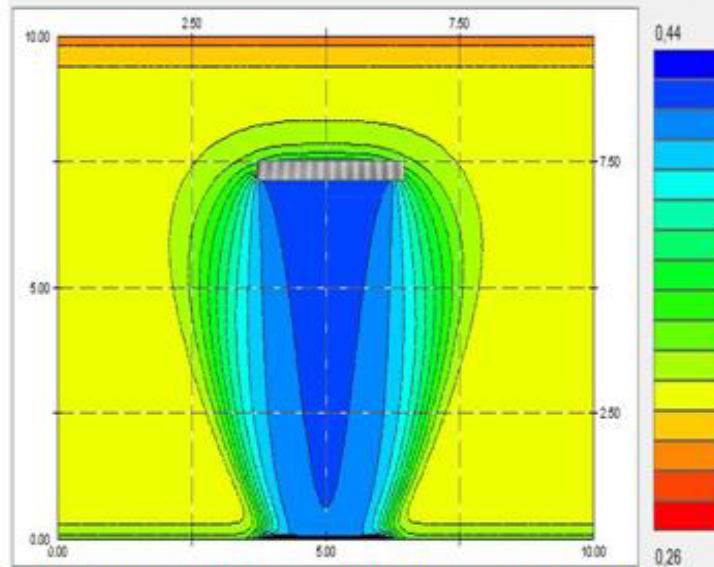
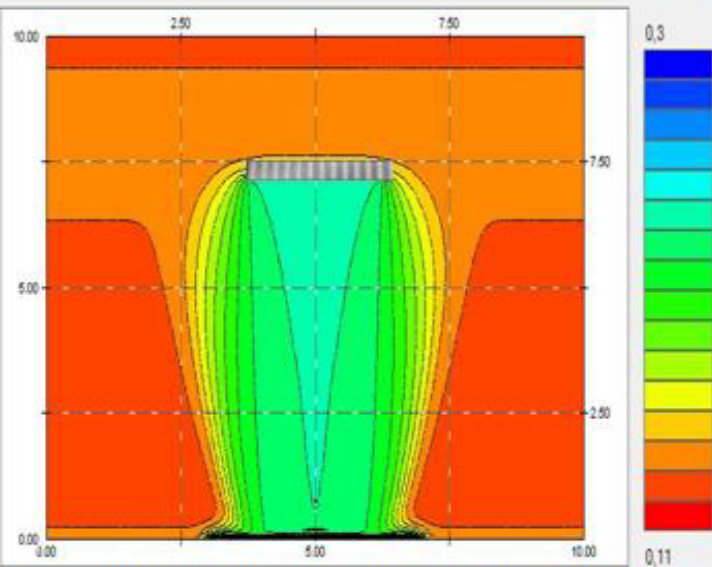


