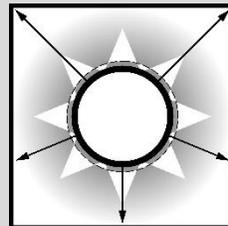


– Vortrag –

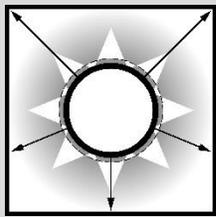
# Schadstoffe im Baugrund

Dr.-Ing. R.-B. Wudtke

5. Deutscher Geotechnik Konvent  
28. März 2019  
Leipzig

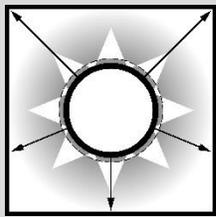


wudtke o geotechnik  
Richard-Strauss-Straße 3 | 99423 Weimar  
Mobil: 0177 / 78 73 753  
r.wudtke@wu-geo.de



# Gliederung

- 1 Begriffe und Einordnung
- 2 Schadstoffcharakteristik
  - Anorganische Schadstoffe
  - Organische Schadstoffe
- 3 Schadstoffausbreitung
  - Transportmechanismen
  - Rückhaltemechanismen
  - Schadstoffabbau
- 4 Boden als Abfall
  - Rechtliche Grundlagen
  - Einbauklassen
  - Verwertungsprozeß



# 1 Begriffe / Einordnung

## Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)

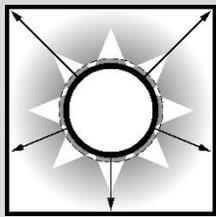
- Boden
- Funktionen des Bodens
- Schädliche Bodenveränderung
- Verdachtsflächen
- Altlasten
- Altlastverdächtige Flächen
- Sanierung

Zusammenhang zwischen

**Boden → dessen Funktionen  
→ schädliche Bodenveränderung**

## Boden

„Boden ... ist die obere Schicht der Erdkruste, soweit sie Träger der ... Bodenfunktionen ist, einschließlich der flüssigen Bestandteile (Bodenlösung) und der gasförmigen Bestandteile (Bodenluft), ohne Grundwasser und Gewässerbetten.“



# 1 Begriffe / Einordnung

## Funktionen des Bodens

### ... Natürliche Funktion

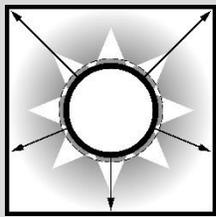
- Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen
- Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen
- Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers

### ... Historische Funktionen

- Archiv der Natur- und Kulturgeschichte

### ... Nutzungsfunktion

- Rohstofflagerstätte
- Fläche für Siedlung und Erholung
- Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung
- sowie für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung



# 1 Begriffe / Einordnung

## Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)

- Boden
- Funktionen des Bodens
- Schädliche Bodenveränderung
- Verdachtsflächen
- Altlasten
- Altlastverdächtige Flächen
- Sanierung

Zusammenhang zwischen

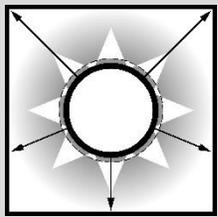
**Boden → dessen Funktionen  
→ schädliche Bodenveränderung**

## Schädliche Bodenveränderung

Beeinträchtigung der Bodenfunktionen,  
die geeignet sind,

- Gefahren oder
- erhebliche Nachteile oder
- erhebliche Belästigungen

für den Einzelnen oder die Allgemeinheit  
herbeizuführen.



## 2 Schadstoffcharakteristik

### 2.1 Dosis – Wirkung – Beziehung

Paracelsus (1493-1541)

„Was ist, das nicht Gift ist?“

All' Ding sind Gift  
und nichts ist ohne Gift!

Die Dosis allein macht's,  
dass ein Ding kein Gift ist.“

**Jeder Stoff hat in Abhängigkeit  
seiner Konzentration eine  
schädliche Wirkung.**

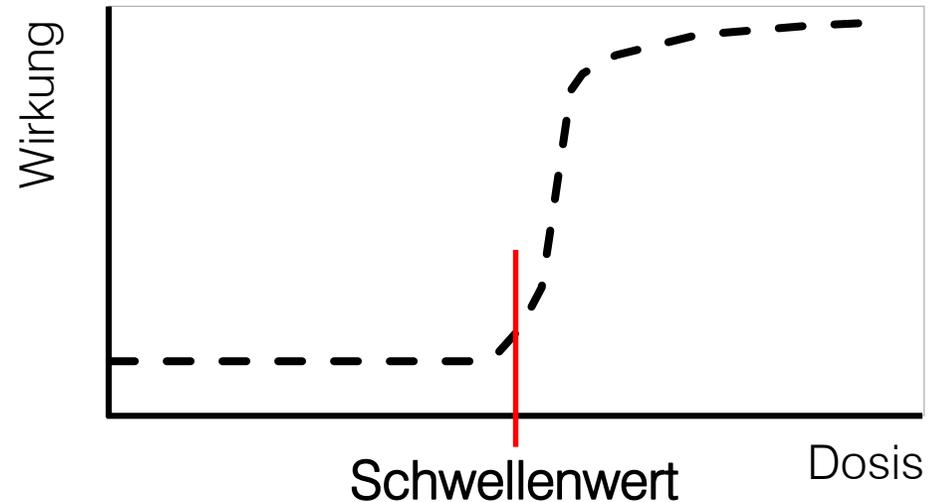
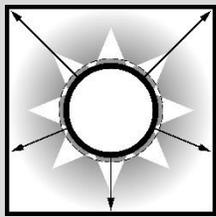


Abbildung 1  
beispielhafte Konzentrations-Wirkungs-Kurve



## 2 Schadstoffcharakteristik

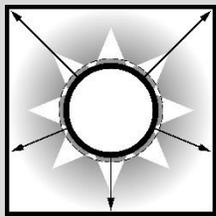
### 2.2 Anorganische Schadstoffe

#### Schwermetalle

<b>Name</b> [-]	<b>Kurzzeichen</b> [-]	<b>Dichte</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Prüfwert nach BBSchV<sup>1)</sup></b> [mg/kg TM] / [ $\mu$ g/l]
Arsen	As	5,72	50
Blei	Pb	11,34	400
Cadmium	Cd	8,65	20
Kupfer	Cu	8,92	50
Quecksilber	Hg	13,59	20
Zink	Zn	7,13	500

... weitere Schwermetalle sind:  
Beryllium, Chrom, Kobalt, Nickel,  
Selen, Thallium, Zinn

<sup>1)</sup> Anhang 2,  
gültig für den Wirkungspfad  
Boden- Mensch in Wohngebieten

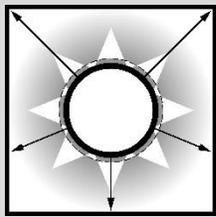


## 2 Schadstoffcharakteristik

### 2.2 Anorganische Schadstoffe

#### Schwermetalle

- geogen als Bestandteil von Mineralen  
→ Freisetzung durch Verwitterung
- gelöst meist als Komplex oder an Partikel gebunden
- *Emission* als  
Aerosol  
Feinstaub  
Klärschlamm

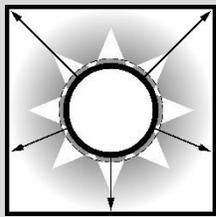


## 2 Schadstoffcharakteristik

### 2.2 Anorganische Schadstoffe

#### Anorganische Verbindungen

- **Schwefelverbindungen**  
Sulfate, Sulfide, Oxide, Säuren
- **Phosphorverbindungen**  
Phosphate, Säuren
- **Stickstoffverbindungen**  
Ammonium
- Chlor
- Asbest
- Cyanide
- **geogen** als Bestandteil von Mineralen  
→ Freisetzung durch Verwitterung
- **anthropogen** als Rückstände der Verbrennung  
Düngung  
Salze
- **Emission** durch Niederschlag  
Versickerung gelöster Salze  
Abfall



## 2 Schadstoffcharakteristik

### 2.3 Organische Schadstoffe

#### Aromate – cyclische Kohlenwasserstoffe

... Grundbestandteil Benzol ( $C_6H_6$ )

... als Restprodukt der Kohleverkokung oder der Ethylen-Herstellung

... leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe BTEX  
→ Benzol, Toluol, Xylole, Ethylbenzol, Styrol, Cumol

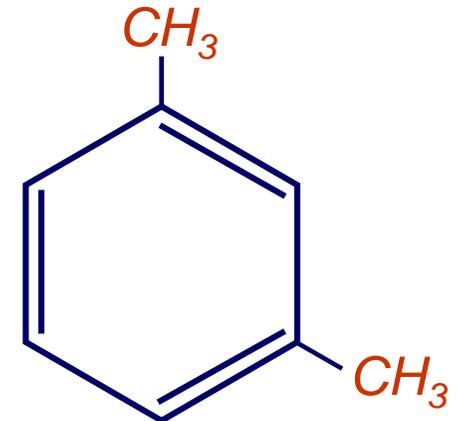
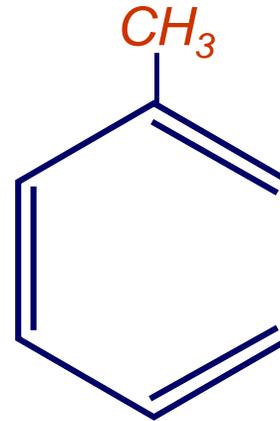
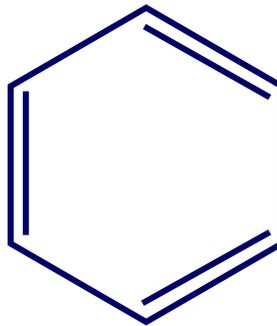
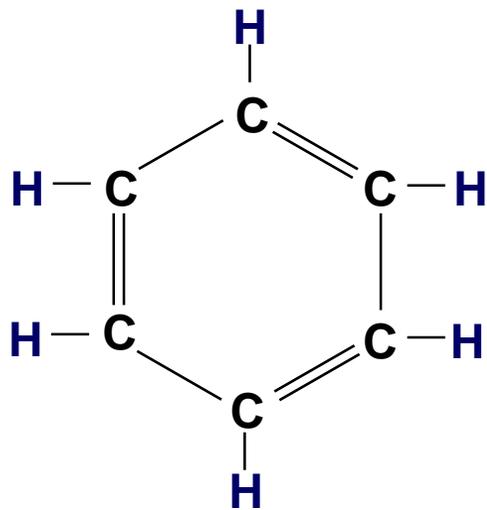
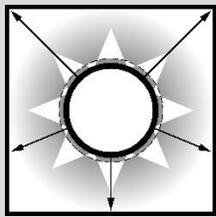


Abbildung 2

von links nach rechts – Benzolring mit Bindungen, Benzolring (Symbol), Toluol, meta-Xylole



