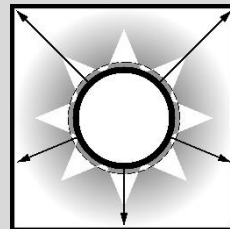


– Vortrag –

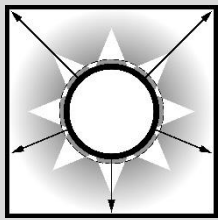
Schadstoffe im Baugrund

Dr.-Ing. R.-B. Wudtke

5. Deutscher Geotechnik Konvent
28. März 2019
Leipzig

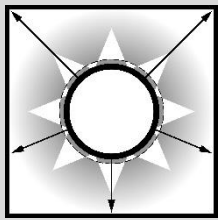


wudtke o geotechnik
Richard-Strauss-Straße 3 | 99423 Weimar
Mobil: 0177 / 78 73 753
r.wudtke@wu-geo.de



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)

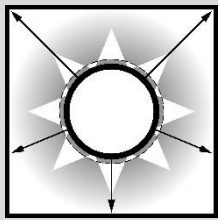
- Boden
- Funktionen des Bodens
- Schädliche Bodenveränderung
- Verdachtsflächen
- Altlasten
- Altlastverdächtige Flächen
- Sanierung

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

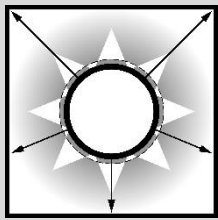
- Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen
- Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen
- Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften,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

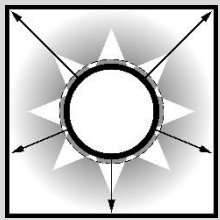
**Boden → dessen Funktionen
→ schädliche Bodenveränderung**

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.**

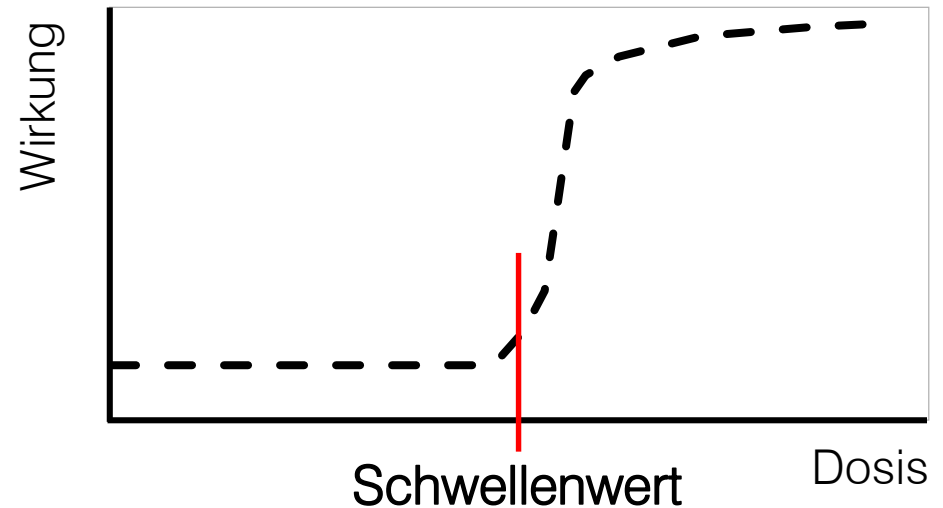
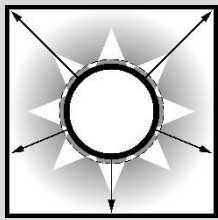


Abbildung 1
beispielhafte Konzentrations-Wirkungs-Kurve



2 Schadstoffcharakteristik

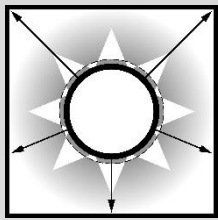
2.2 Anorganische Schadstoffe

Schwermetalle

| Name [-] | Kurzzeichen [-] | Dichte [g/cm ³] | Prüfwert nach BBSchV¹⁾ [mg/kg TM] / [μ 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

¹⁾ Anhang 2,
gültig für den Wirkungspfad
Boden- Mensch in Wohngebieten

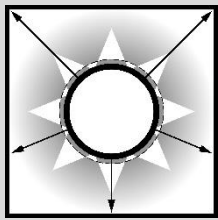


2 Schadstoffcharakteristik

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

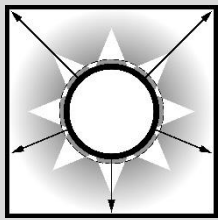


2 Schadstoffcharakteristik

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

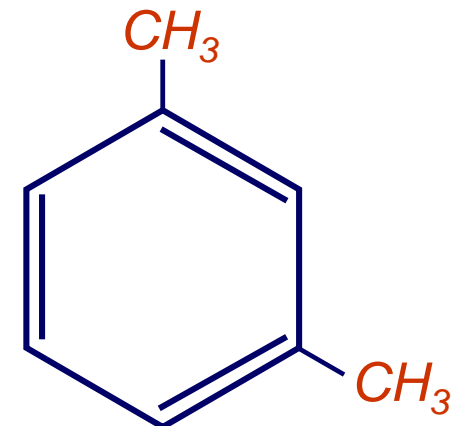
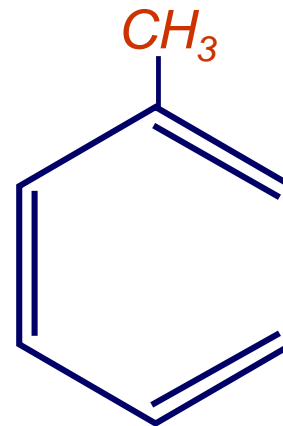
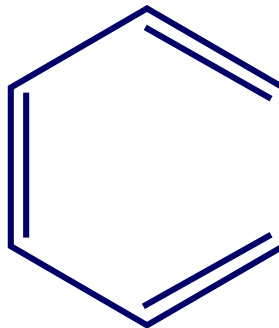
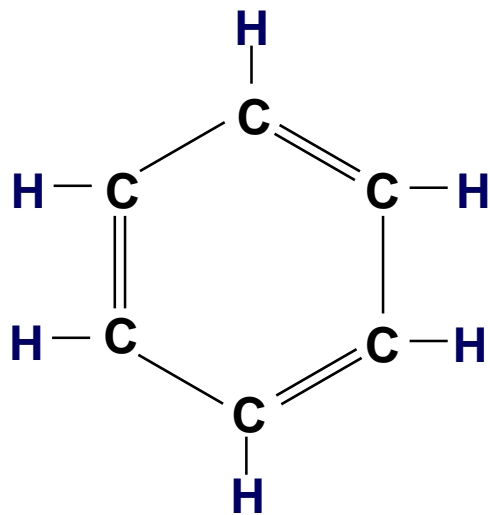
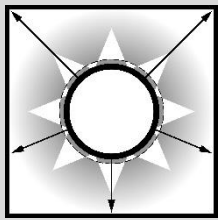


Abbildung 2

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 (OH^-) und Chlor
→ Chlorbenzol, Phenol, PCP - Pentachlorphenol

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

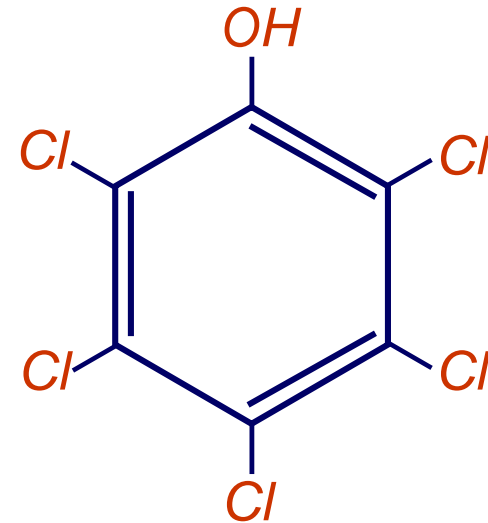
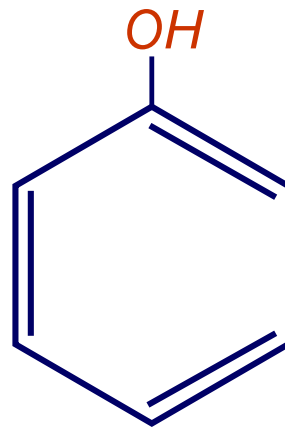
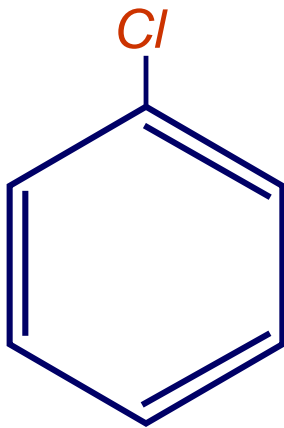
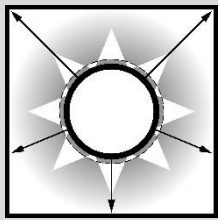


