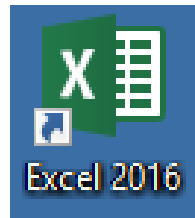
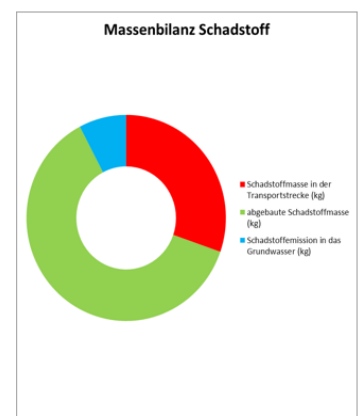
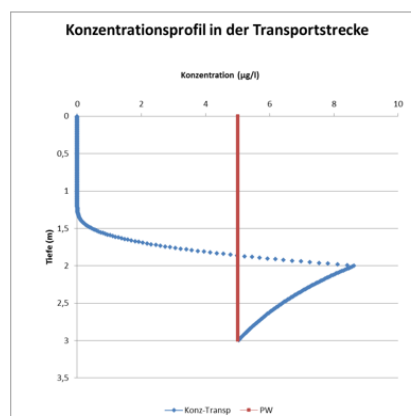
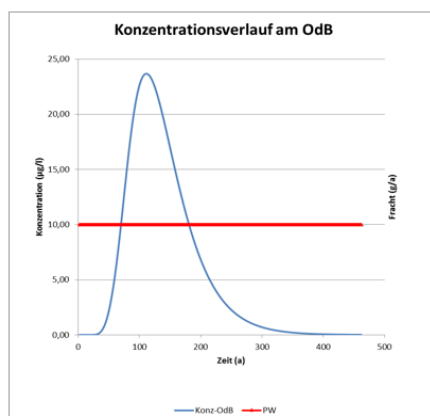
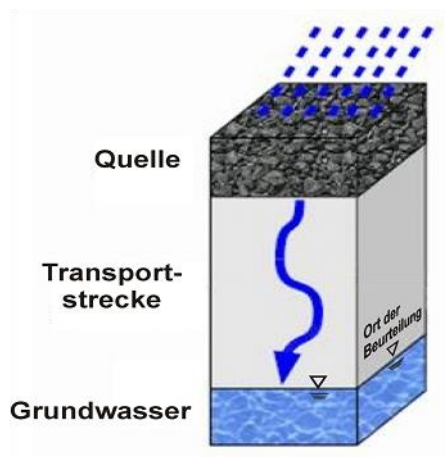


# ALTEX-1D

Anytische Lösung der 1D-Transportgleichung mit MS-EXCEL



## Benutzungsanleitung Version 3



(Stand 23.11.2018)

**Die Version 3 des Berechnungsinstrumentes für die Sickerwasserprognose ALTEX-1D wurde im Rahmen der LFP-Projekte B2.15 (Teil 1/Teil 2) und B1.17 entwickelt und durch das Länderfinanzierungsprogramm „Wasser, Boden und Abfall“ finanziert**

