

# Modellierung des Einflusses einer Versickerung von gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser

Alfred Paul BLASCHKE, Richard KIRNBAUER

- Undichte Kanäle
- Interaktion Vorfluter Grundwasser
- **Abwasserversickerung**

23.-24. Juni 2008, Graz  
 Numerische Grundwassermodellierung: Konzeption, komplexe Anwendung, Entscheidungsgrundlage

Modellierung des Einflusses einer Versickerung von gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser

### Ausgangslage

- 88,9 % Kanalisation und Abwasserreinigungsanlage (BLFUW, 2006a)
- 11,1 % Einzelentsorgungsanlagen  
 teilweise nicht mehr als Stand der Technik entsprechen (z.B. undichte Senkgruben, Dreikammerfaulgruben), noch nicht angeschlossene Haushalte
- ca. 5 % bleiben für Einzel- oder Gruppenentsorgungsanlagen (< 50 EW)

ohne ausreichende Vorflut können sich dabei Schwierigkeiten bei der Ableitung des gereinigten Abwassers ergeben

Alternativen sind:

- dichte Senkgruben mit Abfuhr des Abwassers in eine Kläranlage
- eine Reinigung in Kleinkläranlagen mit anschließender Versickerung des gereinigten Abwassers in den Untergrund (im Ausnahmefall)

Jahr	Anschlussgrad in %
1988	38,3
1991	52,9
1993	60,2
1998	80,9
2001	88,9

Quelle: BM/FUW 2002/Statistik Austria Bericht 2002

Entsorgung der Siedlungsgebiete Karte 2

23.-24. Juni 2008, Graz  
 Numerische Grundwassermodellierung: Konzeption, komplexe Anwendung, Entscheidungsgrundlage

Modellierung des Einflusses einer Versickerung von gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser

### Bewilligung in Kompetenz der Bundesländer

INFORMATIONSBLETT  
 für Ansuchen um eine wasserrechtliche Bewilligung zur Abwasserbeseitigung  
 Erforderliche Plan- und Beschreibungsunterlagen

Entscheidungsbehelf für Kleinkläranlagen  
 Zahl: 21304-9732000/-2003

Land Salzburg  
 Blatt Versickerung  
 von gereinigtem häuslichem Abwasser in den Untergrund

VORSCHLÄGE FÜR DIE BEURTEILUNG VON BIOLOGISCHEN KLEINKLÄRANLAGEN  
 von PETER SCHABER  
 2. Fassung November 2003

Bayerisches Landesamt für Umwelt  
 Abwasserentsorgung von Einzelanwesen  
 Hinweise zum sachgemäßen Bau und Betrieb von Kleinkläranlagen  
 Stand August 2005

23.-24. Juni 2008, Graz  
 Numerische Grundwassermodellierung: Konzeption, komplexe Anwendung, Entscheidungsgrundlage

Modellierung des Einflusses einer Versickerung von gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser

## Leitfaden für die Beurteilung einer Versickerung von gereinigtem Abwasser

**Auswirkung von Versickerung und Verrieselung von durch Kleinkläranlagen mechanisch-biologisch gereinigtem Abwasser in dezentralen Lagen**

August 2006

lebensministerium.at

**Projektteam**

**Koordination und Arbeitsgruppe Abwassertechnik und Wassergüte**  
 Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU-Wien  
 Helmut Kross  
 Matthias Zessner  
 Christian Schilling