## 2 Schadstoffcharakteristik

### 2.3 Organische Schadstoffe

#### Aromate – cyclische Kohlenwasserstoffe

... leichtflüchtige Verbindungen mit Hydroxidion ( $\text{OH}^-$ ) und Chlor  
→ Chlorbenzol, Phenol, PCP - Pentachlorphenol

... schwerflüchtige Chlorverbindungen  
z. B. Cyclohexan-Isomere, Lindan

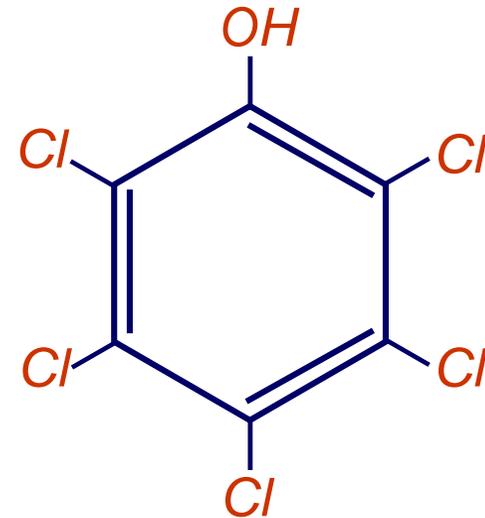
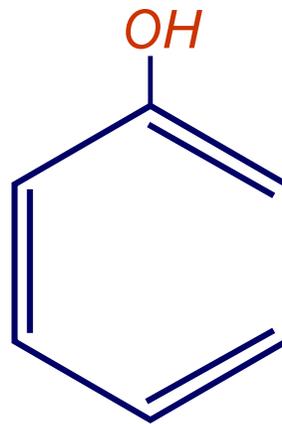
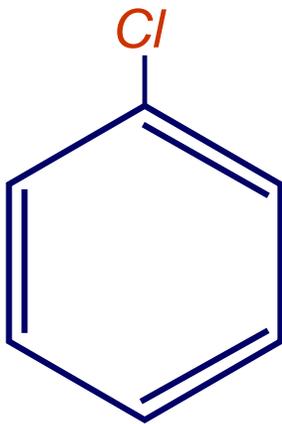
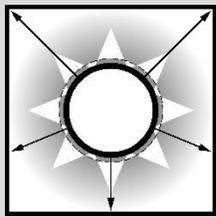


Abbildung 3  
von links nach rechts – Chlorbenzol, Phenol, PCP



## 2 Schadstoffcharakteristik

### 2.3 Organische Schadstoffe

#### PAK - Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe

- ... natürlicher Bestandteil von Kohle und Erdöl
- ... Restprodukte der Pyrolyse von organischem Material
- ... gering wasserlöslich, neutral, gering abbaubar
- ... Flüchtigkeit und Löslichkeit sinkt mit Zunahme der Bindungen
- ... 18 verschiedene Verbindungen

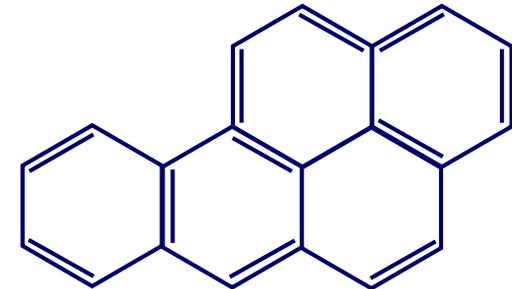
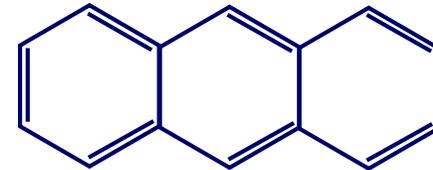
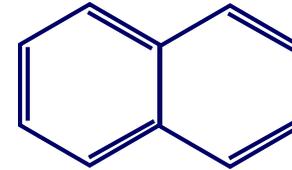
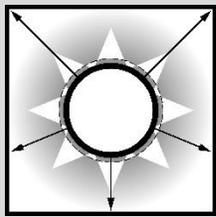


Abbildung 4  
von oben nach unten  
Naphtalin, Anthracen, Benzo(a)pyren



## 2 Schadstoffcharakteristik

### 2.3 Organische Schadstoffe

#### Aliphatische Kohlenwasserstoffe

... acyclische oder cyclische,  
gesättigte oder ungesättigte  
Kohlenwasserstoffe

... Beispiele:  
Methan, Ethan, Propan, Ethen

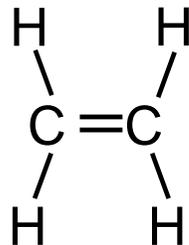
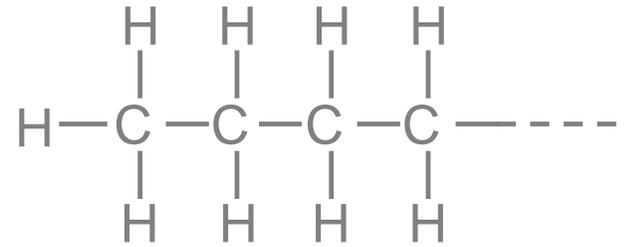
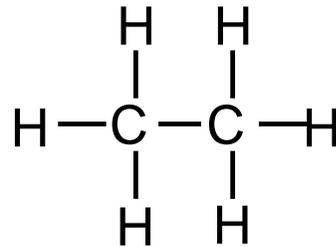
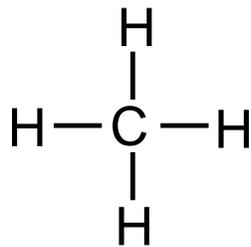
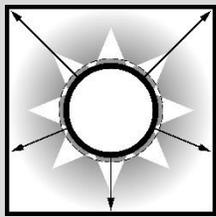


Abbildung 4  
von links nach rechts –  
Methan, Ethan, Octan, Ethen (Ethylen)



## 2 Schadstoffcharakteristik

### 2.3 Organische Schadstoffe

#### LCKW – Leichtflüchtige Chlorierte Kohlenwasserstoffe

... Veränderung von aliphatischen Kohlenwasserstoffen durch Chloreinlagerung

... Beispiele:

DCM – Dichlormethan

TCM – Trichlormethan (Chloroform)

TCA – 1,1,1-Trichlorethan

TCE, TRI – Trichlorethen

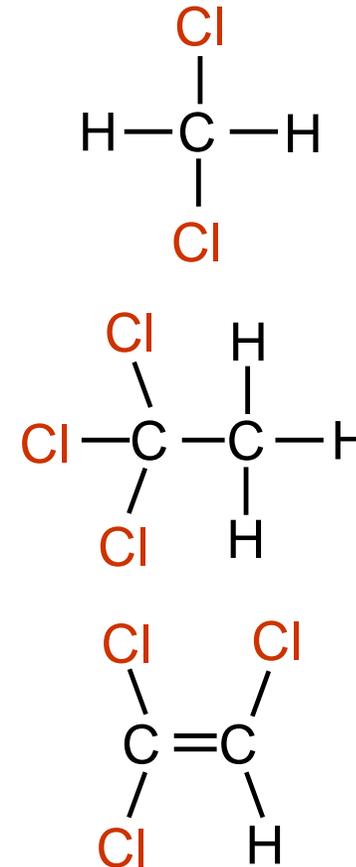
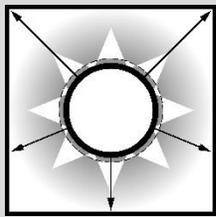


Abbildung 5  
von oben nach unten  
Dichlormethan, Trichlorethan, Trichlorethen



## 2 Schadstoffcharakteristik

### 2.3 Organische Schadstoffe

#### MKW - Aliphatische Mineralölkohlenwasserstoffe

- ... Produkt aus der Refinement von Rohöl
- ... Beispiele:
  - n-Butan
  - cis-2-Penten
  - 2-Methoxy-2-methylpropan

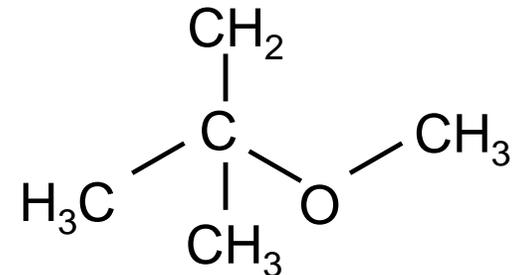
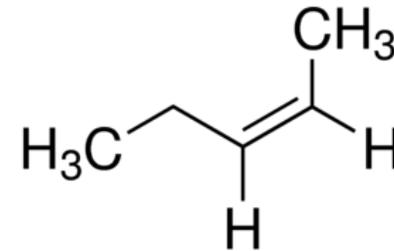
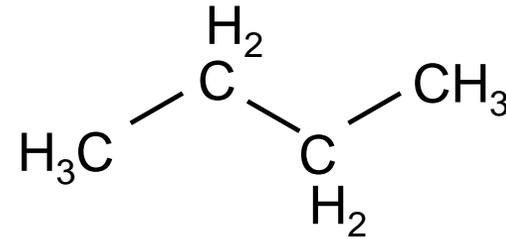
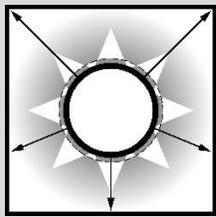


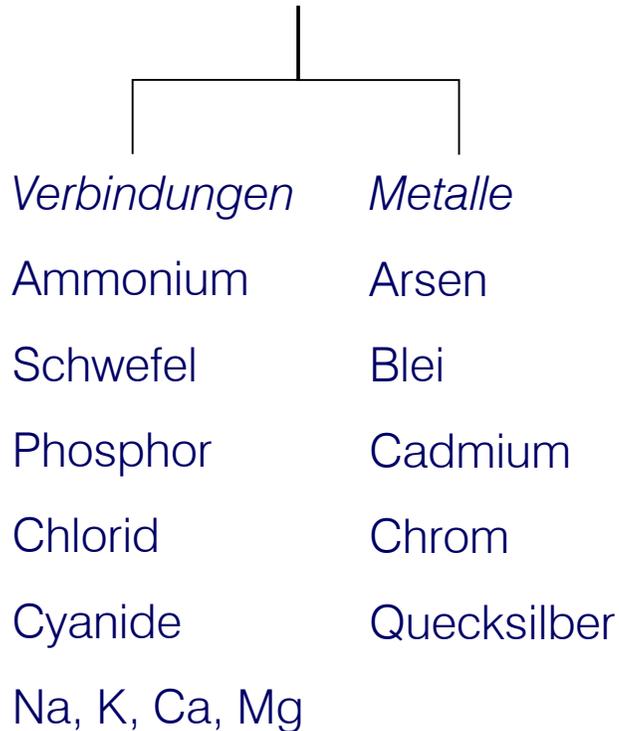
Abbildung 6  
von oben nach unten  
N-Butan, , cis-2-Penten, MTBE



