

Fachgespräch „Frachten“

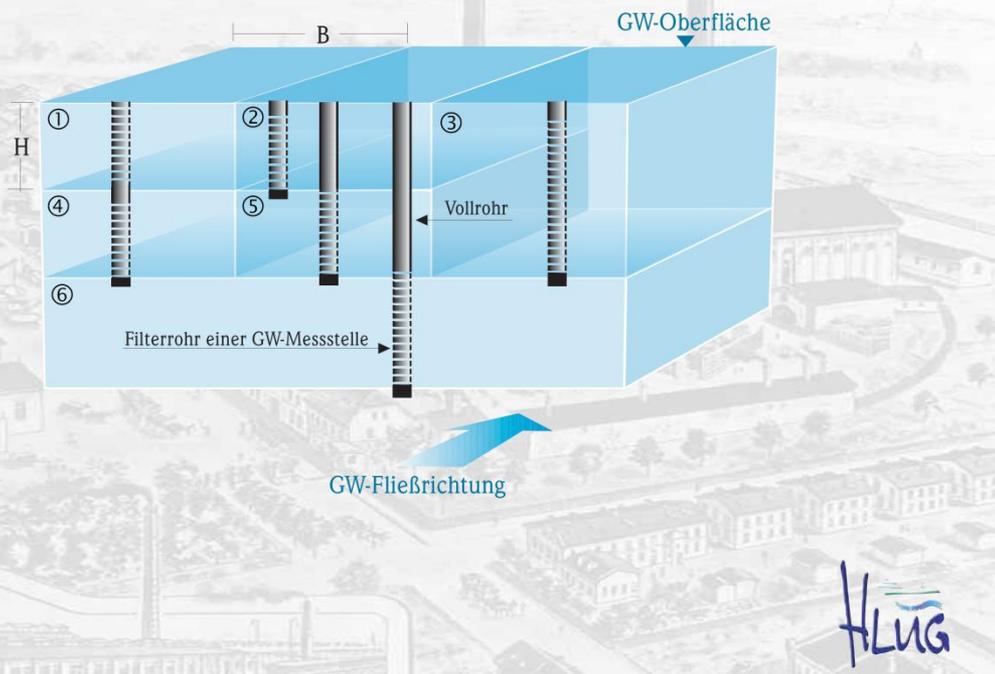
20. April 2009, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Vorstellung des Handbuchs Altlasten „Ermittlung von Schadstofffrachten im Grund- und Sickerwasser“



Ermittlung von Schadstofffrachten im Grund- und Sickerwasser

Band 3, Teil 6



www.hlug.de

weiterklicken

... Altlasten

... Aktuelle Information

vertrieb@hlug.de

Inhalt

- ❑ **Einführung „Frachten“**
- ❑ **Frachtenermittlung im Sickerwasser**
- ❑ **Frachtermittlung im Grundwasser (Schadstoff-Fahne)**

Schadstoff-Frachten

Relevanz von Schadstofffrachten im Grundwasser

- ❑ Entscheidung, ob eine Grundwassersanierung erforderlich ist
- ❑ Entscheidung, ob eine laufende Grundwassersanierung beendet werden kann, obwohl die Sanierungszielwerte (i. d. R. Stoffkonzentrationen) noch nicht erreicht sind
- ❑ Entscheidung, ob natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse (MNA) als Ergänzung oder ersetzend für aktive Sanierungsverfahren genutzt werden können
- ❑ Ermittlung von Schadstofffrachten im Sicker- und Grundwasser (Arbeitshilfe)

Schadstoff-Transport

Aus der Quelle austretende Fracht:

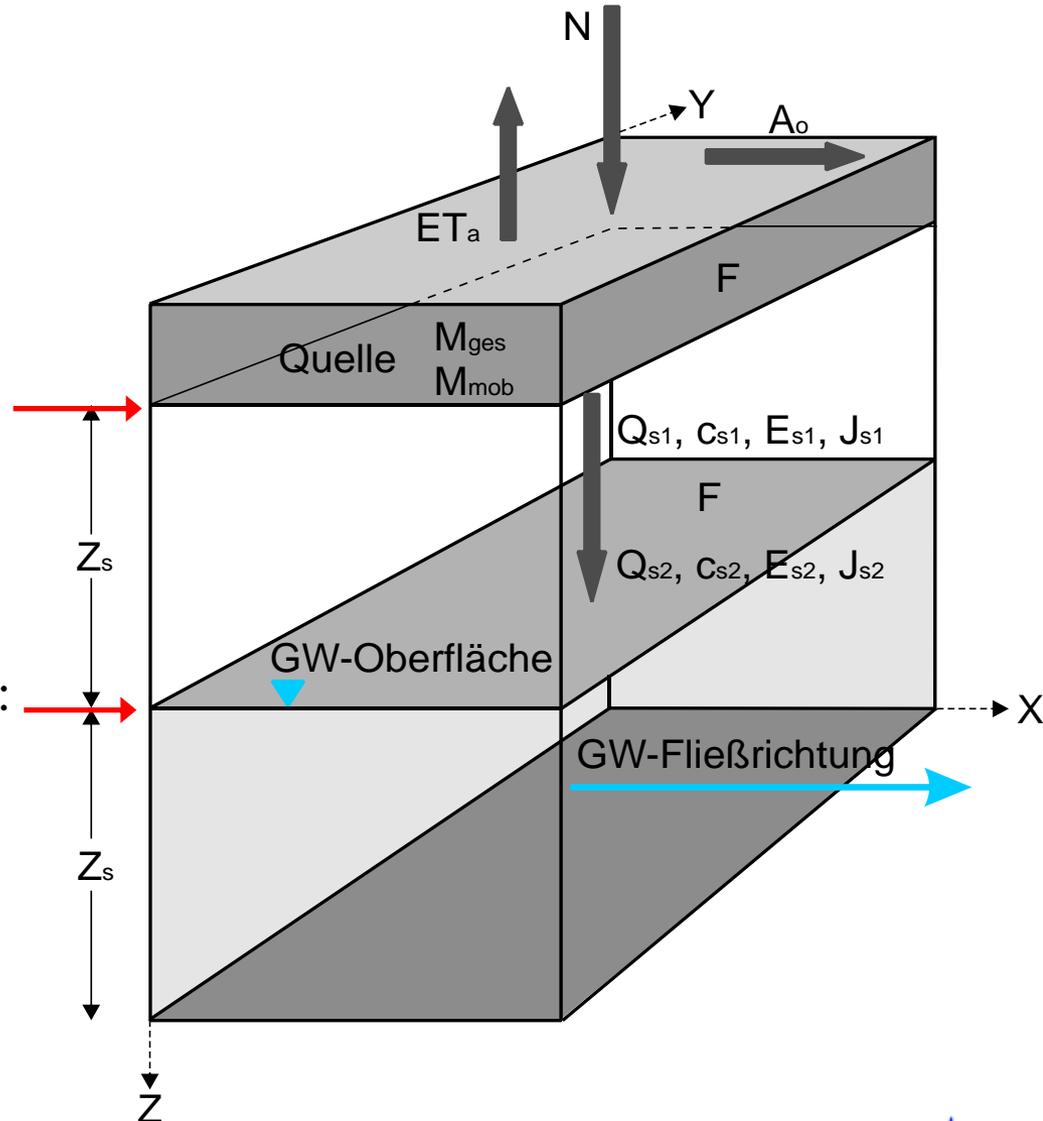
$$E_{s1} = Q_{s1} \cdot c_{s1}$$

Ins Grundwasser eintretende Fracht:

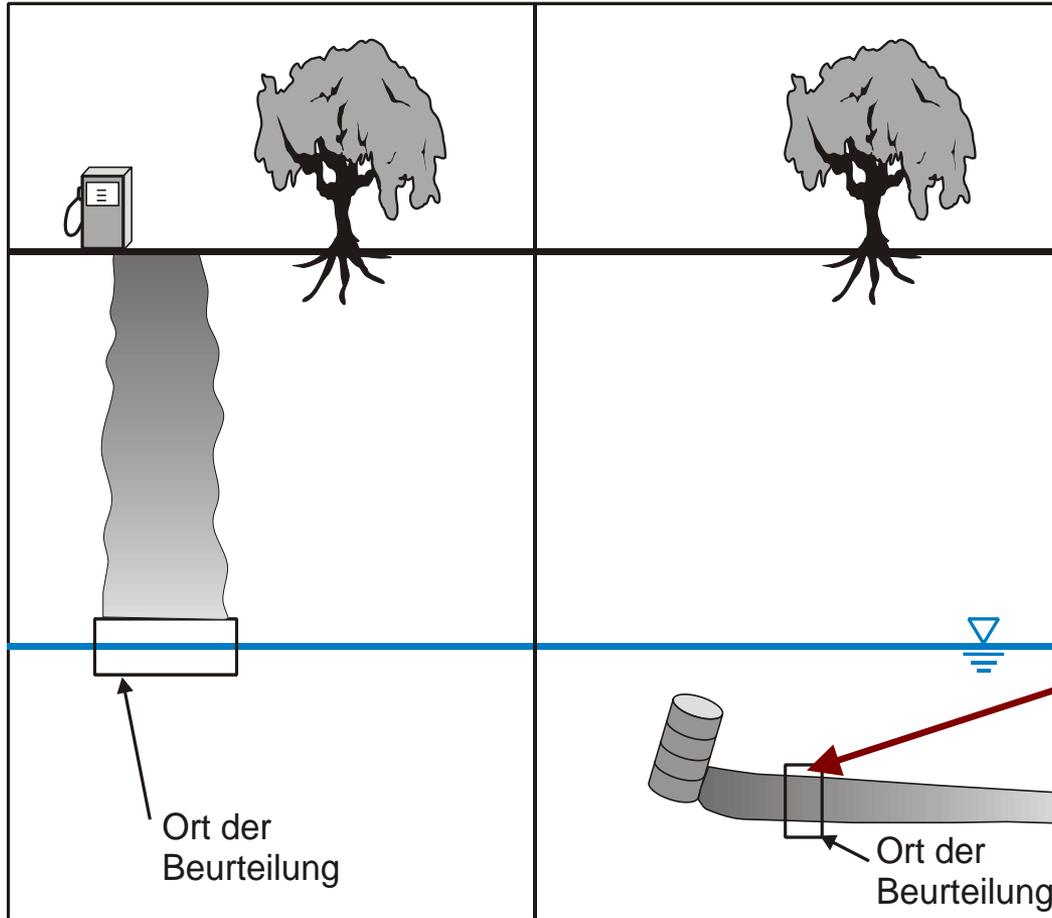
$$E_{s2} = Q_{s2} \cdot c_{s2}$$

Minderungsfaktor (MF_J):

$$MF_J = J_{s1} / J_{s2}$$



- ❑ **Schadstoff-Quelle** (Bereiche der Freisetzung von Schadstoffen, z.B. Phasen, Erzablagerungen)
- ❑ **Fracht** (transportierte Schadstoffmasse pro Zeit)
- ❑ **Quellstärke** (freigesetzte Schadstoffmasse pro Zeit und Fläche)
- ❑ **Emissionsstärke** (freigesetzte Schadstoffmasse pro Zeit und Fläche am → Ort der Beurteilung)