**Arbeitsgruppe Mikrobiologie und Hygiene**  
 Institut für Wassergüte, Bundesamt für Wasserwirtschaft  
 Gerhard Kavka

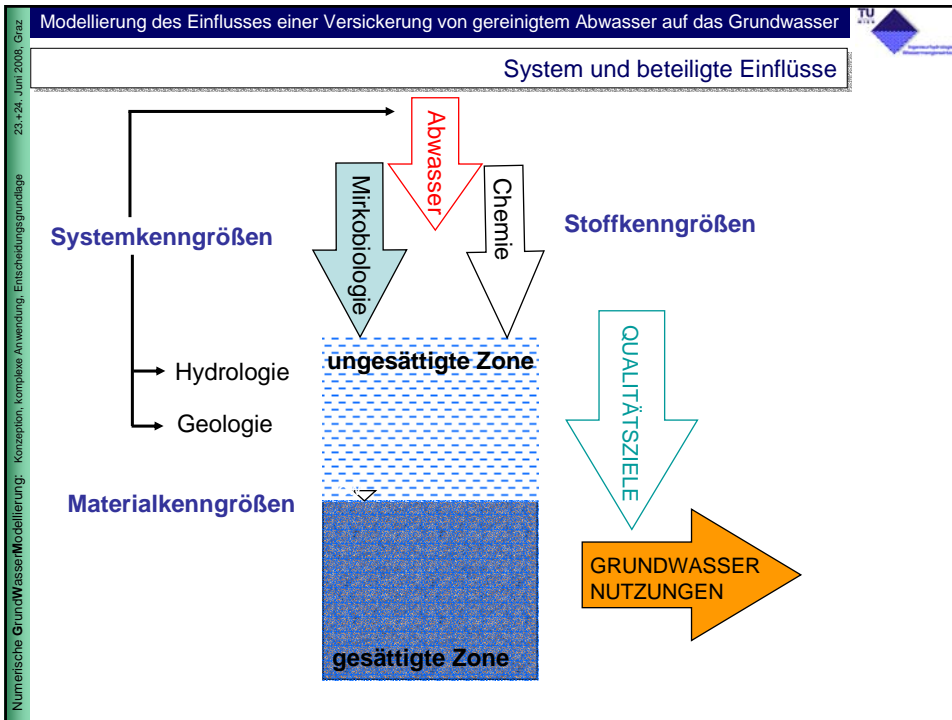
**Inst. f. Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Biowissenschaften, TU-Wien**  
 Andreas Farnleitner

**Arbeitsgruppe Hydrologie und Hydraulik**  
 Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU-Wien  
 Alfred Paul Blaschke  
 Richard Kirnbauer

**Arbeitsgruppe Geologie**  
 Institut für Ingenieurgeologie, TU-Wien  
 Ewald Tentschert  
 Christian Hassler

**Arbeitsgruppe Statistik**  
 Institut für angewandte Statistik und EDV, BOKU Wien  
 Harald Strelec

<http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/wasser/abwasser/>



23. + 24. Juni 2008, Graz  
 Numerische Grundwassermodellierung: Konzeption, komplexe Anwendung, Entscheidungsgrundlage

Modellierung des Einflusses einer Versickerung von gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser

### System und beteiligte Einflüsse

**Systemkenngrößen**

Bodentexturklasse, Mächtigkeit der ungesättigten Zone, Mächtigkeit des Grundwasserleiters, Grundwasserspiegelgefälle

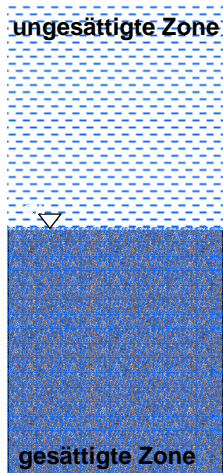
Vorbelastung des Grundwassers, Kläranlagentyp, Kläranlagengröße, Art der Versickerung, Betrachteter Abwasserparameter

**Materialkenngrößen**

Hydraulische Durchlässigkeit  $k_s$ , Van-Genuchten-Parameter (Restwassergehalt  $\theta_r$ , Sättigungswassergehalt  $\theta_s$ ,  $N$ ,  $\alpha$ ), Porosität  $p_e$ , longitudinale Dispersivität  $\alpha_L$ , transversale Dispersivität  $\alpha_T$ , mittlerer Korndurchmesser

**Stoffkenngrößen**

Ablaufkonzentration, Abbauraten, Sticking Efficiency, Collision Efficiency, Virendurchmesser



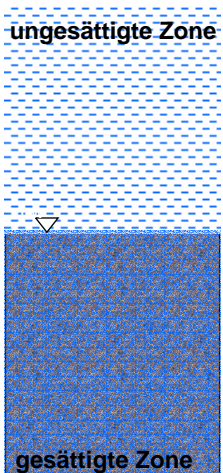
ungesättigte Zone

gesättigte Zone

23. + 24. Juni 2008, Graz  
 Numerische Grundwassermodellierung: Konzeption, komplexe Anwendung, Entscheidungsgrundlage

Modellierung des Einflusses einer Versickerung von gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser

### gewählte Modellansätze



ungesättigte Zone

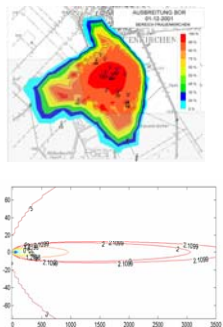
gesättigte Zone

1D ungesättigter Transport

↓

2D gesättigter Transport

→





Transportgleichung

1 dimensionale Transportgleichung

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v \frac{\partial c}{\partial z} - \lambda c$$

für den advektiven-dispersiven Transport mit Abbau

2 dimensionale Transportgleichung

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{R} \left( \frac{\partial v_{a,x}}{\partial x} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial v_{a,y}}{\partial y} \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial c}{\partial x} \left( \frac{D_{xx}}{R} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{D_{xy}}{R} \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial c}{\partial y} \left( \frac{D_{yx}}{R} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{D_{yy}}{R} \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \lambda \cdot c - \frac{i}{n_f \cdot H \cdot R} (c_{IN} - c) - \frac{m}{n_f \cdot H \cdot R} \cdot \frac{c}{H} \left( \frac{S}{n_f R} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0$$