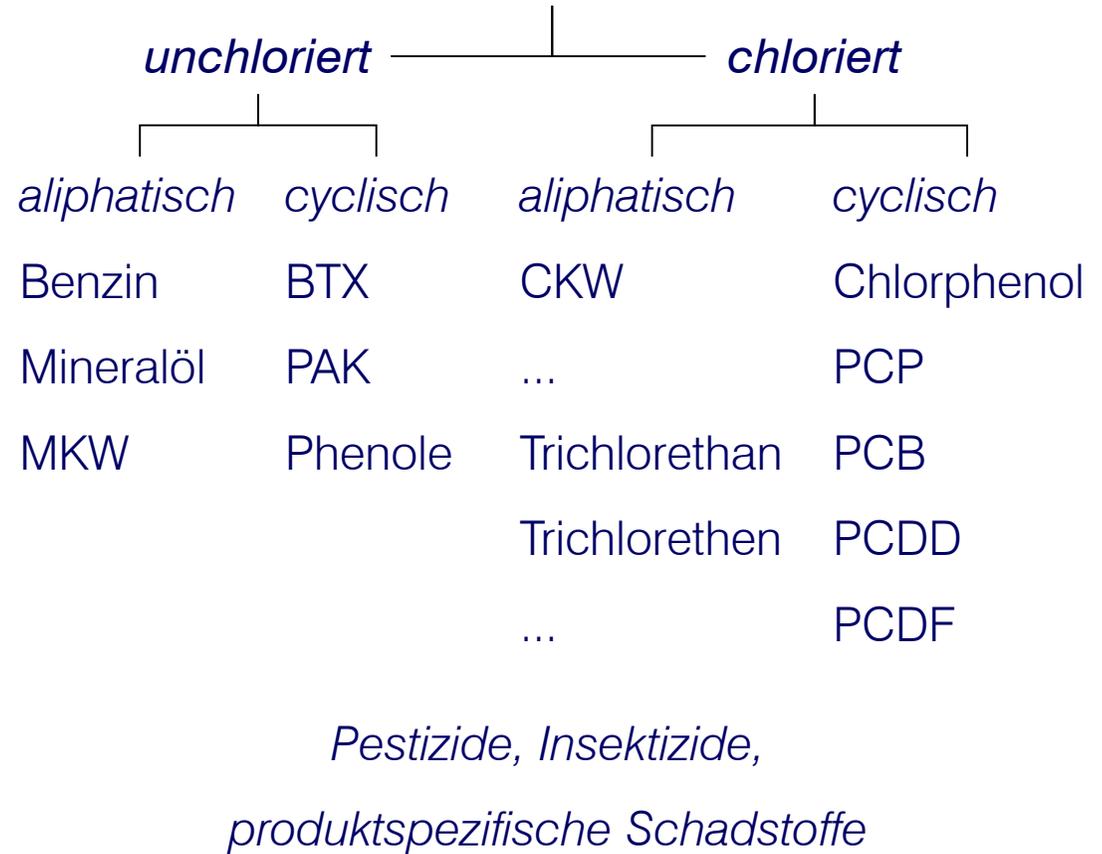
## 2 Schadstoffcharakteristik

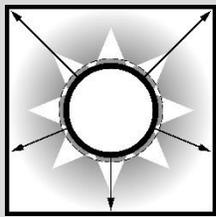
### 2.4 Übersicht

#### anorganisch



#### organisch





## 3 Schadstoffausbreitung

### 3.1 Physikalisch – chemische Eigenschaften

#### Aggregatzustand

fest - flüssig - gasförmig

#### Dichte

$$\rho = \frac{m}{V}$$

[g/cm<sup>3</sup>]

#### Dynamische Viskosität

... Zähflüssigkeit von  
Flüssigkeiten und Gasen ...

$$\eta = \frac{d\tau}{dD}$$

[mPa·s]

#### Flüchtigkeit

... Verdunstungsfähigkeit ...

$$c_g^{sat} = \frac{p_i^0 \cdot M}{R \cdot T}$$

[µg/l]

#### Löslichkeit

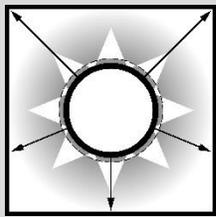
$$c_w^{sat} = \frac{\chi_i}{V_m}$$

[mol/l]

#### Anreicherungs-fähigkeit (Sorption)

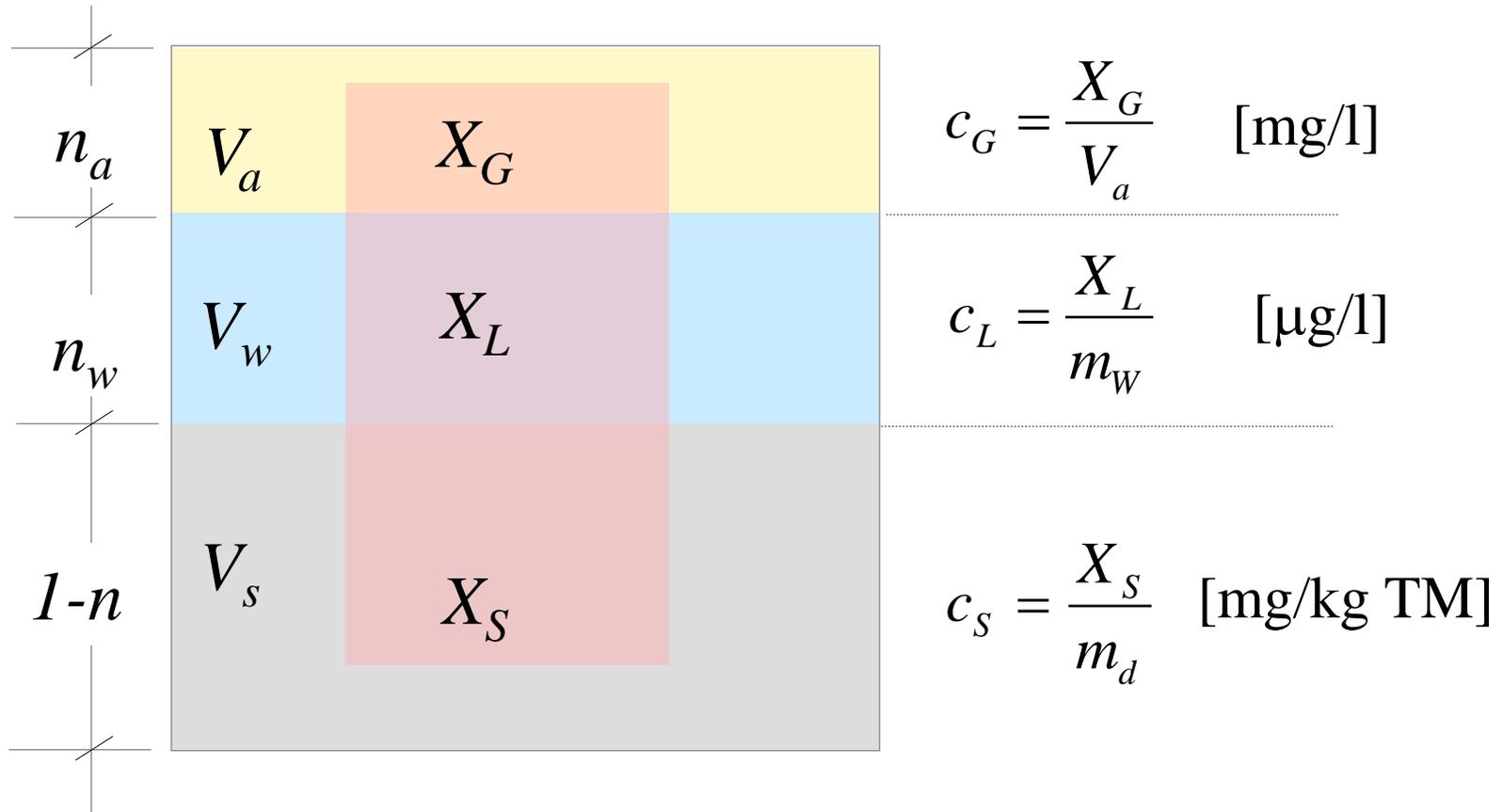
$$K_{ow} = \frac{c_{i,0}}{c_{i,w}}$$

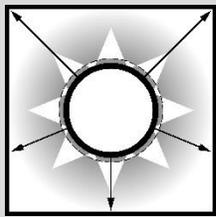
[ - ]



# 3 Schadstoffausbreitung

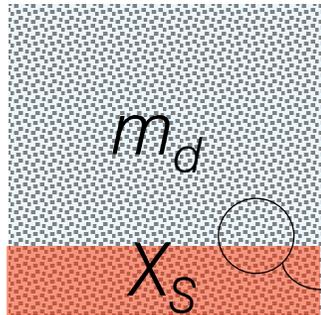
## 3.2 Stoffkonzentration





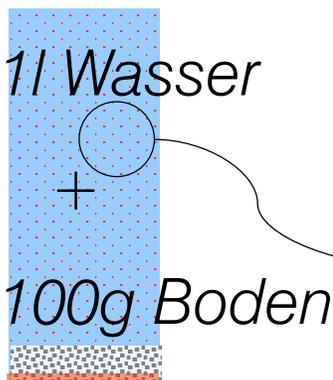
# 3 Schadstoffausbreitung

## 3.2 Stoffkonzentration



### Originalsubstanz

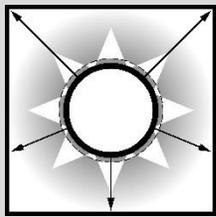
$$c_s = \frac{X_s}{m_d} \quad [\text{mg/kg TM}]$$