Ort der Beurteilung

Kontaktgrundwasser



Frachtermittlung im Sickerwasser

Sickerwasserprognose

Sickerwasserprognose nach § 2 Nr. 5 BBodSchG:

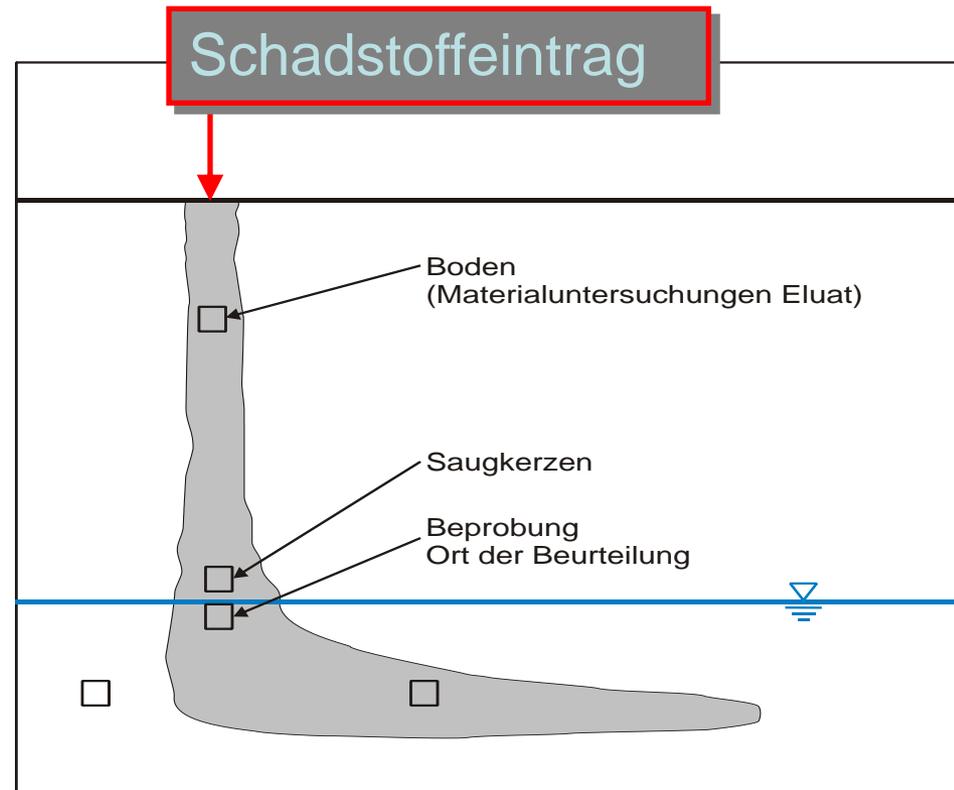
Abschätzung der von einer Altlastenfläche, altlastenverdächtigen Fläche, schädlichen Bodenverunreinigung oder Altlast ausgehenden oder in überschaubarer Zukunft zu erwartenden Schadstoffeinträge über das Sickerwasser in das Grundwasser, unter Berücksichtigung von Konzentrationen und Frachten und bezogen auf den Übergangsbereich von der ungesättigten zur wassergesättigten Zone (Ort der Beurteilung)

Sickerwasserprognose (Verfahren)

Verfahren zur Durchführung der Sickerwasserprognose gemäß Anhang 1 Nr. 3.3 der BBodSchV

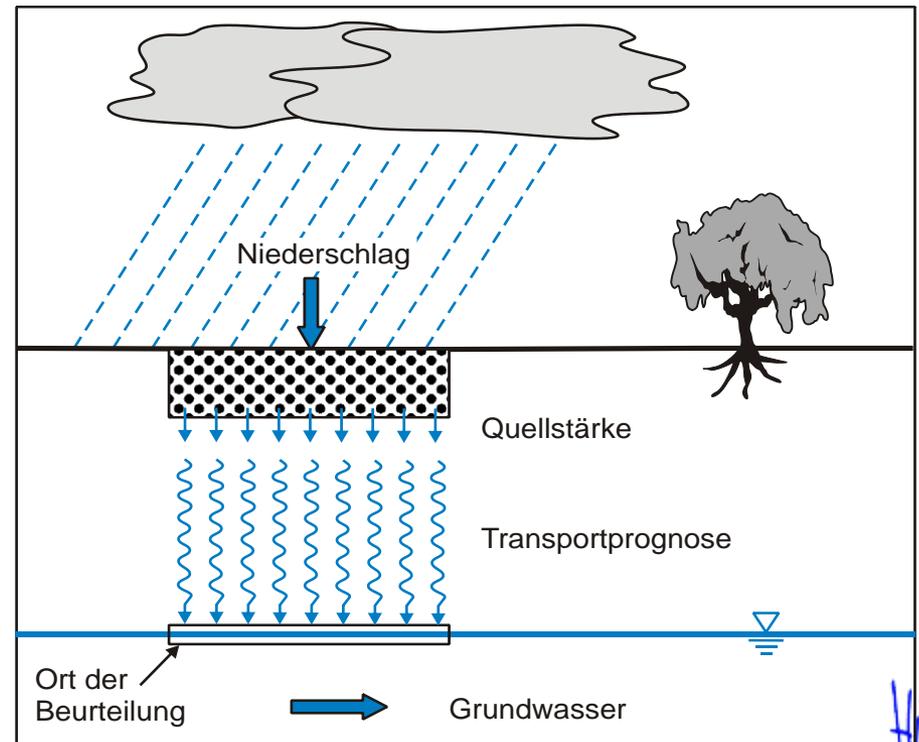
- ❑ **Materialuntersuchungen im Labor**
- ❑ ***In-situ*-Untersuchungen**
- ❑ **Direkte Beprobung am Ort der Beurteilung**
- ❑ **Rückrechnung aus Untersuchungen im Grundwasserabstrom unter Berücksichtigung der Schadstoffkonzentrationen im Grundwasseranstrom, der Verdünnung, des Schadstoffverhaltens in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone sowie des Schadstoffinventars im Boden**

Sickerwasserprognose (Verfahren)



Sickerwasserprognose (Elemente)

- ❑ **Quellstärke** (Freisetzung der Schadstoffe aus der Quelle)
- ❑ **Schadstoffeintrag am Ort der Beurteilung**
(Transportprognose unter Berücksichtigung von Abbau, Dispersion und Rückhalt)



Quellstärke

Zur Berechnung der aus einer Schadstoffquelle freigesetzten Schadstofffrachten sind folgende Informationen erforderlich

- ❑ **räumliche Verteilung der Schadstoffe bzw. der Schadstoffgehalte in der ungesättigten Bodenzone (Schadstoffinventar)**
- ❑ **Schadstoffkonzentration im Sickerwasser (Elutions-/Extraktionsverfahren, Saugkerzenuntersuchungen, chemisch-physikalische Stoffeigenschaften)**
- ❑ **Sickerwasserrate**

Abschätzung des Schadstoffinventars

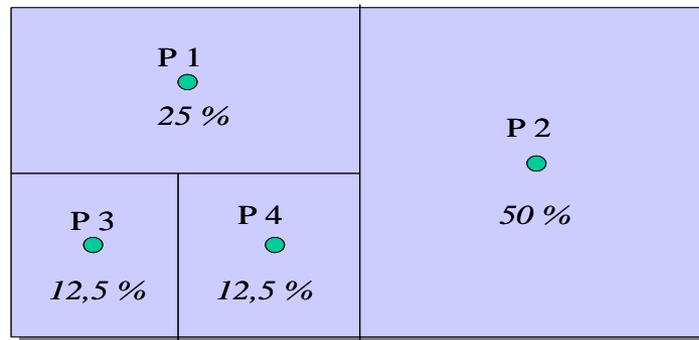
- **Berechnung der flächenbezogenen Schadstoffmasse in [mg/m²]**

(= Masse des Schadstoffes pro Fläche [mg/m² im Bereich eines Bodenprofils, summiert über die beprobten Bodenhorizonte)

Aus: LABO-Veröffentlichung zur Sicherwasserprognose

Abschätzung des Schadstoffinventars

- Unter Berücksichtigung der Flächenrepräsentanz der Profile kann die durchschnittliche Schadstoffmasse im betrachteten Bodenkörper berechnet werden



- Durch Multiplikation der flächenbezogenen Schadstoffmasse $[\text{mg}/\text{m}^2]$ mit der Emissionsfläche $[\text{m}^2]$ ergibt sich die gesamte Schadstoffmasse $[\text{mg}]$ (=Inventar)

Schadstoffinventar

- ❑ **Heterogene Schadstoffverteilung im Boden**
- ❑ **Punktuelle Analysenwerte**

Schadstoffinventar (Erhöhung der Informationsdichte)

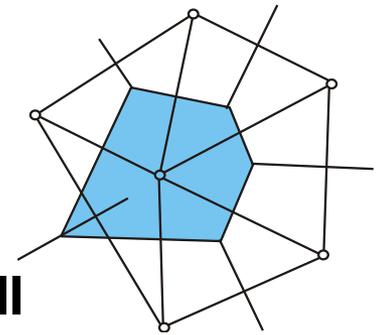
Direct-Push-Sondierungen

- ❑ **Cone Penetration Test (CPT) (Lagerungsdichte)**
- ❑ **Membrane Interface Probe (MIP) (Detektion von leichtflüchtigen Verbindungen)**
- ❑ **Rapid Optical Screening Tool (ROST) (Detektion von aromatischen Verbindungen)**
- ❑ **Kontinuierlich Messdaten entlang der vertikalen Sondierstrecke**
- ❑ **Informationen über Schadstoffgehalt sofort vor Ort verfügbar**
- ❑ **Höhere Auflösung der Schadstoffverteilung im Boden**