Abbildung 3
von links nach rechts – Chlorbenzol, Phenol, PCP



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

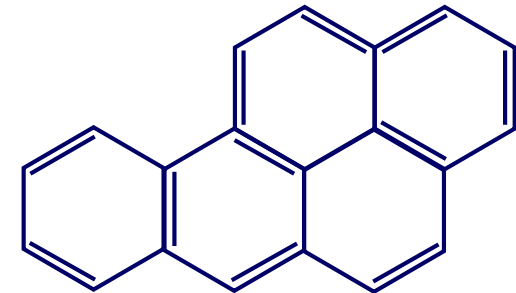
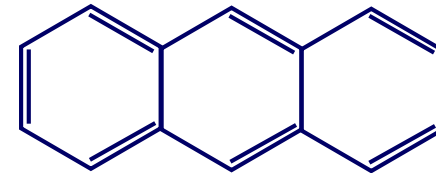
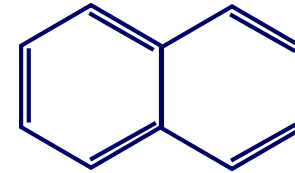
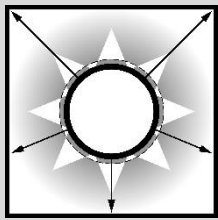


Abbildung 4
von oben nach unten
Naphtalin, Anthracen, Benzo(a)pyren



2 Schadstoffcharakteristik

2.3 Organische Schadstoffe

Aliphatische Kohlenwasserstoffe

... acyclische oder cyclische,
gesättigte oder ungesättigte
Kohlenwasserstoffe

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

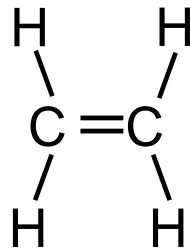
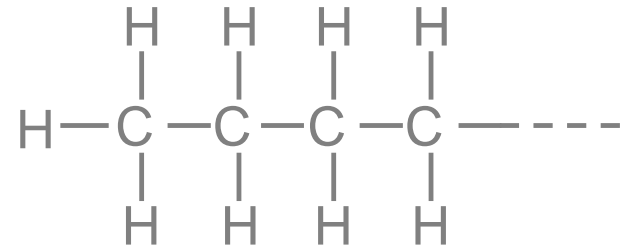
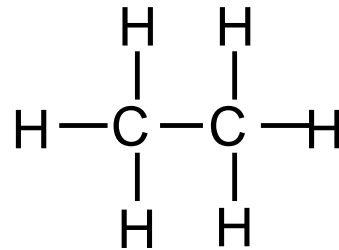
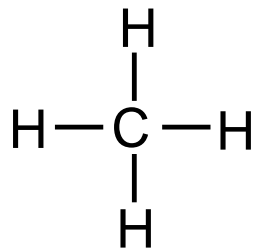
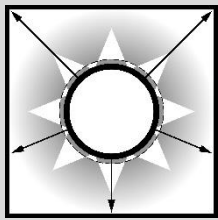


Abbildung 4
von links nach rechts –
Methan, Ethan, Octan, Ethen (Ethylen)



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

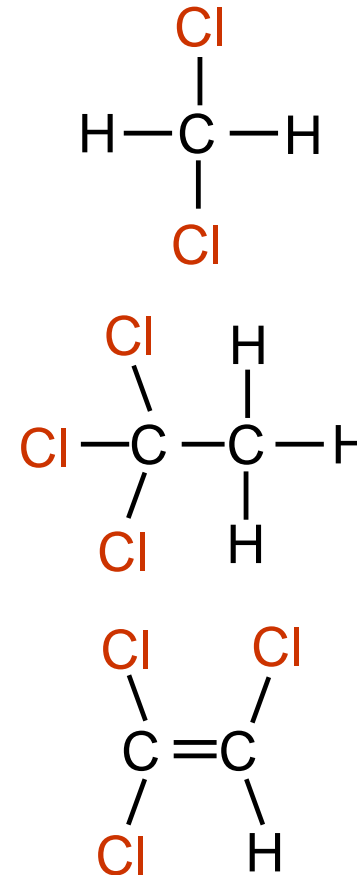
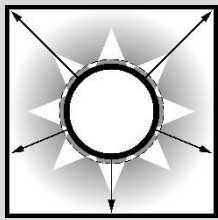


Abbildung 5
von oben nach unten
Dichlormethan, Trichlorethan, Trichlorethen



2 Schadstoffcharakteristik

2.3 Organische Schadstoffe

MKW - Aliphatische Mineralölkohlenwasserstoffe

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

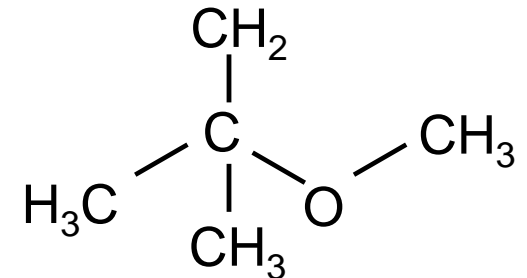
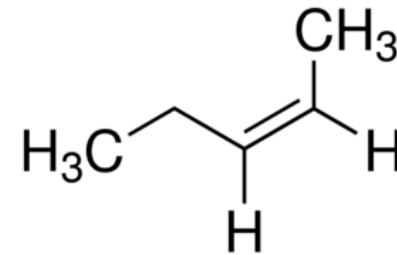
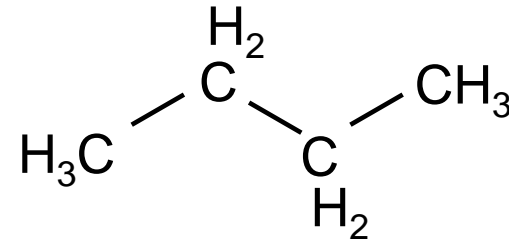
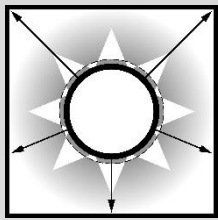


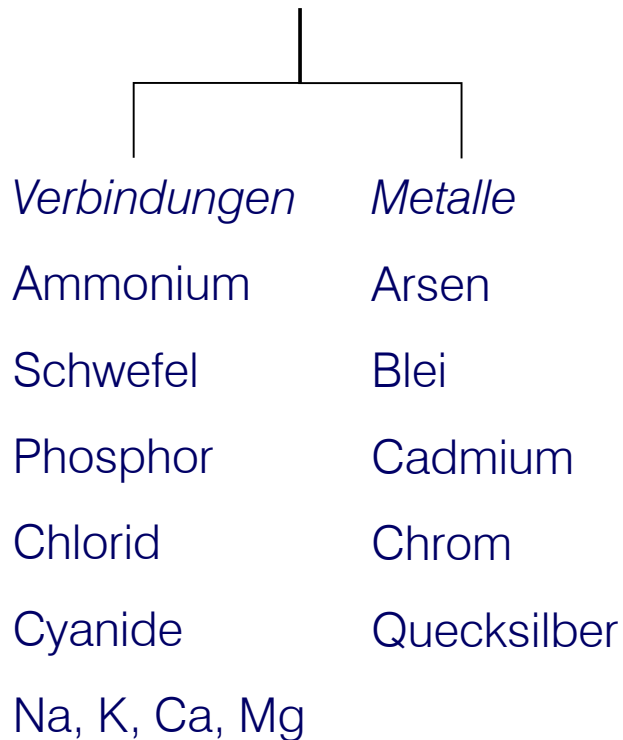
Abbildung 6
von oben nach unten
N-Butan, , cis-2-Penten, MTBE



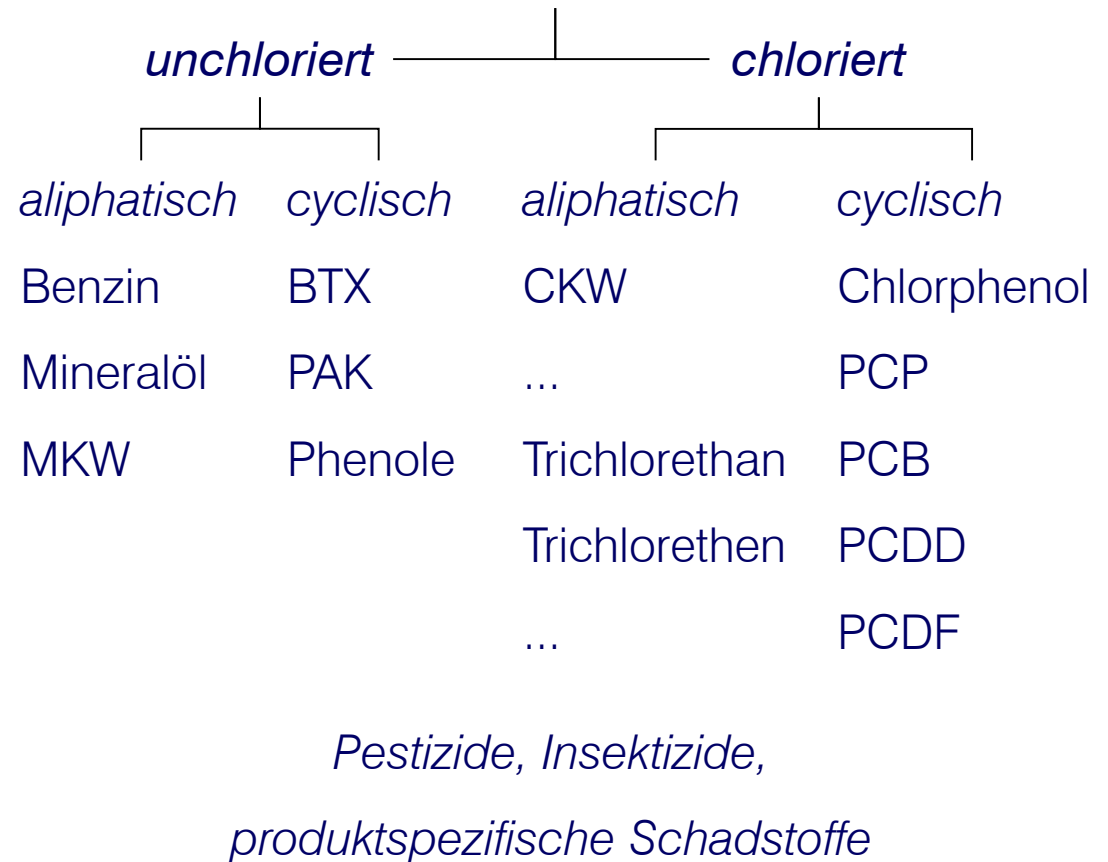
2 Schadstoffcharakteristik

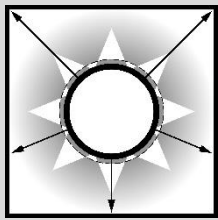
2.4 Übersicht

anorganisch



organisch





3 Schadstoffausbreitung

3.1 Physikalisch – chemische Eigenschaften

Aggregatzustand

fest - flüssig - gasförmig

Dichte

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

[g/cm³]

