

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



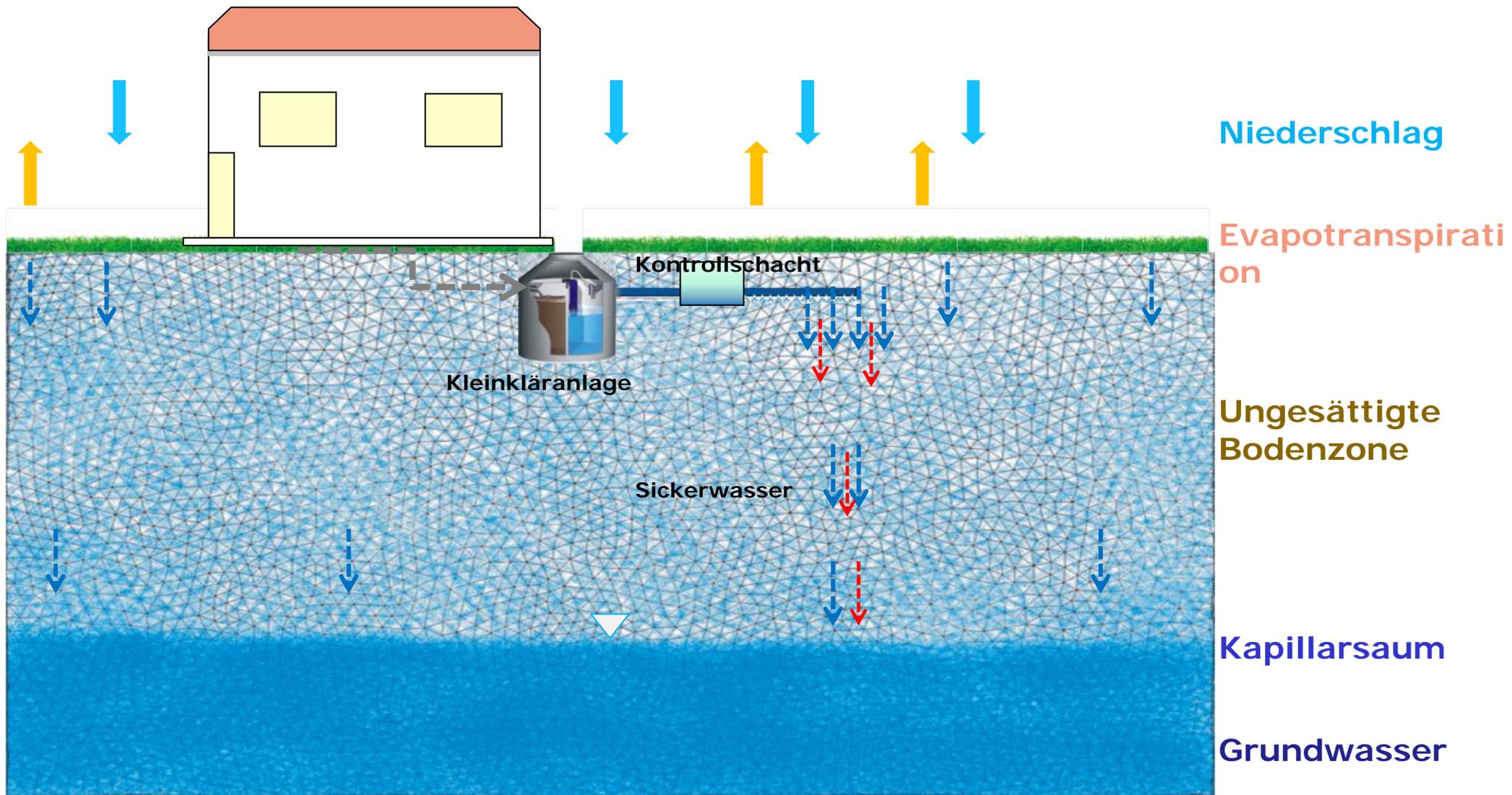
Überwachung



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[®] als Werkzeug zur Entscheidungshilfe

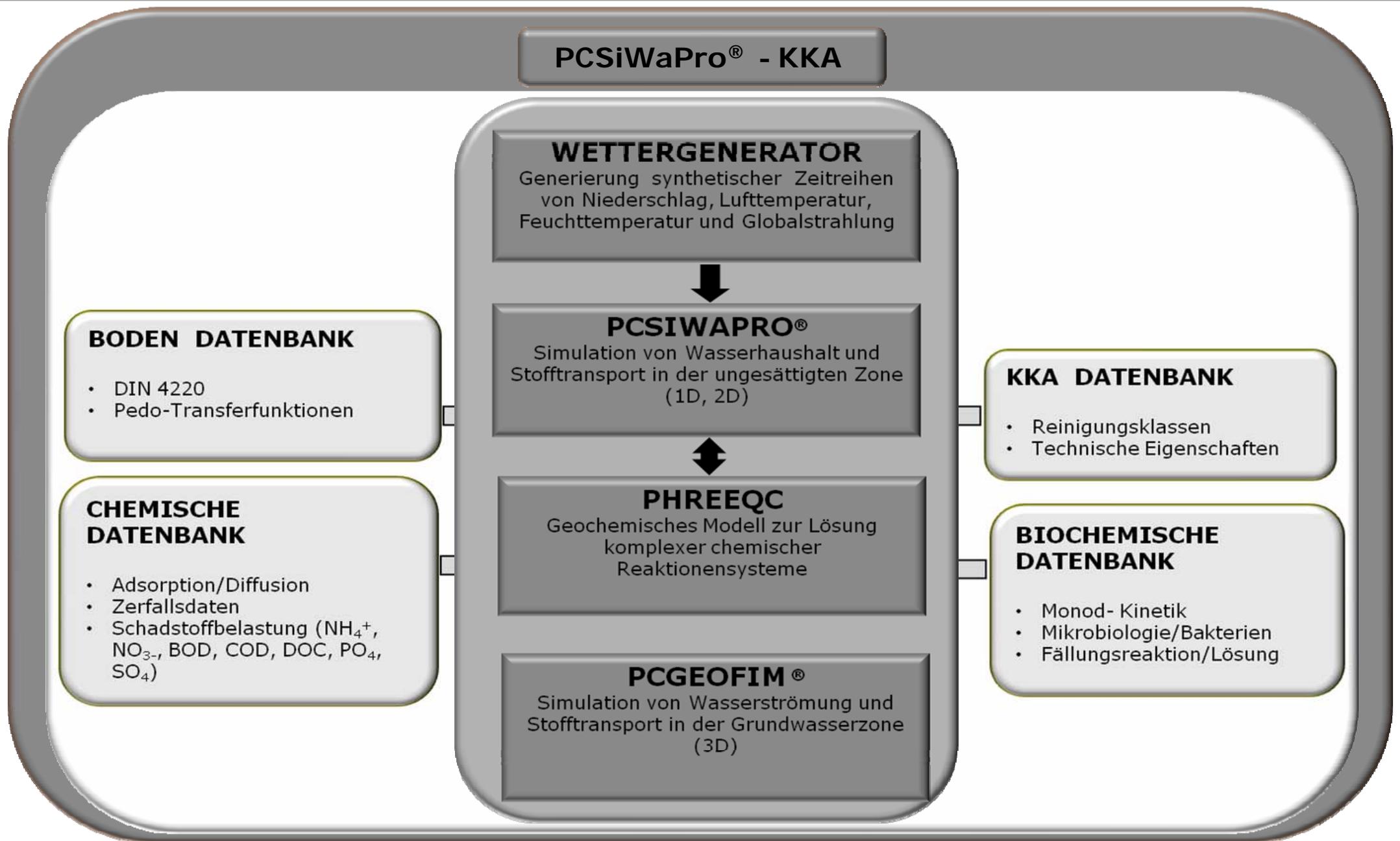
- Erweiterung der Stoff- und Bodendatenbank für relevante Abwasserinhaltsstoffe, KKA-Klassen, Bodenparameter, Sorptionsparameter
- Programmierungsarbeit der Middleware: Kopplung mit PHREEQC, Daten- und Parameterübergabe & Austausch von Parametern für beide Moduls, Erweiterung des „Assistent Modules“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

3. Lösungsweg

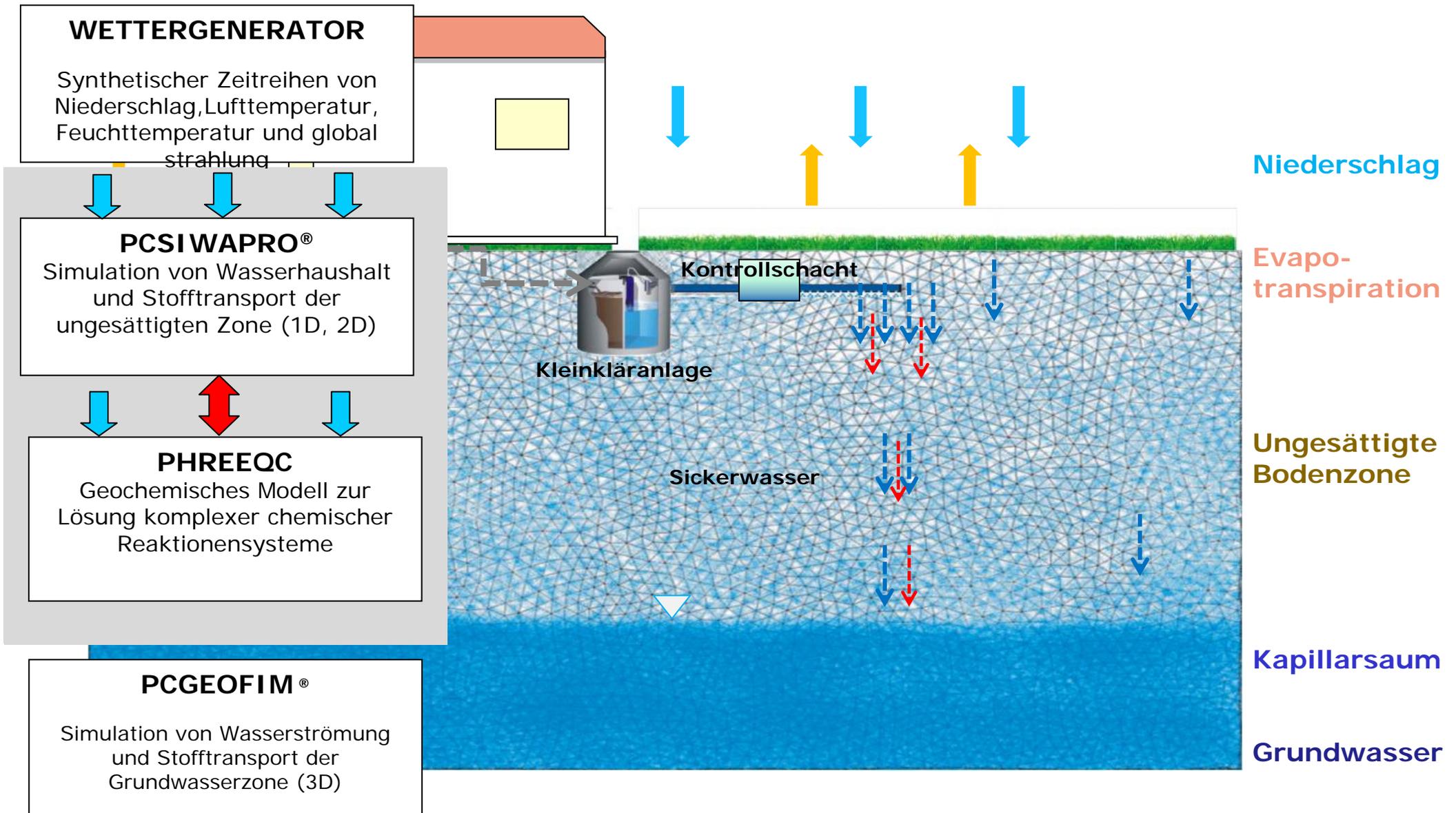
3.2 Quantifizieren der Wasser- und Stoffflüsse im Boden hinsichtlich der Versickerungsleistung, des Reinigungs- und Speicherverhaltens

- 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[®] - KKA



PCSiWaPro® - KKA - Konzept



PCSiWaPro® - Entscheidungshilfesystem

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

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

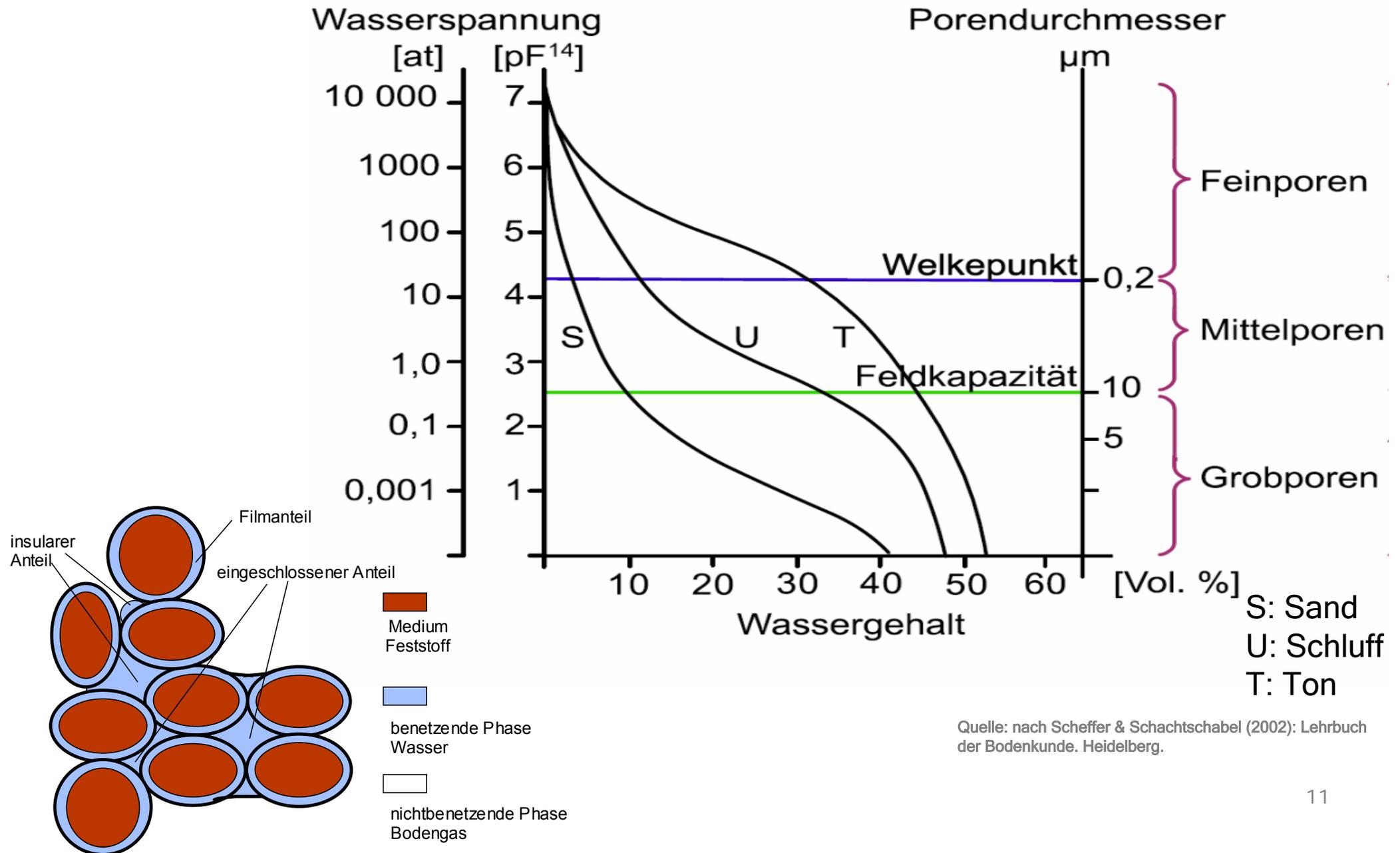
θ - volumetrischer Wassergehalt
 t - Zeit
 x_i ($x_1=x$, $x_2=z$) -
Raumkoordinaten
 K - hydraulische Leitfähigkeit
 h - Druckhöhe
 S - Quellen-/Senkenterm