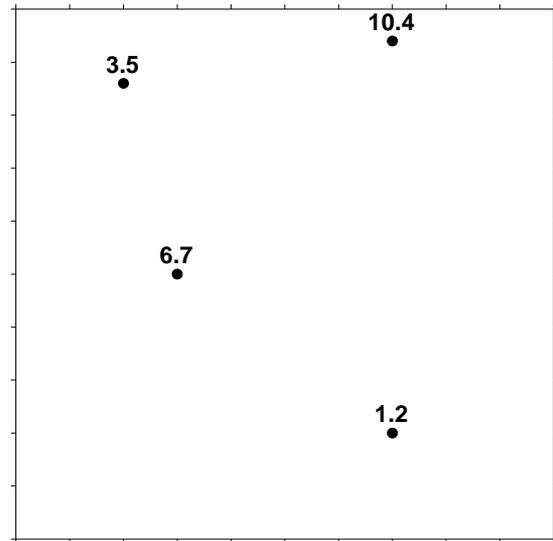
Schadstoffinventar (Erhöhung der Informationsdichte)

Geostatistik

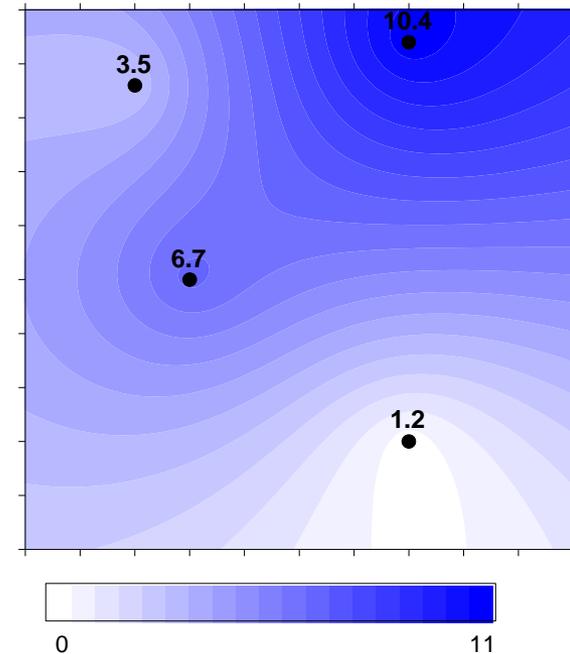
- ❑ **Ableitung von räumlichen Werteverteilung von Variablen**
- ❑ **Schadstoffgehalte zwischen den Messpunkten werden „interpoliert“**
- ❑ **Verschiedene Interpolationsmethoden verfügbar, z.B.**
 - **Thiessen-Polygone**
 - **Triangulierung**
 - **Inverse Distance**
- ❑ **In der Regel Auswertung über Computer-Modell erforderlich**
- ❑ **In der Praxis kaum auf Schadstoffgehalte im Boden angewendet**



Inverse Distance



Inverse Distance
Methode

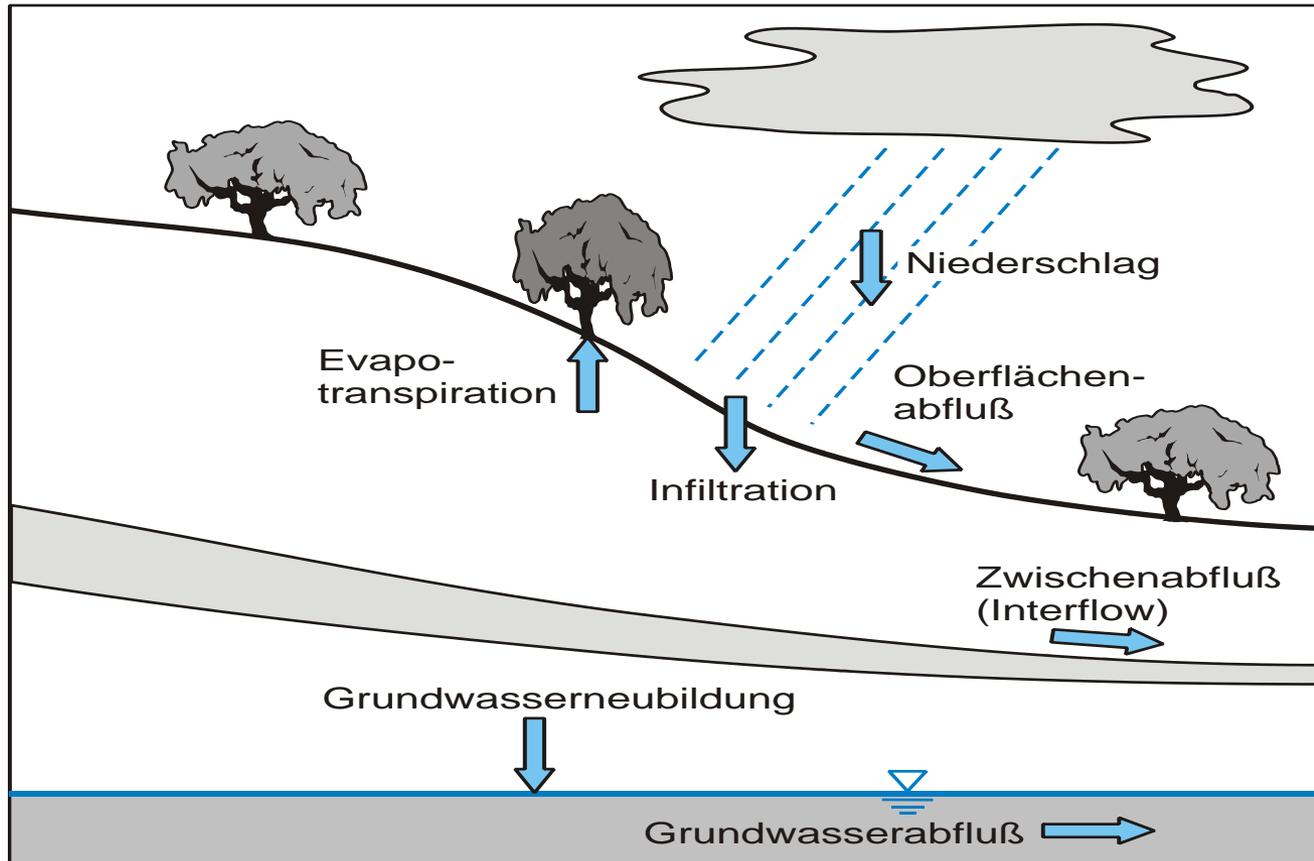


Der Wert für den Schadstoffgehalt an einem unbeprobten Ort wird durch ein gewichtetes Mittel der benachbarten gemessenen Werte geschätzt. Die Gewichte sind dabei proportional zu dem Inversen des Abstands zwischen gemessenem und unbeprobtem Ort.

Quantifizierung freisetzbarer Schadstoffe

- ❑ **Elutionsverfahren**
- ❑ ***In-situ*-Untersuchungen**
 - Sickerwasseruntersuchung mittels Saugsonden (Saugkerzen) (nicht geeignet für LCKW, AKW und hydrophobe Schadstoffe)
 - Bodenluftuntersuchungen (nur qualitativ zur Abgrenzung des Schadensherdes)

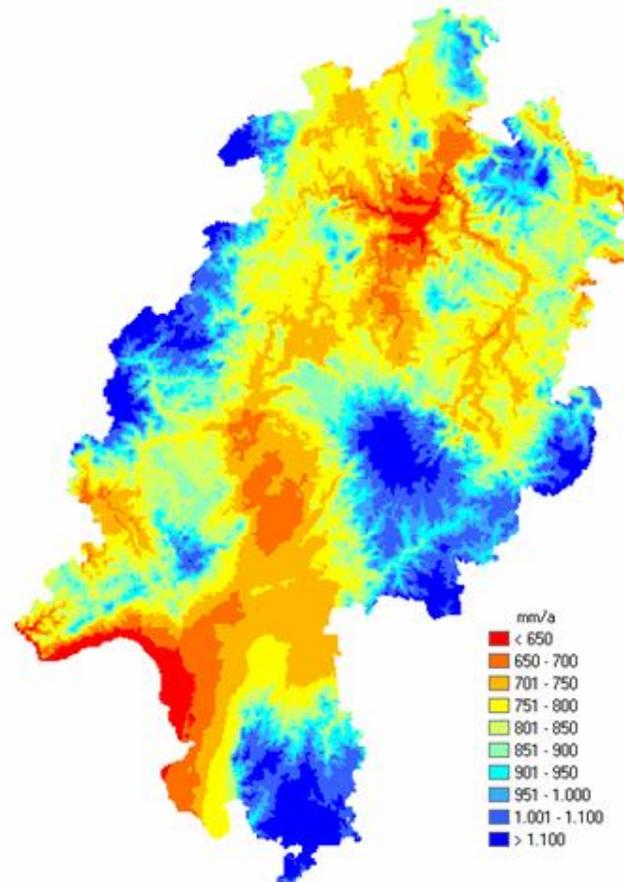
Sickerwasserrate (Wasserströme)