Wassersättigung B3-Feldversuch



Wassersättigung B4-Feldversuch

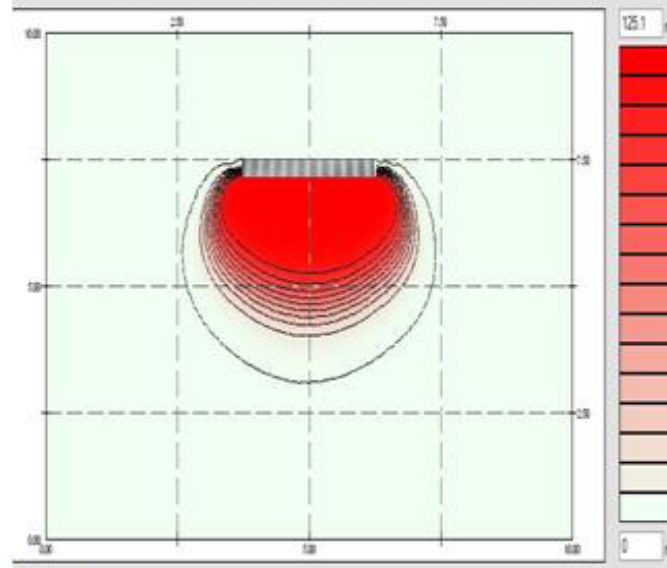
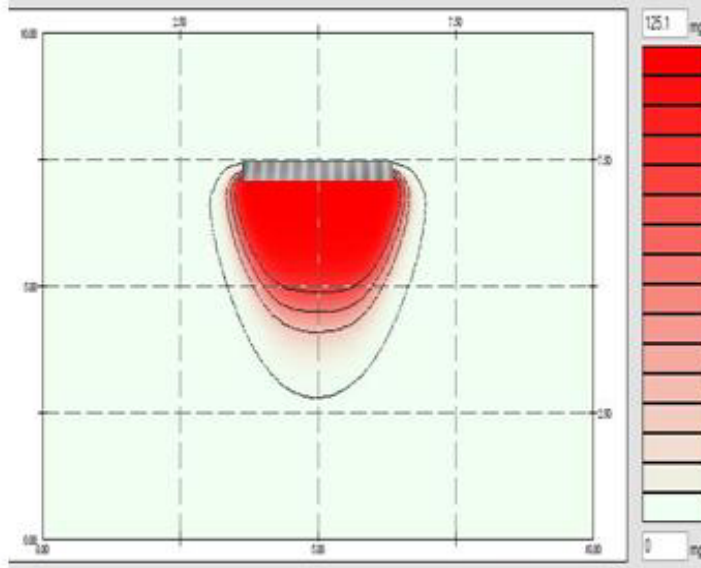
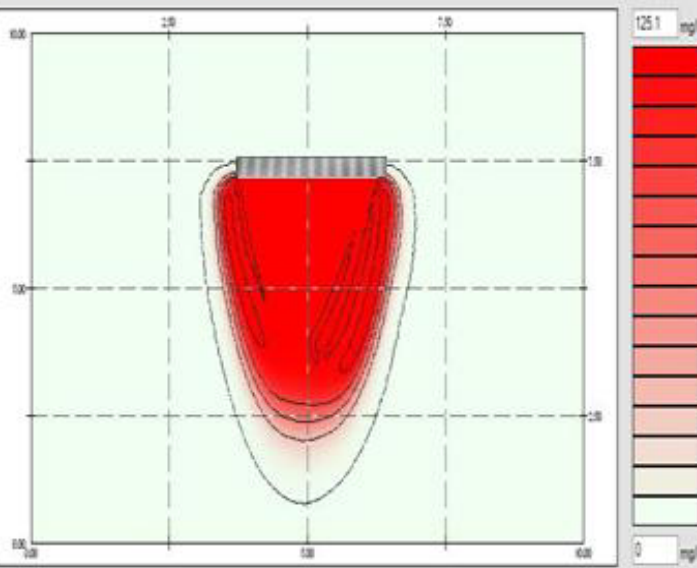
# Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®



B4 Wassergehalt nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)

B3 Wassergehalt nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)

B5 Wassergehalt nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)



B4 Sulfat-Konzentration nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)

B3 Sulfat-Konzentration nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)

B5 Sulfat-Konzentration nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)



### 3. Lösungswege?

---

Quantifizieren der Wasser- und Stoffflüsse in Boden hinsichtlich der  
Versickerungsleistung, Reinigungs- und Speicherverhalten

- Untersuchung Bodenwasserhaushalt sowie Abbau organischer  
Abwasserinhaltsstoffe unter Variation verschiedener  
Randbedingungen → 1D Laborversuche
- Simulation des Labor und Feldversuche mittels PCSiWaPro®
- **Berücksichtigen der räumlichen und zeitlichen Variabilität  
der Versickerungsquelle→  
2D Sensitivitätsanalyse mittels PCSiWaPro®**