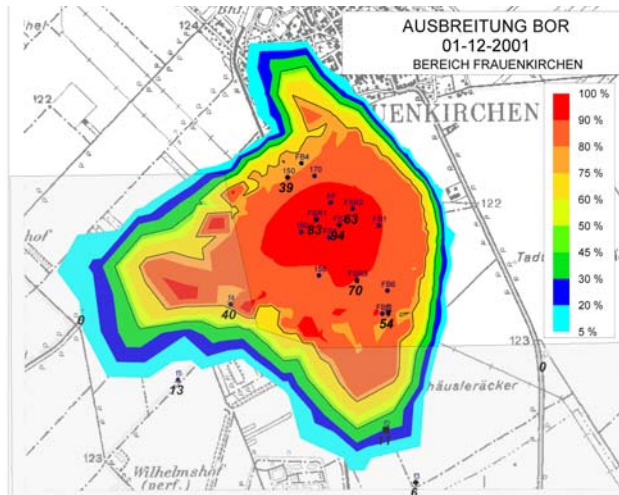
- h = h(x,y,t) [m] Standrohrspiegelhöhe
- H [m] Grundwassermächtigkeit
- S = S(x,y) [-] Flächenbezogener Speicherkoeffizient
- n<sub>f</sub> = n<sub>f</sub>(x,y,t) [-] durchflusswirksamer Hohlraumanteil
- i = i(x,y,t) [m/s] flächenbezogener Zufluss (z.B. Neubildung)
- v<sub>a,x</sub>, v<sub>a,y</sub> [m/s] Komponenten der Abstandsgeschwindigkeit
- c = c(x,y,t) [g/m<sup>3</sup>] Konzentration des gelösten Stoffes
- c<sub>IN</sub> = c<sub>IN</sub>(x,y,t) [g/m<sup>3</sup>] Konzentration eines Zuflusses (z.B. Neubildung)
- m = m(x,y,t) [g/d/m<sup>2</sup>] flächenbezogener Stoffeintrag
- R [-] Retardationsfaktor R = 1 + ρ · k · (1 - n<sub>f</sub>) / n<sub>f</sub>
- ρ [t/m<sup>3</sup>] Dichte des trockenen Korngerüsts
- k [m<sup>2</sup>/t] Adsorptionskoeffizient

Numerische GrundwasserModellierung: Konzeption, komplexe Anwendung, Entschärfungsgrundlage



Numerische Lösungen der Transportgleichung

Numerische Lösungen der Transportgleichungen  
Finite Differenzen bzw. Finite Elemente Verfahren



Numerische GrundwasserModellierung: Konzeption, komplexe Anwendung, Entschärfungsgrundlage

23.-24. Juni 2008, Graz  
 Numerische Grundwassermodellierung: Konzeption, komplexe Anwendung, Entscheidungsgrundlage

Modellierung des Einflusses einer Versickerung von gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser

### verwendete analytische Lösungen der Transportgleichungen

#### 1D ungesättigter Transport

$q = k(\theta) \cdot \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right)$  Darcy-Buckingham (1907)

Strömung

$v = \frac{q}{\theta}$

$c(x, t = \infty) = c_0 \cdot \exp\left( \frac{\left( v - v \cdot \sqrt{1 + 4\lambda \cdot \frac{D}{v^2}} \right) \cdot x}{2D} \right)$

$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$

Kinzelbach (1987), van Genuchten (1981)

#### Viren

$\log_{10} \left( \frac{c}{c_0} \right) = \frac{x}{2.3} \left( 1 - \sqrt{1 + 4\alpha_L (\lambda/v)} \right)$

$\lambda = \mu_f + k_{att}$

$k_{att} = \frac{3(1-n)}{2d_c} \alpha n v$

Schijven et al. (2000, 2003)

#### 2D gesättigter Transport

Darcy (1856)

$q = k_s \cdot I$

$v = \frac{q}{P_c}$

#### Chemische Wasserinhaltsstoffe

$c(x, y, t = \infty) \approx \frac{c_0}{2 \cdot \sqrt{\pi \alpha_T}} \cdot \frac{1}{\sqrt{r\gamma}} \cdot \exp\left( \frac{x - r\gamma}{2\alpha_L} \right)$

$r = \sqrt{x^2 + \frac{\alpha_L}{\alpha_T} y^2}$       $\gamma = \sqrt{1 + \frac{4\alpha_L \lambda}{v}}$