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

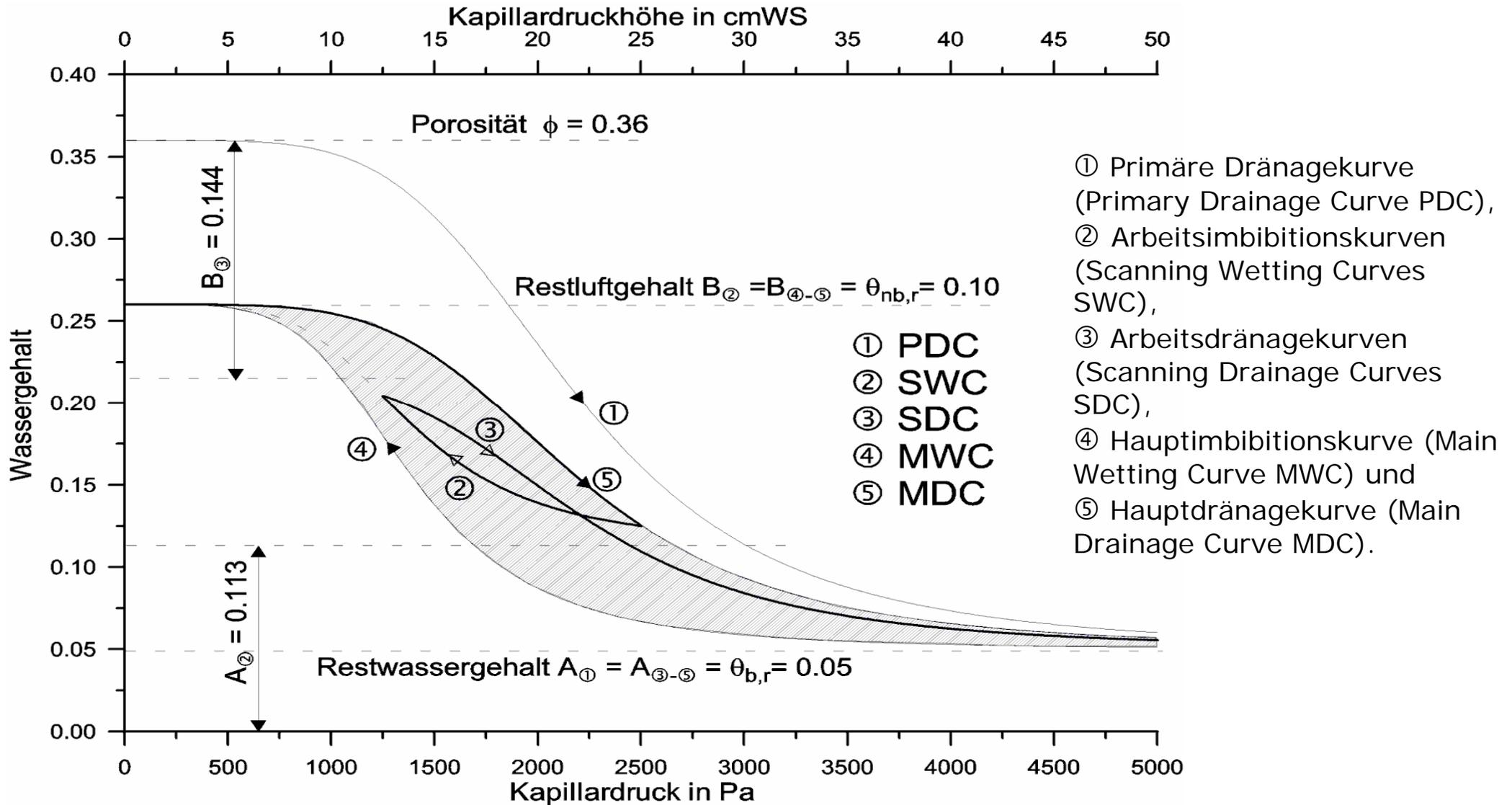
ϕ - Porosität
 $\theta_{r,W}$ - Restwassergehalt
 $\theta_{r,L}$ - Restluftgehalt
 α - Skalierungsfaktor
 n - Anstiegsfaktor
 h_c - Kapillardruckhöhe

- 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[®] - Entscheidungshilfesystem



PCSiWaPro[®] - Entscheidungshilfesystem



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

PCSiWaPro[®] - Entscheidungshilfesystem

Stofftransportprozesse

Konvektions-Dispersions-Gleichung:

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

r	Ortskoordinate	m_R
t	Zeit	s
	Volumetrischer Wassergehalt	m_{fl}^3 / m_R^3
D	Dispersionkoeffizient	m_R^2 / s
S_m	Spezifische Schadstoffmasse ($S_m = S_{fl,m} + S_{s,m}$)	Kg / m_R^3
S_{fl,m}	Spezifische Schadstoffmasse in der flüssigen Phase	Kg / m_R^3
S_{s,m}	Spezifische Masse an der festen Phase	Kg / m_R^3
u	Mittlere Fließgeschwindigkeit	m_R / s
γ_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

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

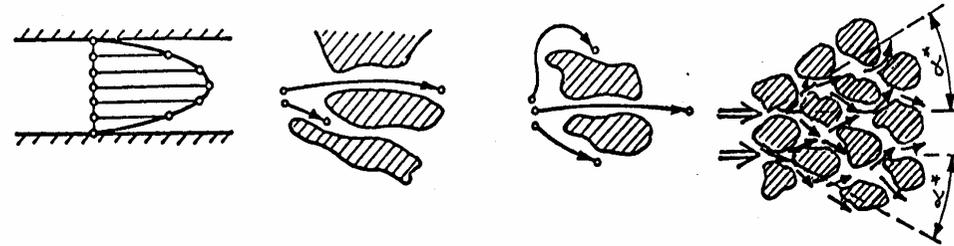
s_m – adsorbed mass on the solid phase

θ – water content, ρ_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

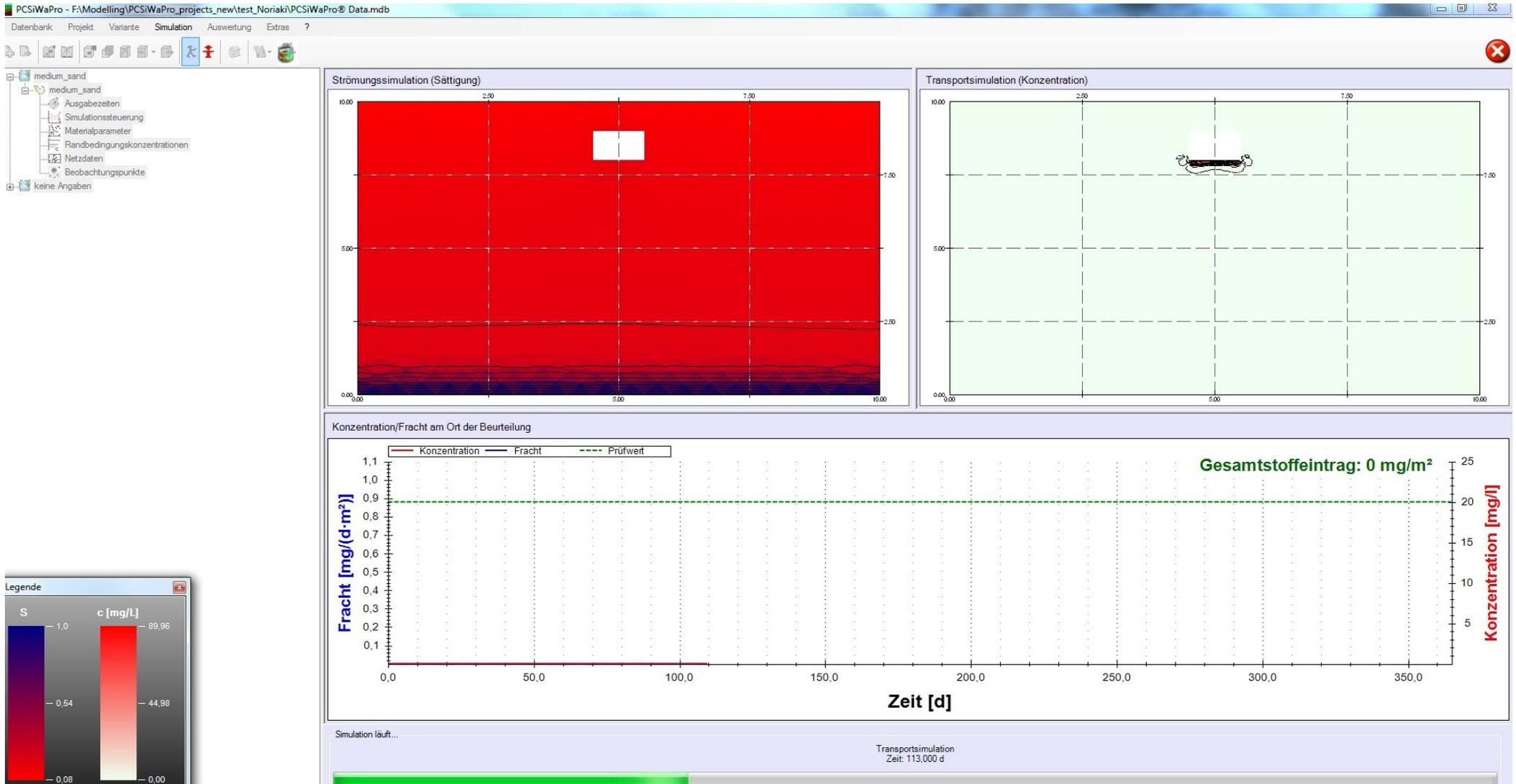
$$s_m = s_{m,0} \cdot e^{-\mu_m \cdot t}$$

Quell-Senkenterm

→ Randbedingungen (Schadstoffeinträge)

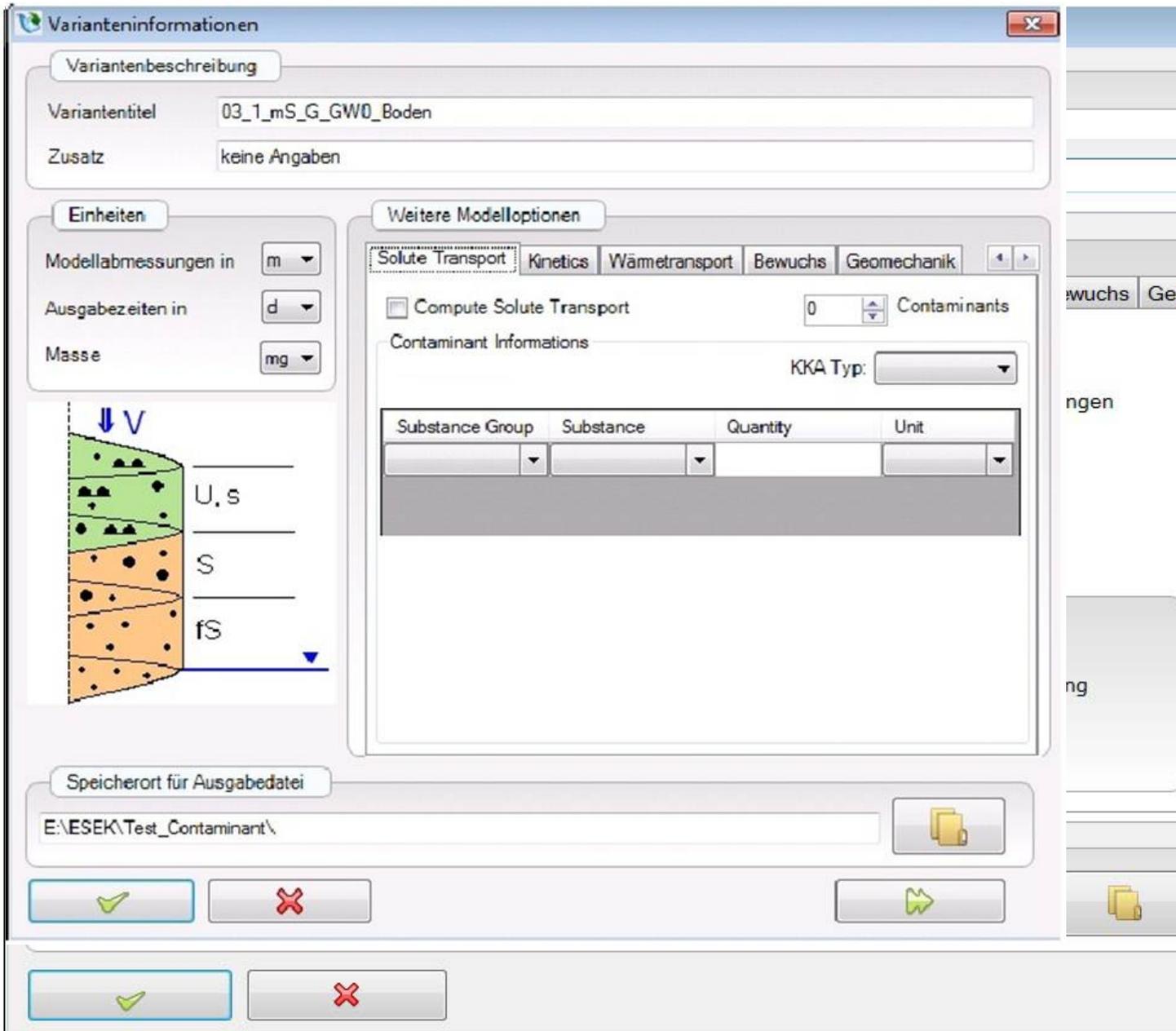
→ Quellfunktionsterm

PCSiWaPro[®] - KKA



Datenbanken (Boden- und Stoffparameter)

PCSiWaPro[®] - KKA



Einstellungen

- Modeloptionen
- KKA Typ
- Materialparameter
- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

Geometrie

Ergebnisse

PCSiWaPro[®] - 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

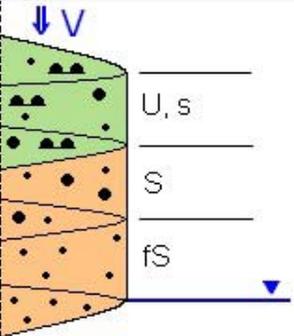
Rotationssymmetrische vertikale Strömung

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® - KKA

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

- Navigation:** Includes a '1/1' 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 'Hydraulik' selected.
- Bodenhydraulische Parameter:** Fields for Porosität (ϕ = 0.38), Durchlässigkeit (k_0/k_f = 1400 m/a), Restwassergehalt ($\theta_{r,w}$ = 0), Restluftgehalt, and Wassergehalt bei.
- van Genuchten Parameter:** Fields for Drainage (α^d = 20,000 1/m), Imbibition (α^i = 40,000 1/m), and Anstiegsparameter n = 1.23.
- Schätzfunktionen:** Buttons for 'Parameter nach DIN4220', 'Pedotransferfunktionen', and 'Bodenartenbank'.
- Estimation Dialog:** A pop-up window titled 'Abschätzung nach DIN 4220' with a dropdown menu showing 'DIN 4220', 'USST', and 'LABOR-ESEK'. It contains fields for 'Abgeschätzte Parameter': θ_s = 0.39, $\theta_{r,w}$ = 0, α = 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 ζ)'. A green checkmark button is visible.
- Graphs:** Two plots at the bottom. The left plot shows 'Wassergehalt' vs 'Kapillardruckhöhe [m]' with a red line (PDC) and a blue curve. The right plot shows 'Relative Permea' vs 'Wassergehalt' with a red curve.