### Elution

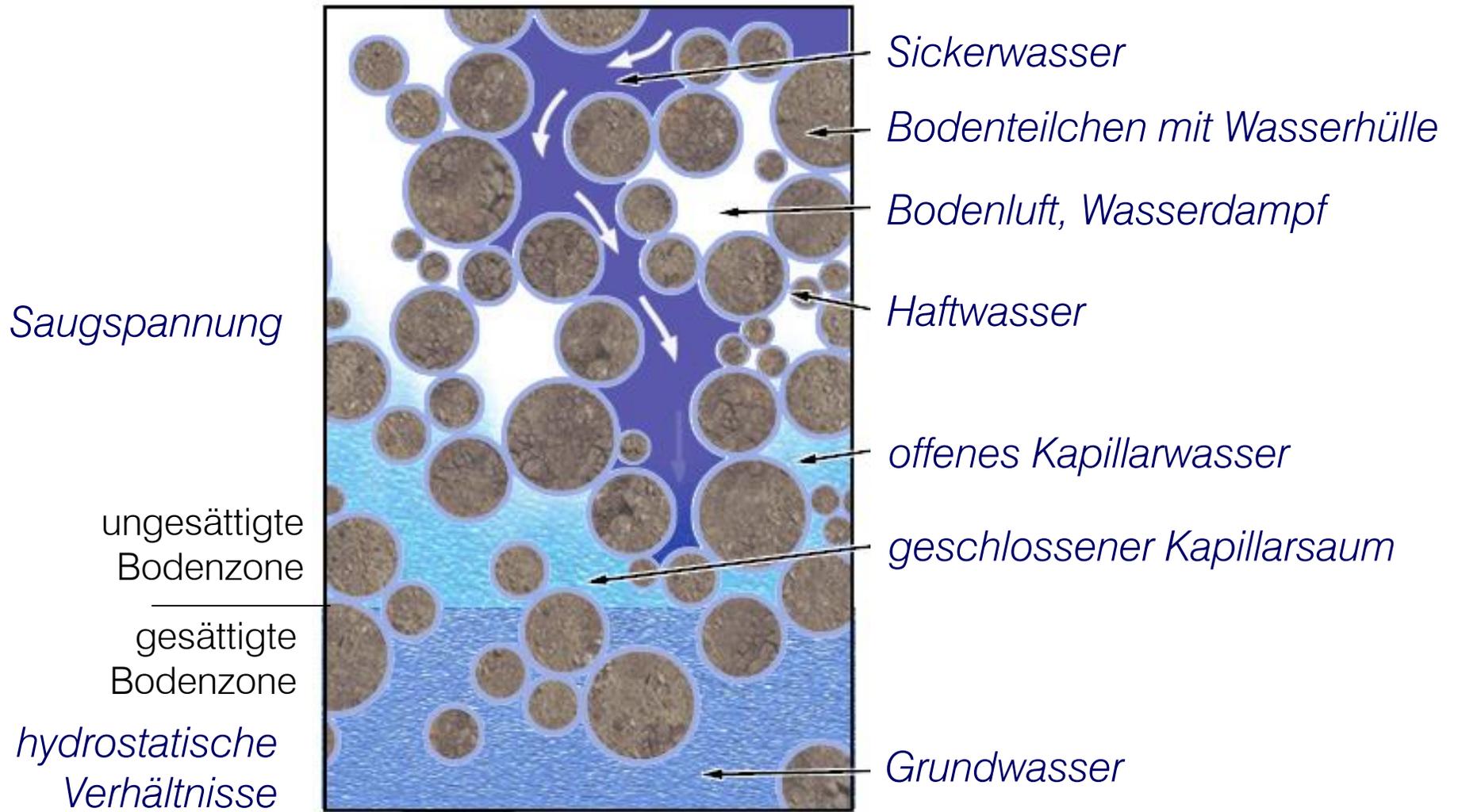
Auswaschung von Substanzen  
z. B. Schüttelversuch DEV S4

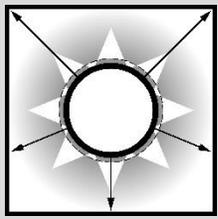
$$c_L = \frac{X_L}{m_w} \quad [\mu\text{g/l}], [\text{mg/l}]$$



# 3 Schadstoffausbreitung

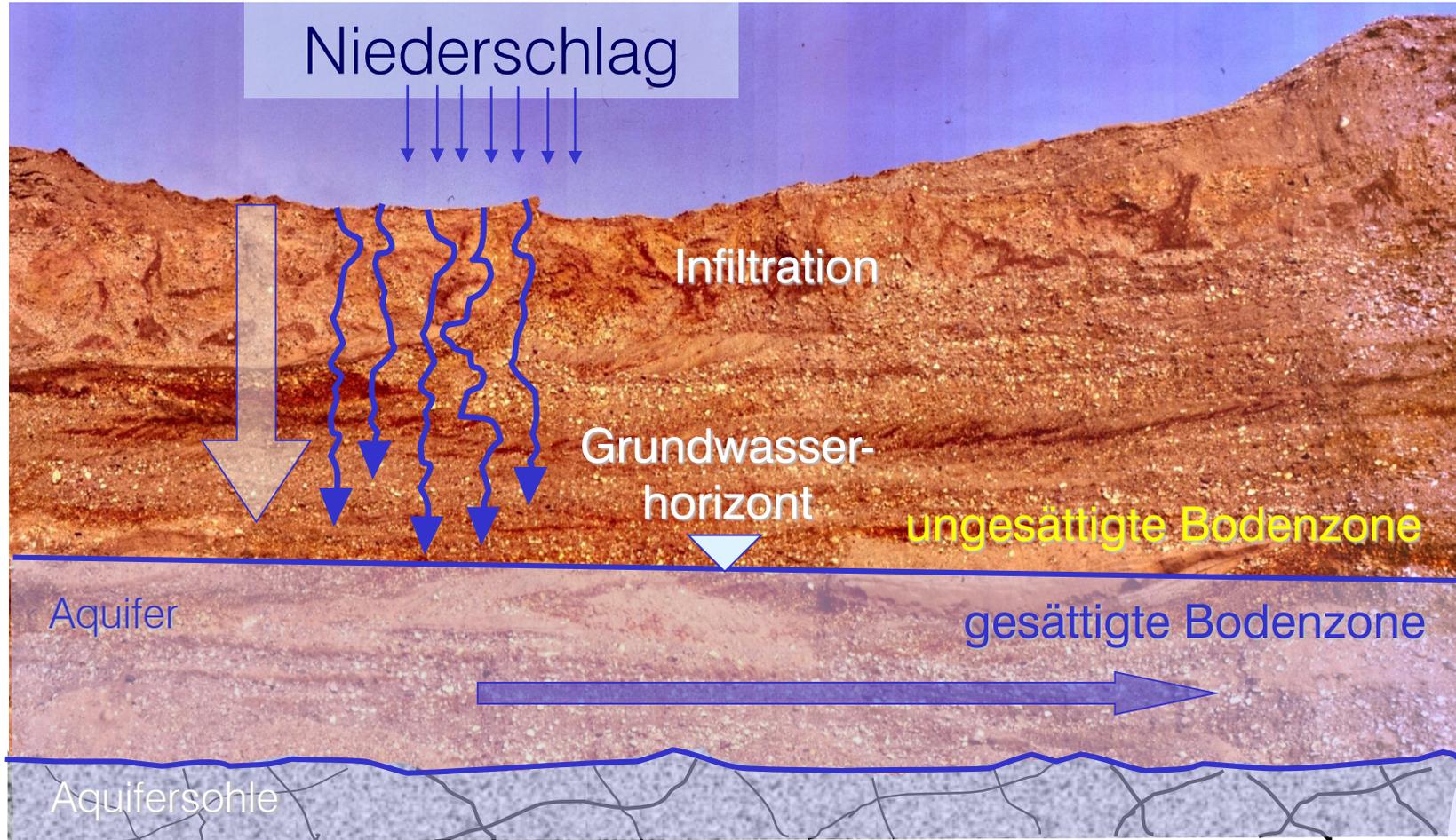
## 3.3 Wasser im Boden

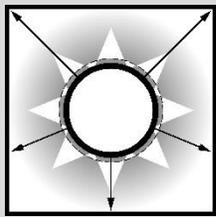




### 3 Schadstoffausbreitung

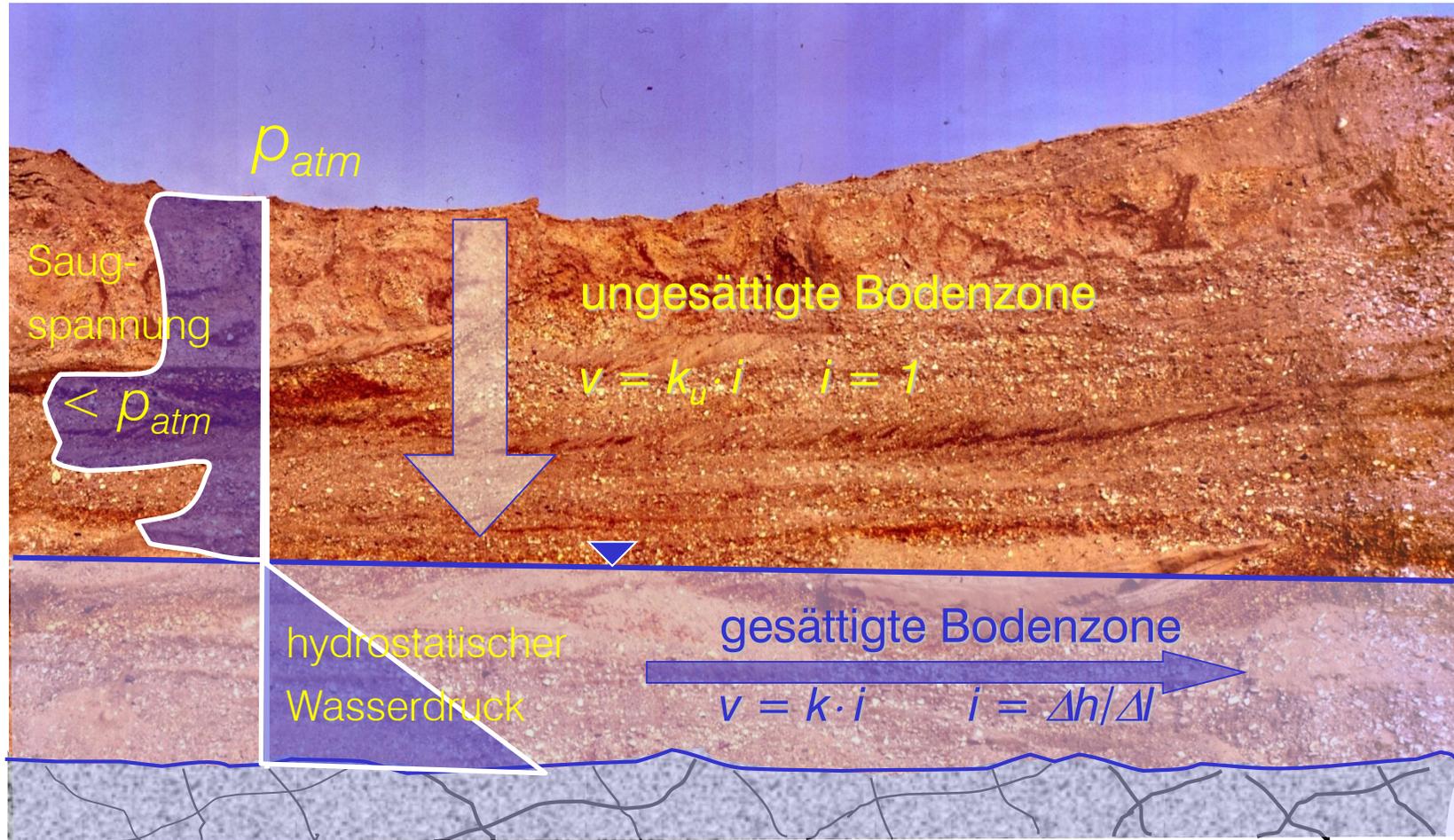
#### 3.4 Infiltration und Grundwasserneubildung