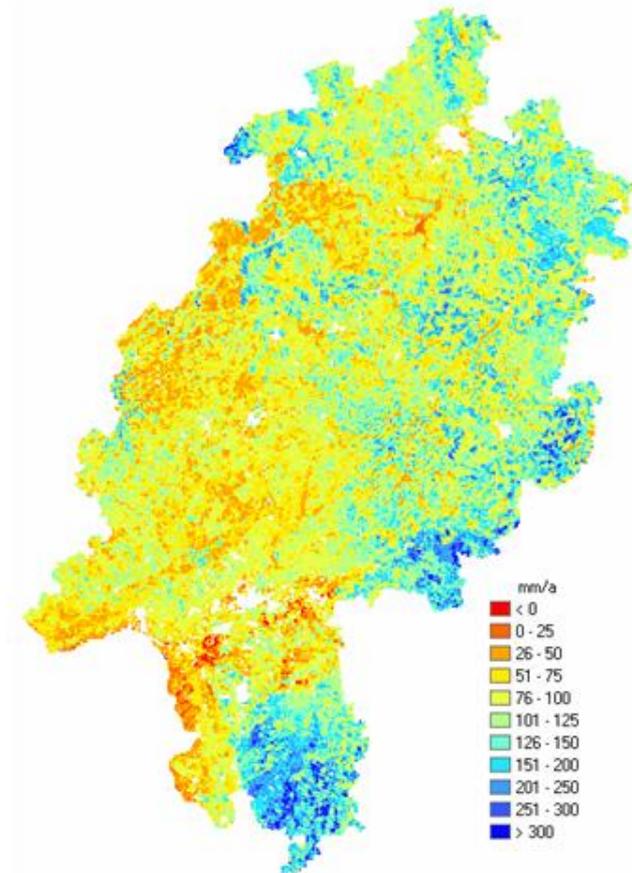
Sickerwasserrate

- i. d. R. keine hohe zeitliche Auflösung erforderlich, sondern eine integrative summarische Betrachtung

Niederschlag 1971-2000



Grundwasserneubildung 1971-2000



Sickerwasserrate

TUB-BGR-Verfahren

- ❑ **Regressionsgleichungen für unterschiedliche Nutzungen und Unterschied grundwassernah/grundwasserfern**
- ❑ **zur Berechnung erforderlich:**
 - mittlere jährliche Niederschlagshöhe
 - mittlere jährliche Sommer-Niederschlagshöhe
 - jährliche potentielle Evapotranspiration
 - nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum

Grundwasserneubildungskarten

Sickerwasserrate

Anhang 3

Anhang 3

Berechnung der Sickerwasserrate (SWR) nach dem TUB-BGR-Verfahren *

Szenario: Grünland grundwasserfern **

Eingabedaten (gelb unterlegte Felder)

N _{Jahr}	800 mm	mittlere jährliche Niederschlagshöhe
N _{sommer}	400 mm	mittlere jährliche Sommer-Niederschlagshöhe
E _{tp}	600 mm	mittlere jährliche potenzielle Verdunstungshöhe
nFKWe	200 mm	nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum

Zwischenergebnis

WV	600 mm	pflanzenverfügbare Menge im Sommerhalbjahr errechnet aus: nFKWe + N _{sommer}
----	--------	--

Ergebnisse

Variante 1: WV größer 700 mm SWR 111 mm

Berechnungsformel:

$$SWR = N_{\text{Jahr}} - ET_p \cdot 1,20 \cdot [0,66 \log (ET_p^{-1}) + 2,79]$$

Variante 2: WV kleiner 700 mm SWR 179 mm

Berechnungsformel:

$$SWR = N_{\text{Jahr}} - ET_p \cdot [1,79 \log (nFK_{we} + N_{som}) - 3,89] \cdot [0,66 \log (ET_p^{-1}) + 2,79]$$

* Das TUB-BGR-Verfahren ist veröffentlicht in:
BLA-GEO (2004): Bund-Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO), UAG Sickerwasserprognose der Ad-hoc-AG Hydrogeologie und der Ad-hoc-AG Boden, Empfehlungen für die Charakterisierung und Parametrisierung des Transportpfades Boden-Grundwasser als Grundlage für die Sickerwasserprognose, Version 1.0 Mai 2004

** Das TUB-BGR-Verfahren gilt für landwirtschaftlich genutzte Flächen und nicht spezifisch für Altlasten.
Da Altlasten oftmals bewachsene Brachflächen sind, wurde das Szenario „Grünlandfläche grundwasserfern“ ausgewählt.

Schadstofffracht im Sickerwasser

Erforderlich:

- ❑ **räumliche Verteilung der Schadstoffe/Schadstoffgehalte in der ungesättigten Bodenzone (Schadstoffinventar)**
- ❑ **Schadstoffkonzentration im Sickerwasser (Elutions- bzw. Extraktionsverfahren, Saugkerzen)**
- ❑ **Sickerwasserrate**

Schadstofffracht im Sickerwasser

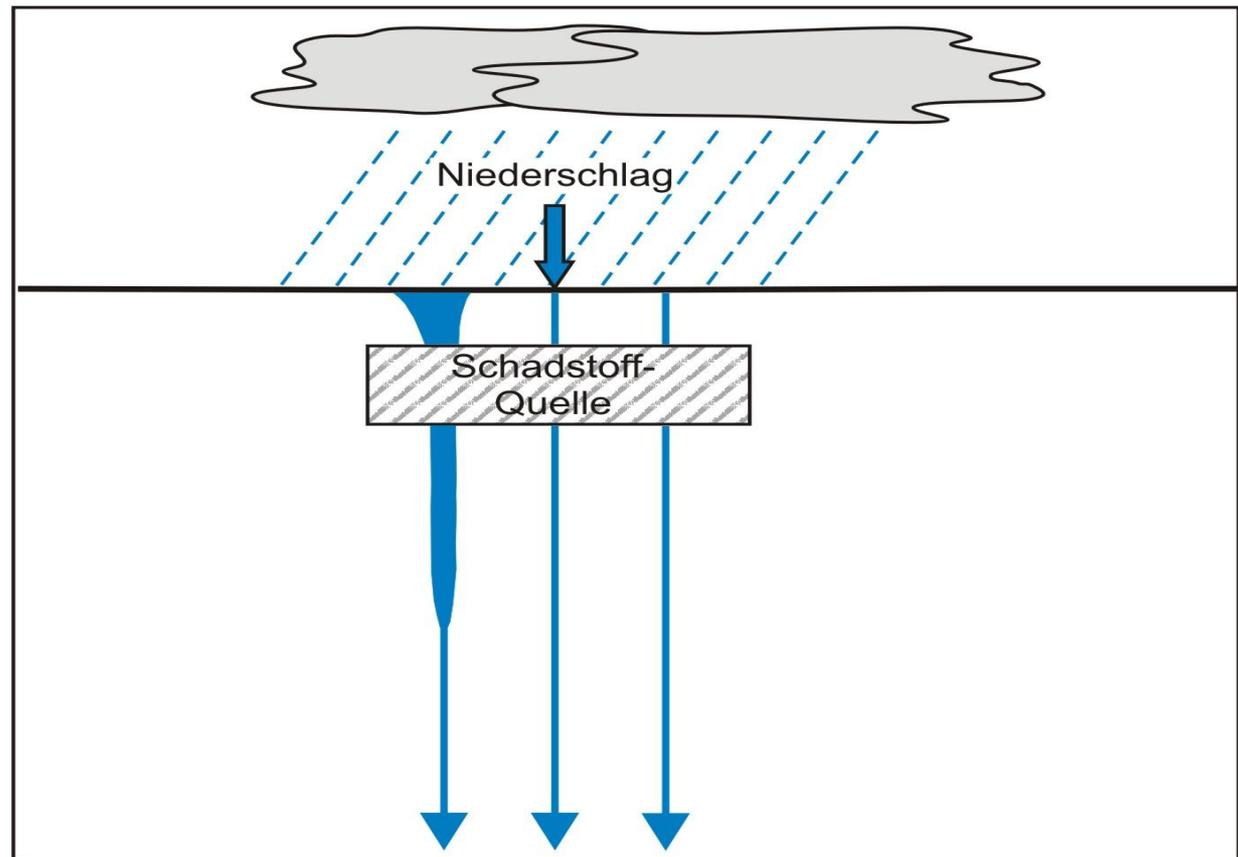
Vereinfachter Ansatz:

- ❑ **Schadstofffracht** $E_s = Q_s \cdot c_s$
- ❑ **Dauer des Schadstoffaustrages** $t = M_{\text{mob}} / E_s$

E_s	Fracht im Sickerwasser [g/d]
Q_s	Sickerwasserstrom [m ³ /d]
c_s	Stoffkonzentration im Sickerwasser [g/m ³] oder [mg/l]
J_s	Quellstärke im Sickerwasser an der UK der Quelle [g/m ² ·d]
F	Bodenfläche der Schadstoffquelle [m ²]
t	Dauer des Schadstoffaustrages
M_{mob}	Mobilisierbare Schadstoffmasse in der Schadstoffquelle