Einstellungen

- Modeloptionen
- KKA Typ

Materialparameter

- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

Geometrie

Ergebnisse

PCSiWaPro[®] - KKA

Materialparameter

Schichtansprache (DIN 4022) Bodenart (DIN 4220) Schadstoff

1/1 KRB10 Ammonium (NH₄⁺)

Hydraulik Stofftransport

Bodenspezifische Parameter

Trockenrohddichte ρ_b 1,5 g/cm³

Diffusionskoeffizient D_M 0 m²/a

Diffusionskoeffizient in Luft D_L 0 m²/a

Longitudinale Dispersivität

Transversale Dispersivität

Reaktionsparameter

Zerfallskonstante 0. Ordnung (gelöst) γ_w 0 [-]

Zerfallskonstante 0. Ordnung (fest) γ_s 0 [-]

Zerfallskonstante 0. Ordnung (Gasphase) γ_g 0 [-]

μ_w 0,000 1/a

μ_s 0,000 1/a

μ_g 0 1/a

Sorptionparameter

Sorptionsisotherme

Henry - Koeffizient

Henry-Koeffizient (Gasphase)

Abschätzung der Schadstoffeigenschaften

Organische Schadstoffe Anorganische Schadstoffe

Stoffartname: Abwasser

Schadstoff: Ammonium (NH₄⁺)

Stoffeigenschaften

Diffusionskoeffizient 0 m²/s

Halbwertszeit 0 a

Freundlich - Exponent 0,8

Sorptionskoeffizient K_F 1,00e+0 $\mu\text{g}^{1-0,8}/\text{kg}$

C_{org} 0,1 %

pH 6

Ton 5 %

Sorbierte Stoffe

Konzentration in der Lösung [µg/l]

Schadstoffdatenbank

Einstellungen

- Modeloptionen
- KKA Typ

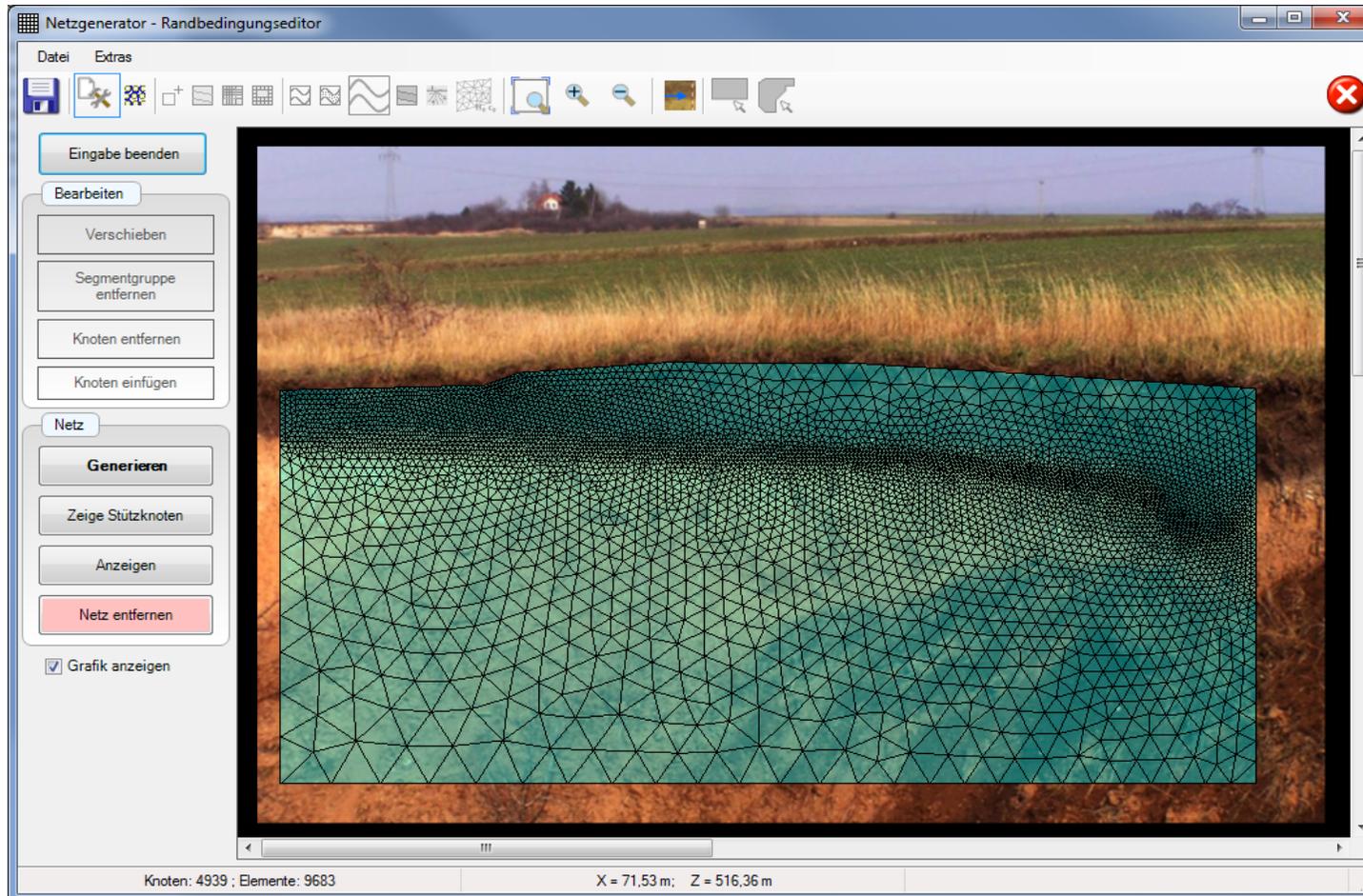
Materialparameter

- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

Geometrie

Ergebnisse

PCSiWaPro® - KKA



Einstellungen

- Modeloptionen
- KKA Typ

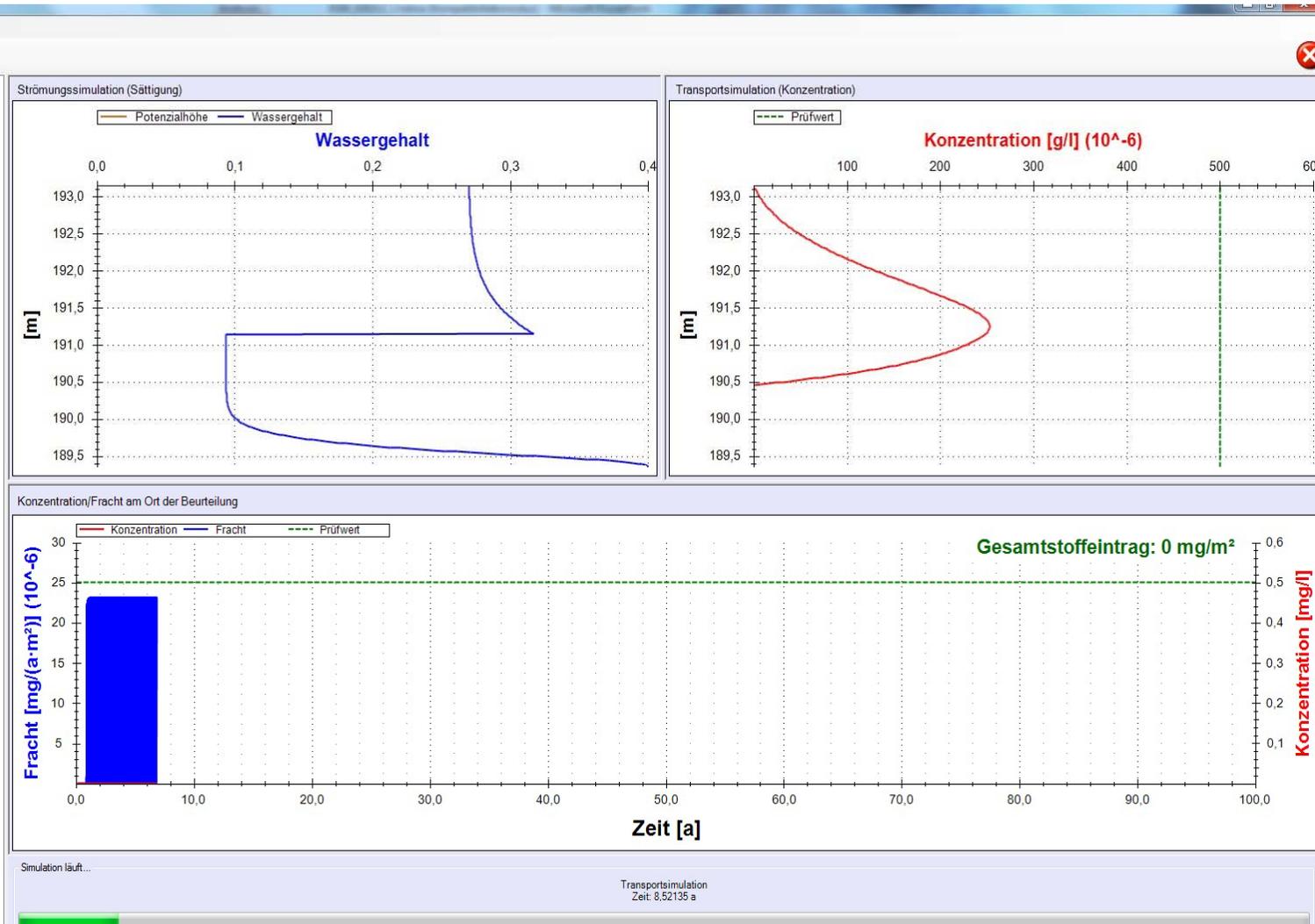
Materialparameter

- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

Geometrie

Ergebnisse

PCSiWaPro[®] - KKA



Einstellungen

- Modeloptionen
- KKA Typ

Materialparameter

- Bodendatenbank
- SchadstoffenDB

Geometrie

Ergebnisse

PCSiWaPro® - KKA

Abwasserprognose gemäß Abwasserverordnung

Programmname:PCSiWaPro® Version: 1.8.1.0

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

Az: 123456

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

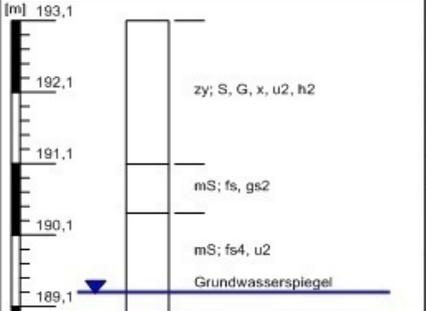


Diagramm zur Geometrie und Prognosezeitraum. Die vertikale Achse zeigt die Tiefe in Metern (m) von 189,1 bis 193,1. Die horizontale Achse zeigt die Zeit in Jahren (a) von 0 bis 100. Die Schichten sind wie folgt definiert: Schicht 1 (zy; S, G, x, u2, h2) von 193,1 bis 192,1 m; Schicht 2 (mS; fs, gs2) 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: $t_D = 21,0 \text{ a}$

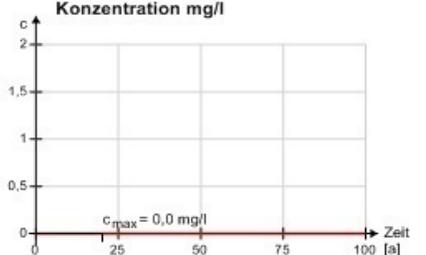
Simulationszeitraum: $t_{max} = 100,0 \text{ a}$

Lfd. Nr.	Schichtansprache DIN 4022	Bodenart DIN 4220	Mächtigkeit		Bodenphysikalische Parameter						Stofftransportparameter		
			M	ϕ	$\theta_{w,r}$	α	n	k_f	ρ	δ	K_D	t_{50}	
			m		1/m		m/s	g/cm ³	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 ϕ - Porosität ρ - Rohdichte
 $\theta_{w,r}$ - Restwassergehalt δ - Dispersivität
 α - Massstabsfaktor K_D - Sorptionskoeffizient
 n - Anstiegsparameter
 k_f - Durchlässigkeitsbeiwert t_{50} - Halbwertszeit

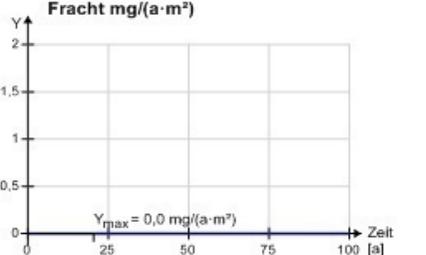
Prognoseergebnis für den Ort der Beurteilung

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[®] - KKA Kopplung mit PHREEQC

The screenshot displays the PHREEQC Interactive software interface. The main window is titled "PHREEQC Interactive - [Phrqc1]" and contains a menu bar (File, Edit, View, Options, Window, Help) and a toolbar with various icons for file operations and simulation control. Below the toolbar are several tabs: "Initial conditions", "Forward and inverse modeling", "Printing and numerical method", and "Stoichiometry and thermodynamic data".

The left sidebar shows a tree view of the project structure, including "Input files", "Phrqc1", "Simulation 1", and "SOLUTION 1".

The main area is divided into two panels:

- SOLUTION Panel:**
 - General tab selected.
 - Default units: mg/L; Charge balance: (none).
 - Select elements/redox states: Checkboxes for Al, Alkalinity, B, Ba, Br, C, CO3-2, CH4, Ca, Cd, Cl, Cu, Cu+, Cu+2, F, Fe, Fe+2, Fe+3, H2, K, Li, Mg, Mn, Mn+2, Mn+3, N, N2, NO2-, NO3-, Na, O2, O, P, Pb, S, HS-, SO4-, Si, Sr, Zn.
 - Table of input data:

	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
- KINETICS Panel:**
 - Define rates tab selected.
 - Starting number: 1; Ending number: (empty); Description: (empty).
 - Defined rates:
 - Albite:
 - Calcite:
 - K-feldspar:
 - Organic_C:
 - Pyrite:
 - Pyrolusite:
 - Table of defined rates:

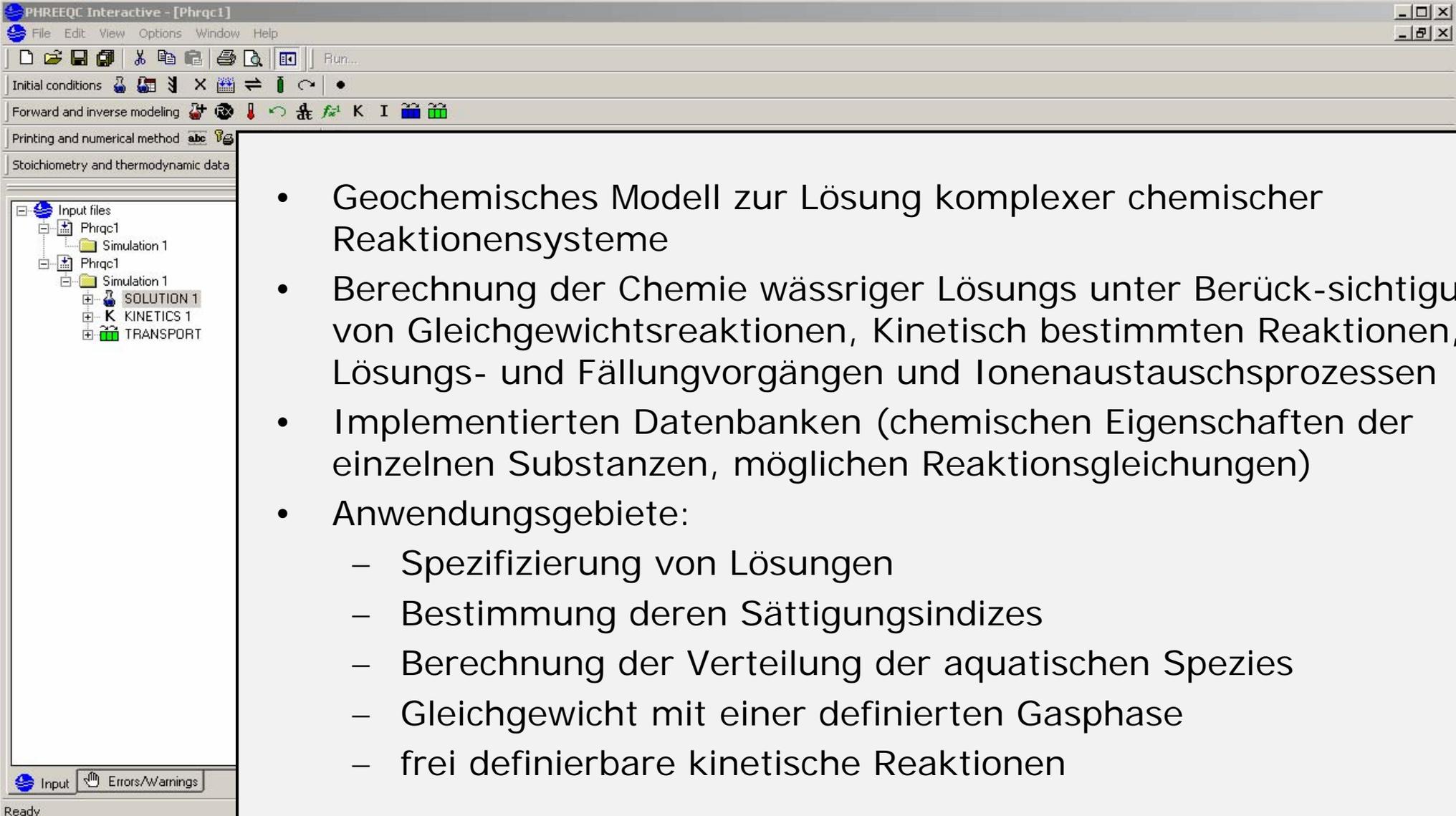
	Rate name
1	Organic_C
2	Calcite
3	
4	
 - Organic_C | Calcite |
 - General parameters:

Initial moles (m0)	1
Moles (m)	1
Tolerance (tol)	1e-008
 - 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)	
 - Description of input: Positive number to designate the following set of kinetic reactions.