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

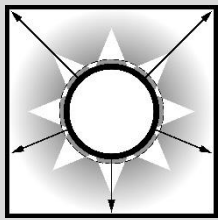
$$c_w^{sat} = \frac{\chi_i}{V_m}$$

[mol/l]

Anreicherungs-fähigkeit (Sorption)

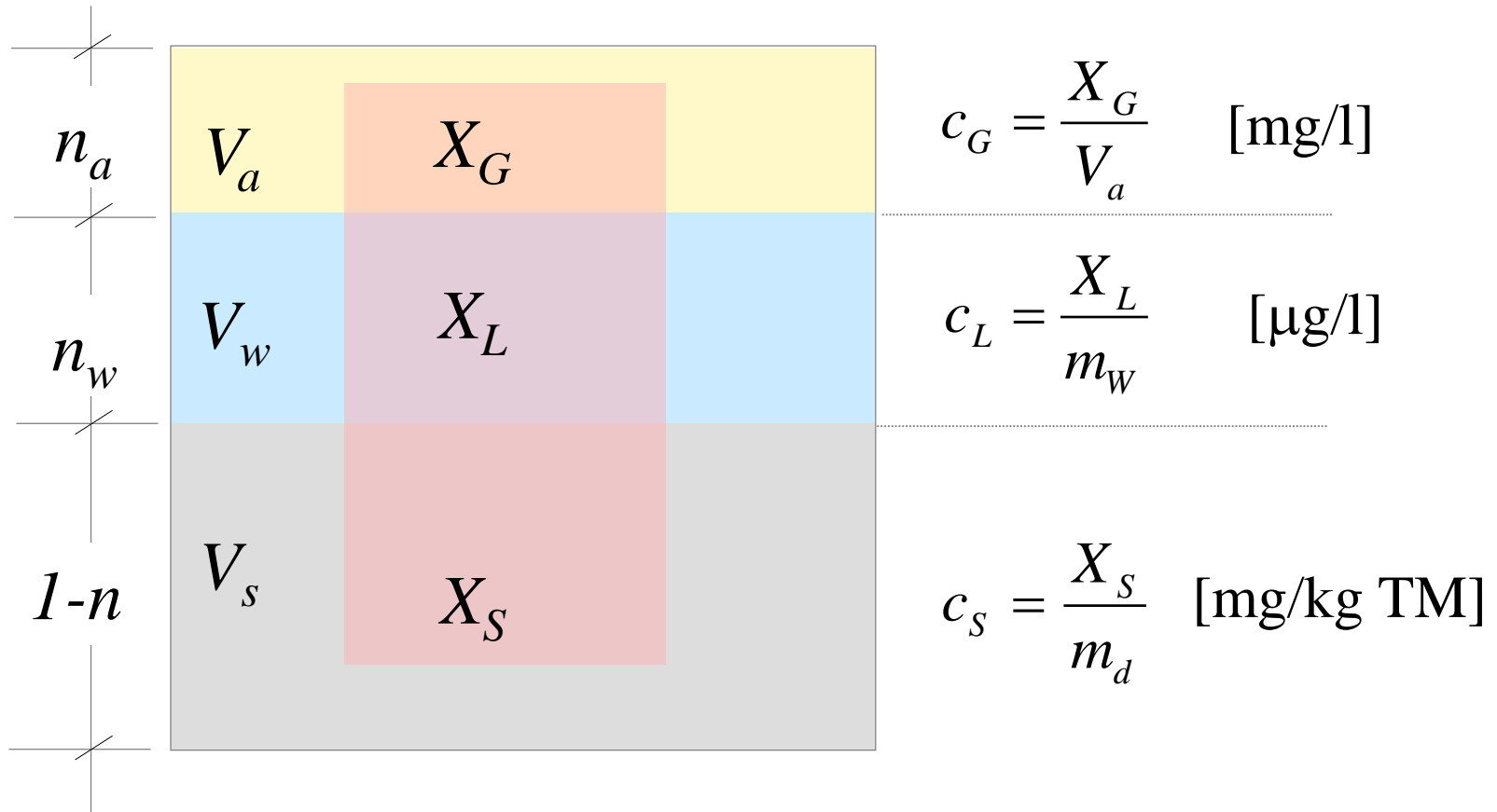
$$K_{ow} = \frac{c_{i,0}}{c_{i,w}}$$

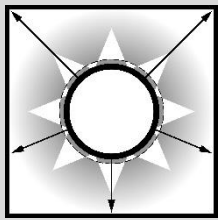
[-]



3 Schadstoffausbreitung

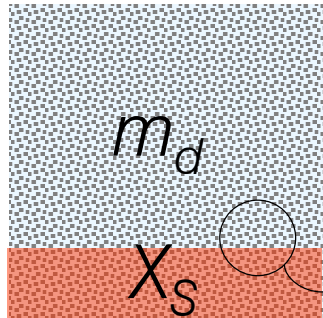
3.2 Stoffkonzentration





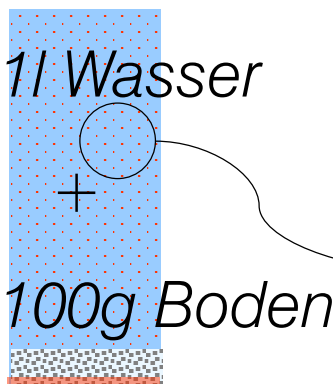
3 Schadstoffausbreitung

3.2 Stoffkonzentration



Originalsubstanz

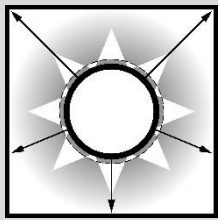
$$c_s = \frac{X_s}{m_d} \quad [\text{mg/kg TM}]$$



Elution

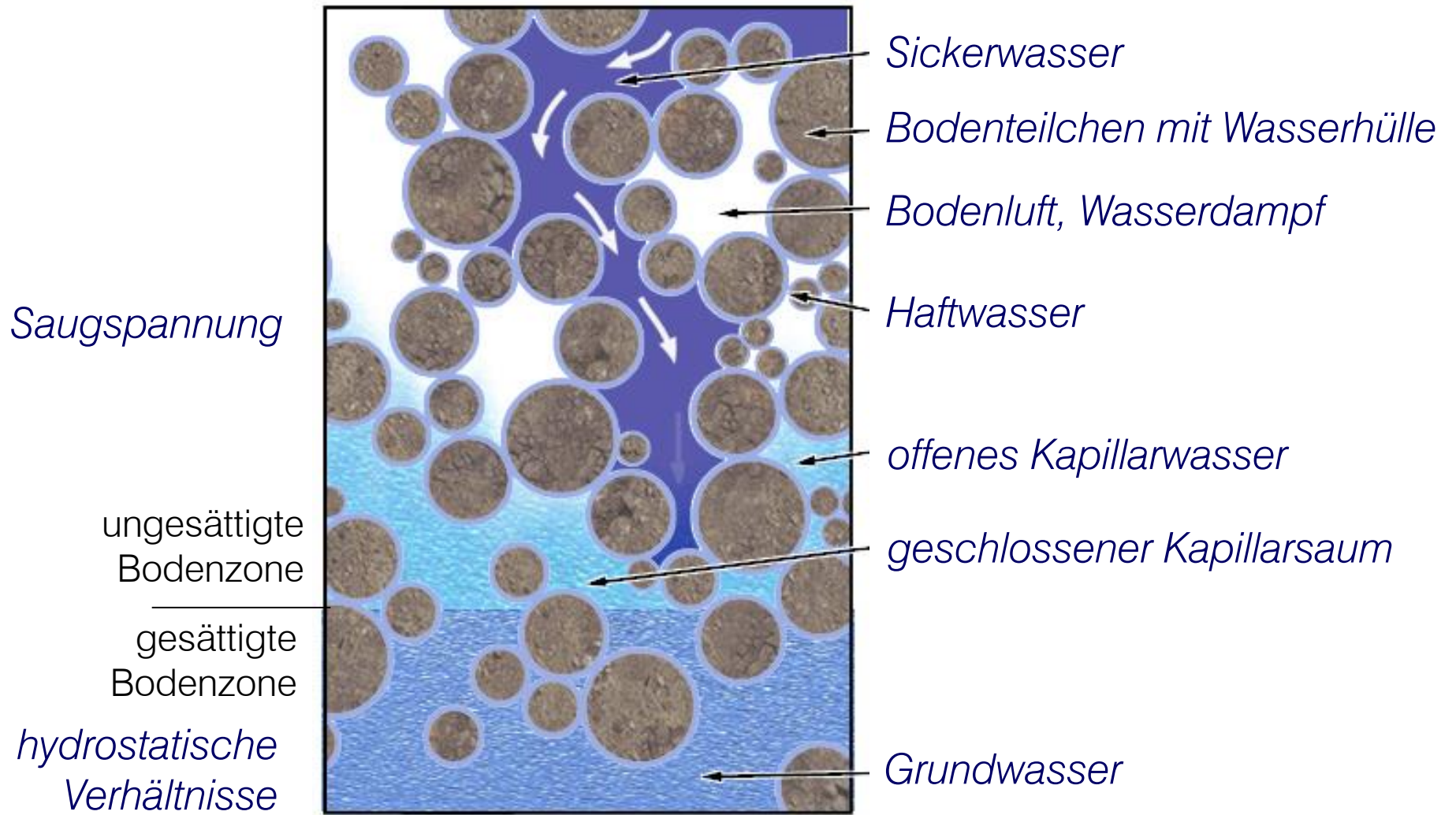
Auswaschung von Substanzen
z. B. Schüttelversuch DEV S4