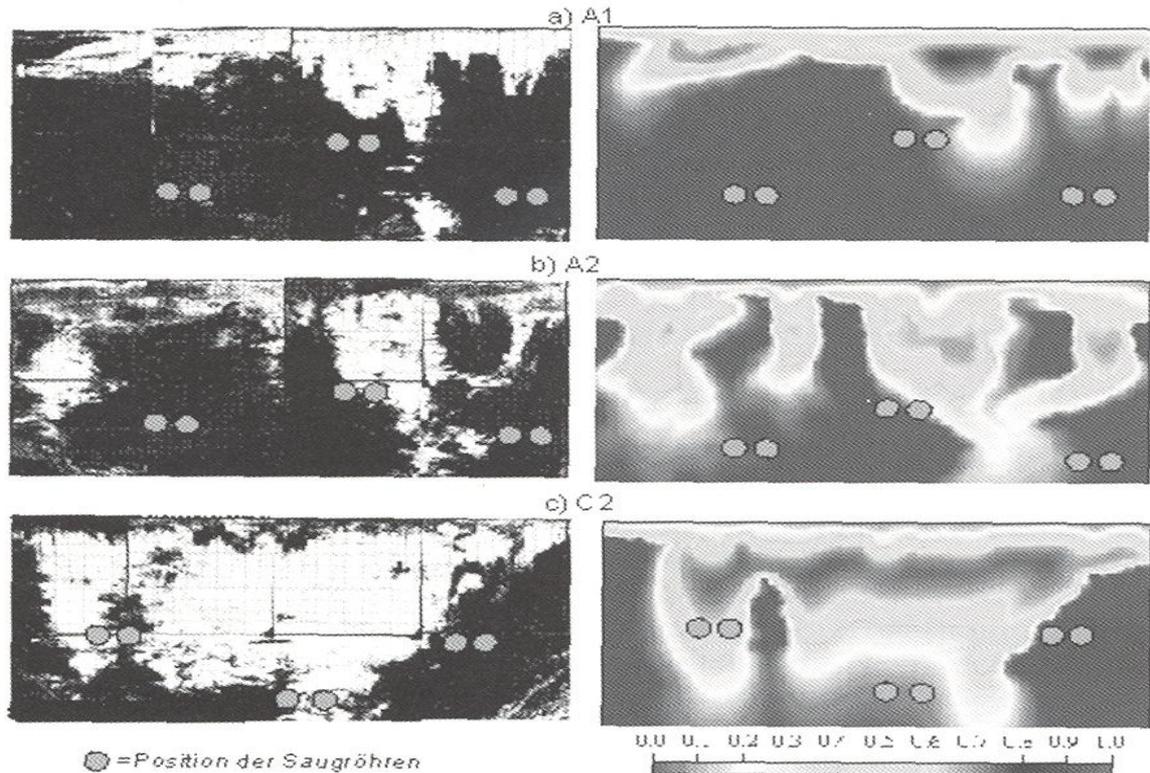
Problem: Bevorzugte Fließwege

- ❑ Klüfte
- ❑ Störungen
- ❑ Schichtfugen
- ❑ Wurzelgänge
- ❑ Wurmlöcher



Problem: Bevorzugte Fließwege

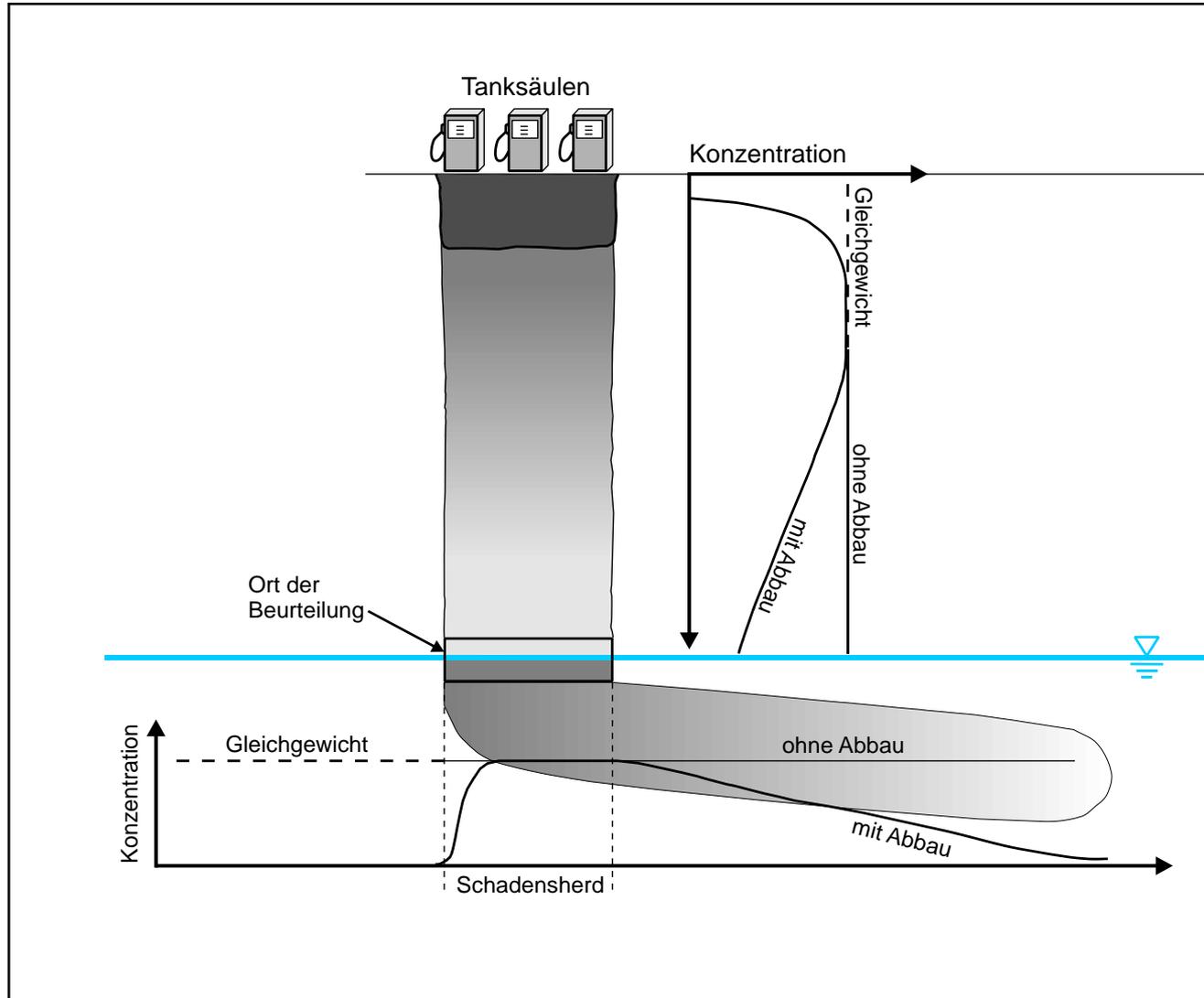
- ❑ 4 m x 2 m Plot
- ❑ Farbtracer (links)
- ❑ Simulierte Tracerkonzentration (rechts)



Transportprognose

- ❑ **Analytisches Modell ALTEX-1D**
- ❑ **Numerisches Modell TENSIC**
- ❑ **langsam strömende Phase und schnell strömende Phase (preferential flow)**
- ❑ **Berücksichtigt Abbau (0. Ordnung)**
- ❑ **Parametrisierung aus Datenbank**

Schadstofffracht im Sickerwasser (Rückrechnung aus Grundwasseruntersuchungen)



Anhang 4: Ermittlung der Schadstoffkonzentration und -fracht am Ort der Beurteilung mittels Grundwasseruntersuchungen (EXCEL)

Die Anwendung des EXCEL-Arbeitsblattes ist in Kapitel 3.3.1 erläutert. Das EXCEL-Arbeitsblatt steht im Internet unter folgender Adresse zur Verfügung:
www.hlug.de/medien/altlasten/altlastenbearbeitung/fracht.htm

Anhang 4

EXCEL-Arbeitsblatt zum Handbuch Altlasten, Band 3 Teil 6:
 "Ermittlung von Schadstofffrachten im Grund- und Sickerwasser"



Stand 2008

Anhang 4

Ermittlung der Schadstoffkonzentration und -fracht am Ort der Beurteilung mittels Grundwasseruntersuchungen

Eingabedaten (gelb unterlegte Felder)

		<u>Kontaminierte Fläche</u>		
2000 m ²	F	Ausdehnung der kont. Fläche [m ²]		
50 m ²	B	Breite der kontaminierten Fläche quer zur GW-Fließrichtung [m]		
		<u>Grundwasserneubildung</u>		
200 mm/a	GWN	Grundwasserneubildungsrate		
		<u>Grundwasserleiter</u>		
10 m	H	Grundwasser-Mächtigkeit		
1,0E-04 m/s	k _r	Durchlässigkeitsbeiwert		
0,002	I	Hydraulischer Gradient [-]	= 0,2 %	
5 µg/l	c _{Zu}	Schadstoffkonzentration im Zustrom		
50 µg/l	c _{Ab}	Schadstoffkonzentration im Abstrom		

Zwischenergebnisse, aus den o.g. Daten automatisch berechnet

5,6E-06 g/s	E _{Ab}	Schadstofffracht Abstrom
5,0E-07 g/s	E _{Zu}	Schadstofffracht Zustrom
5,1E-06 g/s	E _{GWa}	Schadstofffracht im Sickerwasser

Berechnungsergebnisse

405 µg/l	c _{GWa}	Schadstoffkonzentration im Sickerwasser
0,44 g/d	E _{GWa}	Schadstofffracht im Sickerwasser

Schadstofffracht im Sickerwasser

(Rückrechnung aus Grundwasseruntersuchungen)

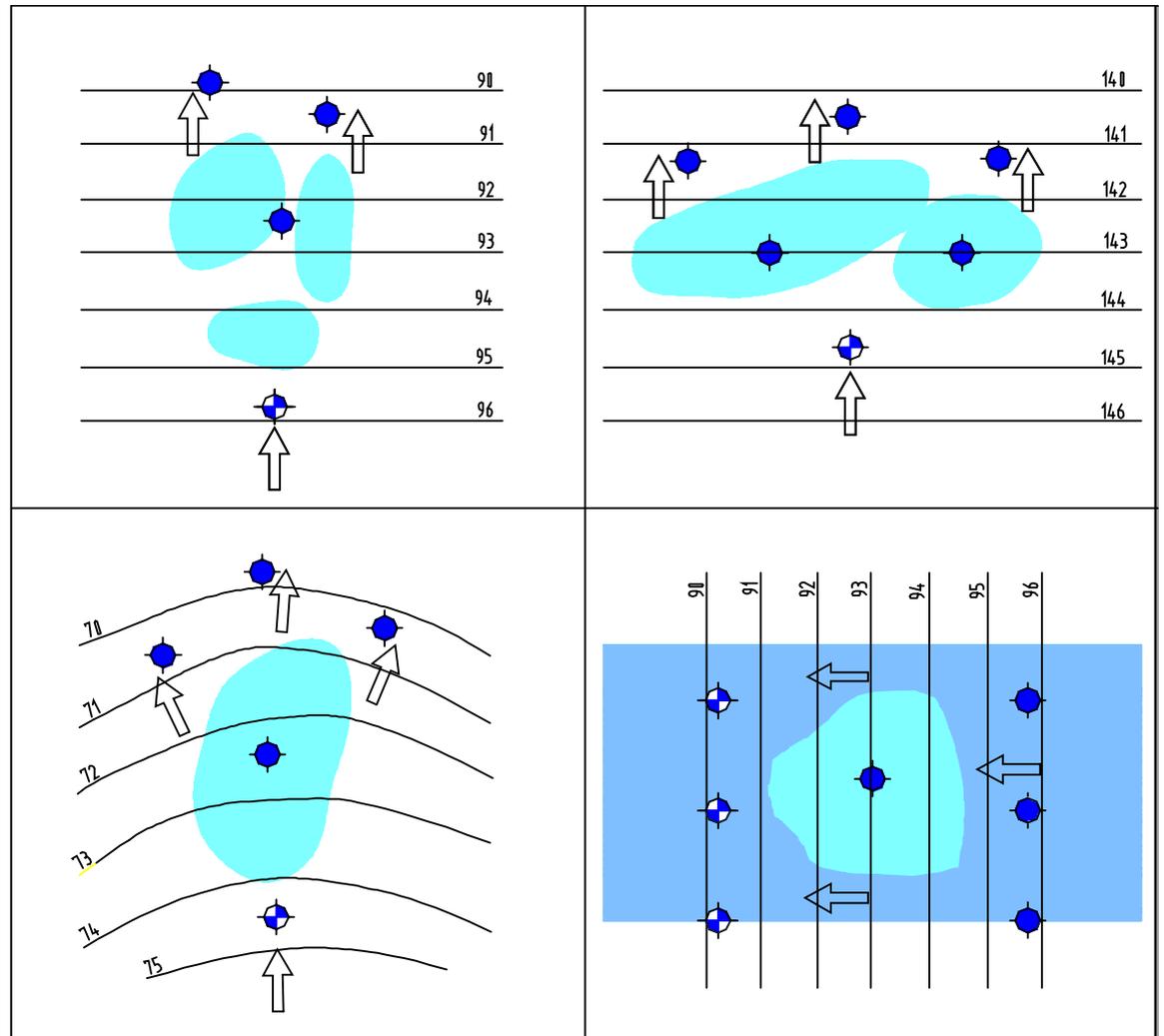
- ❑ **Verfrachtung von Schadstoffen in das Grundwasser ist bereits eingetreten**
- ❑ **Im Abstrom einer Schadensquelle sind die Sanierungsschwellenwerte zwar unterschritten, die Schadstoffe aber dennoch nachweisbar → Vermutung, dass am Ort der Beurteilung sanierungsrelevante Schadstoffkonzentrationen vorliegen**
- ❑ **Bevorzugt Ort der Beurteilung beproben, aber:**
 - aus technischen Gründen (z. B. Überbauung) kann dieser nicht beprobt werden oder
 - das Schadenszentrum ist nicht hinreichend genau bekannt