PCSiWaPro[®] - 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[®] - 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[®] - 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[®] - 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[®] - 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[®] - 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[®] - 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

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

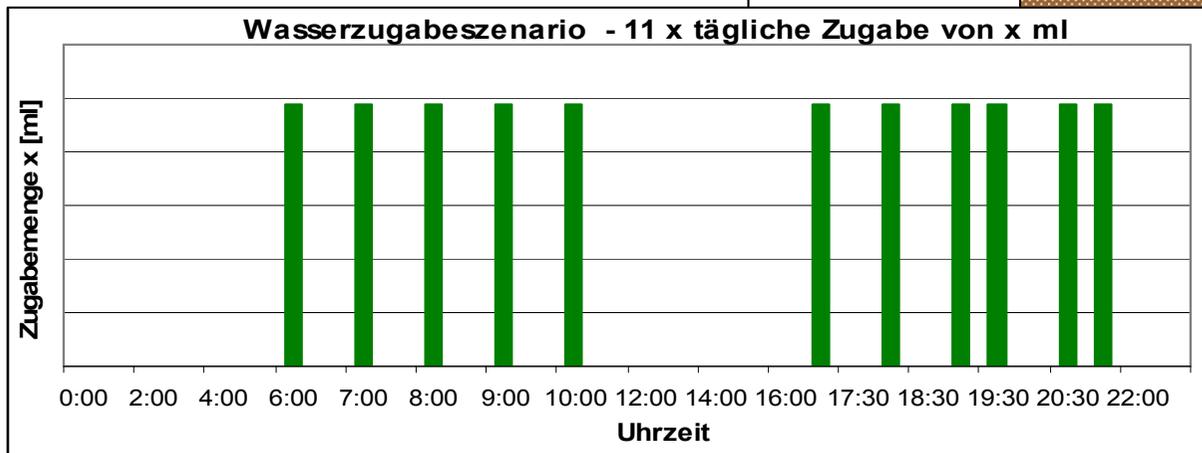
Zeitschaltuhr

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



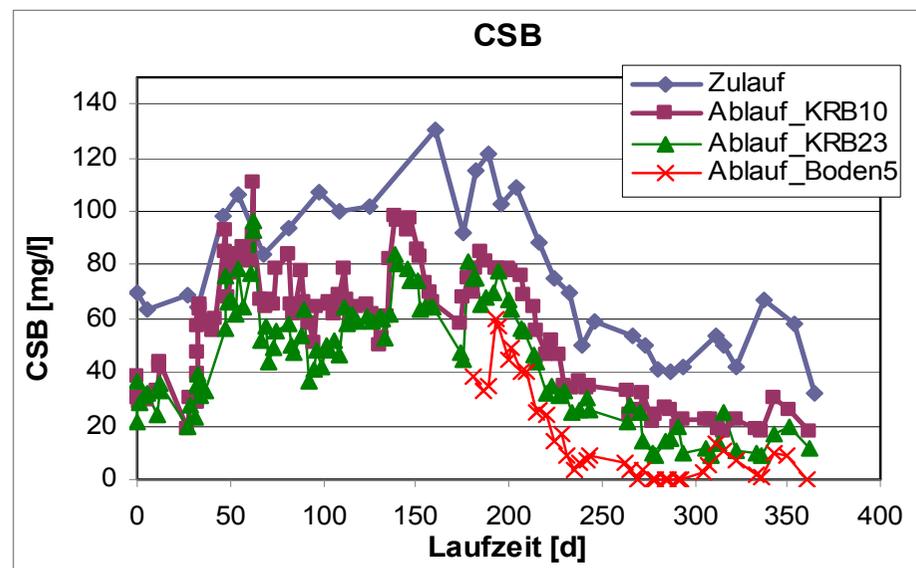
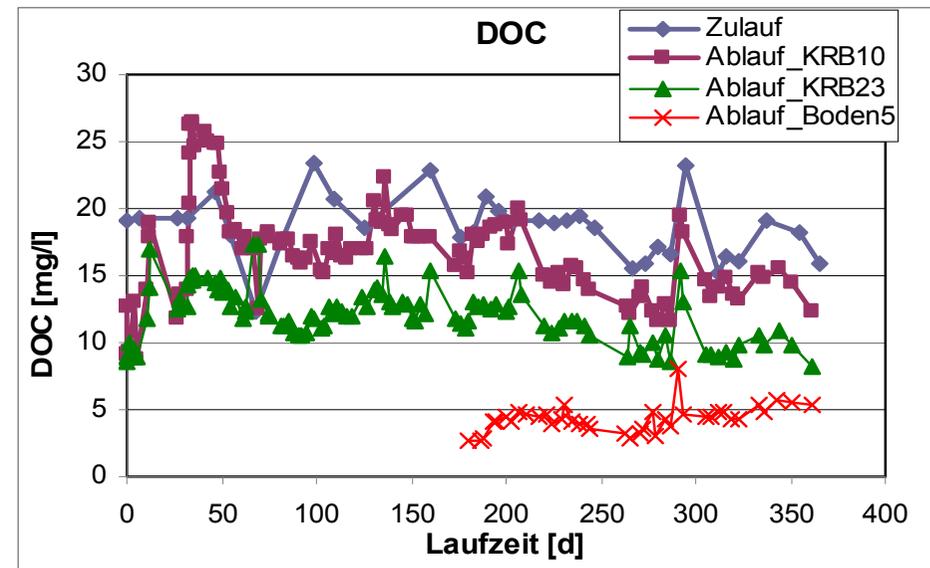
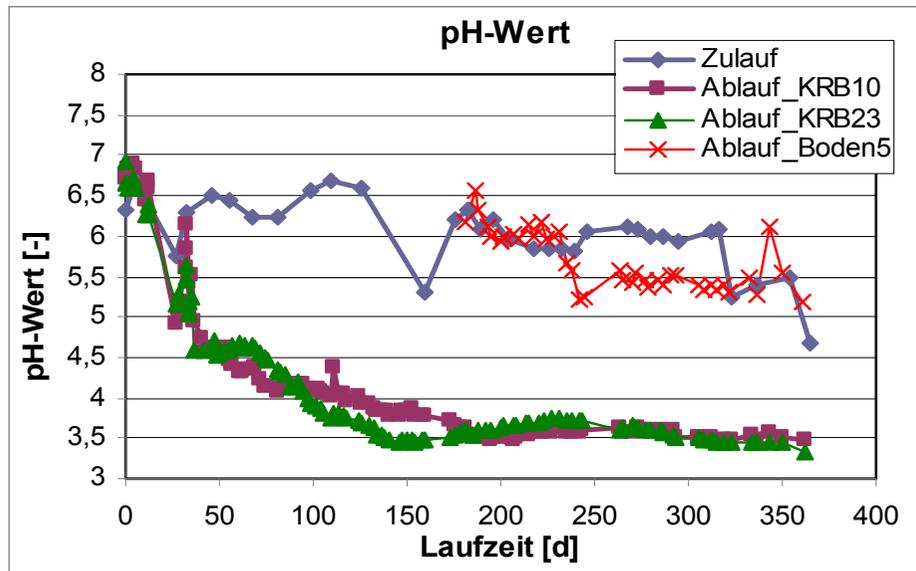
Waage

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

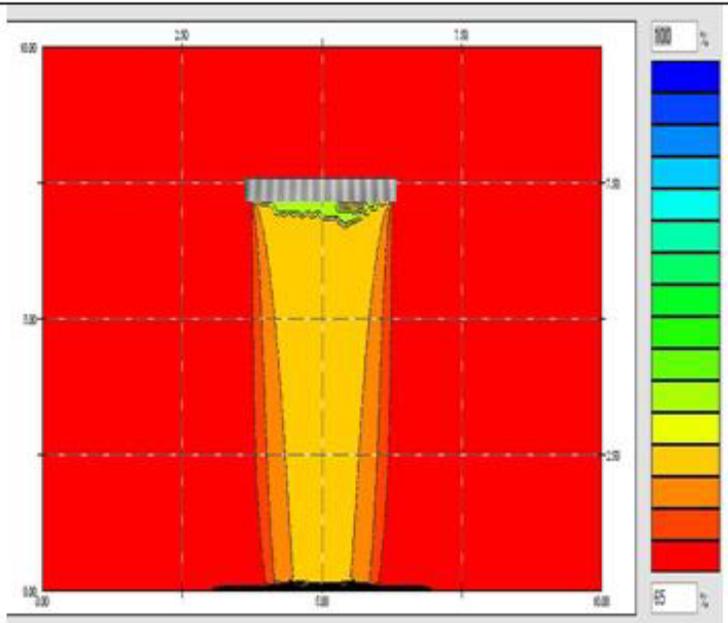
Ergebnisse – Abwasserinhaltsstoffe



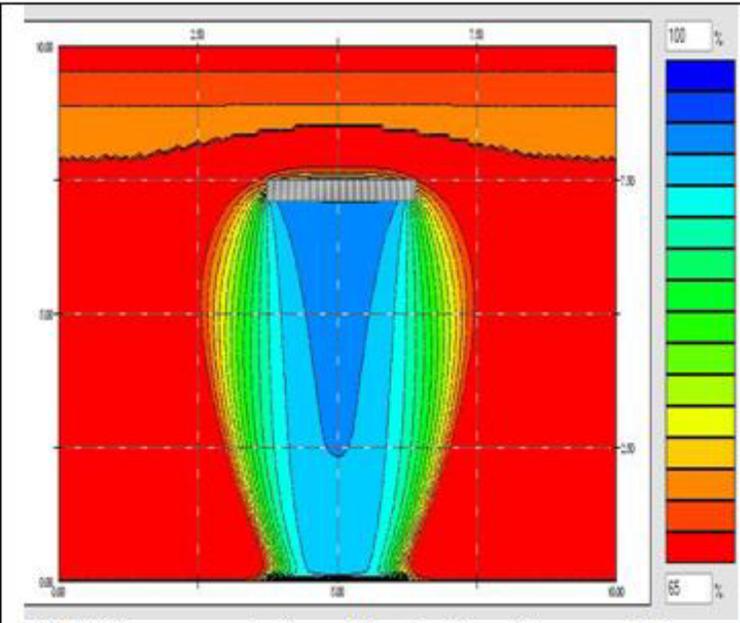
Extreme pH-Wert Absenkung in KRB10 und KRB23 – Ursache geringe Pufferkapazität
Boden - negative Auswirkungen auf Abbau

Reduzierung DOC

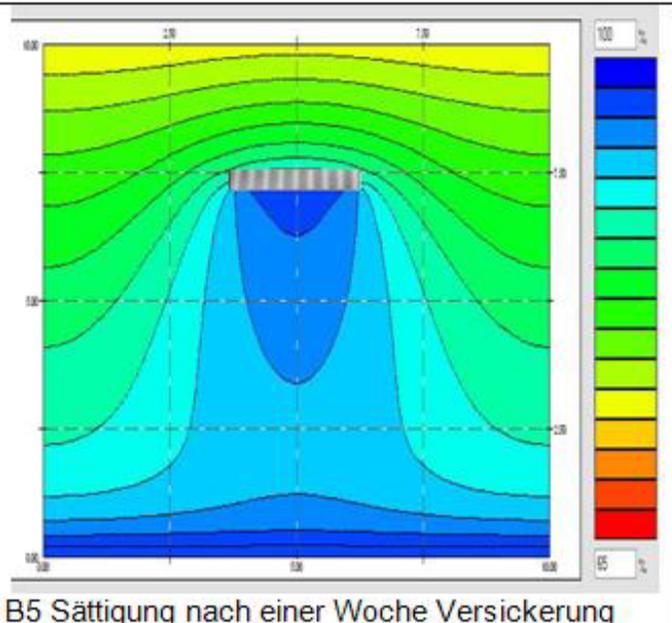
Reduzierung CSB ...