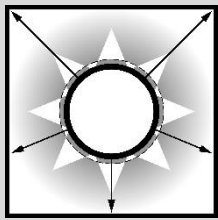
$$c_L = \frac{X_L}{m_w} \quad [\mu\text{g/l}], [\text{mg/l}]$$



3 Schadstoffausbreitung

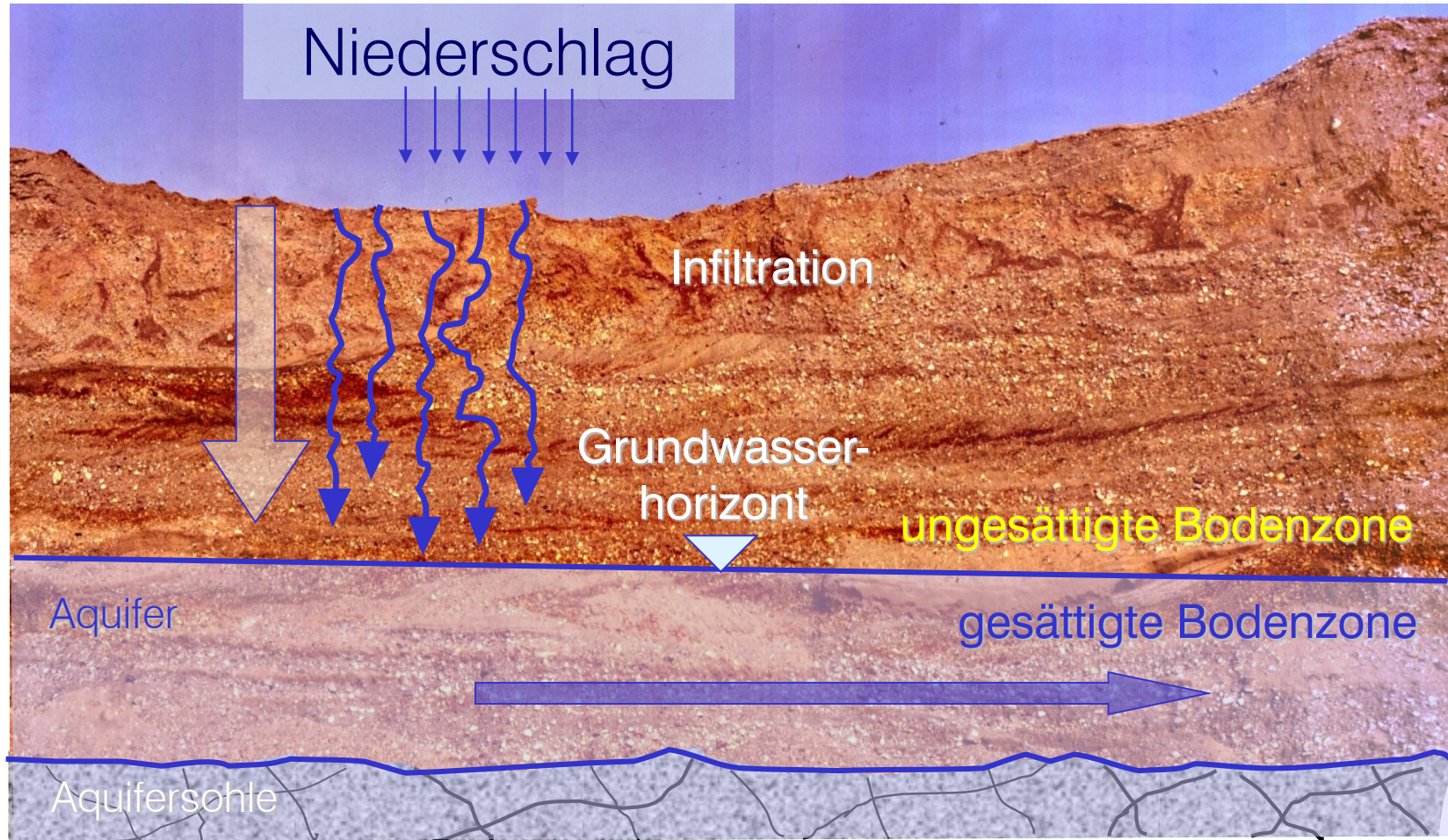
3.3 Wasser im Boden

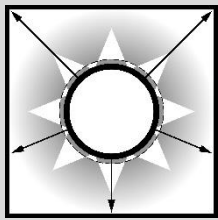




3 Schadstoffausbreitung

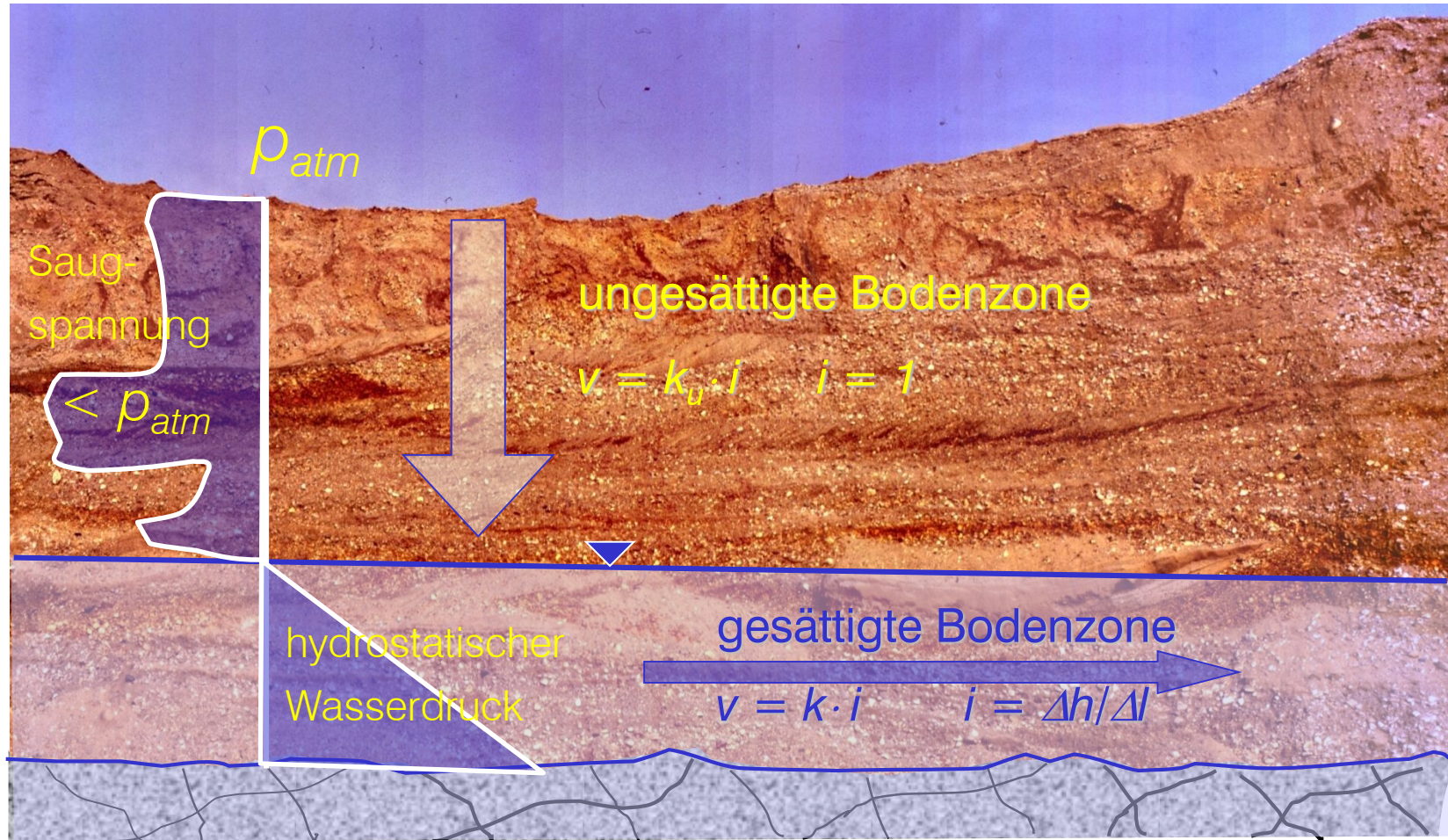
3.4 Infiltration und Grundwasserneubildung