## 2D-Sensitivitätsanalyse mittels PCSiWaPro®

- getestete Kenngröße und Simulationslaufzeit

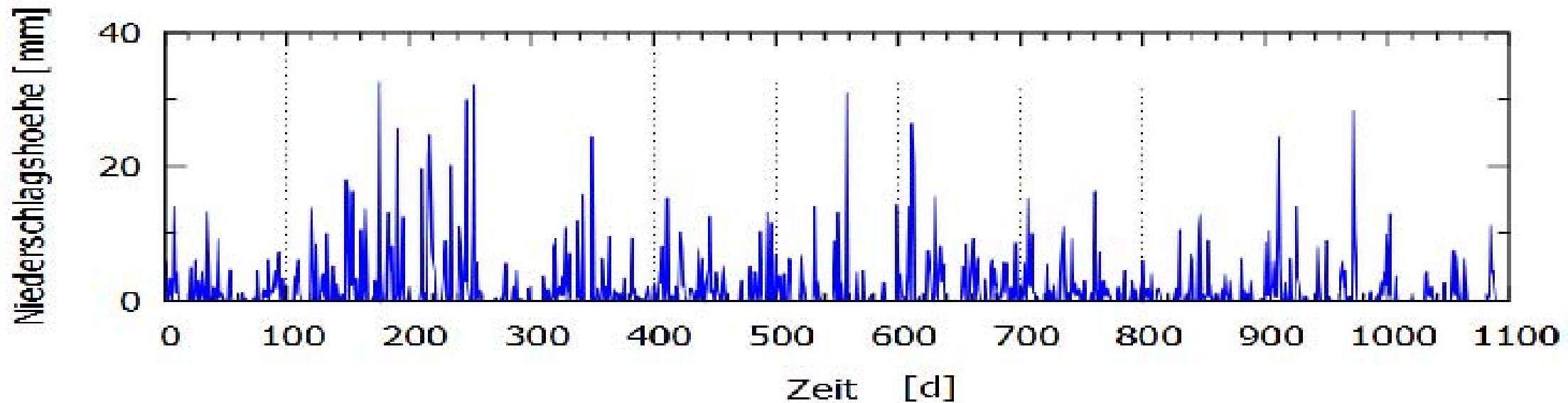
- konstante Infiltrationsrate : Kleinkläranlage für 4 Personen

- Modell Flurabstand:  **$Q=0,025 \text{ m}^3/(d \cdot p)$**  bzw.  **$0,075 \text{ m}^3/(d \cdot p)$**   
reduziert aus Einwohnerwert ( $Q=0,15 \text{ m}^3/(d \cdot p)$ ) aufgrund Verdunstung,  
Kolmation

- Modell Niederschlag:  **$Q=0,0025 \text{ m}^3/(d \cdot p)$**  bezogen auf den Säulenversuch