Schadstofffracht im Sickerwasser (Rückrechnung aus Grundwasseruntersuchungen)

- ❑ Sickerwasserstrom addiert sich zu Grundwasserstrom
- ❑ Das Sickerwasser mischt sich im betrachteten Kompartiment vollständig mit dem Grundwasser über die gesamte Höhe des Grundwasserleiters
- ❑ Eventuell mit dem Grundwasser im Anstrom herangetragene Schadstoffe werden berücksichtigt
- ❑ Abbau und Rückhalteprozesse sind nicht berücksichtigt



Messstellennetz



→ Grundwasserfließrichtung

■ Schadstoffquelle (n)
(bekannt oder vermutet)

— 90 — Grundwasserisohypse

⊕ Grundwassermessstelle im Zustrom

⊙ Grundwassermessstelle im Einflussbereich

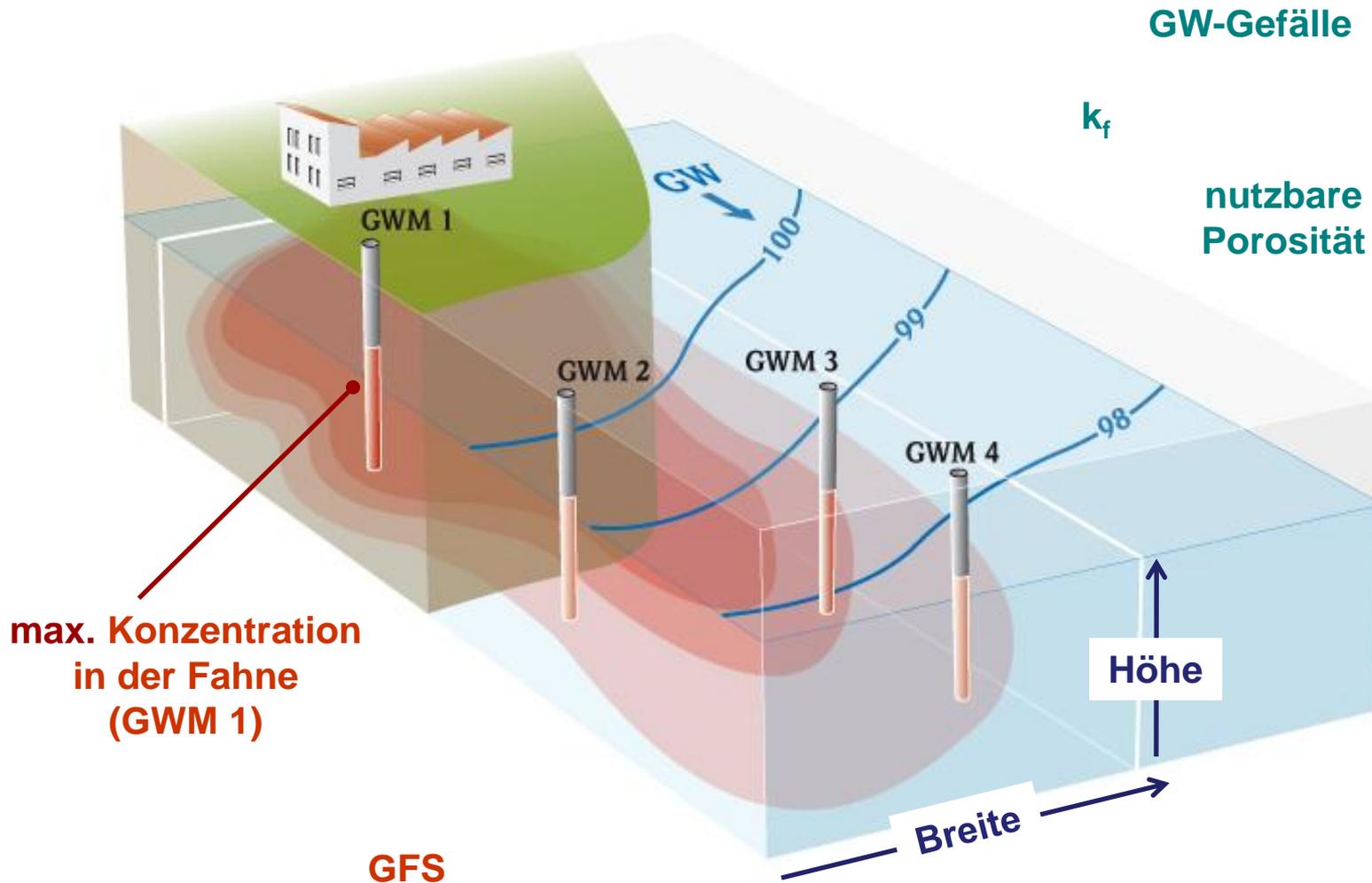


**Frachtermittlung im
Grundwasser
(Schadstoff-Fahne)**

Schadstofffracht im Grundwasser

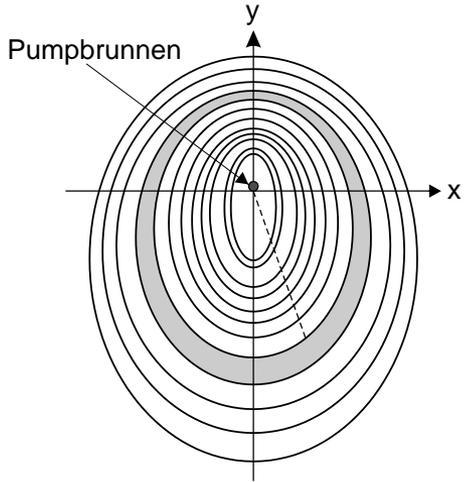
- ❑ **Stromröhrenmodell**
- ❑ **Kontrollebenen-Konzept**
 - Immissionspumpversuche
 - Beprobung von Grundwassermessstellen in Transekten
- ❑ **Reaktive Schadstofftransportmodelle**

Stromröhrenmodell „Frachtermittlung“

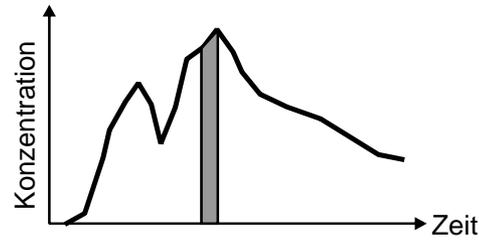


Immissionspumpversuche

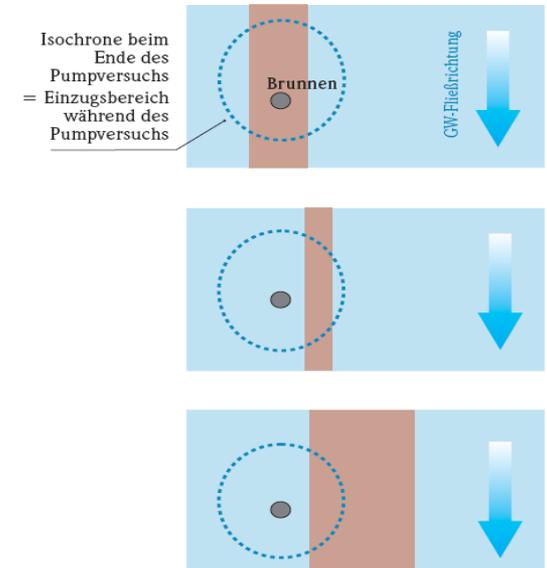
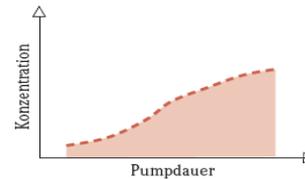
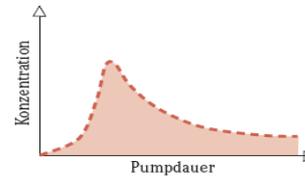
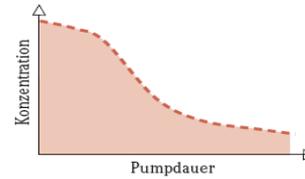
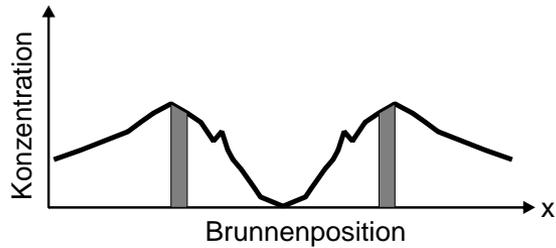
A