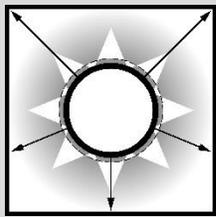




### 3 Schadstoffausbreitung

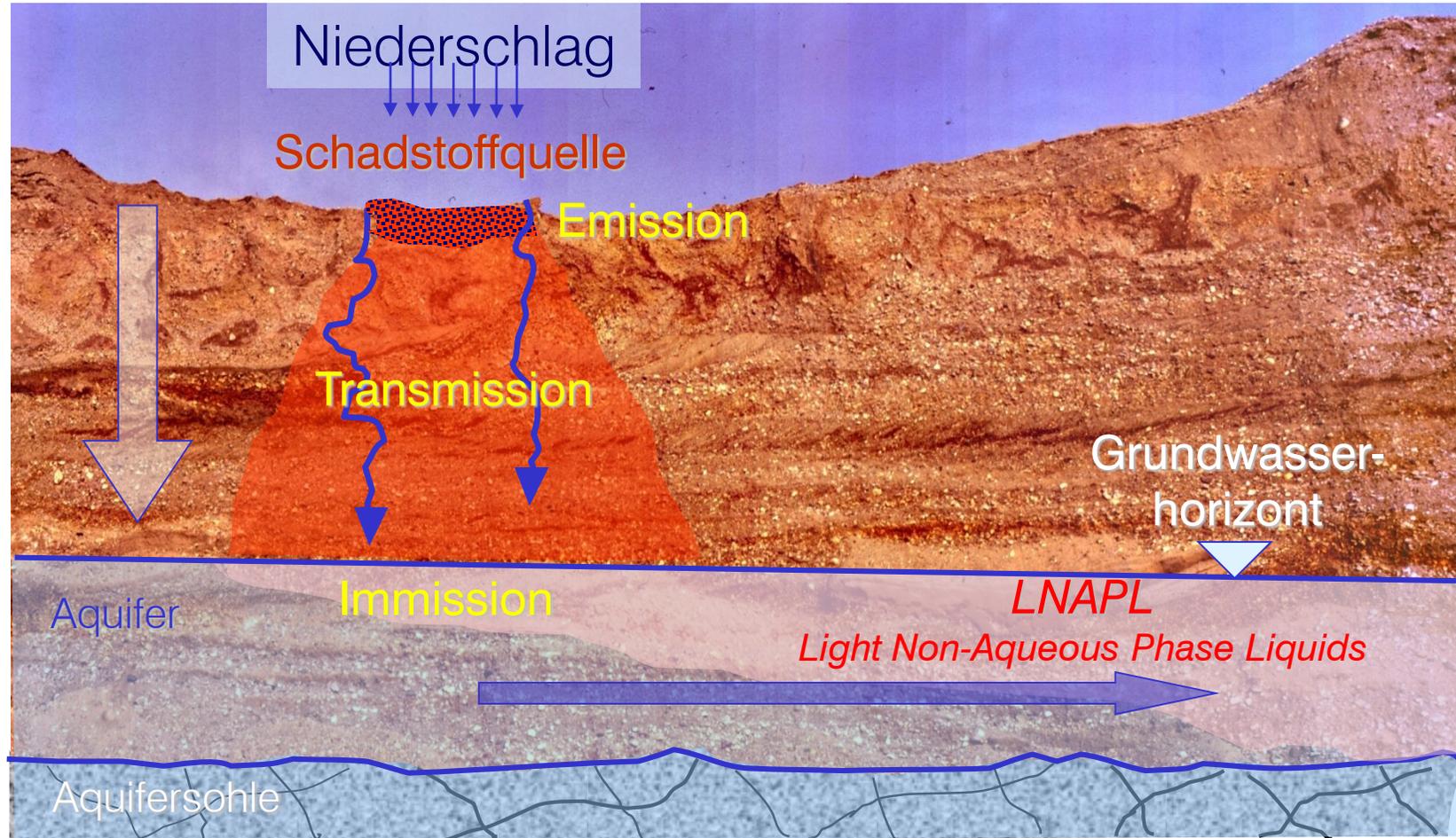
## 3.4 Infiltration und Grundwasserneubildung

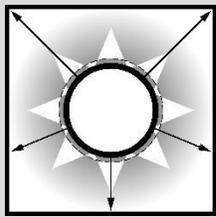




### 3 Schadstoffausbreitung

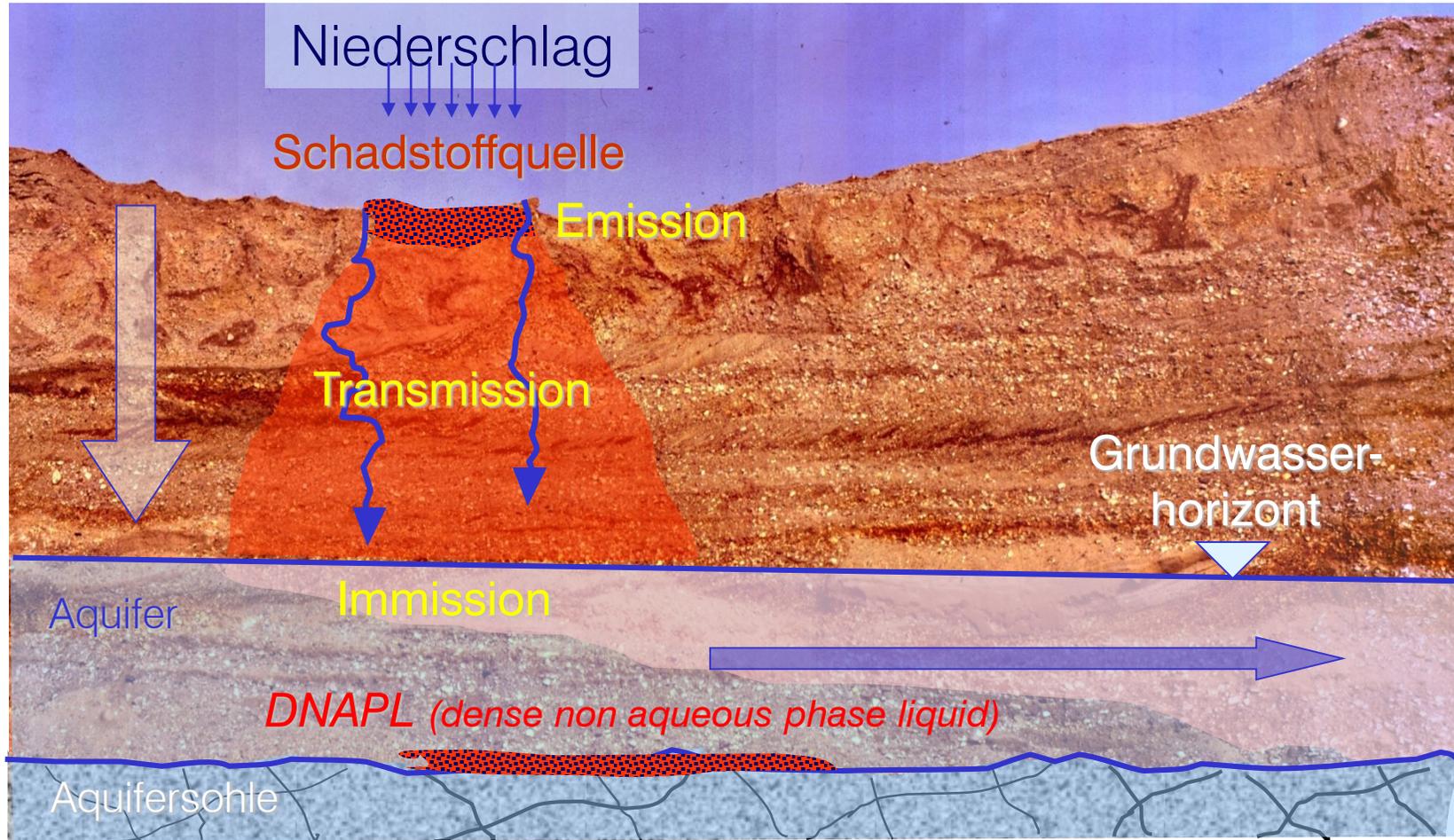
## 3.5 Emission - Transmission - Immission

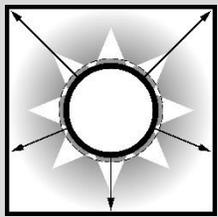




# 3 Schadstoffausbreitung

## 3.5 Emission - Transmission - Immission

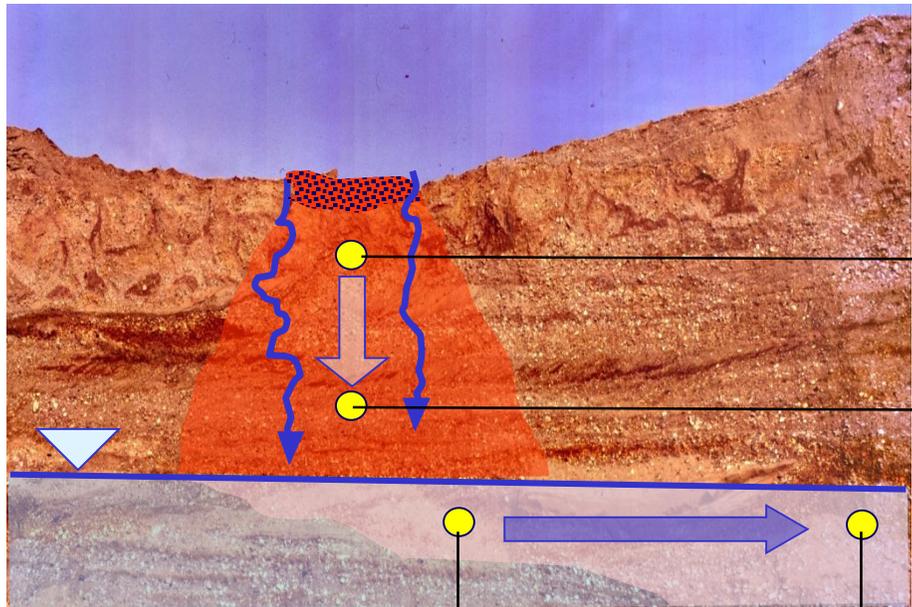




### 3 Schadstoffausbreitung

## 3.6 Konvektion und Advektion

Transport von Stoffen in der ungesättigten und der gesättigten Zone mit der Massenbewegung der flüssigen Phase



$$t = t_n$$

$$t = t_n + \Delta t$$

$$t = t_m$$

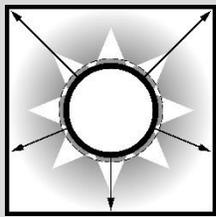
$$t = t_m + \Delta t$$

*Darcy'sches  
Gesetz*

$$v = k \cdot i$$

*gleichförmige  
Bewegung*

$$v = s / t$$



## 3 Schadstoffausbreitung

### 3.7 Molekulare Diffusion

- ... Stofftransport aufgrund Brown'scher Molekularbewegung
- ... strömungsunabhängiger Ausgleich der Konzentration  
→ vom Ort der höheren in Richtung der niedrigen Konzentration