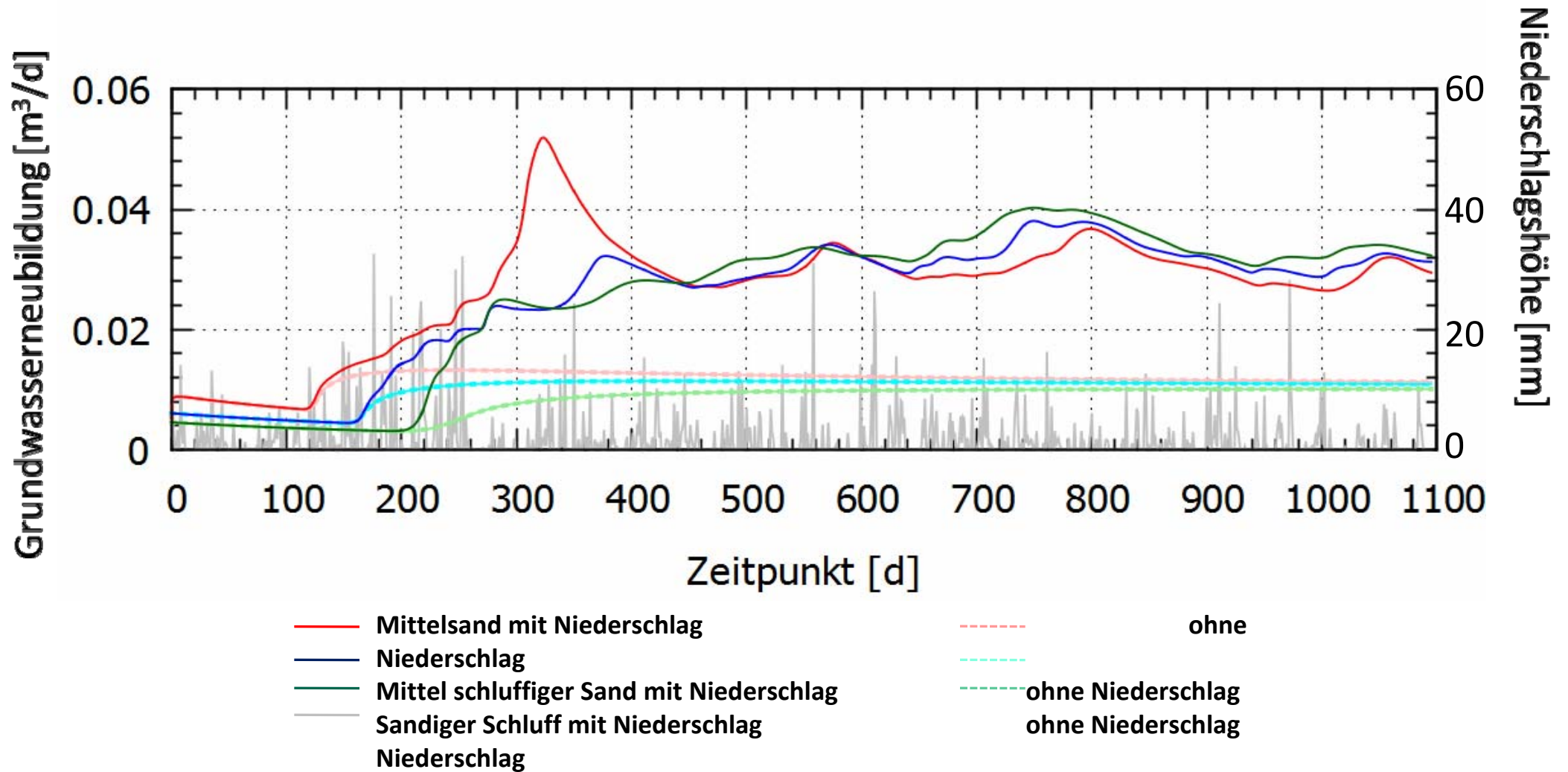
- Bodenparameter nach DIN 4220

## Niederschlagsmenge

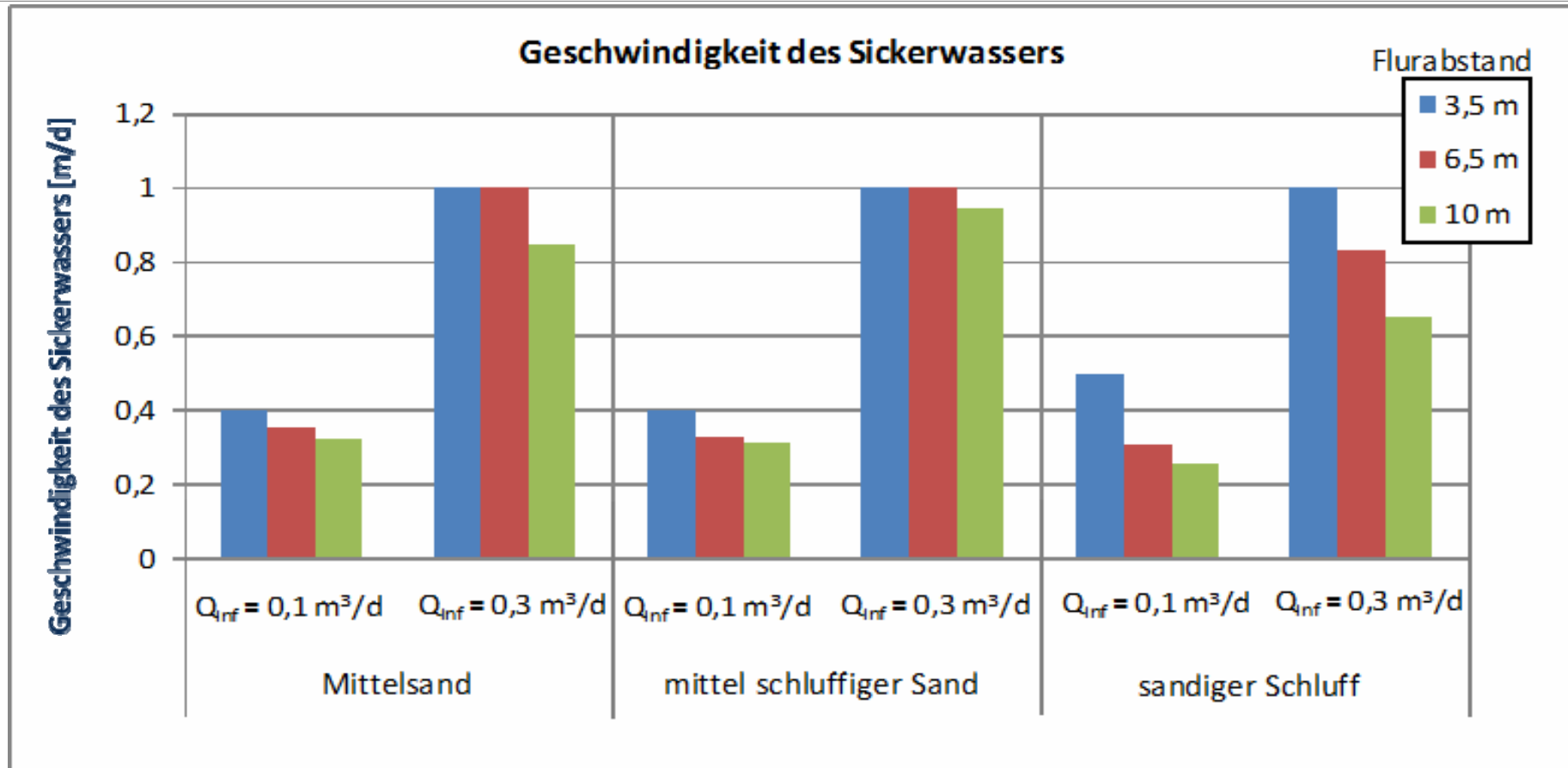


- Klimastation Görlitz (aus Wettergenerator von PCSiWaPro®)
- Länge der Datenreihen 10...20 Jahre
- Jahresniederschlagshöhe 676 mm