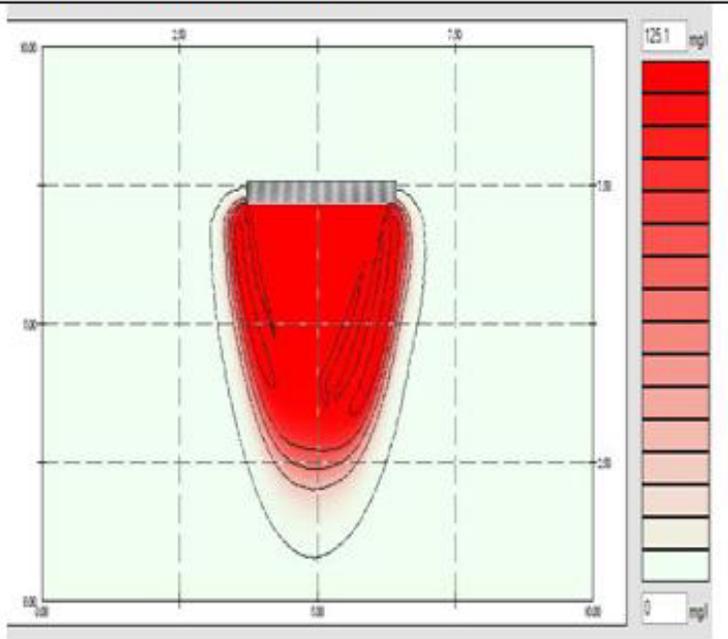
B4 Sättigung nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)



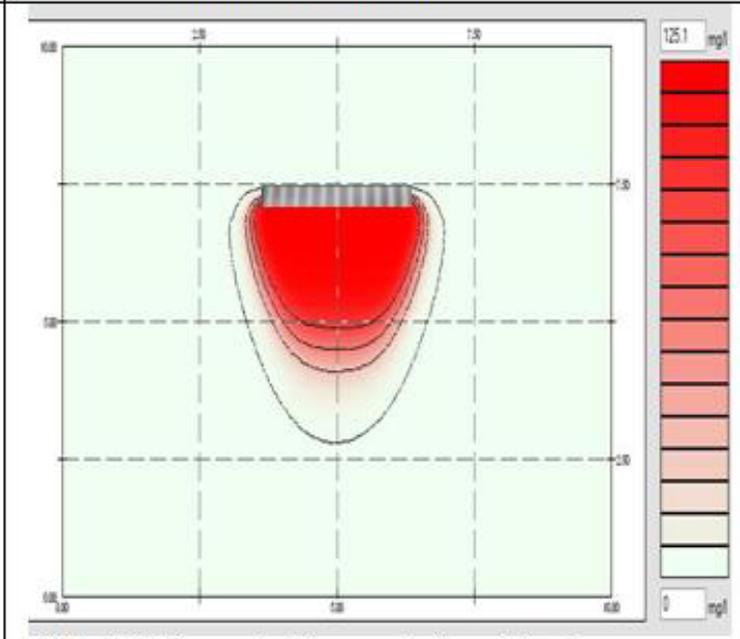
B3 Sättigung nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)



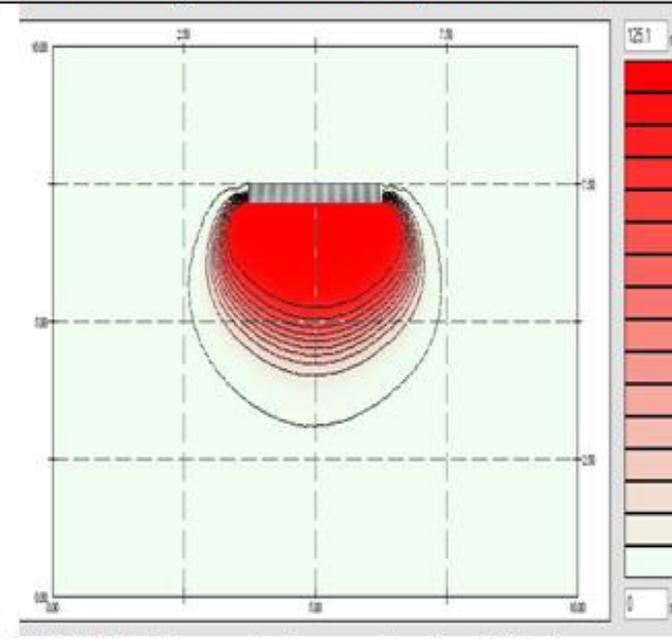
B5 Sättigung nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)



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



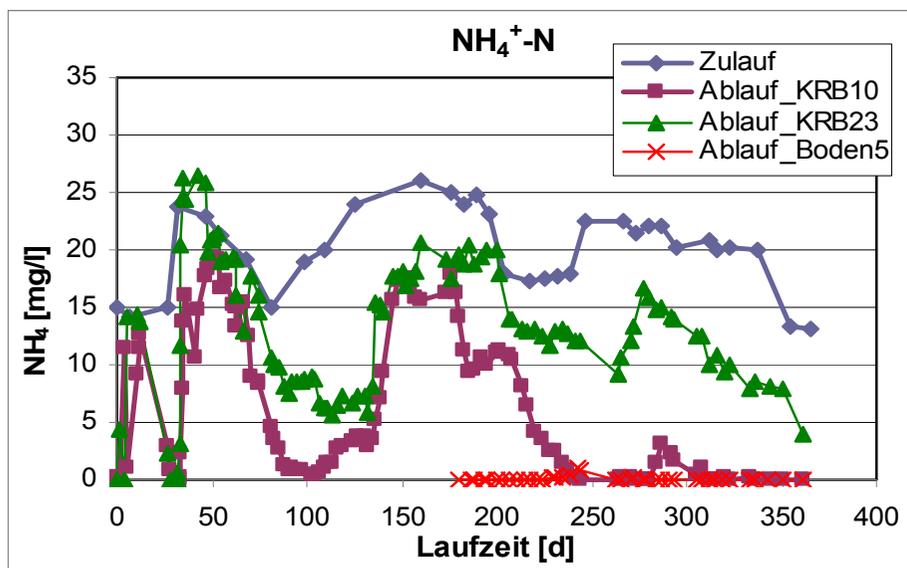
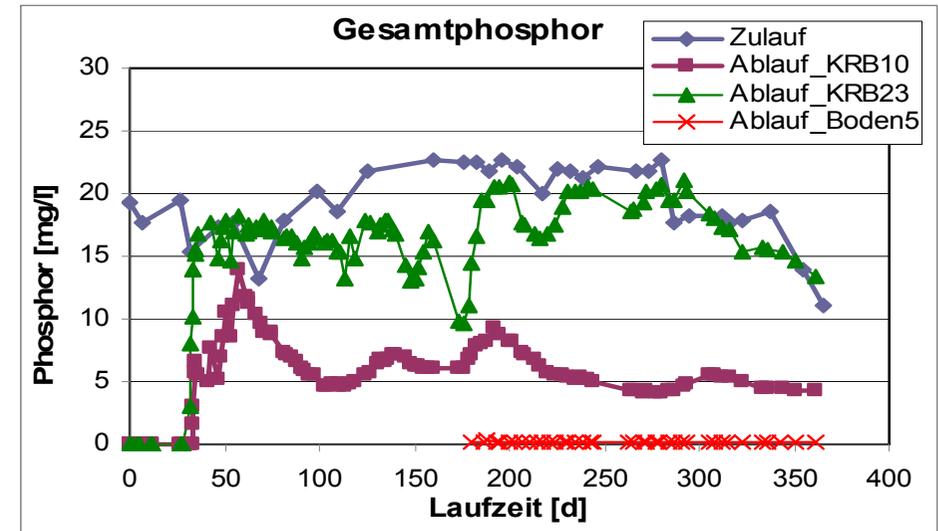
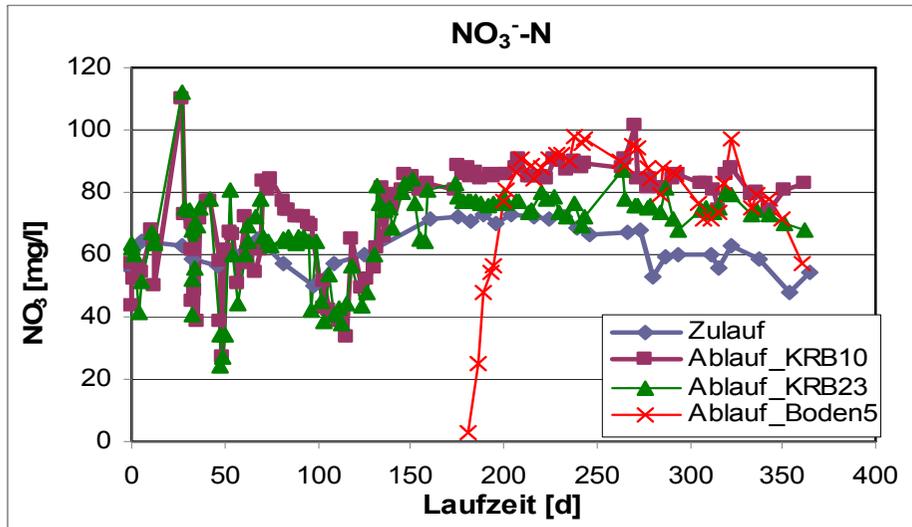
B3 Sulfat-Konzentration nach einer Woche Versickerung 2D-400I-Modell (kontinuierlich)



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®

The screenshot displays the PCSiWaPro software interface for a simulation project. The main window shows a table of time-dependent boundary conditions (Zeitabhängige Randbedingungen) for a column experiment. The table includes columns for time (Zeit [min]), precipitation (Niederschlagsmenge [cm/min]), potential evaporation (Pot. Evaporation [cm/min]), potential transpiration (Pot. Transpiration [cm/min]), groundwater level (Grundwasserspiegel [cm]), and potential (Potential (RB 8) [cm]).

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					

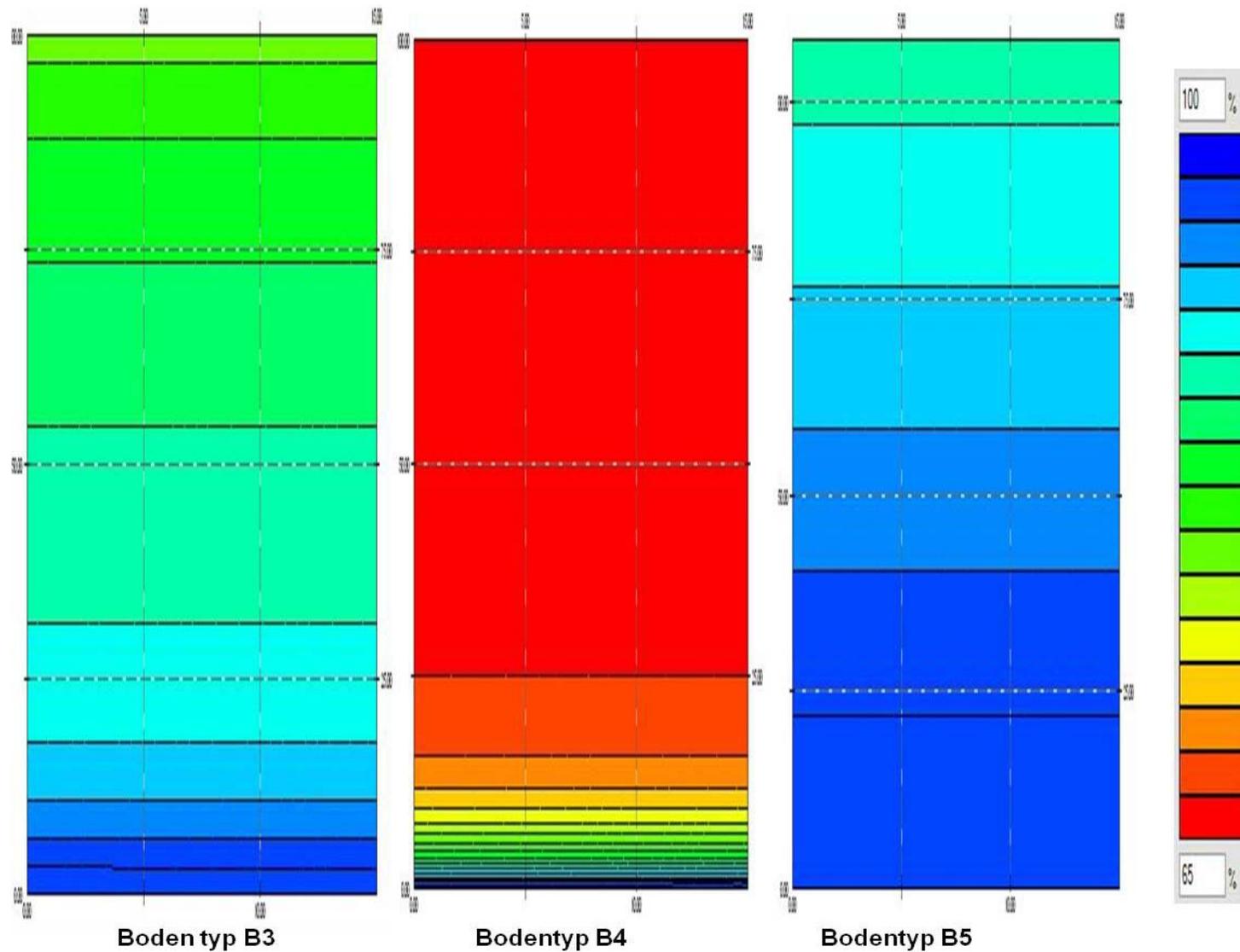
Two material parameter windows are overlaid on the main interface:

- Materialparameter (left):** Shows hydraulic parameters: Porosität $\phi = 0.44$, Durchlässigkeit $k_0/k_f = 0.3$, Restwassergehalt $\theta_{w,r} = 0$, Restluftgehalt $\theta_{L,r} = 0$, Wassergehalt bei $k_0/k_f = 0.44$. It includes a graph of water content (Wassergehalt) vs. capillary pressure (Kapillardruck) for PBC, MDC, and MWC.
- Materialparameter (right):** Shows soil-specific parameters: Trockenrohdichte $\rho_b = 1.5 \text{ g/cm}^3$, Diffusionskoeffizient $D_M = 0.00011 \text{ cm}^2/\text{min}$, Diffusionskoeffizient in Luft $D_L = 0 \text{ cm}^2/\text{min}$, Longitudinale Dispersivität $\delta_L = 6.5 \text{ cm}$, Transversale Dispersivität $\delta_T = 0.6 \text{ cm}$. It also shows sorption parameters (Freundlich-Koeffizient $K_F = 1.2$, Exponent $q = 1.4$) and reaction parameters (Zerfallskonstante).

The interface also features a project tree on the left, a variant information panel, and a soil cross-section diagram.