# Inhaltsverzeichnis

|               |                                                              |           |
|---------------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>B1</b>     | <b>Einleitung</b>                                            | <b>11</b> |
| <b>B1.1</b>   | <b>Entwicklungshistorie der Version 3</b>                    | <b>11</b> |
| <b>B1.2</b>   | <b>Änderungen in der Version 3 gegenüber der Version 2.4</b> | <b>11</b> |
| <b>B1.2.1</b> | <b>Benutzeroberfläche</b>                                    | <b>11</b> |
| <b>B1.2.2</b> | <b>Funktionalität</b>                                        | <b>12</b> |
| <b>B2</b>     | <b>Systemvoraussetzungen und Einstellungen</b>               | <b>13</b> |
| <b>B3</b>     | <b>Bearbeitungsablauf</b>                                    | <b>13</b> |
| <b>B3.1</b>   | <b>Programm-Steuerung</b>                                    | <b>13</b> |
| <b>B3.2</b>   | <b>Parameter-Eingabe</b>                                     | <b>16</b> |
| <b>B3.2.1</b> | <b>Arbeitsblatt „Projekt“</b>                                | <b>18</b> |
| <b>B3.2.2</b> | <b>Arbeitsblatt „Standort“</b>                               | <b>18</b> |
| <b>B3.2.3</b> | <b>Arbeitsblatt „Quelle“</b>                                 | <b>23</b> |
| <b>B3.2.4</b> | <b>Arbeitsblatt „Transport“</b>                              | <b>29</b> |
| <b>B3.3</b>   | <b>Durchführung der Berechnung</b>                           | <b>32</b> |
| <b>B3.4</b>   | <b>Erstellung eines Ergebnisberichtes</b>                    | <b>39</b> |
| <b>B3.5</b>   | <b>Anzeige der Stoffdatentabellen</b>                        | <b>41</b> |
| <b>B3.6</b>   | <b>Anzeige der Benutzungsanleitung (Kurzanleitung)</b>       | <b>41</b> |
| <b>B4</b>     | <b>Fallbeispiele</b>                                         | <b>41</b> |
| <b>B4.1</b>   | <b>Fallbeispiel 1 (Anorganik/Quelltyp A)</b>                 | <b>42</b> |
| <b>B4.1.1</b> | <b>Beschreibung des Falles (Wurfscheibenschießanlage)</b>    | <b>42</b> |
| <b>B4.1.2</b> | <b>Parametereingabe</b>                                      | <b>44</b> |
| <b>B4.1.3</b> | <b>Durchführung der Berechnung</b>                           | <b>50</b> |
| <b>B4.2</b>   | <b>Fallbeispiel 2 (Anorganik/Quelltyp B)</b>                 | <b>57</b> |
| <b>B4.2.1</b> | <b>Beschreibung des Falles (Abwasserverrieselungsfläche)</b> | <b>57</b> |
| <b>B4.2.2</b> | <b>Parametereingabe</b>                                      | <b>59</b> |
| <b>B4.2.3</b> | <b>Durchführung der Berechnung</b>                           | <b>63</b> |
| <b>B4.3</b>   | <b>Fallbeispiel 3 (Organik/Quelltyp A)</b>                   | <b>66</b> |
| <b>B4.3.1</b> | <b>Beschreibung des Falles (Bohrschlammgrube)</b>            | <b>66</b> |
| <b>B4.3.2</b> | <b>Parametereingabe</b>                                      | <b>68</b> |
| <b>B4.4</b>   | <b>Fallbeispiel 4 (Organik/Quelltyp B)</b>                   | <b>79</b> |
| <b>B4.4.1</b> | <b>Beschreibung des Falles (Rangierbahnhof)</b>              | <b>79</b> |
| <b>B4.4.2</b> | <b>Parametereingabe</b>                                      | <b>81</b> |
| <b>B4.4.3</b> | <b>Durchführung der Berechnung</b>                           | <b>86</b> |
| <b>B5</b>     | <b>Anhang</b>                                                | <b>89</b> |
| <b>B5.1</b>   | <b>Fachliche Grundlagen</b>                                  | <b>89</b> |
| <b>B5.1.1</b> | <b>Allgemein</b>                                             | <b>89</b> |

|                 |                                                                                |            |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>B5.1.2</b>   | <b>Neue Funktionalitäten in Version 3</b>                                      | <b>90</b>  |
| <b>B5.2</b>     | <b>Test und Validierung der Version 3</b>                                      | <b>91</b>  |
| <b>B5.2.1</b>   | <b>Allgemeine Vorgehensweise</b>                                               | <b>91</b>  |
| <b>B5.2.2</b>   | <b>Vergleich zwischen den ALTEX-1D Versionen 2.4 (alt) und 3 (neu)</b>         | <b>92</b>  |
| <b>B5.2.3</b>   | <b>Eignung von Hydrus-1D als Vergleichsmodell</b>                              | <b>98</b>  |
| <b>B5.2.4</b>   | <b>Validierung der Version 3 für die Berechnung von Konzentrationsprofilen</b> | <b>99</b>  |
| <b>B5.2.4.1</b> | <b>Vergleich mit Hydrus-1D</b>                                                 | <b>99</b>  |
| <b>B5.2.4.2</b> | <b>Vergleich mit Mathematica</b>                                               | <b>99</b>  |
| <b>B5.2.4.3</b> | <b>Vergleich mit Ergebnissen aus Feldmessungen</b>                             | <b>102</b> |
| <b>B5.3</b>     | <b>Hinweise zur Ermittlung der Eingabeparameter</b>                            | <b>107</b> |
| <b>B5.3.1</b>   | <b>Standort</b>                                                                | <b>107</b> |
| <b>B5.3.2</b>   | <b>Quelle</b>                                                                  | <b>108</b> |
| <b>B5.3.3</b>   | <b>Transport</b>                                                               | <b>109</b> |
| <b>B6</b>       | <b>Literatur</b>                                                               | <b>111</b> |

## Tabellenverzeichnis

|          |                                                                                                                               |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tab. 1:  | Ergebnisse der Bodenuntersuchungen für das Fallbeispiel 1                                                                     |
| Tab. 2:  | schichtspezifische Bodenparameter für das Fallbeispiel 1                                                                      |
| Tab. 3:  | Ergebnisse der Eluatuntersuchungen                                                                                            |
| Tab. 4:  | Stoffdaten für Blei und Antimon                                                                                               |
| Tab. 5:  | Eingabeparameter zur Beschreibung der Schadstoffquelle                                                                        |
| Tab. 6:  | schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte Feldkapazität/Luftkapazität                             |
| Tab. 7:  | schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der kd-Werte für Blei und Antimon                                          |
| Tab. 8:  | Kenngößen für die Sickerwasserprognose zum Zeitpunkt 40 Jahre nach Beginn des Schießbetriebes                                 |
| Tab. 9:  | Mittlere Blei- und Antimon-Gehalte für die Schicht 1                                                                          |
| Tab. 10: | Kenngößen für die Sickerwasserprognose zum Zeitpunkt der Prüfwert-unterschreitung (J. n. EB : Jahre nach Emissionsbeginn)     |
| Tab. 11: | Kenngößen für die Sickerwasserprognose bei Simulation einer Sanierung mit Beseitigung der Quelle nach 40 Jahren Schießbetrieb |
| Tab. 12: | Ergebnisse der Bodenuntersuchungen auf der Verrieselungsfläche                                                                |
| Tab. 13: | schichtspezifische Bodenparameter                                                                                             |
| Tab. 14: | Ergebnisse des Säulenversuches                                                                                                |
| Tab. 15: | Stoffdaten für Cadmium                                                                                                        |
| Tab. 16: | Eingabeparameter zur Beschreibung der Schadstoffquelle ohne und mit Maßnahme zur Mobilitätskontrolle                          |
| Tab. 17: | schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte Feldkapazität/Luftkapazität                             |
| Tab. 18: | schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der kd-Werte für Szenario 1 (Ausgangszustand)                              |
| Tab. 19: | schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der kd-Werte für Szenario 2 (Maßnahme zur Mobilitätskontrolle)             |