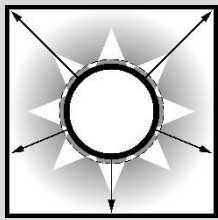




3 Schadstoffausbreitung

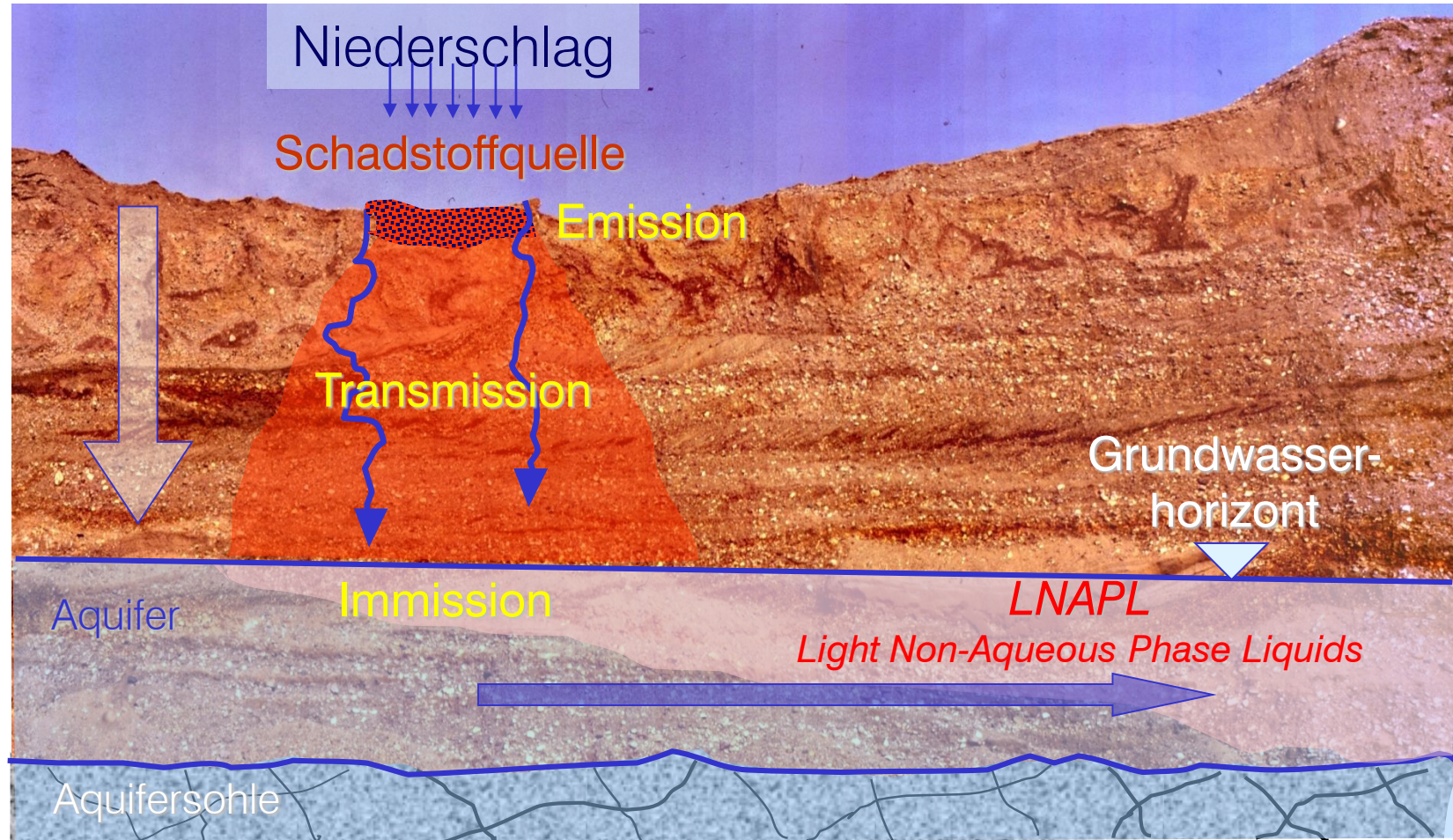
3.4 Infiltration und Grundwasserneubildung