Kinzelbach (1987)

#### Bakterien

$\log_{10} \left( \frac{c}{c_0} \right) = \frac{x}{2.3} \left( \frac{\lambda_f}{v} + \lambda_f \right)$

$\lambda_f$ ..... Filtrationsrate [1/m]  
 $\lambda_a$ ..... Abbaurrate [1/d]

$\eta$ ..... Collision Efficiency  
 $\alpha$ ..... Sticking Efficiency  
 $x$ ..... Fließstrecke  
 $\alpha_L$ ..... Longitudinale Dispersivität  
 $v$ ..... Sickerwassergeschwindigkeit  
 $n$ ..... Porosität  
 $d_c$ ..... Mittlerer Korndurchmesser [m]  
 $\mu_f$ ..... Virendurchmesser [m]  
 $T$ ..... Temperatur [°C]

23.-24. Juni 2008, Graz  
 Numerische Grundwassermodellierung: Konzeption, komplexe Anwendung, Entscheidungsgrundlage

Modellierung des Einflusses einer Versickerung von gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser

### Anwendung auf Transport von Mikroorganismen

Abwasser [enterale Viren] → Konzentrationevgl. → Grundwasser gem. Trinkwasserqualitätsziele (WHO, USEPA) [enterale Viren]

Abwasser [E. coli] → Konzentrationevgl. → Grundwasser gem. Trinkwasserverordnung [E. coli]

notwendige Reduktion

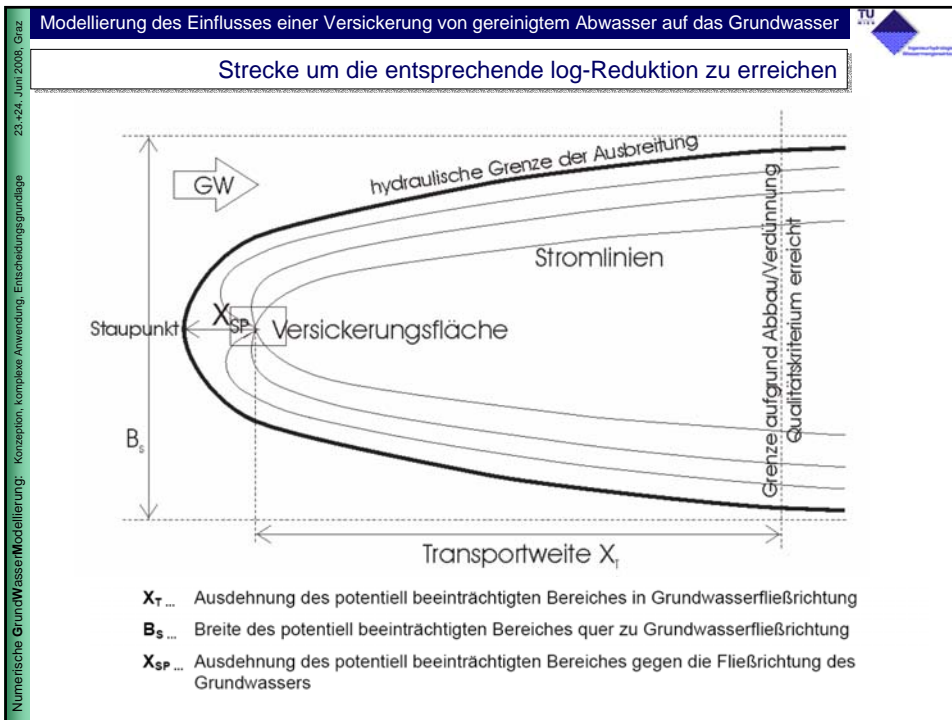
Modellierung Ausbreitung Bakterien & Viren

ungesättigte Zone / gesättigte Zone

im Boden & Aquifer

Modellierte Fließstrecken zur Gewährleistung der Qualitätsziele im Grundwasser

Famleitner, Mach (2006)



Modellierung des Einflusses einer Versickerung von gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser

Kenngrößen

Systemkenngrößen:	Bodentexturklasse, Mächtigkeit der ungesättigten Zone, Mächtigkeit des Grundwasserleiters, Grundwasserspiegelgefälle, Grundwasserneubildung, Vorbelastung des Grundwassers, Kläranlagentyp, Kläranlagengröße, Art der Versickerung, Betrachteter Abwasserparameter
Materialkenngrößen:	Hydraulische Durchlässigkeit $k_s$ , Van-Genuchten-Parameter (Restwassergehalt $\theta_r$ , Sättigungswassergehalt $\theta_s$ , $N$ , $\alpha$ ), Porosität $p_e$ , longitudinale Dispersivität $\alpha_L$ , transversale Dispersivität $\alpha_T$ , mittlerer Korndurchmesser
Stoffkenngrößen:	Ablaufkonzentration, Abbauraten, Sticking Efficiency, Collision Efficiency, Virendurchmesser