# 2D-Sensitivitätsanalyse mittels PCSiWaPro®



## 2D-Sensitivitätsanalyse mittels PCSiWaPro®



**Bodenart ( $k_f$ -Wert) ↑**

**Flurabstand ↑**

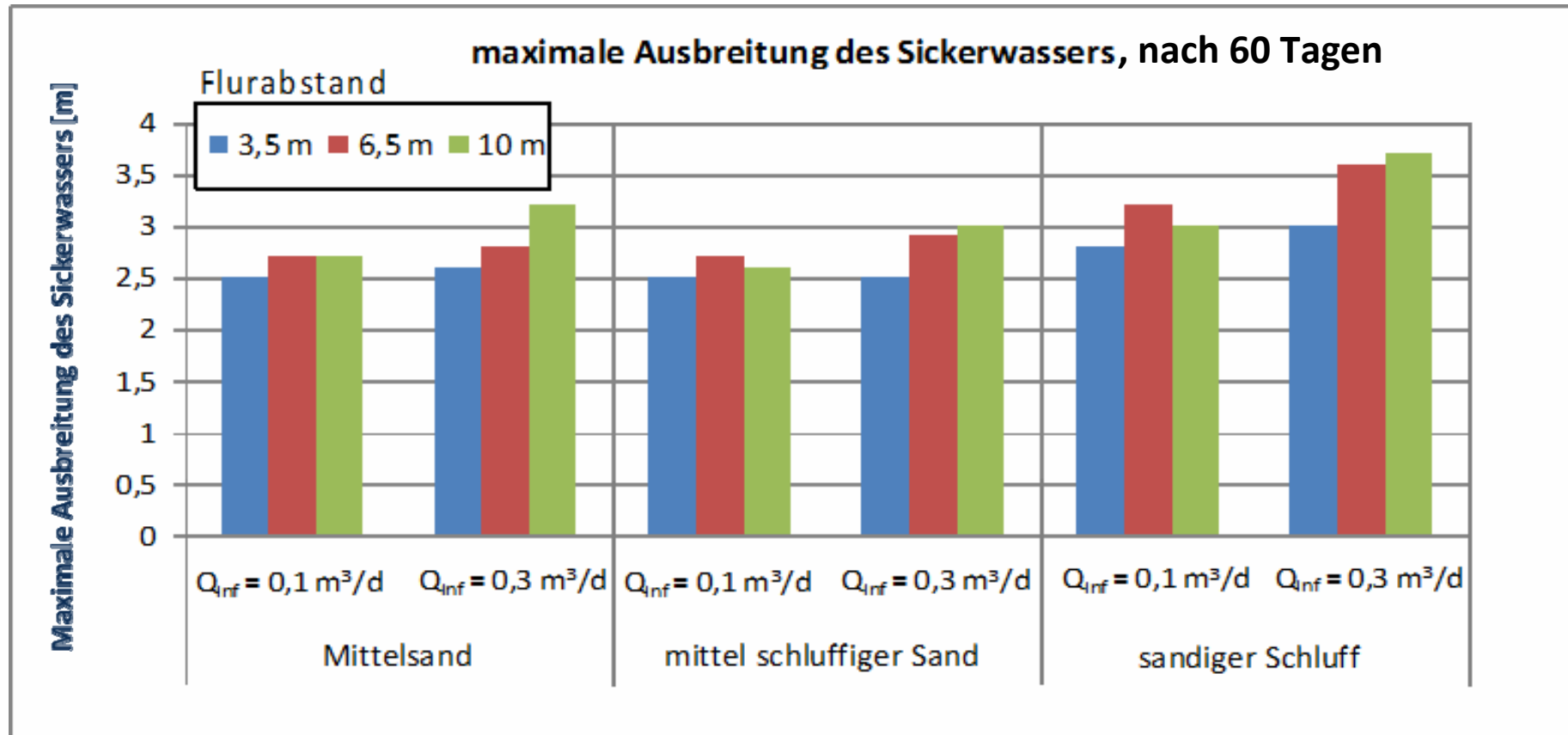
**Infiltrationsrate ↑**

**Geschwindigkeit ↓**

**Geschwindigkeit ↓**

**Geschwindigkeit ↑**

## 2D-Sensitivitätsanalyse mittels PCSiWaPro®



**Bodenart ( $k_f$ -Wert) ↑**



**max. Ausbreitung (↓)**

**Flurabstand ↑**



**max. Ausbreitung ↑**

**Infiltrationsrate ↑**



**max. Ausbreitung ↑**

## 4. Schlussfolgerungen der Säulenversuche

---

- Eine ausreichende Versickerungsfähigkeit konnte für Böden mit  $k_f$  -Wert  $\geq 1 \cdot 10^{-7}$  m/s nachgewiesen werden
- Bei Realisierung ungesättigter Verhältnisse im Laborversuch lagen die infiltrierten Abwassermengen im Verhältnis zur Natur weit unter den üblichen 150 l/EW/d/m<sup>2</sup>
- Nur in einer Laborsäule konnte der Abbau aller relevanten, untersuchten Abwasserinhaltsstoffe nachgewiesen werden – in den beiden anderen Laborsäulen war der biologische Abbau durch sehr niedrige pH-Werte gehemmt
- Die Variation verschiedener Randbedingungen hatte keinen signifikanten Einfluss auf den Abbau
- Im Versuchszeitraum ließ sich kein Clogging nachweisen
- Um im Vorfeld der Infiltration von gereinigtem Abwasser Aussagen zur Reduzierung von Abwasserinhaltsstoffen zu treffen, ist es notwendig neben den bodenphysikalischen auch bodenchemische Eigenschaften zu untersuchen

# 4. Schlussfolgerungen der Sensitivitätsanalyse

## Modell Niederschlag

- Erhöhung des Wassergehaltes in der ungesättigten Zone (ca. 5 – 9 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)
- Vergrößerung der Ausbreitung der Sättigungsfront bei hohem Wassergehalt

## Modell Flurabstand

	Geschwindigkeit	Ausbreitung bei gleichem Wassergehalt	max. Ausbreitung
<b>Bodenart (k<sub>f</sub>-Wert) ↑</b>	↕	↓↓↓	(↓)
<b>Flurabstand ↑</b>	↓↓	↓	↑↑
<b>Infiltrationsrate ↑</b>	↑↑↑	↑↑	↑↑

↕      geringe Sensitivität  
 ↕ ↕    mäßige Sensitivität  
 ↕ ↕ ↕   starke Sensitivität



# 4. Schlussfolgerungen der Sensitivitätsanalyse

## Modell Niederschlag

- Erhöhung des Wassergehaltes in der ungesättigten Zone (ca. 5 – 9 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)
- Vergrößerung der Ausbreitung der Sättigungsfront bei hohem Wassergehalt

## Modell Flurabstand

- Ankunftszeit 2 Tage bei Flurabstand = 3,5 m, Infiltrationsrate = 0,3 m<sup>3</sup>/d  
→ zu wenig Reaktionszeit des geklärten Abwassers für Reinigung
- Max. Ausbreitung nach 60 Tagen Simulationszeit  
(= Mindestabstand zwischen Kleinkläranlagen und dem Auslauf)
  - Mittelsand 2,5 – 3,2 m
  - mittel schluffiger Sand 2,5 – 3 m
  - sandiger Schluff 2,8 – 3,7 m