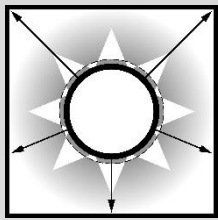




3 Schadstoffausbreitung

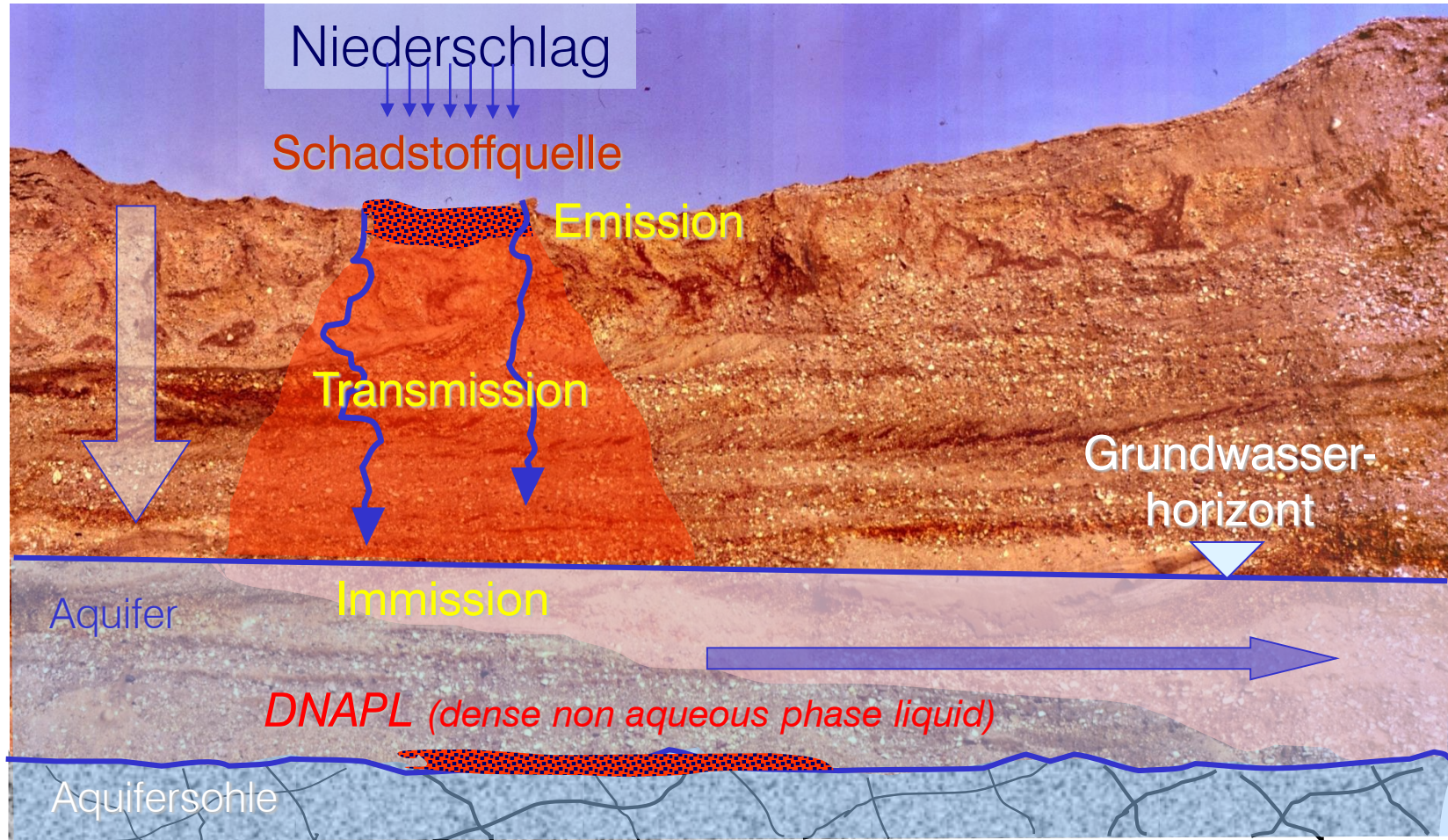
3.5 Emission - Transmission - Immission

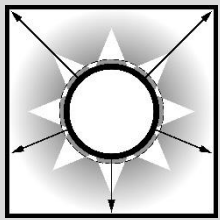




3 Schadstoffausbreitung

3.5 Emission - Transmission - Immission

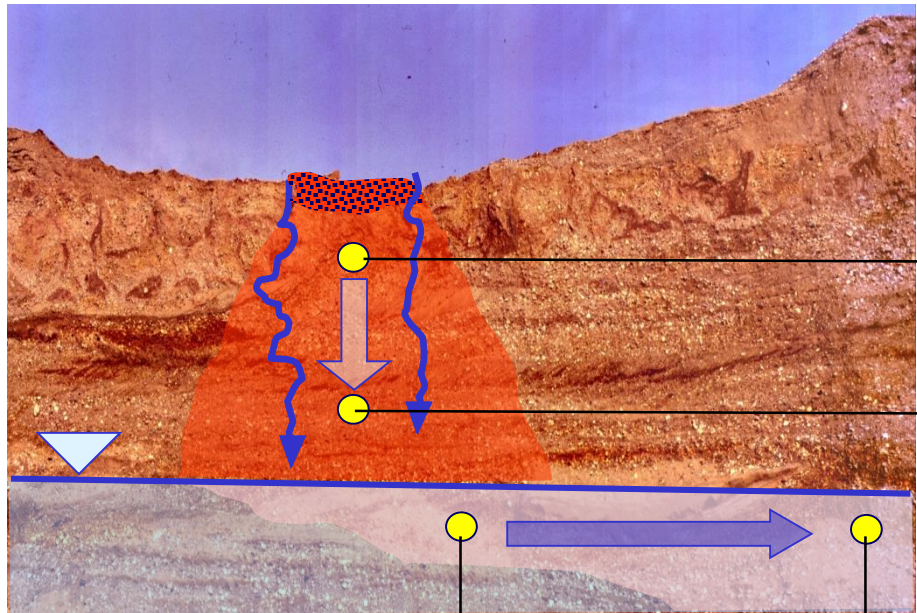




3 Schadstoffausbreitung

3.6 Konvektion und Advektion

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



$$t = t_n$$

$$t = t_n + \Delta t$$

$$t = t_m$$

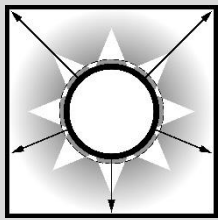
$$t = t_m + \Delta t$$

*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*

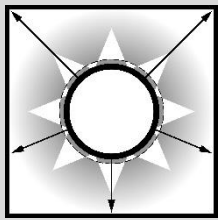
$$f_{diff} = -D_0 \cdot \nabla c$$

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

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

f_{diff} - diffusiver Massenfluss [kg/m²/s]

D_0 - molekularer Diffusionskoeffizient [m²/s]

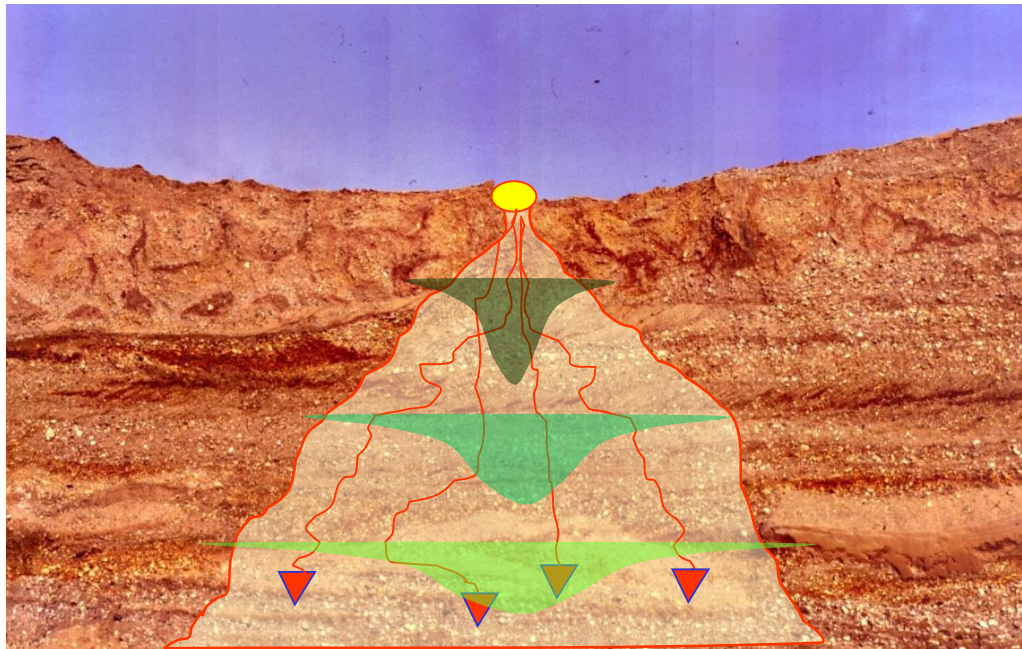


3 Schadstoffausbreitung

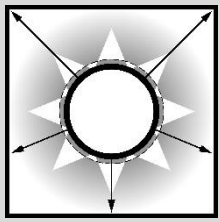
3.8 Mechanische Dispersion

... Fließgeschwindigkeitsvariation durch Verzweigungen der Fließwege im Korngefüge

... als Folge → räumliche Ausbreitung der Schadstofffront



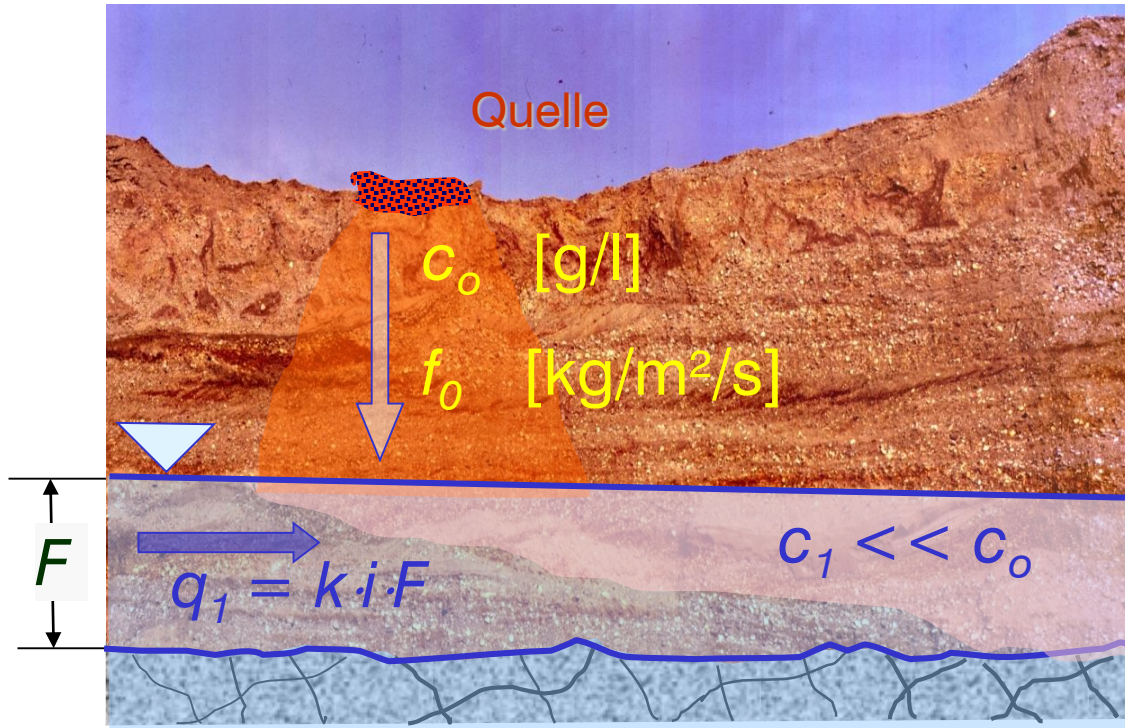
Konzentrationsabnahme in Richtung des Fließweges infolge Auffächerung der Schadstofffahne