Eingangsparameter – SYSTEM- und MATERIALKENNGRÖSSEN

Tabelle 31: Äquivalenzliste für Texturklassen

Texturklasse gemäß USDA	Texturklasse gemäß DIN 4220	Texturklasse gemäß ÖBG
Sand (S)	Ss	Sand
Loamy Sand (LS)	St2, Su2	Sand, lehmiger Sand
Sandy Loam (SL)	Su3, Su4, St3, St4, St3, St2	lehmiger Sand, sandiger Lehm, schluffiger Sand
Loam (L)	Ls3, Ltu, Ls2	sandiger Lehm, lehmiger Sand
Silt Loam (SIL)	Us, Uls, Ut, Lu, Ut2, Ut3, Ut4	lehmiger Schluff, sandiger Schluff, Schluff
Sandy Clay Loam (SCL)	Ls4, Lts, Ts4, St3	Lehm, sandiger Ton, sandiger Lehm, lehmiger Sand
Clay Loam (CL)	Lts, Lt, Lt2	Lehm
Silty Clay Loam (SICL)	Tu3, Tu4, Lt3	schluffiger Lehm, Lehm
Sandy Clay (SC)	Ts3	lehmiger Ton, sandiger Ton, Lehm
Silty Clay (SIC)	Tu2	lehmiger Ton, Ton
Silt (SI)	Uu	Schluff
Clay (C)	Ts2, Tl, Tu2, Tt	Ton, lehmiger Ton

Hydrogeologic Data (Carsel et. al, 1988)

	A	B	Transf.	Mean	SD
<b>Sand</b>					
K <sub>v</sub>	0	70	SB	-0,394	1,15
θ <sub>s</sub>	0,245	0,615	NO	(8,25·10 <sup>-2</sup> m/s)	(4,33·10 <sup>-2</sup> m/s)
θ <sub>r</sub>	0	0,1	LN	-3,12	0,224
α	0	0,25	SB	0,378	0,439
N	1,5	4	LN	0,978	0,1
<b>Loamy Sand</b>					
K <sub>v</sub>	0	51	SB	-1,27	1,4
θ <sub>s</sub>	0,132	0,688	NO	(4,05·10 <sup>-2</sup> m/s)	(3,16·10 <sup>-2</sup> m/s)
θ <sub>r</sub>	0	0,11	SB	0,075	0,067
α	0	0,25	NO	0,124	0,043
N	1,35	5	SB	-1,11	0,307
<b>Sandy Loam</b>					
K <sub>v</sub>	0	30	SB	-2,49	1,53
θ <sub>s</sub>	0,132	0,688	NO	(1,23·10 <sup>-2</sup> m/s)	(1,56·10 <sup>-2</sup> m/s)
θ <sub>r</sub>	0	0,11	SB	0,384	0,7
α	0	0,25	SB	-0,937	0,764
N	1,35	3	LN	0,634	0,082
<b>Sandy Gravel</b>					
K <sub>v</sub>	-	-	LN	3,18	0,274
θ <sub>s</sub>	-	-	Const.	(3,5·10 <sup>-1</sup> m/s)	(1,9·10 <sup>-1</sup> m/s)
θ <sub>r</sub>	-	-	Const.	0,3	0
α	-	-	Const.	0,02	0
N	-	-	Const.	15	0
N	-	-	Const.	2	0
<b>Gravel</b>					
K <sub>v</sub>	-	-	LN	7,02	0,57
θ <sub>s</sub>	-	-	Const.	(1,77·10 <sup>-2</sup> m/s)	(1,55·10 <sup>-2</sup> m/s)
θ <sub>r</sub>	-	-	Const.	0,3	0
α	-	-	Const.	0,02	0
N	-	-	Const.	15	0
N	-	-	Const.	2	0

Normal distribution; LN: Log-Normal distribution; SB: Log-Ratio distribution

Numerische Grundwassermodellierung: Konzeption, komplexe Anwendung, Entschlüsselungsgrundlage