B



C

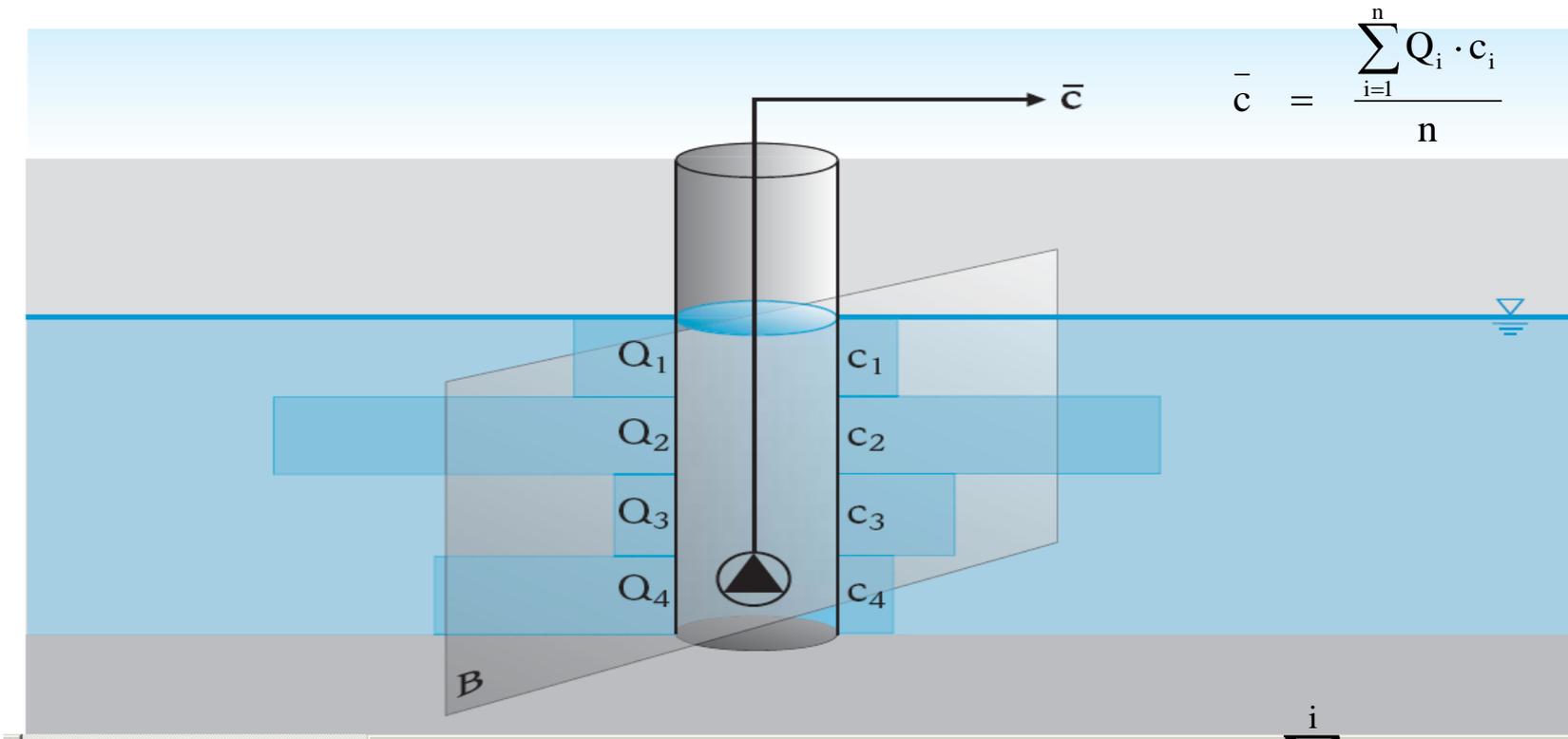
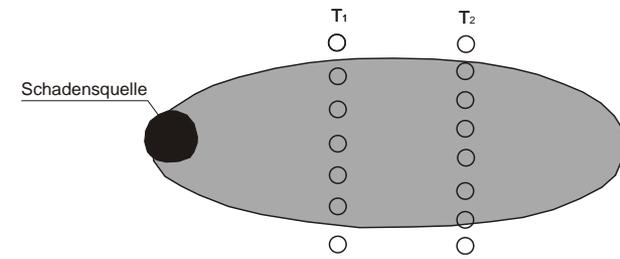


Immissionspumpversuche

- ❑ **Auswertung erfordert Computer-Modell (CSTREAM)**
- ❑ **Impliziert dass $c = \text{const.}$ entlang der beprobten Fließstrecke**
- ❑ **Ermittlung der Verminderung der Fracht zwischen zwei Kontrollebenen**
- ❑ **Keine Aussagen zur Fahndynamik möglich**

Beprobung von Transekten

Zuflussgewichtete Grundwassermischprobe



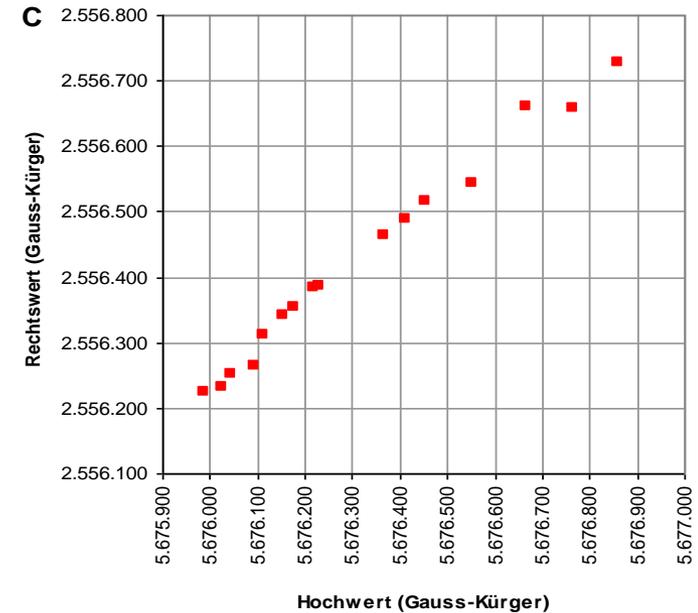
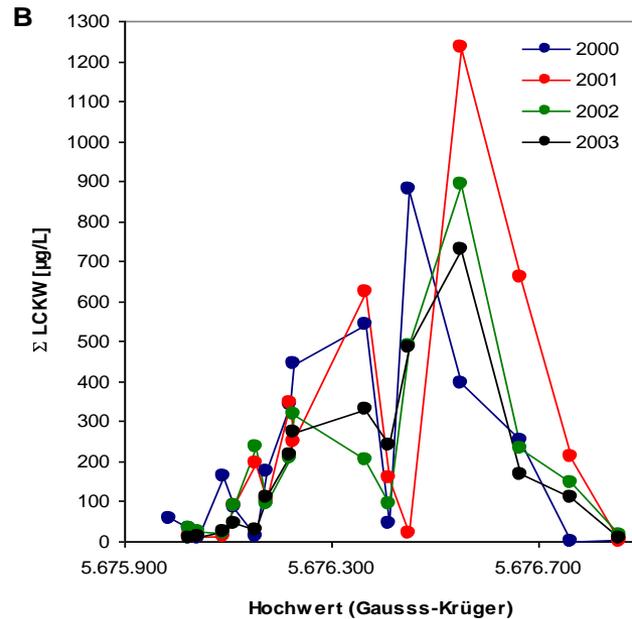
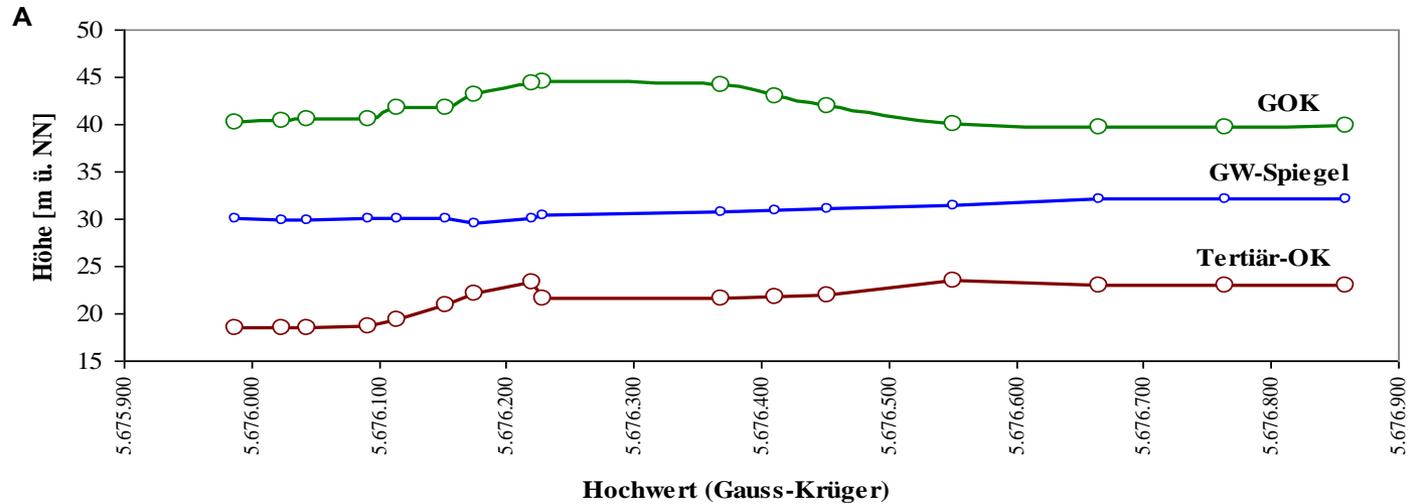
$$F = \sum_{i=1}^i c_i \cdot Q_i$$