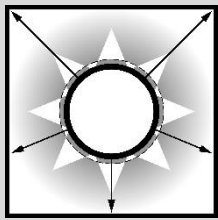
3 Schadstoffausbreitung

3.9 Verdünnung

... Verdünnung infolge der Mischung von Flüssigkeiten

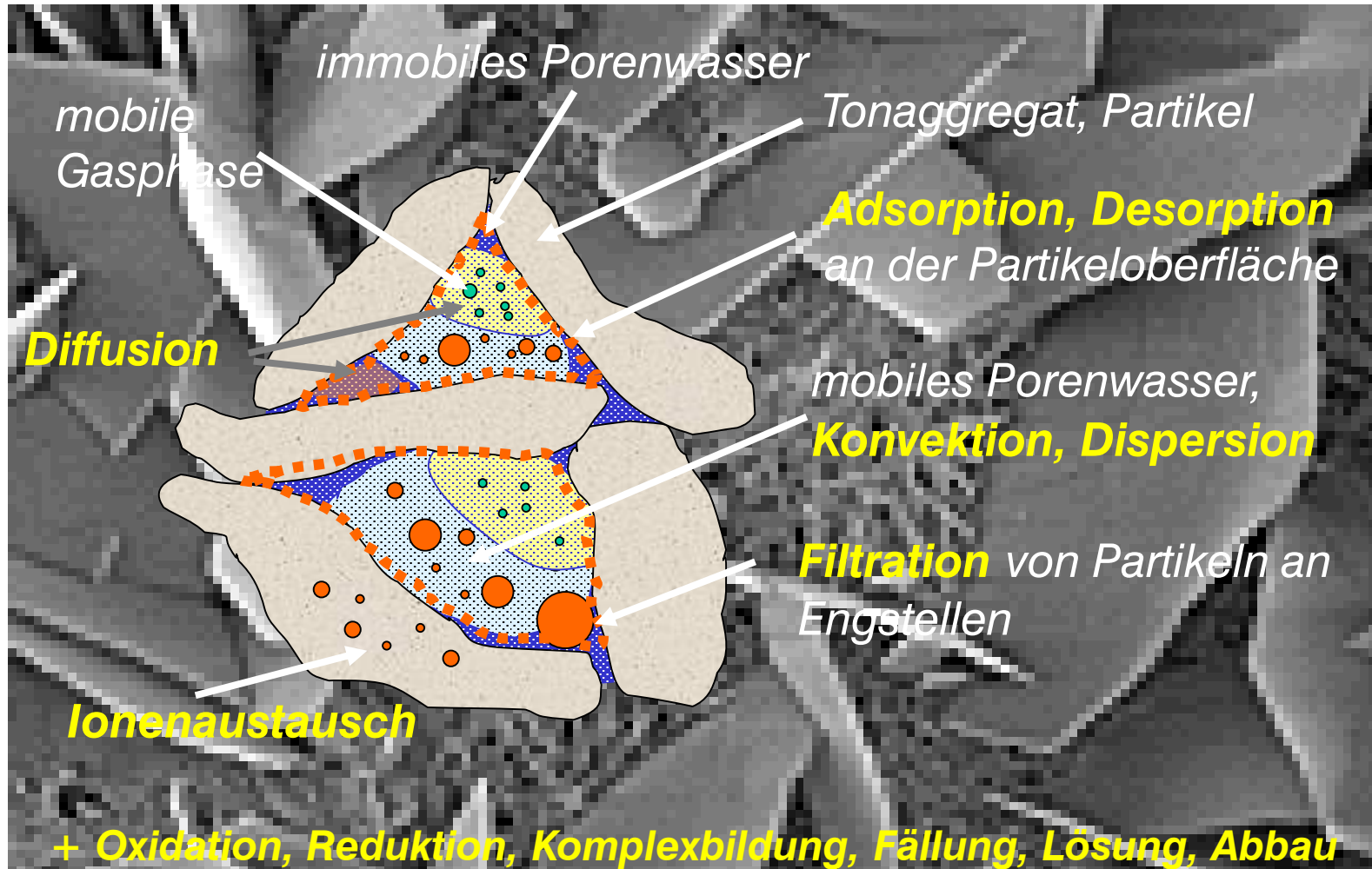


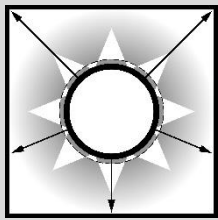
Der Massenfluss f_0 der Transmission gelangt in den Grundwasserstrom und verdünnt sich auf die Konzentration c_1



3 Schadstoffausbreitung

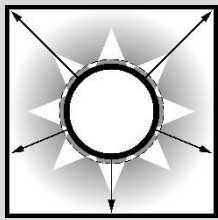
3.10 Sorption und Abbau





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

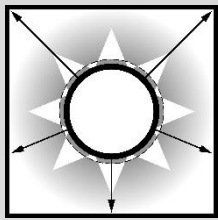


Rechtsverordnungen



Verwaltungsvorschriften





4 Boden als Abfall

4.1 Rechtliche Situation



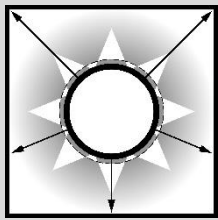
Länderarbeitsgemeinschaft Abfall

Mitteilung der
Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20

www.laga-online.de/mitteilungen

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





4 Boden als Abfall

4.1 Rechtliche Situation

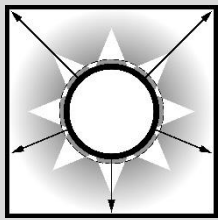


Länderarbeitsgemeinschaft Abfall

Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen:

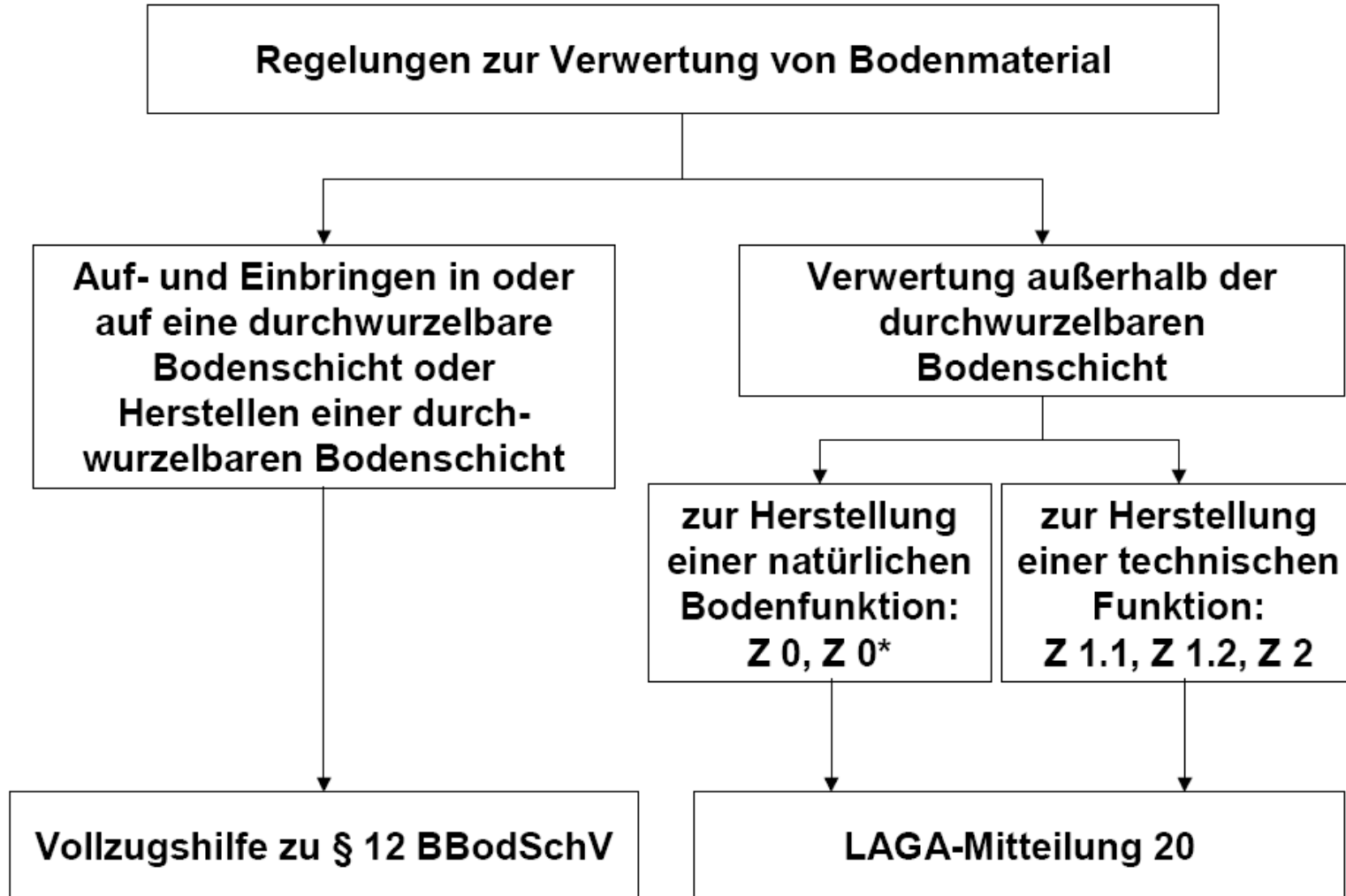
Teil II: Technische Regeln für die Verwertung

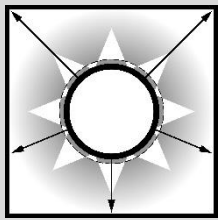
1.2 Bodenmaterial (TR Boden)