Eingangsparameter – SYSTEMKENNGRÖSSEN

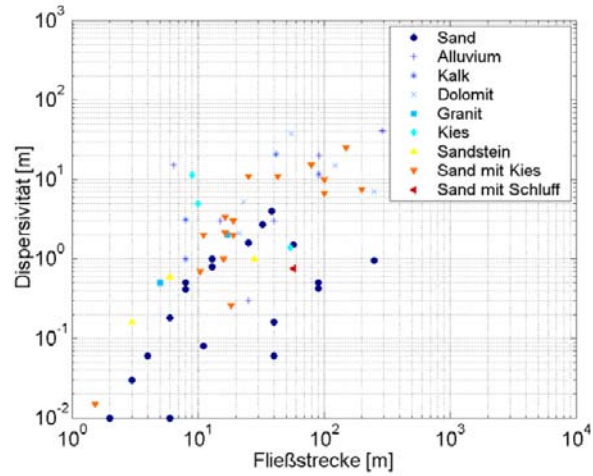
- Kläranlagentyp:
  - Belebungsverfahren bzw. Pflanzenkläranlage
  - Grauwasserbehandlung
- Kläranlagengröße: 4 bzw. 20 EW-Anlage
- Vorbelastung des Grundwassers: 3 bzw. 8 mg/l O<sub>2</sub>.
- Abwasserparameter: CSB/NH<sub>4</sub> – Sauerstoffzehrung, Nitrat, Carbamazepin  
Bakterien, Viren
- Betriebszustand
  - Normalfall
  - Störfall

Numerische Grundwassermodellierung: Konzeption, komplexe Anwendung, Entschlüsselungsgrundlage



Eingangsparameter – MATERIALGRÖSSEN

beispielhaft → DISPERSIVITÄT (aus Literaturwerten)



(Gelhar et. al, 1992).

Eingangsparameter – STOFFKENNGRÖSSEN

- Abbauraten, bzw. Halbwertszeiten für chemische Parameter (Tage)
- Filtrationskonstanten für E.coli ( $m^{-1}$ )
- Absterberaten für E.coli ( $Tag^{-1}$ )
- Inaktivierungsrate für Viren ( $Tag^{-1}$ )
- Größe der Virenpartikel (nm)
- Sticking-Effizienz für Viren (-)

23.-24. Juni 2008, Graz  
 Numerische Grundwassermodellierung: Konzeption, Komplexe Anwendung, Entscheidungsguidage

Modellierung des Einflusses einer Versickerung von gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser

### Eingangsparameter – STOFFKENNGRÖSSEN

beispielhaft → Kenngrößen für VIREN (aus Literaturwerten)

Microbial parameters:	required log <sub>10</sub> -reduction	12.4 for entire sewage 8.7 for grey water	constant	result of QMRA
Enteric viruses				
	inactivation rate in water [1/d]	0.0058 – 0.24	uniform	Yates et. al. (1985) Blanc et. al. (1996) Yahya et. al. (1993) Mathess et. al. (1988) Schijven (2005)
	sticking efficiency [1]	1.10 <sup>-5</sup> – 1.10 <sup>-3</sup>	uniform	Schijven (2005)
	virus particle size [nm]	20 - 35	uniform	Bienz (2001) Walter (2000) Wyn-Jones et. al. (2001)

23.-24. Juni 2008, Graz  
 Numerische Grundwassermodellierung: Konzeption, Komplexe Anwendung, Entscheidungsguidage

Modellierung des Einflusses einer Versickerung von gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser

### Eingangsparameter – Monte Carlo Methode

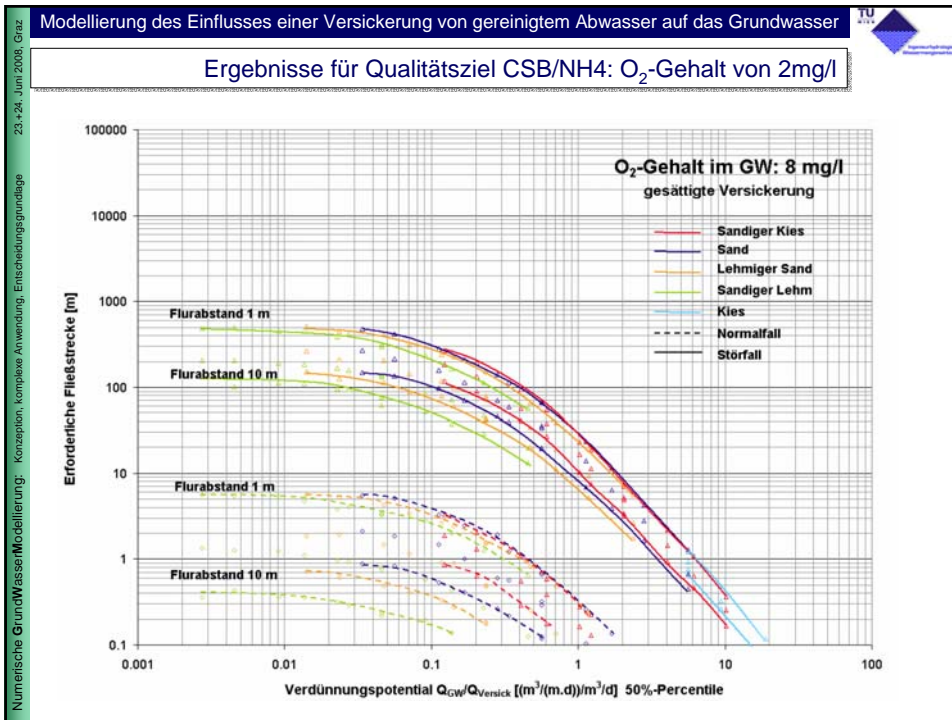
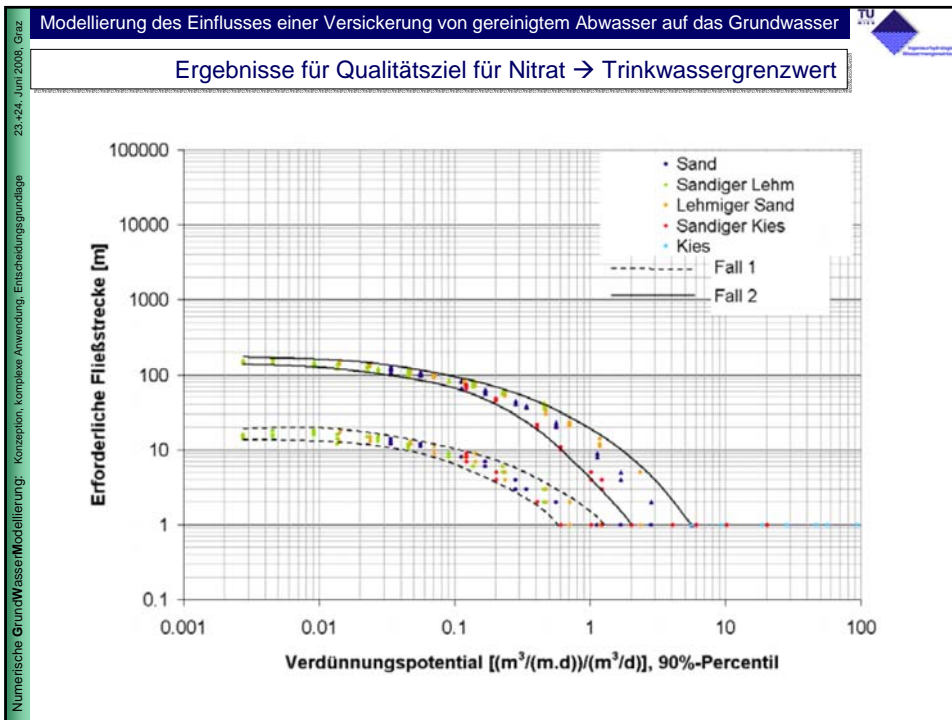
Materialkenngrößen:	Hydraulische Durchlässigkeit $k_s$ , Van-Genuchten-Parameter (Restwassergehalt $\theta_r$ , Sättigungswassergehalt $\theta_s$ , $N$ , $\alpha$ ), Porosität $p_e$ , longitudinale Dispersivität $\alpha_L$ , transversale Dispersivität $\alpha_T$ , mittlerer Korndurchmesser
Stoffkenngrößen:	Ablaufkonzentration, Abbauraten, Sticking Efficiency, Collision Efficiency, Virendurchmesser