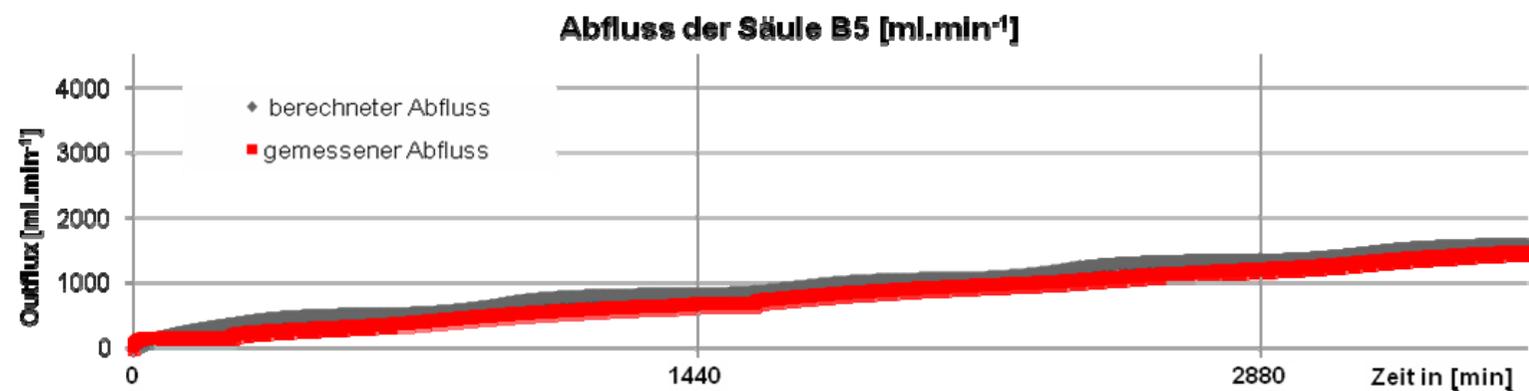
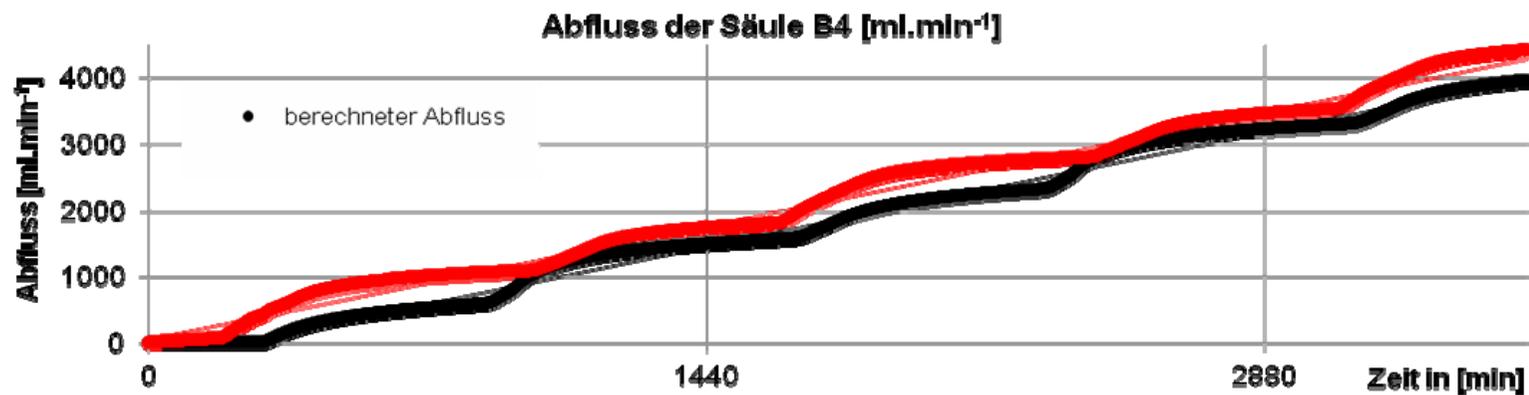
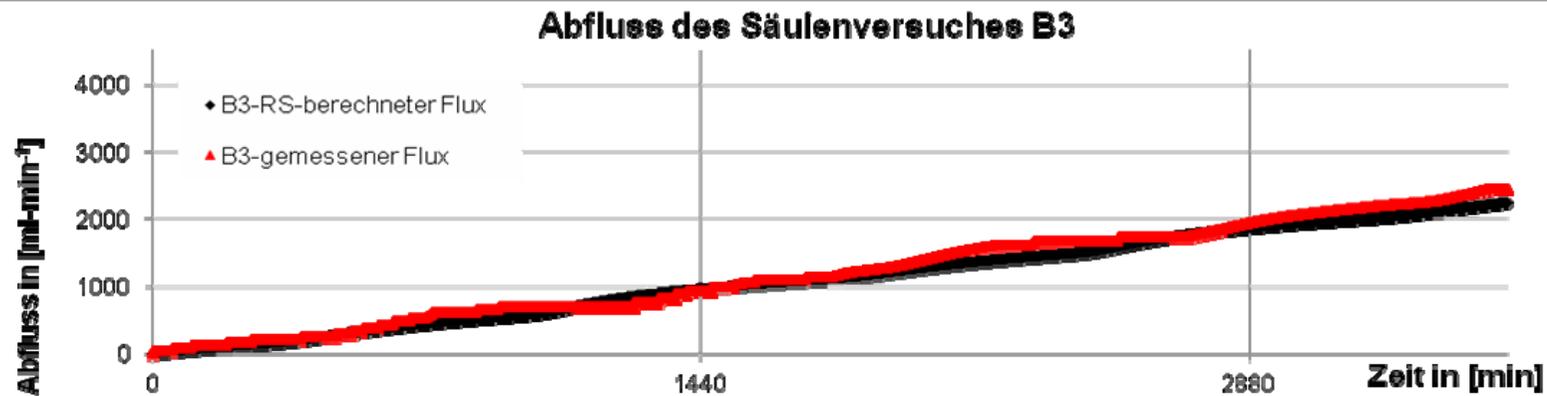
Variantenbeschreibung, zeitabhängige RB und Materialparameter

Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®



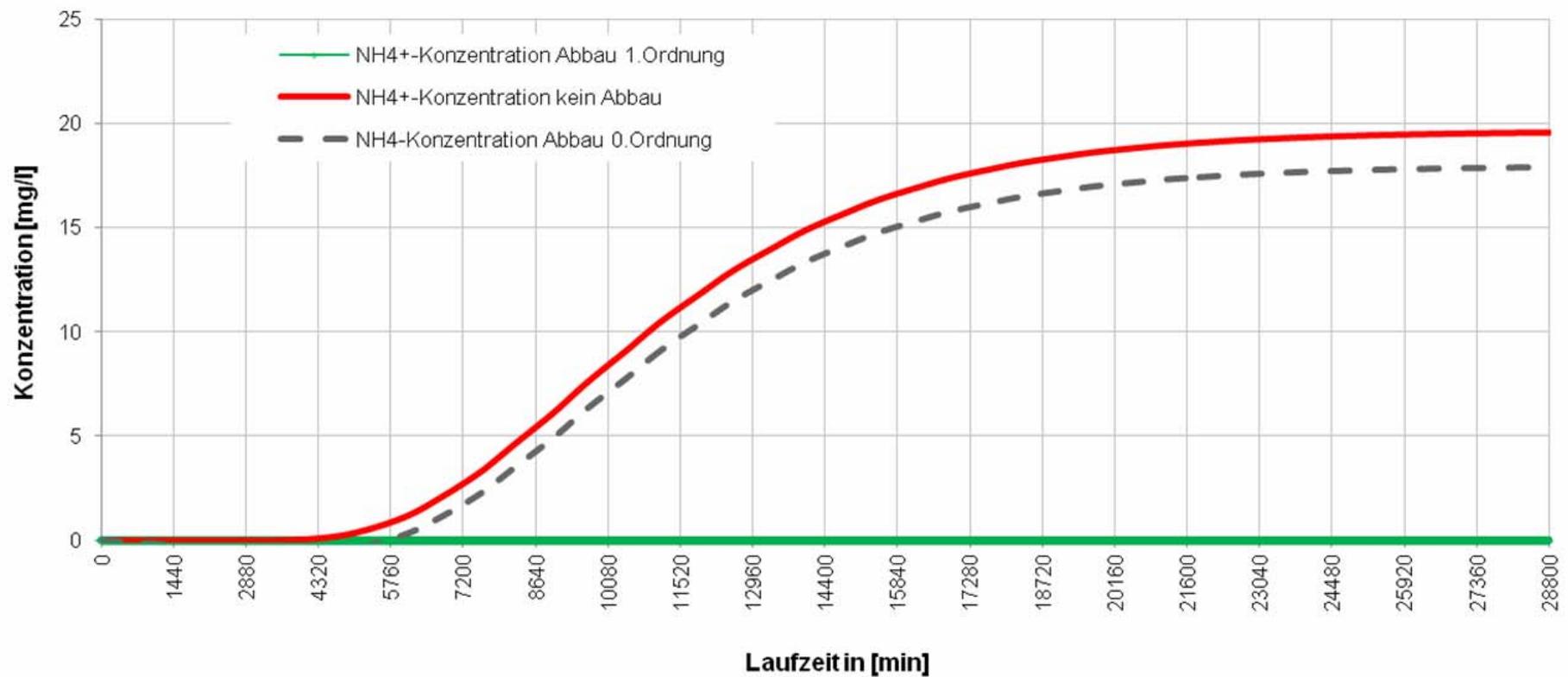
Verteilung der Wassersättigung nach einem Tag Infiltration der untersuchten Böden

Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®

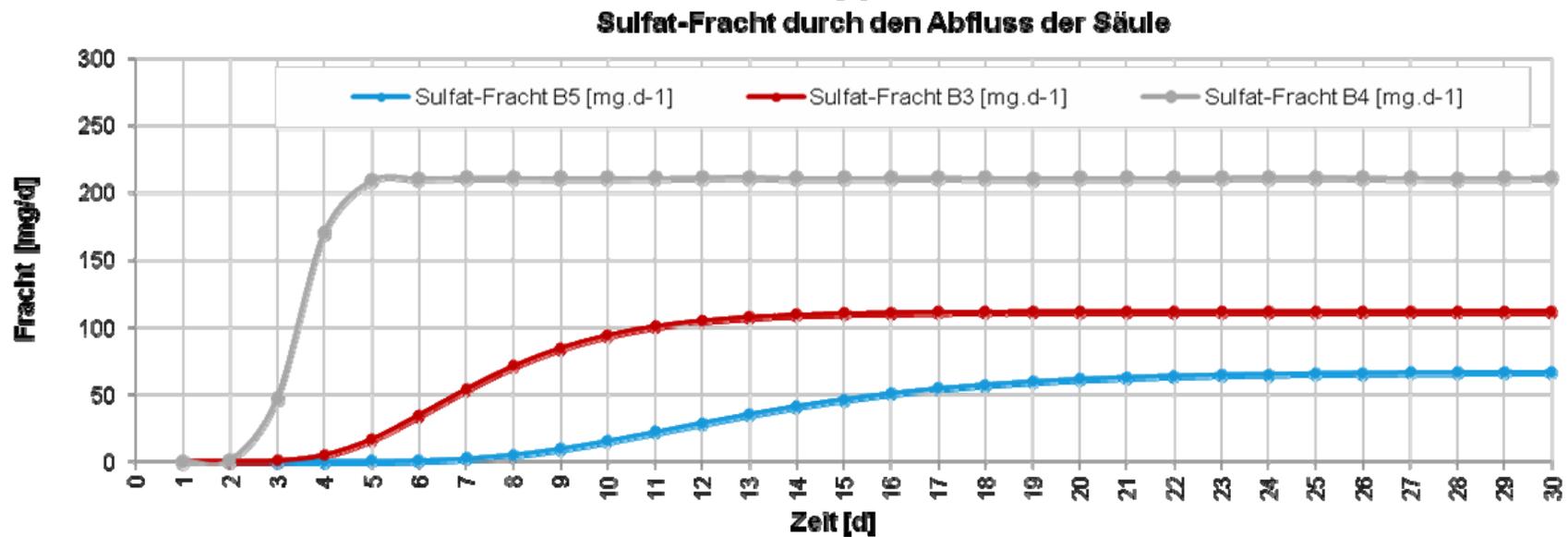
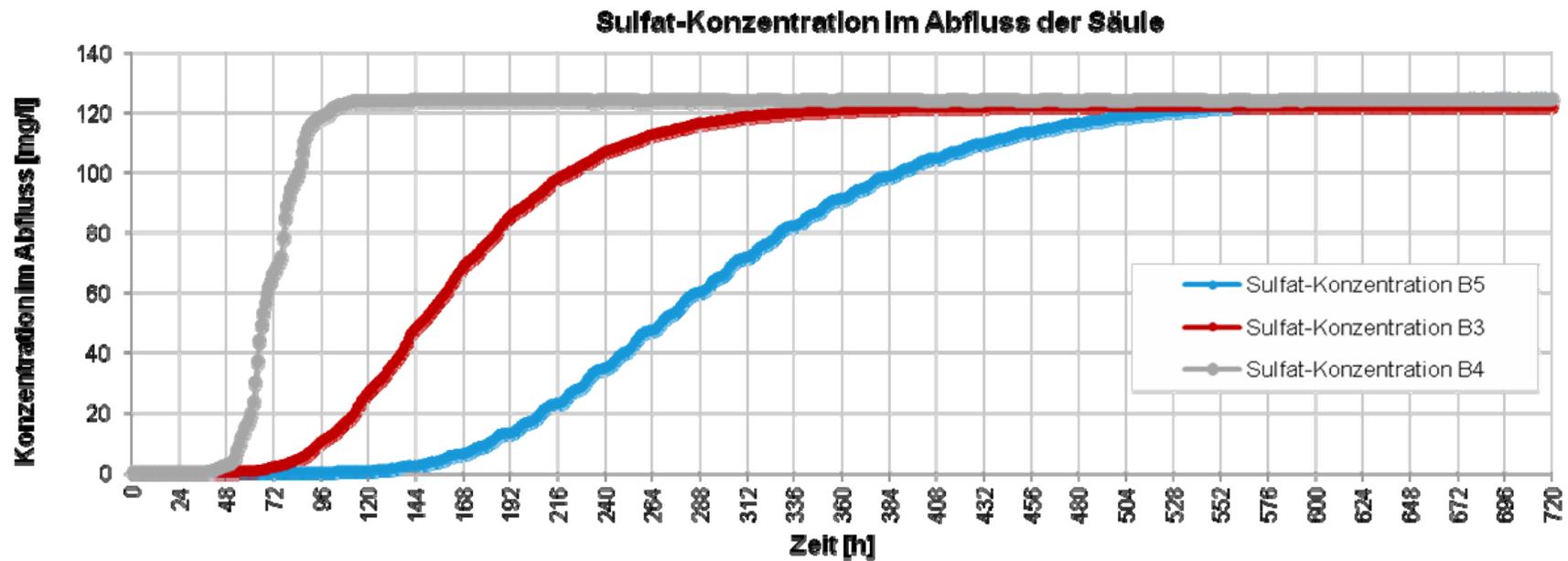


Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®

NH₄⁺-Konzentration im Ablauf der Säule für Boden 5

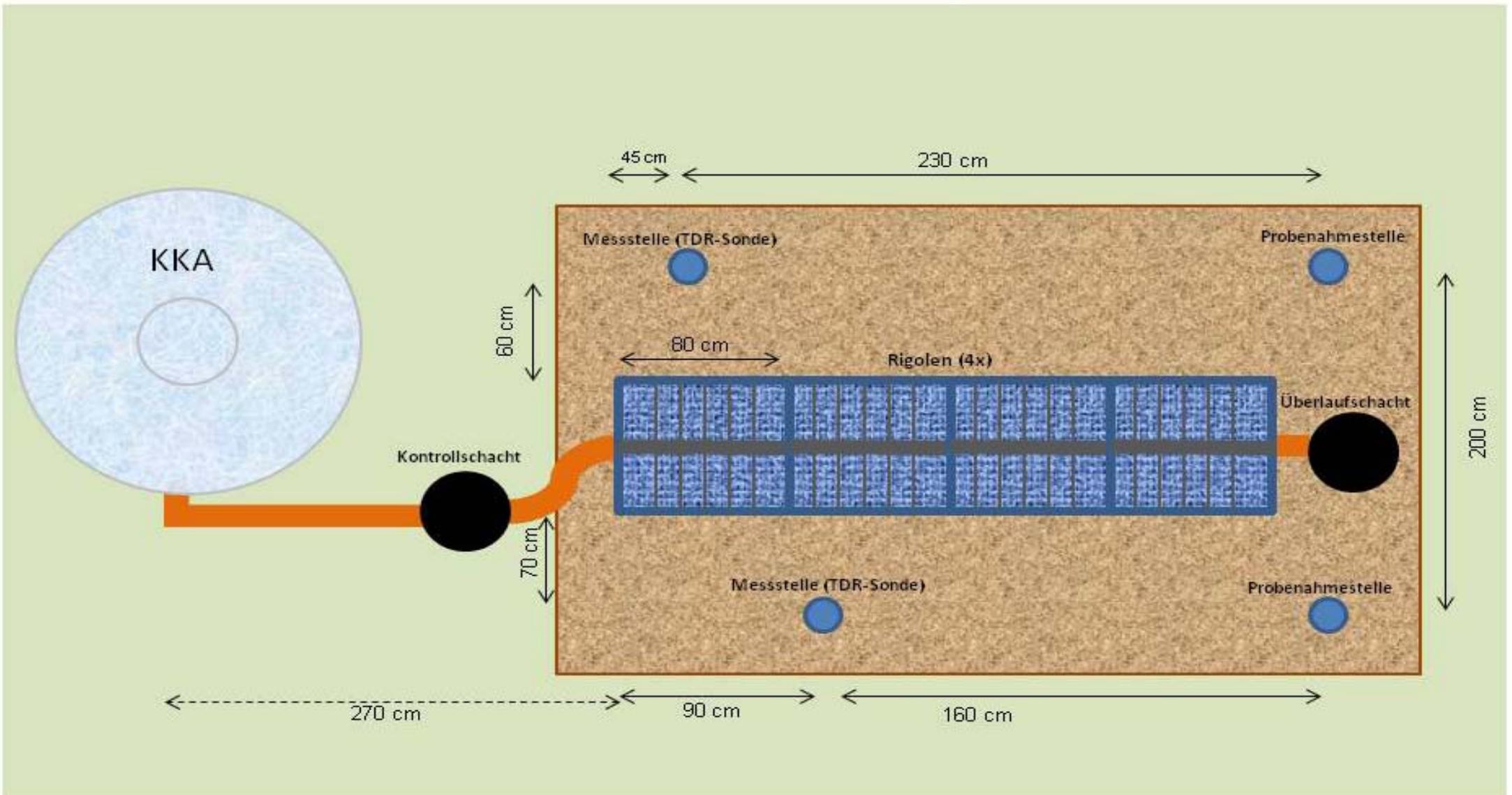


Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®



Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®

Skizze des Feldversuches in Kleinopitz

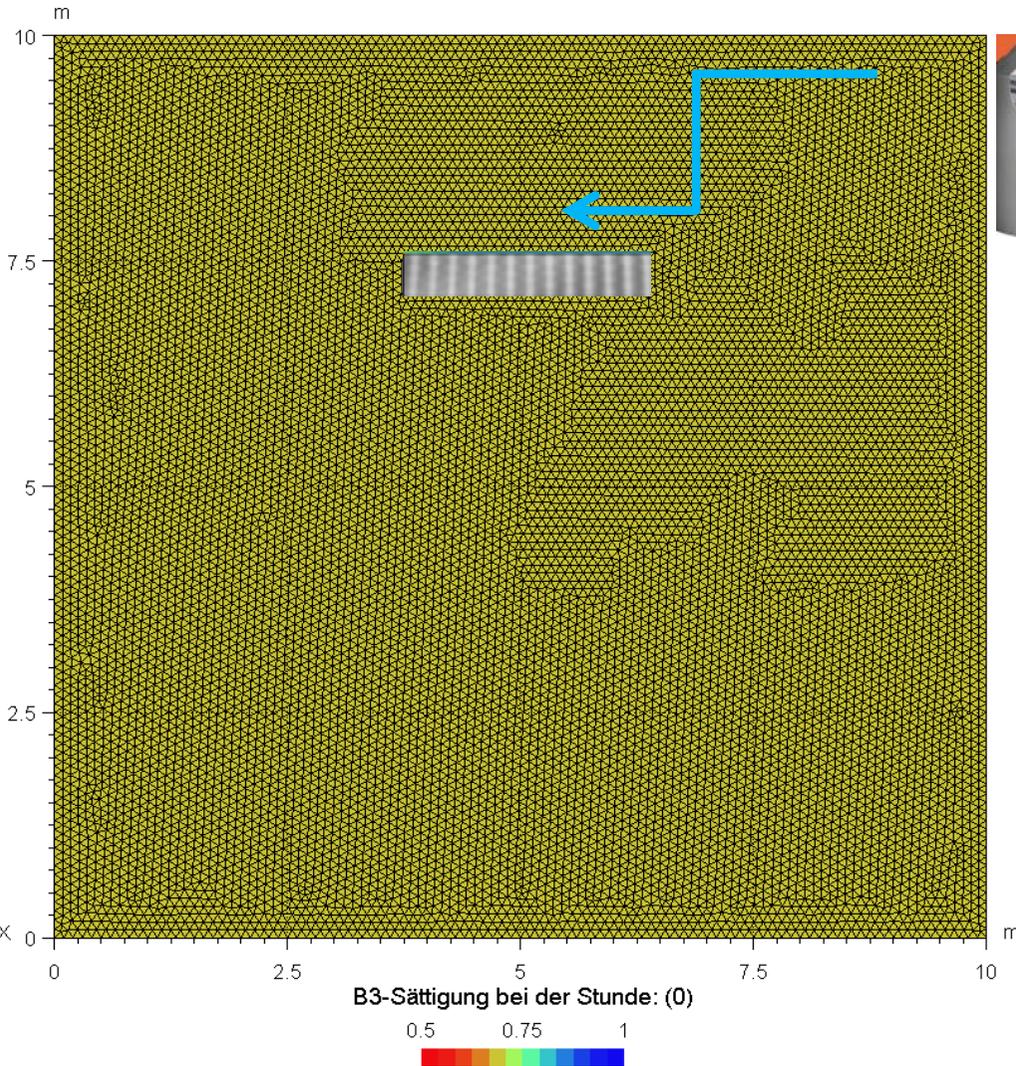




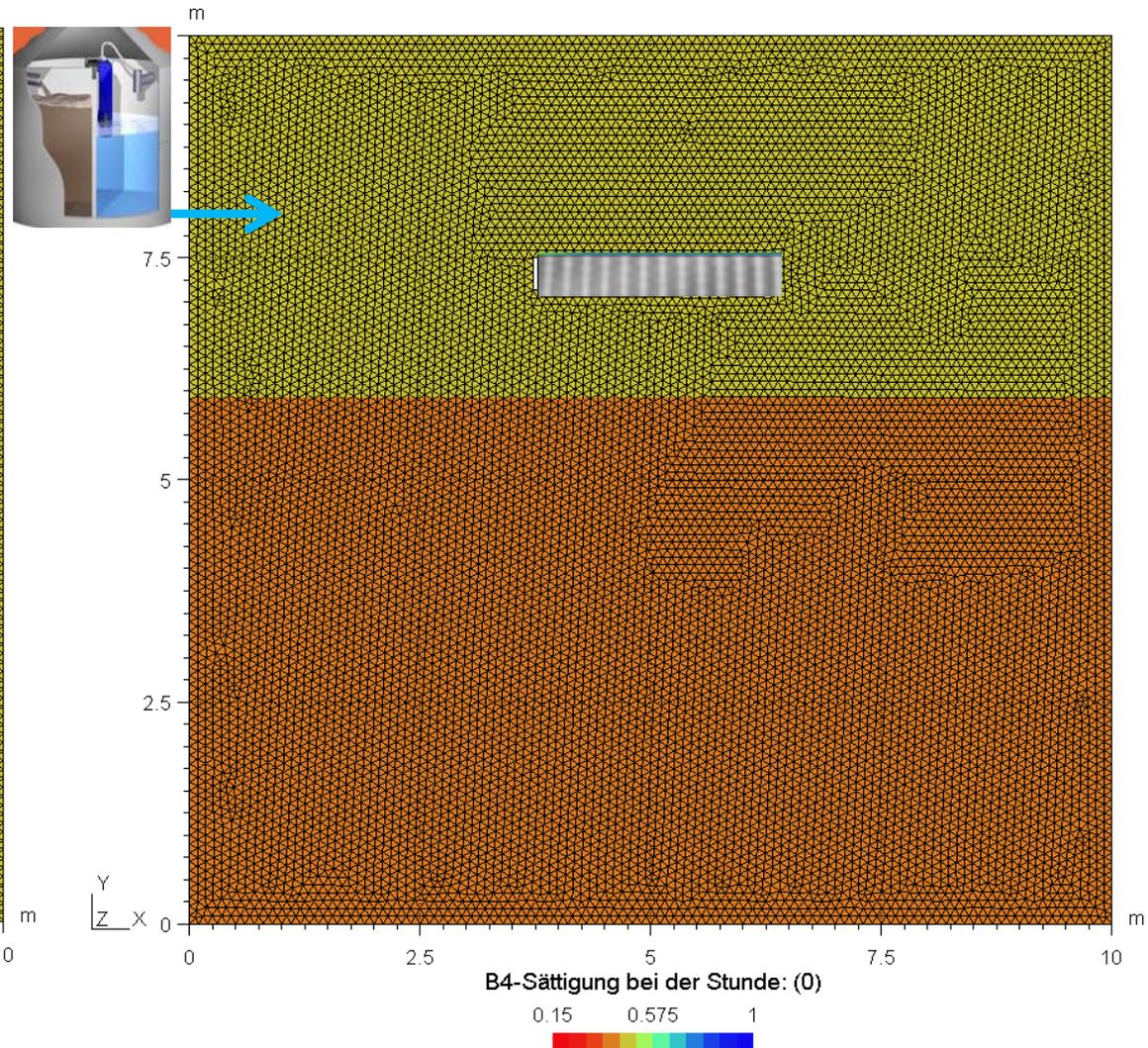
2012/4/24 9:16

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

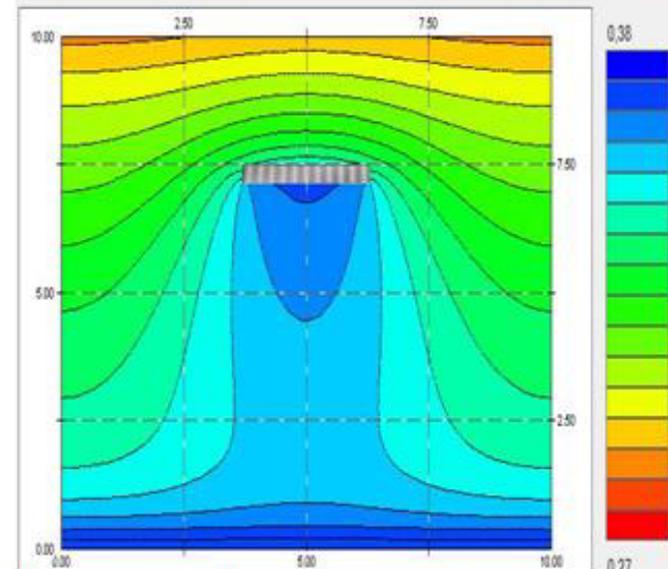
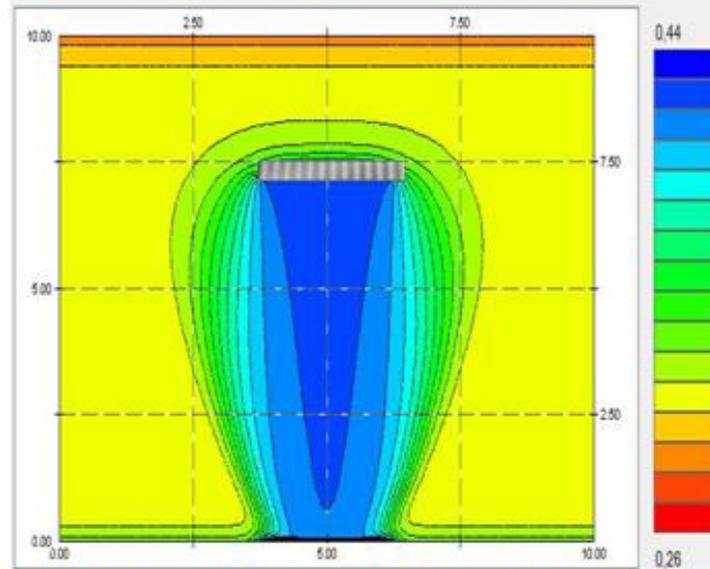
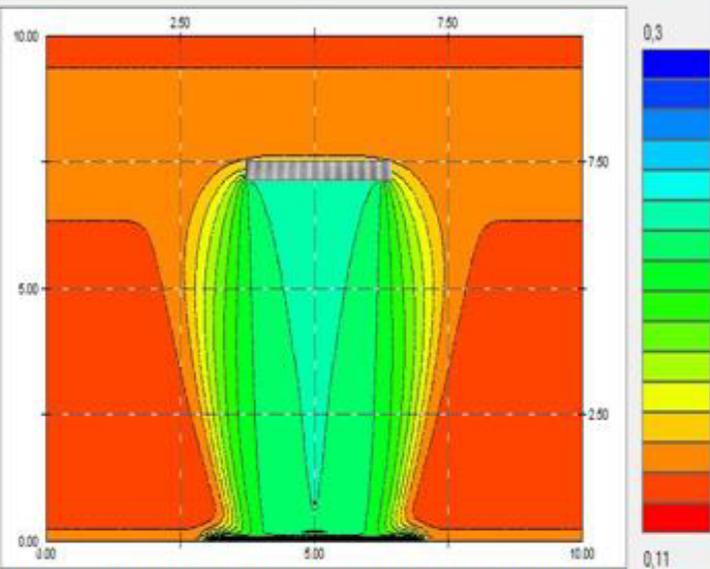


Wassersättigung B3-Feldversuch



Wassersättigung B4-Feldversuch

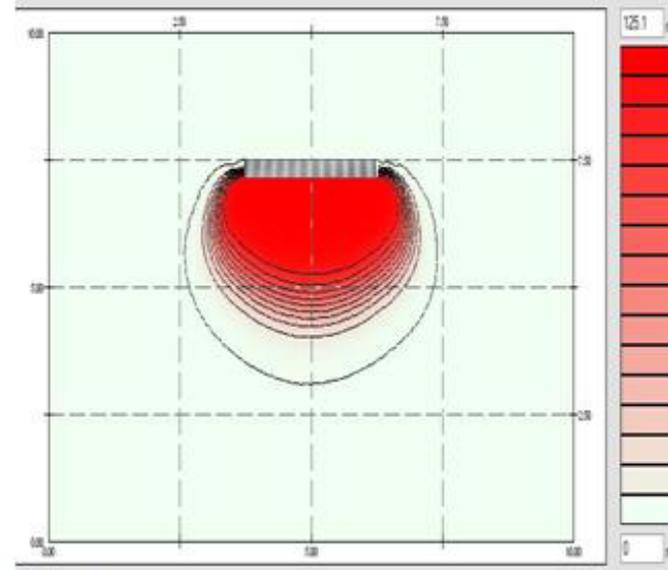
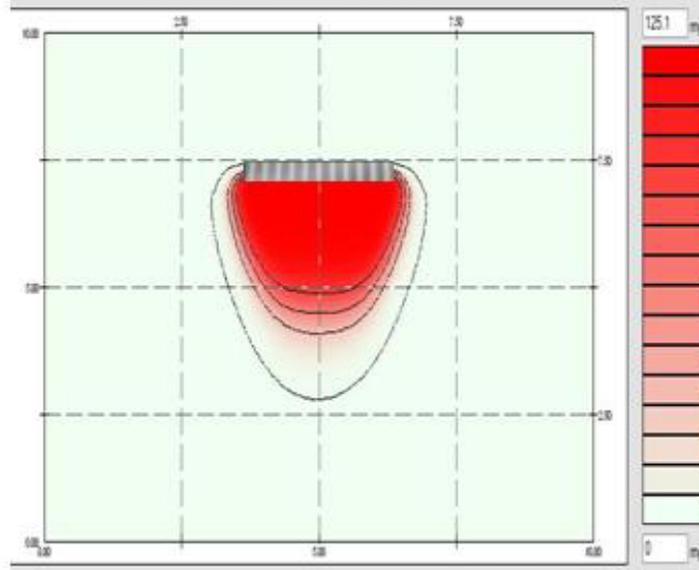
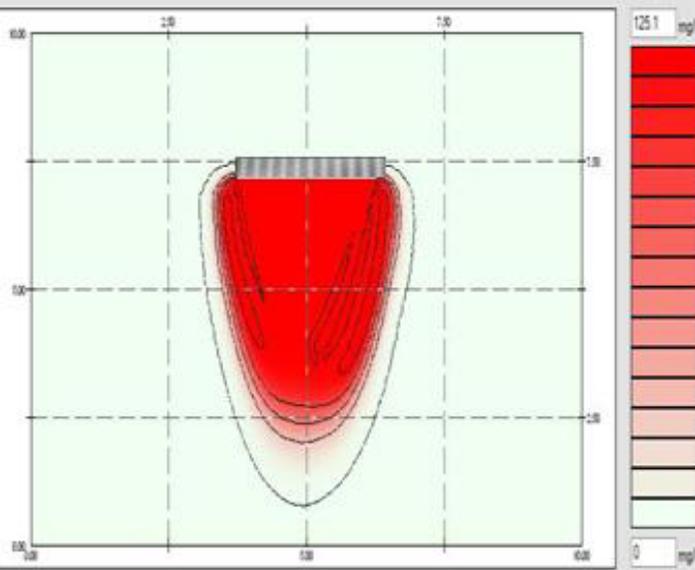
Simulation des Labor & Feldversuche mittels PCSiWaPro®