1. *Fick'sches Gesetz: diffusiver Massenfluss*

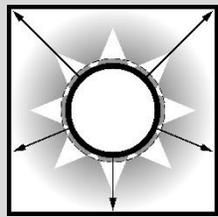
$$f_{diff} = -D_0 \cdot \nabla c$$

2. *Fick'sches Gesetz: zeitliche Veränderung der Konzentration*

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D_0 \cdot \nabla^2 c$$

$f_{diff}$  - diffusiver Massenfluss [kg/m<sup>2</sup>/s]

$D_0$  - molekularer Diffusionskoeffizient [m<sup>2</sup>/s]

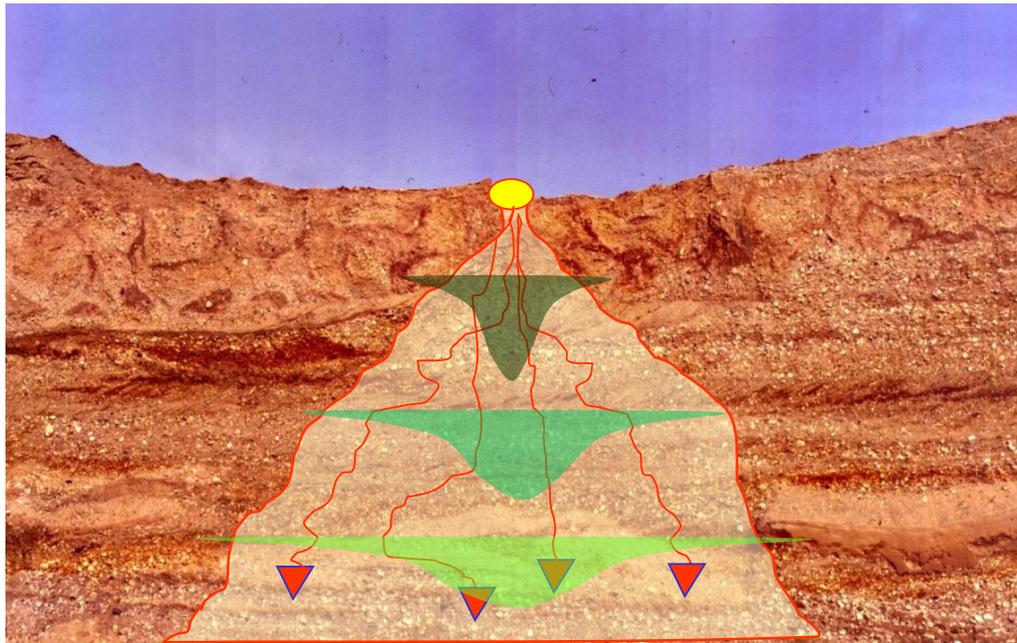


# 3 Schadstoffausbreitung

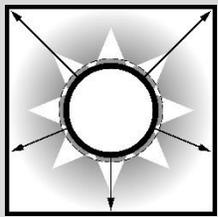
## 3.8 Mechanische Dispersion

... Fließgeschwindigkeitsvariation durch Verzweigungen der Fließwege im Korngefüge

... als Folge → räumliche Ausbreitung der Schadstofffront



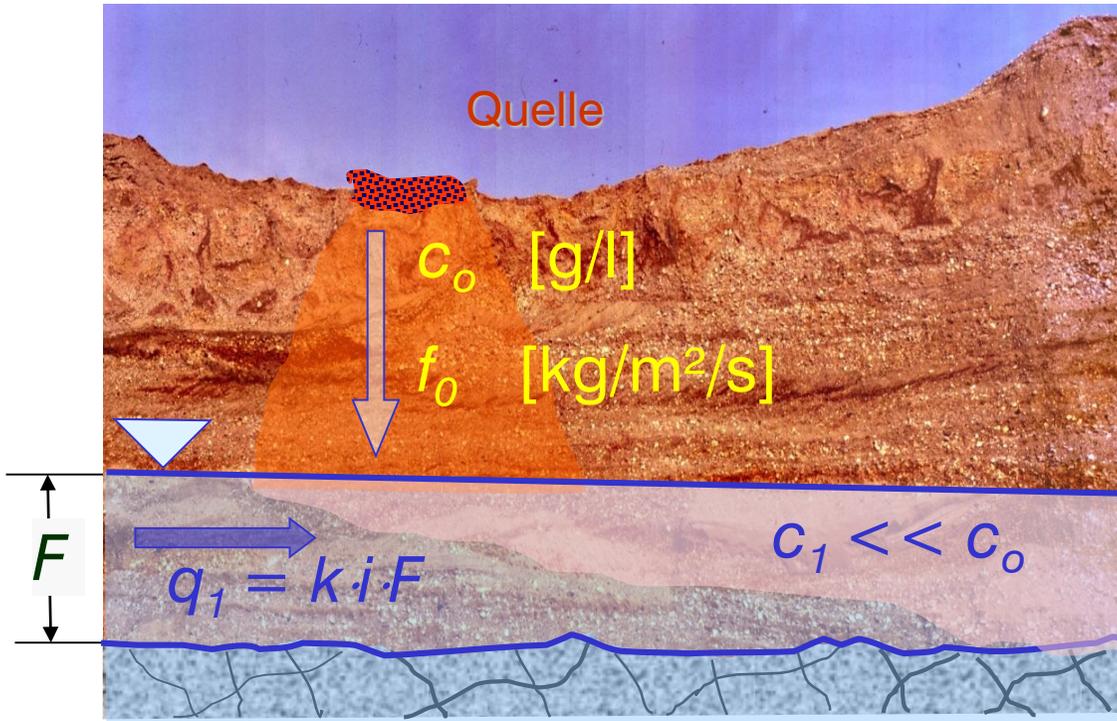
Konzentrationsabnahme in Richtung des Fließweges infolge Auffächerung der Schadstofffahne



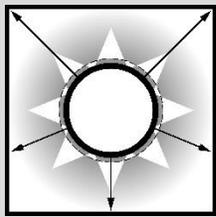
# 3 Schadstoffausbreitung

## 3.9 Verdünnung

... Verdünnung infolge der Mischung von Flüssigkeiten

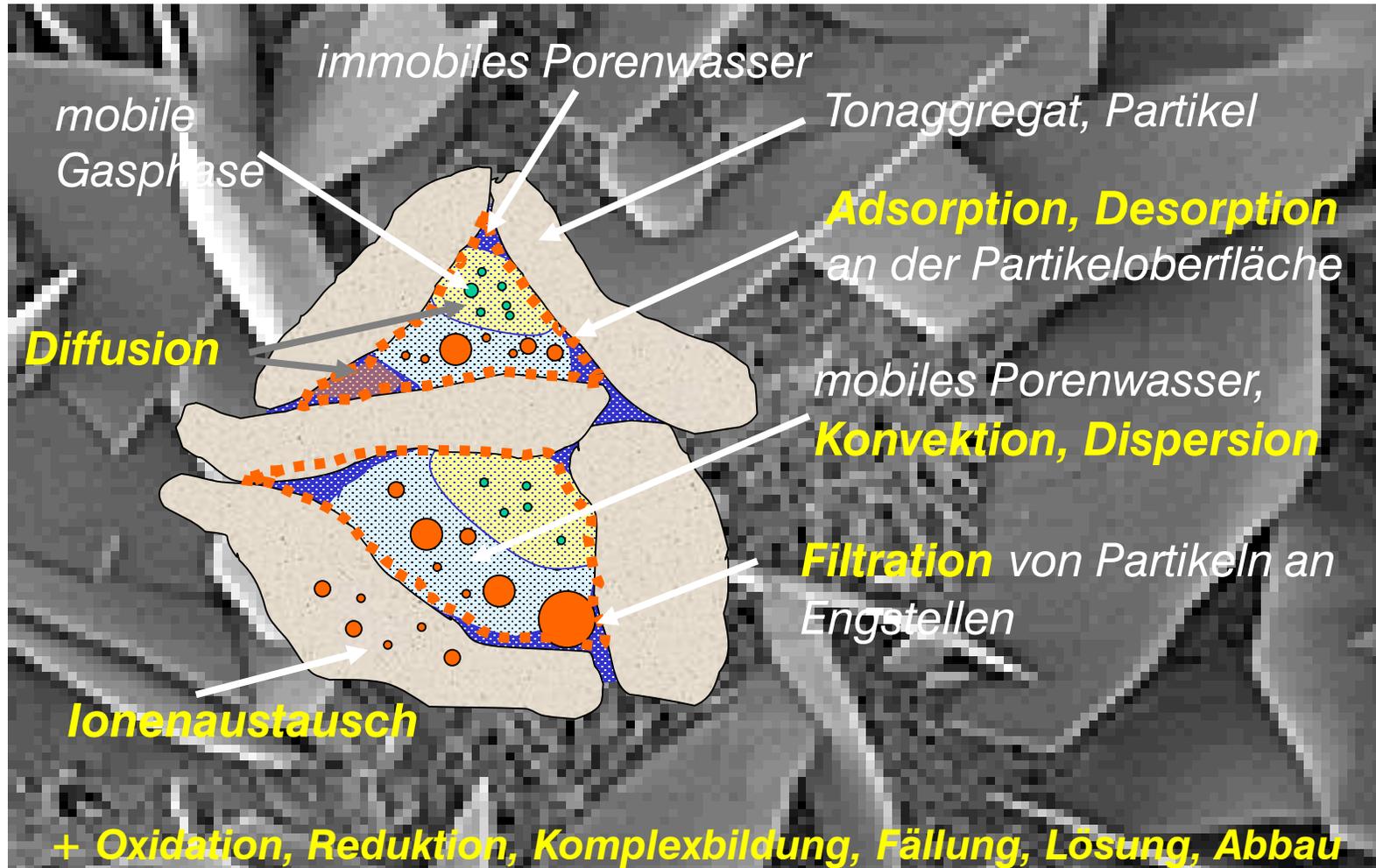


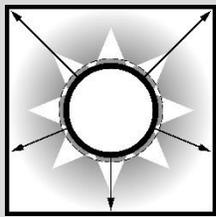
Der Massenfluss  $f_0$  der Transmission gelangt in den Grundwasserstrom und verdünnt sich auf die Konzentration  $c_1$



# 3 Schadstoffausbreitung

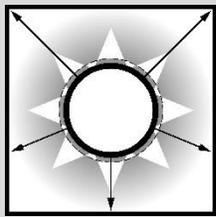
## 3.10 Sorption und Abbau





## ZWISCHENRESÜMEE

- ... Es gibt viele Schadstoffe, aber nicht alles ist Gift!
- ... Die Physik und die Geologie bestimmen die Ausbreitung!
- ... Für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser findet der Stofftransport immer als Emission - Transmission - Immission statt!
- ... Das infiltrierte Wasser ist Haupt-Transportmittel der Schadstoffe im Baugrund!
- ... Es gibt eine gesättigte und eine ungesättigte Bodenzone. Die stärksten Konzentrationen liegen in der ungesättigten vor!
- ... Es gibt zahlreiche Rückhaltemechanismen und reaktive Prozesse → entlang des Transportweges wird die Konzentration daher immer geringer!