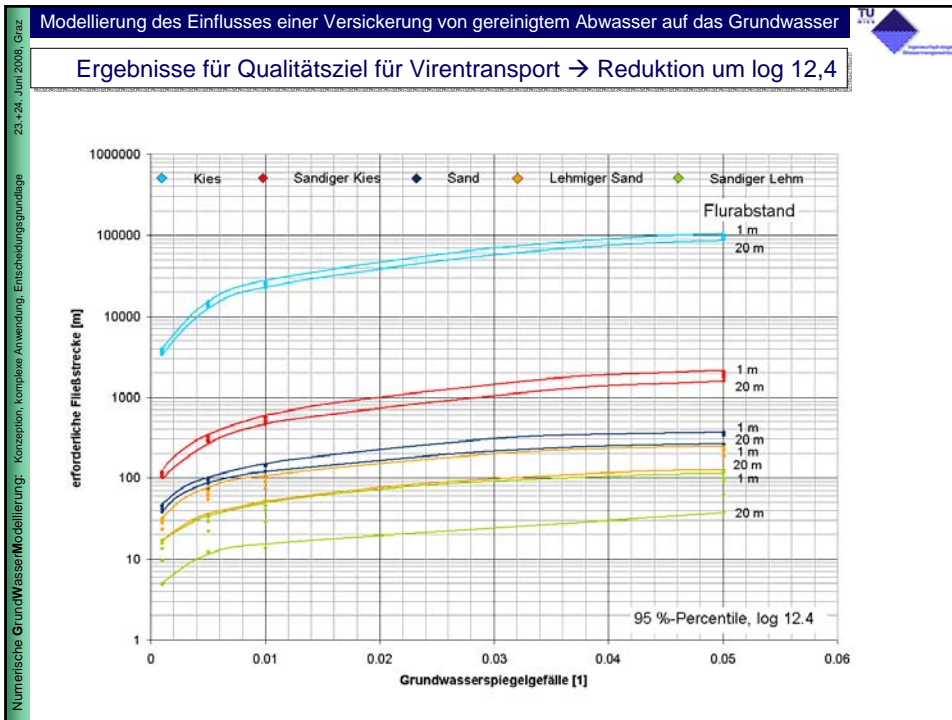
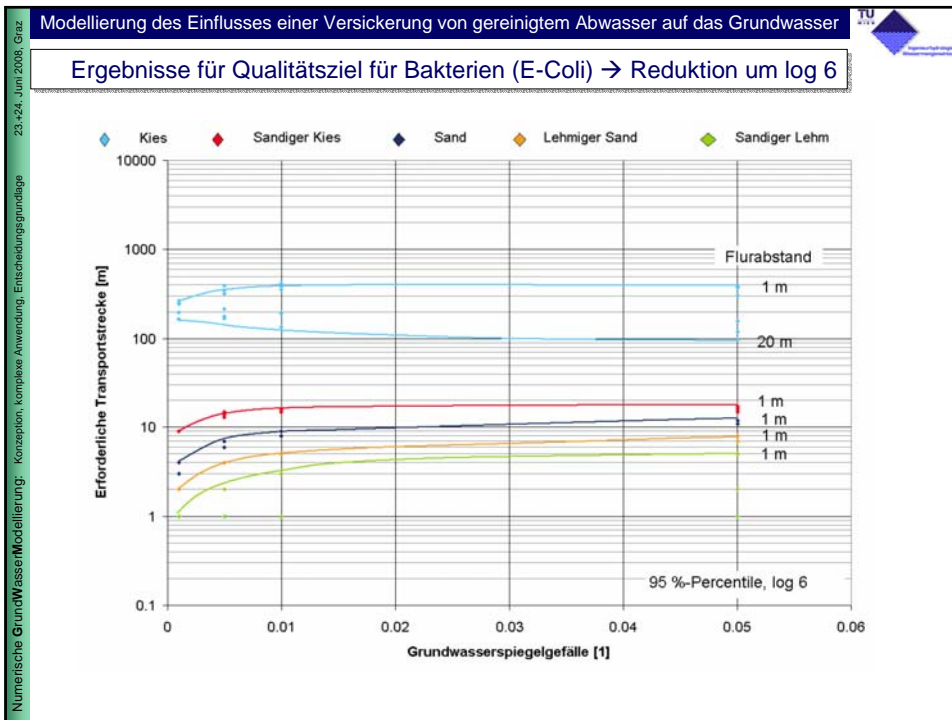
↓

Für die Modellierung erfolgt die Beschreibung durch Verteilungsfunktionen

↓

Monte Carlo Methode jeweils 1000 (chem.) bzw. 4000 (Viren) Realisationen erzeugt





### Zusammenfassung und Ausblick

- Die vorgestellte Methode der Transportmodellierung erlaubt auch bei geringer Information über die hydrologischen, hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Verhältnisse im Fall einer Abwasserbelastung eine Abschätzung der Beeinflussung des Grundwassers vorzunehmen.
- Großer Grundwasserdurchfluss (bedingt durch höhere  $k_f$ -Werte und Grundwassergefälle) bewirkt geringere Filtration bzw. Adsorption, dadurch wird die Ausdehnung des beeinträchtigten Bereiches für mikrobiologisch-hygienischen Parameter größer.
- Geringer Grundwasserdurchfluss (bedingt durch kleinere  $k_f$ -Werte und Grundwassergefälle) bewirkt geringere Verdünnung, dadurch wird die Ausdehnung des beeinträchtigten Bereiches für chemisch-physikalische Parameter größer.
- Weitere Feld- und Laboruntersuchungen hinsichtlich der Parameter bei Viren für die österreichischen Verhältnisse sind erforderlich.

Dank dem Bundesministerium f. Landwirtschaft, Forstwirtschaft,  
Wasserwirtschaft u. Umwelt  
Auftraggeber der Studie.

Danke für Ihr Interesse!