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

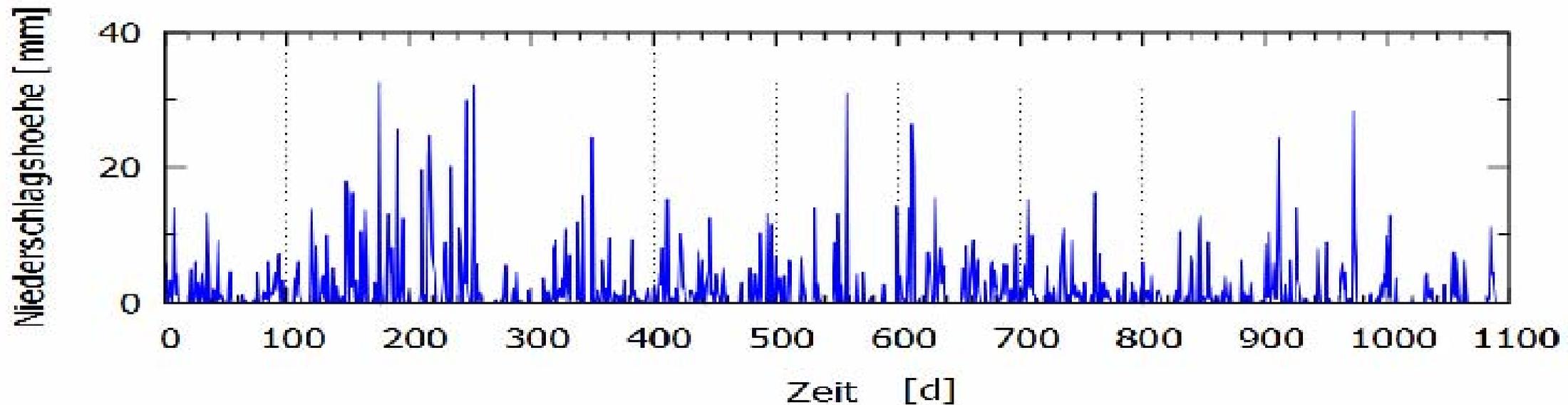
- Untersuchung Bodenwasserhaushalt sowie Abbau organischer
Abwasserinhaltsstoffe unter Variation verschiedener
Randbedingungen → 1D Laborversuche
- Simulation des Labor und Feldversuche mittels PCSiWaPro®
- **Berücksichtigen der räumlichen und zeitlichen Variabilität
der Versickerungsquelle→
2D Sensitivitätsanalyse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

2D-Sensitivitätsanalyse mittels PCSiWaPro®

- getestete Kenngröße und Simulationslaufzeit

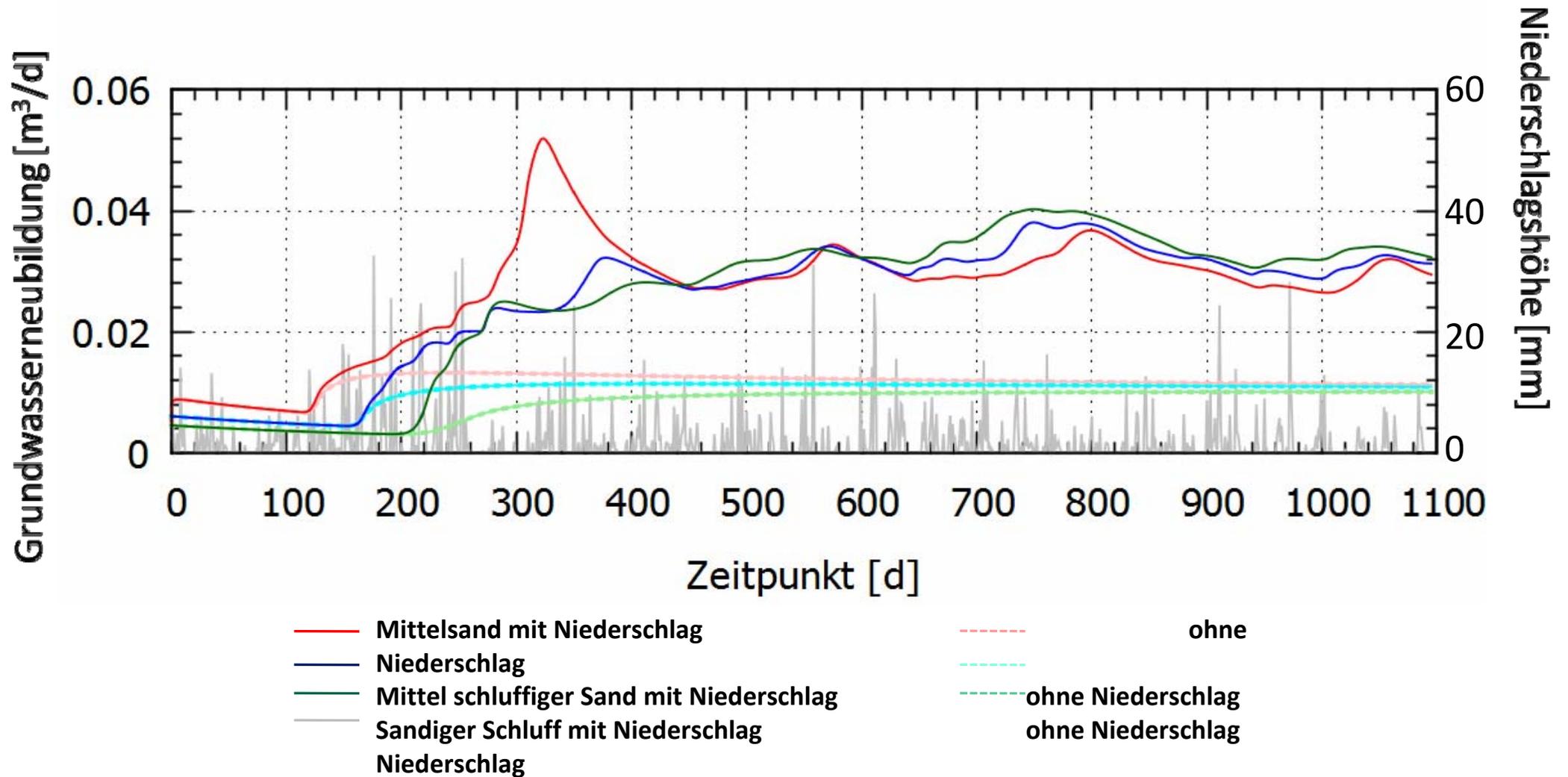
- konstante Infiltrationsrate : Kleinkläranlage für 4 Personen
 - Modell Flurabstand: **$Q=0,025 \text{ m}^3/(d \cdot p)$** bzw. **$0,075 \text{ m}^3/(d \cdot p)$**
reduziert aus Einwohnerwert ($Q=0,15 \text{ m}^3/(d \cdot p)$) aufgrund Verdunstung,
Kolmation
 - Modell Niederschlag: **$Q=0,0025 \text{ m}^3/(d \cdot p)$** bezogen auf den Säulenversuch
- Bodenparameter nach DIN 4220

Niederschlagsmenge

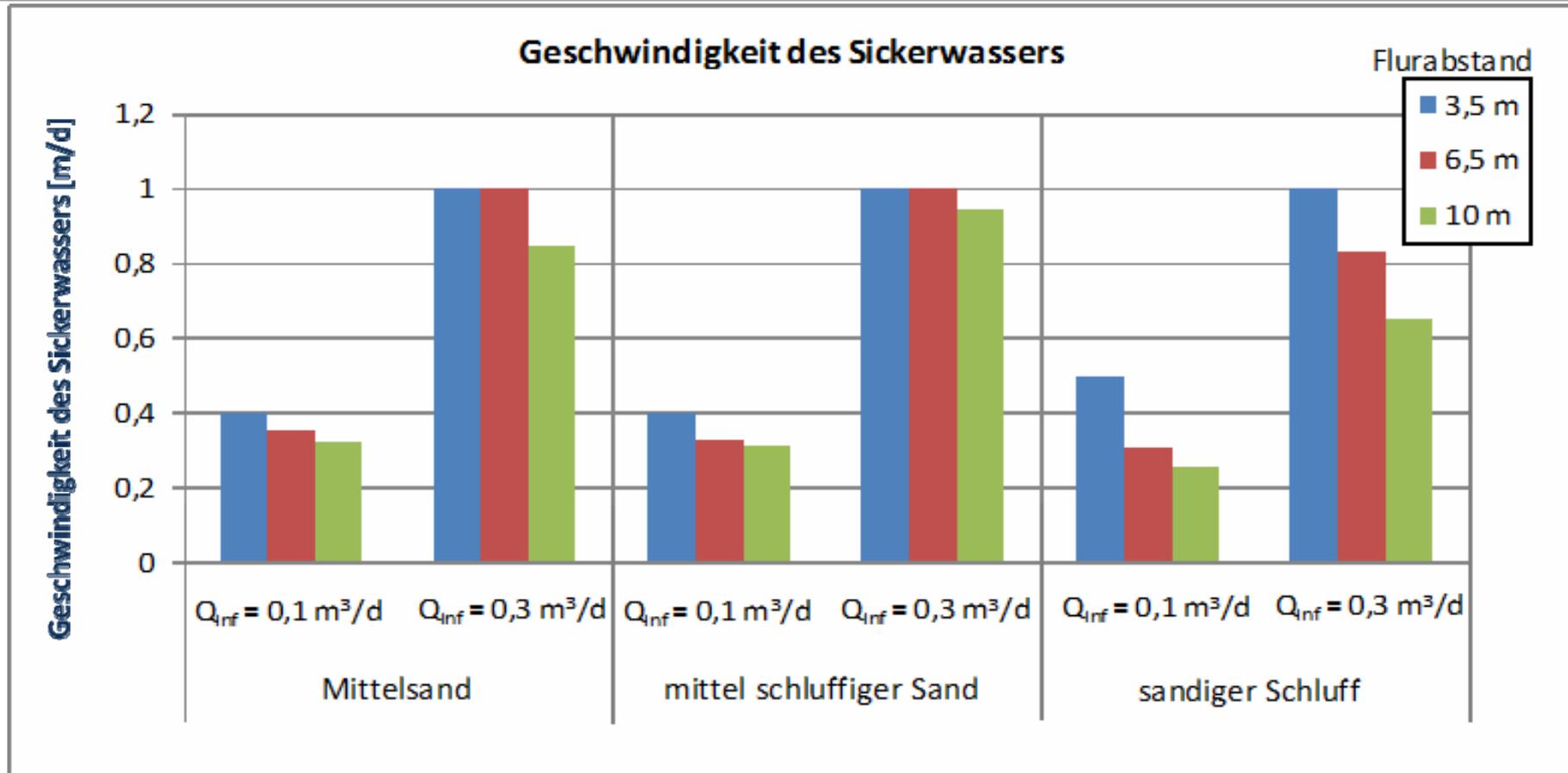


- Klimastation Görlitz (aus Wettergenerator von PCSiWaPro®)
- Länge der Datenreihen 10...20 Jahre
- Jahresniederschlagshöhe 676 mm

2D-Sensitivitätsanalyse mittels PCSiWaPro®



2D-Sensitivitätsanalyse mittels PCSiWaPro®



Bodenart (k_f -Wert) ↑

Flurabstand ↑

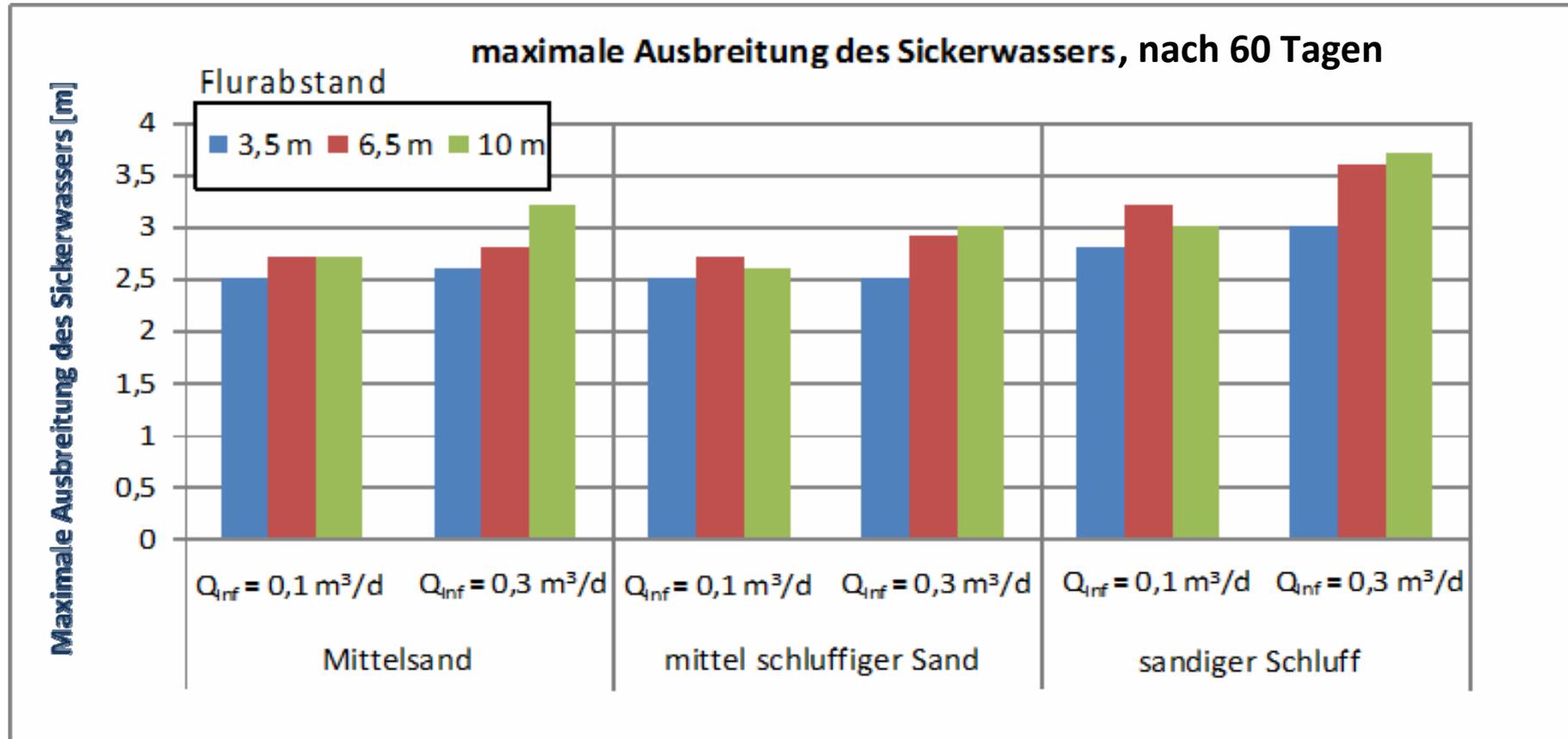
Infiltrationsrate ↑

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/m²
- 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 cm³/cm³)
- Vergrößerung der Ausbreitung der Sättigungsfront bei hohem Wassergehalt

Modell Flurabstand

	Geschwindigkeit	Ausbreitung bei gleichem Wassergehalt	max. Ausbreitung
Bodenart (k_f -Wert) ↑	↕	↓↓↓	(↓)
Flurabstand ↑	↓↓	↓	↑↑
Infiltrationsrate ↑	↑↑↑	↑↑	↑↑

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

4. Schlussfolgerungen der Sensitivitätsanalyse

Modell Niederschlag

- Erhöhung des Wassergehaltes in der ungesättigten Zone (ca. 5 – 9 cm³/cm³)
- Vergrößerung der Ausbreitung der Sättigungsfront bei hohem Wassergehalt

Modell Flurabstand

- Ankunftszeit 2 Tage bei Flurabstand = 3,5 m, Infiltrationsrate = 0,3 m³/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