## 4 Boden als Abfall

### 4.1 Rechtliche Situation

Gesetz zur Förderung der  
Kreislaufwirtschaft und Sicherung  
der umweltverträglichen  
Bewirtschaftung von Abfällen

→ Abfallschlüssel 17 05  
Boden, Steine und Baggergut

Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG  
24.02.2012

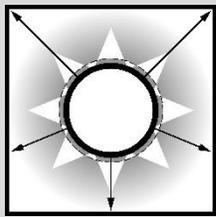


Rechtsverordnungen



Verwaltungsvorschriften





## 4 Boden als Abfall

### 4.1 Rechtliche Situation



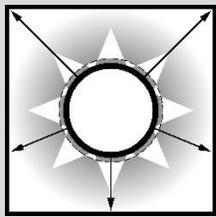
Länderarbeitsgemeinschaft Abfall

Mitteilung der  
Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20

[www.laga-online.de/mitteilungen](http://www.laga-online.de/mitteilungen)

**Anforderungen  
an die stoffliche Verwertung  
von mineralischen Abfällen  
- Technische Regeln -  
Allgemeiner Teil**





## 4 Boden als Abfall

### 4.1 Rechtliche Situation

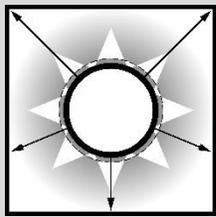


Länderarbeitsgemeinschaft Abfall

**Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen:**

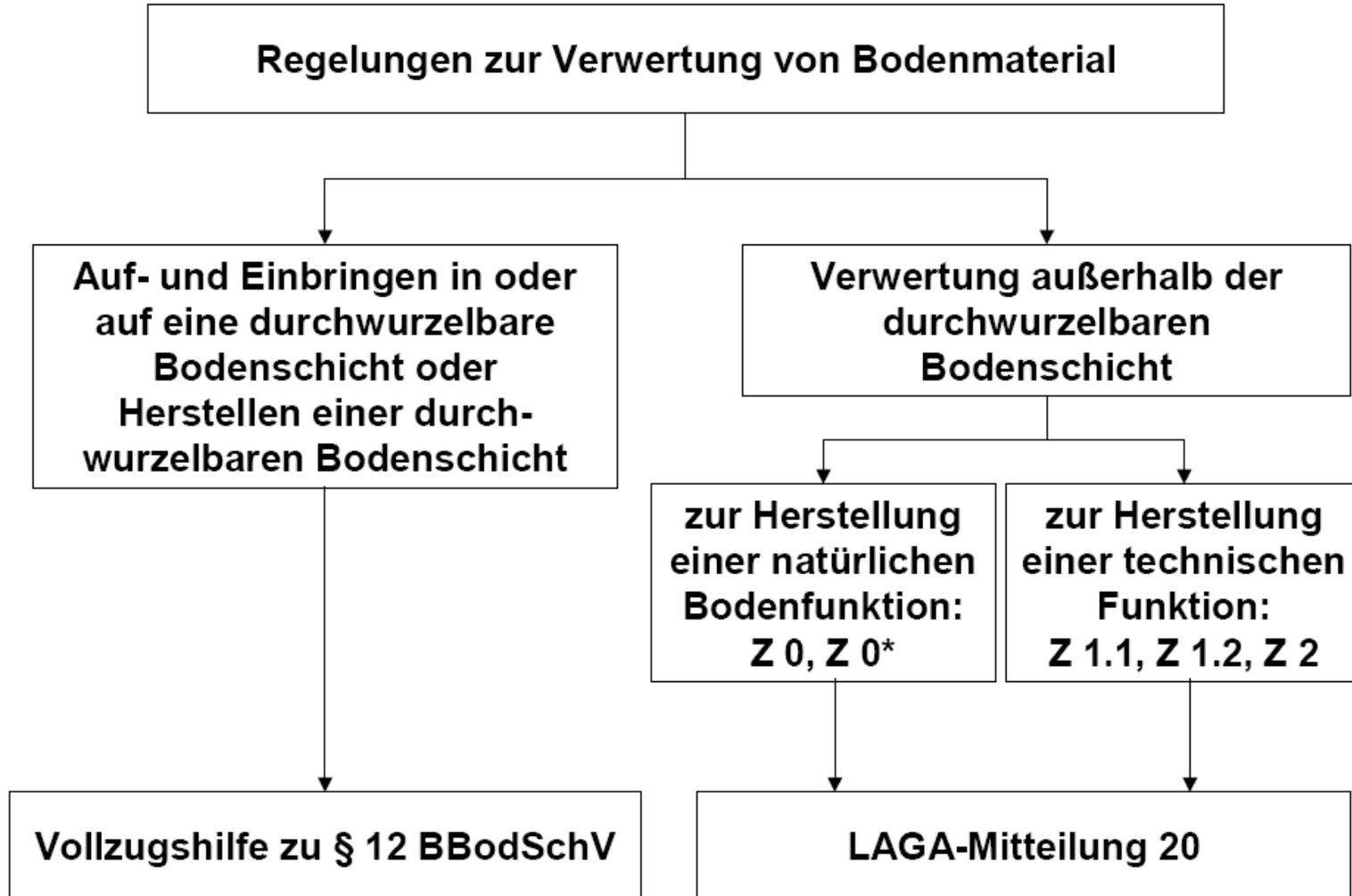
**Teil II: Technische Regeln für die Verwertung**

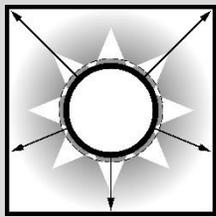
**1.2 Bodenmaterial (TR Boden)**



# 4 Boden als Abfall

## 4.1 Rechtliche Situation

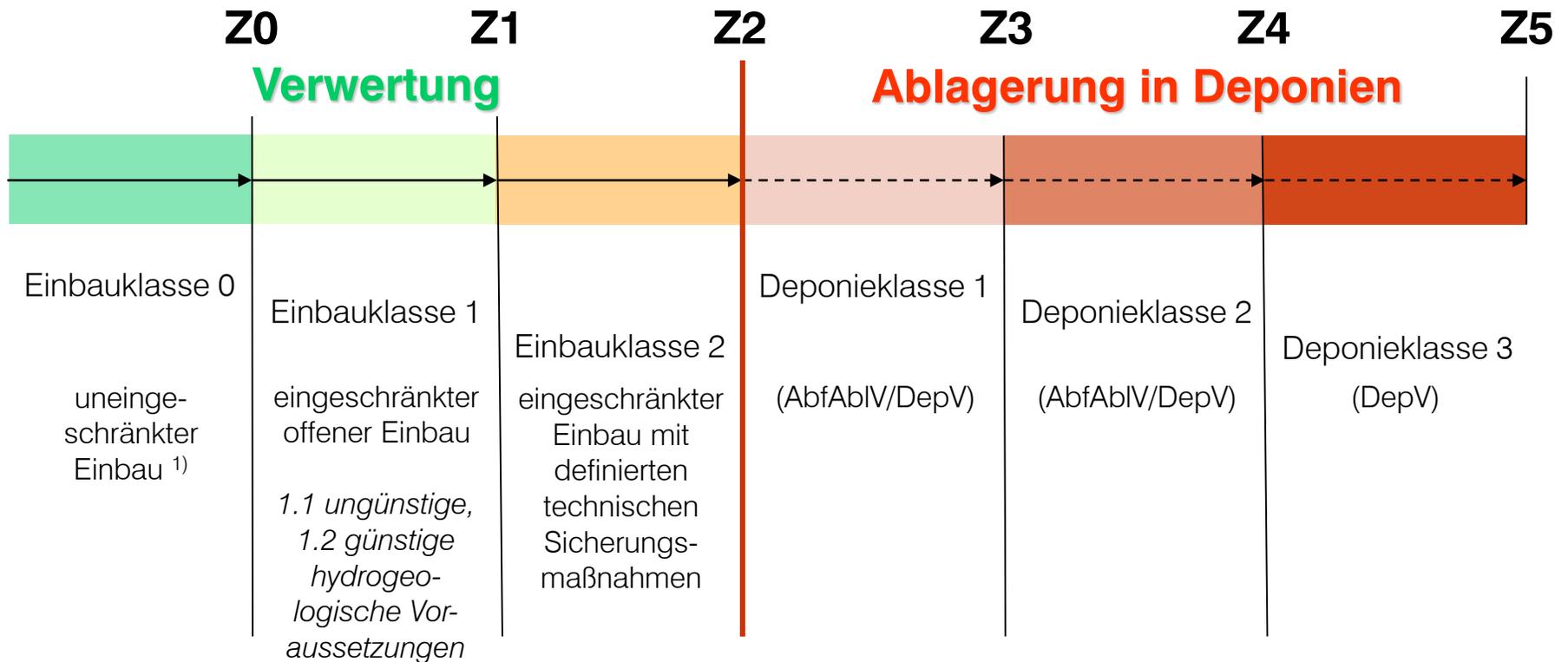




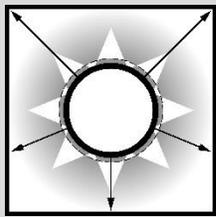
## 4 Boden als Abfall

### 4.2 Einbauklassen und Deponieklassen

Zuordnungswert (Obergrenze der Einbauklasse)



<sup>1)</sup> Diese Einbauklasse gilt nur für die Verwertung in bodenähnlichen Anwendungen (Verfüllung von Abgrabungen und Abfallverwertung im Landschaftsbau außerhalb von Bauwerken)