Beprobung von Transekten

- ❑ **Mittlere zuflussgewichtete Schadstoffkonzentration am Punkt der Beprobung**
- ❑ **Konzentrationsverlauf zwischen den Beprobungspunkten wird interpoliert**
- ❑ **Multiplikation mit dem Grundwasserstrom ergibt die Fracht**

Beprobung von Transekten

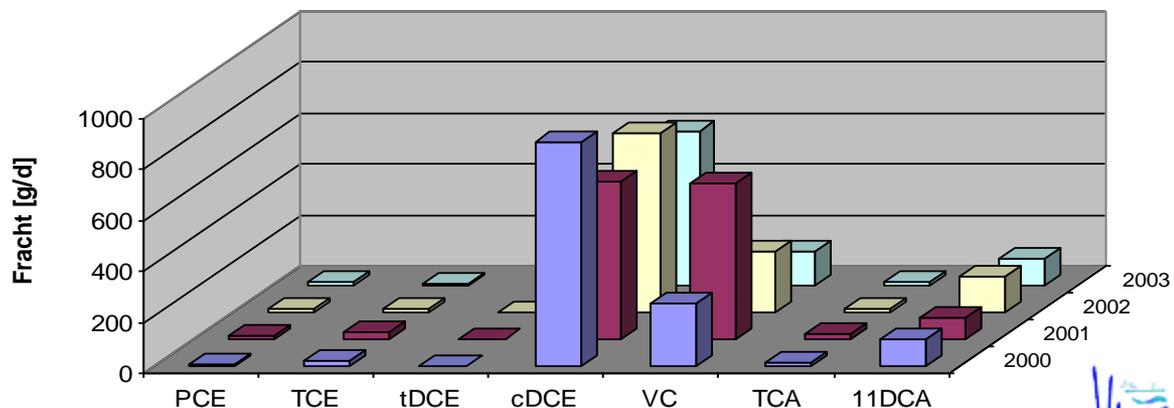
(Beispiel 1/2)



Beprobung von Transekten (Beispiel 1/2)

Jahr	Fracht [g/d]								Σ LCKW
	PCE	TCE	tDCE	cDCE	VC	TCA	11DCA		
Tansekte C									
2000	83	647	12	1.694	582	29	96		3.143
2001	87	533	13	1.222	590	21	115		2.580
2002	11	20	2	679	350	5	60		1.127
2003	10	15	2	626	459	2	79		1.192
Tansekte B									
2000	5	7	0	789	139	20	51		1.010
2001	8	7	0	672	344	22	52		1.106
2002	5	5	0	746	148	8	53		966
2003	3	3	0	725	123	5	52		911
Tansekte A									
2000	8	22	0	874	246	16	105		1.272
2001	12	24	0	616	610	19	83		1.364
2002	10	11	0	699	234	15	137		1.107
2003	12	8	0	600	130	9	104		863
Tansekte G									
2000	3	10	0	129	0	3	49		193
2001	3	7	0	82	0	2	41		136
2002	1	6	0	185	1	2	83		279
2003	1	5	0	138	0	1	53		197

Transekte A



Numerische Modelle

- **Zeitliche und räumliche Prognose erfordert numerische Modelle, die auch den reaktiven Schadstofftransport berücksichtigen (MODFLOW-RT3D)**

Numerische Modelle....

.... Können gegebenenfalls folgende Fragen beantworten :

- ❑ Ist die Fahne in ihrer Ausdehnung stabil (stationär) ?
- ❑ Wenn nein, mit welcher Geschwindigkeit schrumpft sie bzw. dehnt sich aus ?
- ❑ Was wird künftig die maximale Ausdehnung der Schadstofffahne sein ?
- ❑ Wann wird an einem definierten Punkt eine vorgegebene Konzentration erreicht werden ?
- ❑ Wie lange wird die Fahne existieren ?

Numerische Modelle (Parametrisierung)

- ❑ **Verteilung der Speicherkoeffizienten**
- ❑ **Grundwasserneubildung aus Niederschlägen**
- ❑ **Wasseraustausch mit Oberflächengewässern**
- ❑ **Zugabe und Entnahme von Wasser aus Brunnen**
- ❑ **Vorgegebene Grundwasserhöhen**
- ❑ **Randzuflüsse**
- ❑ **Durchflußwirksame Porosität**
- ❑ **Dispersivitäten**
- ❑ **Zugabe und Entnahme von Schadstoffen**
- ❑ **Zerfalls- oder Abbaukonstanten**
- ❑ **Adsorptionsparameter**

t.held@arcadis.de
Tel.: 06151 / 388 - 327

Imagine the
Result

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit



ARCADIS

Wasserhaushaltsgleichung

$$N + A_K = ET_a + A_0 + A_L - A_S + \Delta B$$

N = Niederschlag [mm]

A_K = kapillarer Aufstieg (Grund- oder Stauwasserkontakt vorausgesetzt) [mm]

ET_a = Aktuelle Evapotranspiration (Σ Boden-, Pflanzen- und Interzeptionsverdunstung) [mm]

A_0 = Oberflächenabfluss [mm]

A_L = Lateraler Abfluss (Interflow) [mm]

A_S = Sickerwasser [mm]

ΔB = Änderung der Bodenwasserspeicherung [mm]

Wasserhaushaltsgleichung

- ❑ Niederschlag (Entnahme aus Kartenwerken)
- ❑ Kapillarer Aufstieg (vernachlässigbar, wenn grundwasserfern)
- ❑ Aktuelle Evapotranspiration (Entnahme aus Kartenwerken)
- ❑ Oberflächenabfluss (meist vernachlässigbar; ca. 3 % bis 30° Neigung)
- ❑ Lateraler Abfluss (nur modelltechnisch erfassbar)
- ❑ Sickerwasser (berechnet)
- ❑ Änderung der Bodenwasserspeicherung (vernachlässigbar über lange Zeiträume: > 1 Jahr)

Evapotranspiration

- abhängig von Artenzusammensetzung, Wuchstyp, Bestandsdichte und Bestandsstruktur

Reale Evapotranspiration (tatsächliche Verdunstung für geschlossenen Vegetationsbestände) bei 700-800 mm Jahresniederschlag

- Immergrüner Nadelwald (mittelalt/alt) 600 – 700 mm/a
- Laubwald (alt) 500 – 600 mm/a
- Geschlossener Buschbestand 500 – 600 mm/a
- Grünlandvegetation (Gräser und Kräuter) 450 – 550 mm/a
- Ackerkulturen 400 – 500 mm/a

Evapotranspiration

- ❑ **Reale Evapotranspiration nur messtechnisch zu ermitteln**
- ❑ **In der Praxis wird potenzielle Evapotranspiration verwendet (keine Limitierung des Wasserangebotes)**
- ❑ **zur Berechnung erforderlich:**
 - monats-abhängiger aerodynamischer Koeffizient
 - relative Luftfeuchte
 - Temperatur
- ❑ **alternativ: Entnahme aus Kartenwerken**

Sickerwasserrate

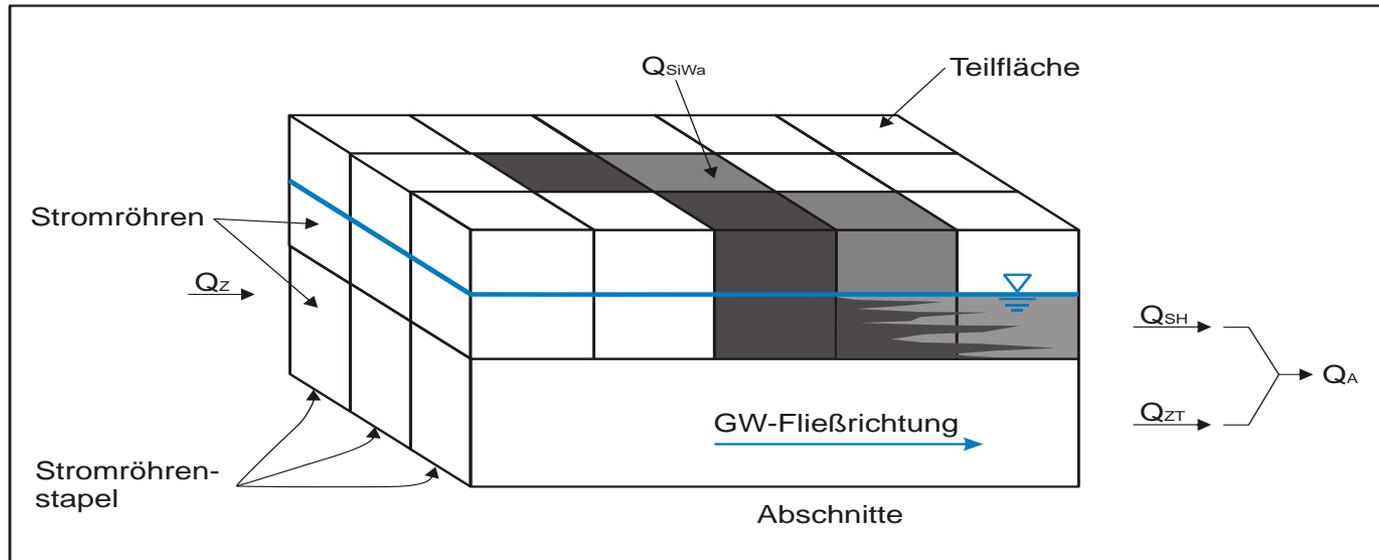


TUB-BGR-Verfahren

- ❑ **Regressionsgleichungen für unterschiedliche Nutzungen und Unterschied grundwassernah/grundwasserfern**
- ❑ **zur Berechnung erforderlich:**
 - mittlere jährliche Niederschlagshöhe
 - mittlere jährliche Sommer-Niederschlagshöhe
 - jährliche potentielle Evapotranspiration
 - nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum

Grundwasserneubildungskarten

Stromröhrenmodell (Baden-Württemberg)



Stromröhrenmodell (Baden-Württemberg)

- ❑ **Schadstoffretardierung, Verdünnung sowie der natürliche abiotische und biotische Abbau werden nicht berücksichtigt**
- ❑ **Inhomogene Schadstoffverteilung erfordert die Aufteilung in Stromröhren**
- ❑ **Das kontaminierte Sickerwasser legt sich in einer dünnen Schicht auf das nicht kontaminierte Grundwasser legt, ohne dass eine Vermischung beider Wasserströme eintritt**