4 Boden als Abfall

4.1 Rechtliche Situation

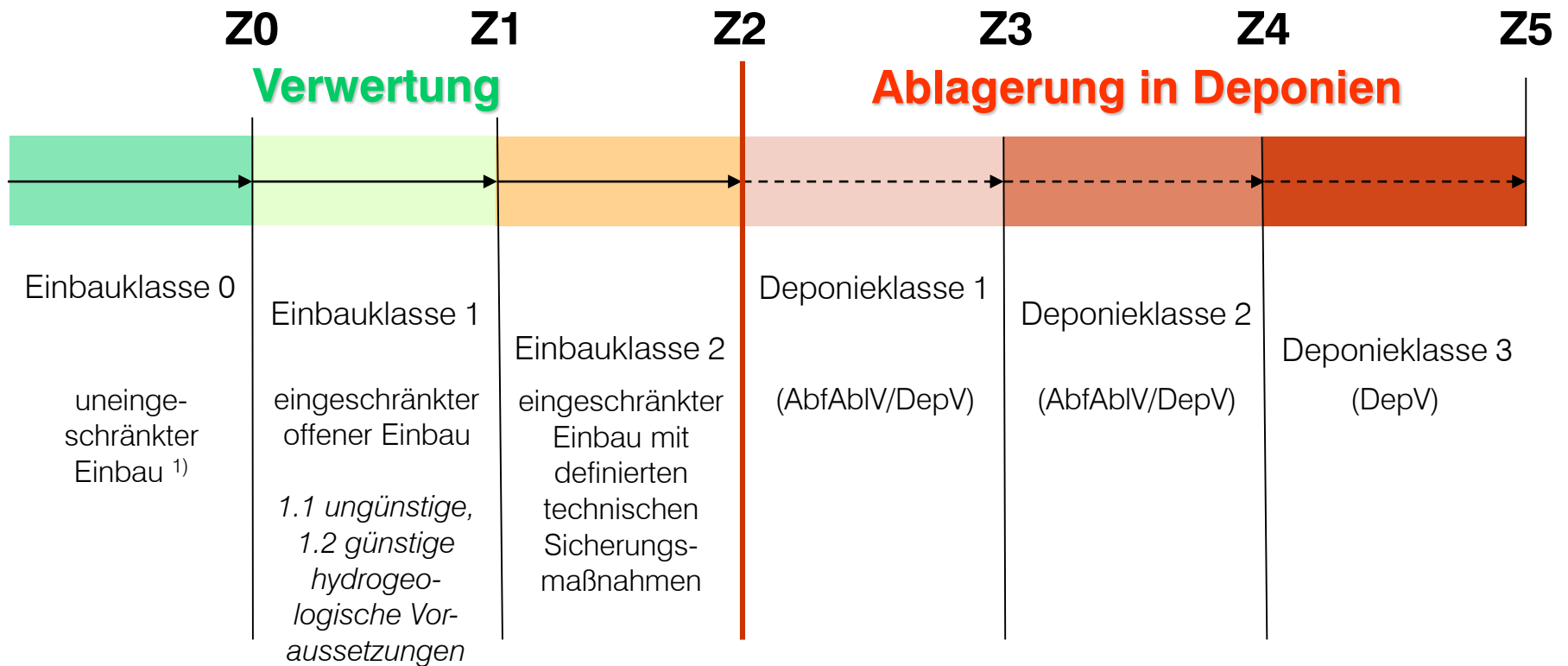




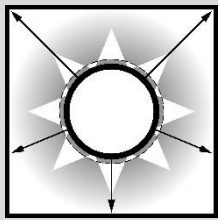
4 Boden als Abfall

4.2 Einbauklassen und Deponieklassen

Zuordnungswert (Obergrenze der Einbauklasse)



¹⁾ 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

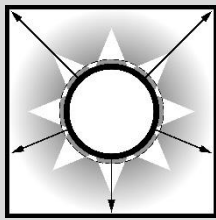
... bei unspezifischem Verdacht

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

Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen:

Teil II: Technische Regeln für die Verwertung

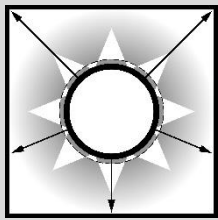
1.2 Bodenmaterial (TR Boden)



4 Boden als Abfall

4.4 Zuordnungswerte Feststoffgehalt

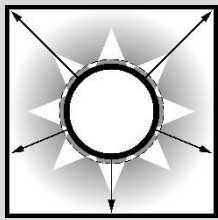
| Parameter | Dimension | Z 0 (Sand) | Z 0 (Lehm/Schluff) | Z 0 (Ton) | Z 0* ¹⁾ |
|--------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Arsen | mg/kg TS | 10 | 15 | 20 | 15 ²⁾ |
| Blei | mg/kg TS | 40 | 70 | 100 | 140 |
| Cadmium | mg/kg TS | 0,4 | 1 | 1,5 | 1 ³⁾ |
| 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 ⁴⁾ |
| 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) ⁵⁾ | 0,5 (1,0) ⁵⁾ | 0,5 (1,0) ⁵⁾ | 0,5 (1,0) ⁵⁾ |
| EOX | mg/kg TS | 1 | 1 | 1 | 1 ⁶⁾ |
| Kohlenwasserstoffe | mg/kg TS | 100 | 100 | 100 | 200 (400) ⁷⁾ |
| BTX | mg/kg TS | 1 | 1 | 1 | 1 |
| LHKW | mg/kg TS | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PCB ₆ | mg/kg TS | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,1 |
| PAK ₁₆ | 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

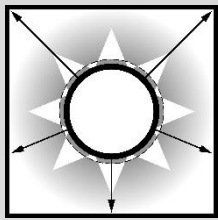
| Parameter | Dimension | Z 1 | Z 2 |
|--------------------|-----------|-------------------------|---------------------------|
| Arsen | mg/kg TS | 45 | 150 |
| Blei | mg/kg TS | 210 | 700 |
| Cadmium | mg/kg TS | 3 | 10 |
| Chrom (gesamt) | mg/kg TS | 180 | 600 |
| Kupfer | mg/kg TS | 120 | 400 |
| 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 ¹⁾ | 10 |
| Kohlenwasserstoffe | mg/kg TS | 300 (600) ²⁾ | 1000 (2000) ²⁾ |
| BTX | mg/kg TS | 1 | 1 |
| LHKW | mg/kg TS | 1 | 1 |
| PCB ₆ | mg/kg TS | 0,15 | 0,5 |
| PAK ₁₆ | mg/kg TS | 3 (9) ³⁾ | 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 | mg/L | 30 |
| Sulfat | 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 |



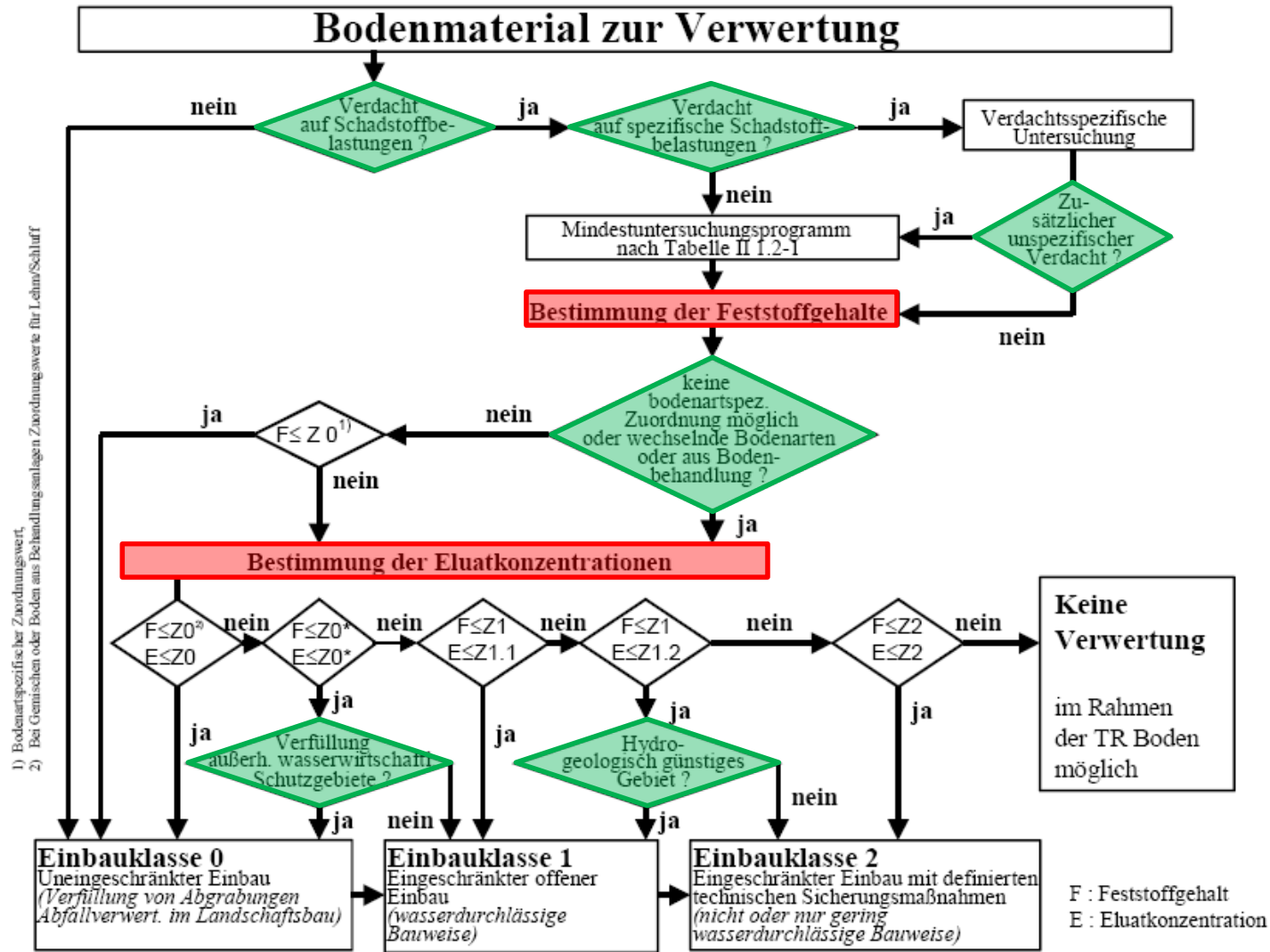
4 Boden als Abfall

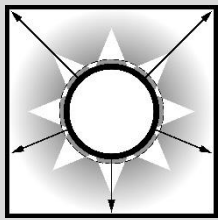
4.5 Zuordnungswerte Eluat-Konzentration

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

4 Boden als Abfall

4.6 Verwertungsprozess





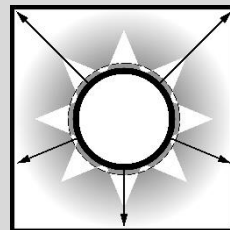
Literatur

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