# 4 Boden als Abfall

## 4.3 Mindestuntersuchungsumfang

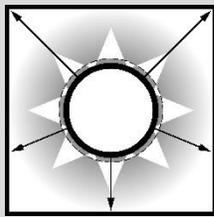
... bei unspezifischem Verdacht

Parameter	Feststoff	Eluat
Kohlenwasserstoffe	X	
EOX	X	
PAK <sub>16</sub>	X	
TOC	X	
Korngrößenverteilung <sup>3)</sup>	X	
Arsen	X	X <sup>1)</sup>
Blei	X	X <sup>1)</sup>
Cadmium	X	X <sup>1)</sup>
Chrom (gesamt)	X	X <sup>1)</sup>
Kupfer	X	X <sup>1)</sup>
Nickel	X	X <sup>1)</sup>
Quecksilber	X	X <sup>1)</sup>
Zink	X	X <sup>1)</sup>
Chlorid <sup>4)</sup>		X <sup>2)</sup>
Sulfat <sup>4)</sup>		X <sup>2)</sup>
pH-Wert <sup>4)</sup>		X
elektrische Leitfähigkeit <sup>4)</sup>		X
sensorische Prüfung (Aussehen und Geruch)	X	

Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen:

Teil II: Technische Regeln für die Verwertung

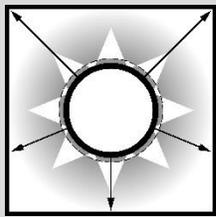
1.2 Bodenmaterial (TR Boden)



## 4 Boden als Abfall

### 4.4 Zuordnungswerte Feststoffgehalt

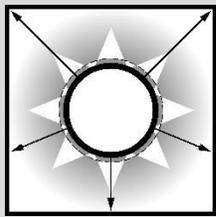
Parameter	Dimension	Z 0 (Sand)	Z 0 (Lehm/Schluff)	Z 0 (Ton)	Z 0* <sup>1)</sup>
Arsen	mg/kg TS	10	15	20	15 <sup>2)</sup>
Blei	mg/kg TS	40	70	100	140
Cadmium	mg/kg TS	0,4	1	1,5	1 <sup>3)</sup>
Chrom (gesamt)	mg/kg TS	30	60	100	120
Kupfer	mg/kg TS	20	40	60	80
Nickel	mg/kg TS	15	50	70	100
Thallium	mg/kg TS	0,4	0,7	1	0,7 <sup>4)</sup>
Quecksilber	mg/kg TS	0,1	0,5	1	1,0
Zink	mg/kg TS	60	150	200	300
TOC	(Masse-%)	0,5 (1,0) <sup>5)</sup>	0,5 (1,0) <sup>5)</sup>	0,5 (1,0) <sup>5)</sup>	0,5 (1,0) <sup>5)</sup>
EOX	mg/kg TS	1	1	1	1 <sup>6)</sup>
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	100	100	100	200 (400) <sup>7)</sup>
BTX	mg/kg TS	1	1	1	1
LHKW	mg/kg TS	1	1	1	1
PCB <sub>6</sub>	mg/kg TS	0,05	0,05	0,05	0,1
PAK <sub>16</sub>	mg/kg TS	3	3	3	3
Benzo(a)pyren	mg/kg TS	0,3	0,3	0,3	0,6



## 4 Boden als Abfall

### 4.4 Zuordnungswerte Feststoffgehalt

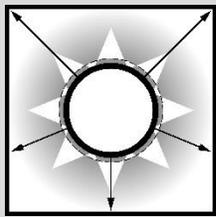
Parameter	Dimension	Z 1	Z 2
Arsen	mg/kg TS	45	150
Blei	mg/kg TS	210	700
Cadmium	mg/kg TS	3	10
Chrom (gesamt)	mg/kg TS	180	600
Kupfer	mg/kg TS	120	400
Nickel	mg/kg TS	150	500
Thallium	mg/kg TS	2,1	7
Quecksilber	mg/kg TS	1,5	5
Zink	mg/kg TS	450	1500
Cyanide, gesamt	mg/kg TS	3	10
TOC	(Masse-%)	1,5	5
EOX	mg/kg TS	3 <sup>1)</sup>	10
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	300 (600) <sup>2)</sup>	1000 (2000) <sup>2)</sup>
BTX	mg/kg TS	1	1
LHKW	mg/kg TS	1	1
PCB <sub>6</sub>	mg/kg TS	0,15	0,5
PAK <sub>16</sub>	mg/kg TS	3 (9) <sup>3)</sup>	30
Benzo(a)pyren	mg/kg TS	0,9	3



## 4 Boden als Abfall

### 4.5 Zuordnungswerte Eluat-Konzentration

Parameter	Dimension	Z 0/Z 0*
pH-Wert	-	6,5-9,5
Leitfähigkeit	$\mu\text{S/cm}$	250
Chlorid	$\text{mg/L}$	30
Sulfat	$\text{mg/L}$	20
Cyanid	$\mu\text{g/L}$	5
Arsen	$\mu\text{g/L}$	14
Blei	$\mu\text{g/L}$	40
Cadmium	$\mu\text{g/L}$	1,5
Chrom (gesamt)	$\mu\text{g/L}$	12,5
Kupfer	$\mu\text{g/L}$	20
Nickel	$\mu\text{g/L}$	15
Quecksilber	$\mu\text{g/L}$	< 0,5
Zink	$\mu\text{g/L}$	150
Phenolindex	$\mu\text{g/L}$	20



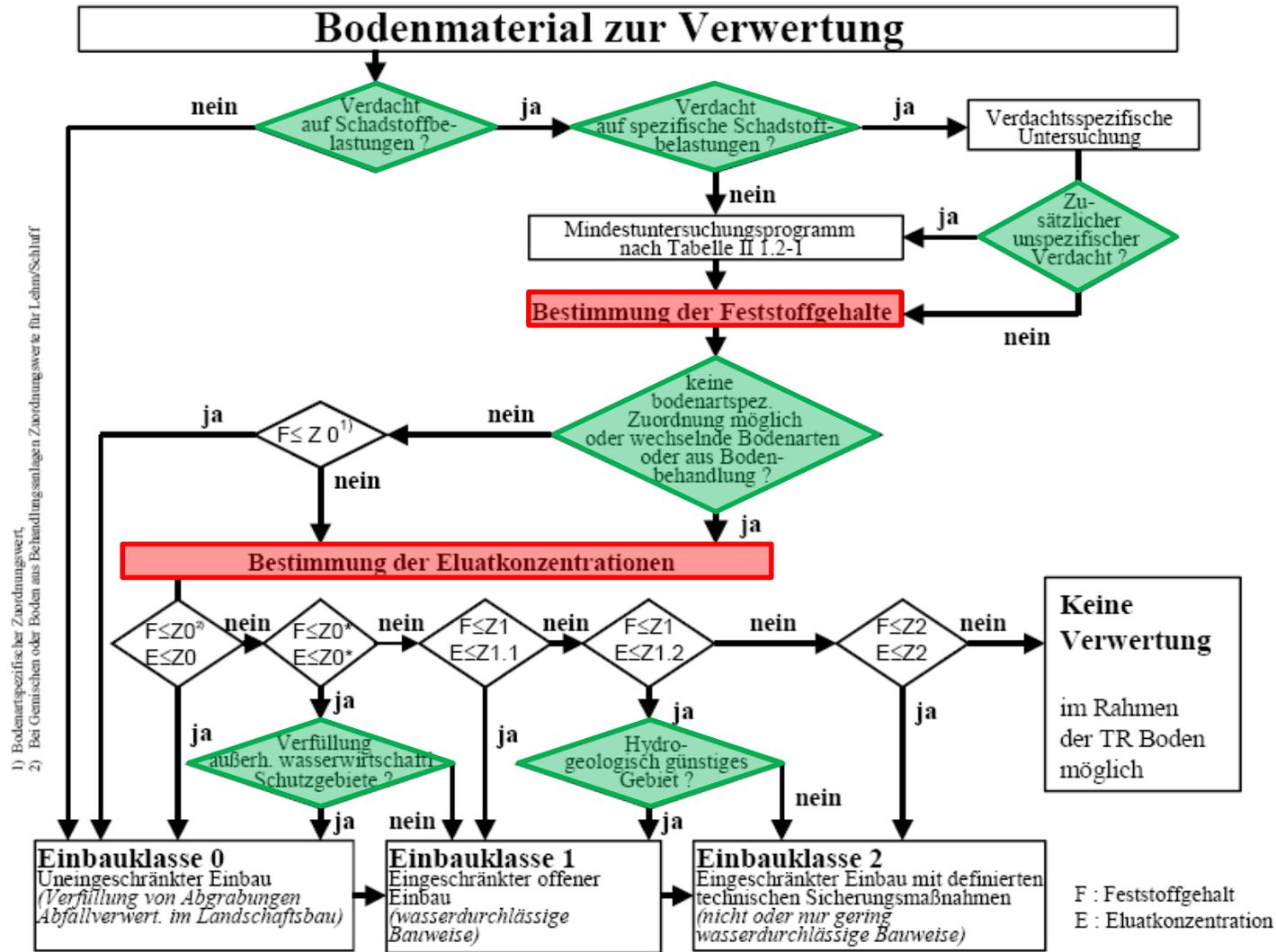
## 4 Boden als Abfall

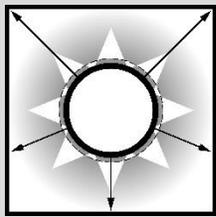
### 4.5 Zuordnungswerte Eluat-Konzentration

Parameter	Dimension	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
pH-Wert	-	6,5-9,5	6-12	5,5-12
Leitfähigkeit	µS/cm	250	1500	2000
Chlorid	mg/L	30	50	100 <sup>2)</sup>
Sulfat	mg/L	20	50	200
Cyanid	µg/L	5	10	20
Arsen	µg/L	14	20	60 <sup>3)</sup>
Blei	µg/L	40	80	200
Cadmium	µg/L	1,5	3	6
Chrom (gesamt)	µg/L	12,5	25	60
Kupfer	µg/L	20	60	100
Nickel	µg/L	15	20	70
Quecksilber	µg/L	< 0,5	1	2
Zink	µg/L	150	200	600
Phenolindex	µg/L	20	40	100

# 4 Boden als Abfall

## 4.6 Verwertungsprozess





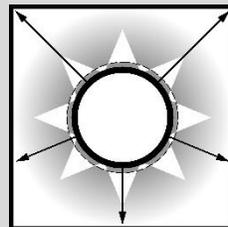
## Literatur

*BBodSchG. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten*

*LAGA M20. Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall 20*

*Witt (2016). VSVI-Seminar Nr. 02/2016: Umgang mit gefährlichem Abfall*

Danke für Ihre Aufmerksamkeit



wudtke • geotechnik  
Richard-Strauss-Straße 3 | 99423 Weimar  
Mobil: 0177 / 78 73 753  
[r.wudtke@wu-geo.de](mailto:r.wudtke@wu-geo.de)