- Tab. 20: Kenngrößen für die Sickerwasserprognose zum Zeitpunkt der Prüfwertunterschreitung (Szenario 1: Ausgangszustand nach 50 Jahren Verrieselungsbetrieb)
- Tab. 21: Kenngrößen für die Sickerwasserprognose zum Zeitpunkt der Prüfwertunterschreitung (Szenario 2: nach Durchführung einer Maßnahme zur Mobilitätskontrolle)
- Tab. 22: Ergebnisse der Feststoff-Untersuchungen des Deponats
- Tab. 23: Ergebnisse der Eluat-Untersuchungen der MP-S3
- Tab. 24: schichtspezifische Bodenparameter für das Fallbeispiel 3
- Tab. 25: Stoffdaten für Benzol, n-Decan und Naphthalin (EW für n-Decan entspricht dem PW der BBodSchV für MKW)
- Tab. 26: Eingabeparameter zur Beschreibung der Schadstoffquelle für das Fallbeispiel 3
- Tab. 27: schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte Feldkapazität/Luftkapazität
- Tab. 28: schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der  $k_d$ -Werte für Benzol, n-Decan und Naphthalin
- Tab. 29: Kenngrößen für die Sickerwasserprognose (aktueller Zustand 55 a nach Emissionsbeginn)
- Tab. 30: Kenngrößen für die Sickerwasserprognose bei Betrachtung des Gesamtzeitraumes
- Tab. 31: Ergebnisse der Feststoff- und Eluatuntersuchungen des mit Diuron belasteten Oberbodens
- Tab. 32: schichtspezifische Bodenparameter für das Fallbeispiel 4
- Tab. 33: Stoffdaten für Diuron
- Tab. 34: Eingabeparameter zur Beschreibung der Schadstoffquelle
- Tab. 35: schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte Feldkapazität/Luftkapazität
- Tab. 36: schichtspezifische Eingabeparameter zur Berechnung der  $k_d$ -Werte für Diuron
- Tab. 37: Kenngrößen der Sickerwasserprognose für Diuron

## Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Aktivierung der Makros beim erstmaligen Start des Programmes
- Abb. 2a: Excel-Menüband mit Registerkarte ALTEX-1D
- Abb. 2b: Fenster unter Menüpunkt „Informationen“
- Abb. 3: Arbeitsblatt-Register in ALTEX-1D nach dem Start der Anwendung (ALTEX-1D aktiv)
- Abb. 4: Start-Arbeitsblatt von ALTEX-1D
- Abb. 5a: Auswahlfenster für Arbeitsblätter beim Rechts-Klick auf eine Arbeitsblatt-Registerkarte (bspw. „Projekt“)
- Abb. 5b: Arbeitsblatt-Register in ALTEX-1D nach Durchführung einer Berechnung (ErgebnisausgabeA aktiv)
- Abb. 6: Optionsfeld mit Pfeilsymbol zur Auswahl der Methode zur Berechnung der Sickerwasserrate
- Abb. 7a: Schaltfläche zur Anzeige der Eingabemaske „Schadstoff Auswahl“
- Abb. 7b: Eingabemaske „Schadstoff-Auswahl“ (Cadmium)
- Abb. 8: Warnhinweis bei Verletzung eines Plausibilitätskriteriums für die Eingabe
- Abb. 9: Arbeitsblatt „Projekt“ zur Eingabe allgemeiner Projektinformationen
- Abb. 10: Arbeitsblatt „Standort“ zur Eingabe der Parameter für die Standortbeschreibung
- Abb. 11: Auswahl der Methode zur Sickerwasser-Berechnung

Abb. 12: Eingabeparameter zur Berechnung der Sickerwasserrate nach dem Verfahren „Beims/Gutt“

Abb. 13: Optionsfelder zur Auswahl der „Beims/Gutt“-Parameter zur Berechnung der Sickerwasserrate

Abb. 14: Eingabeparameter zur Beschreibung der Transportstrecke

Abb. 15: Felder für die Eingabe des typischen Schichtprofils

Abb. 16: „Dropdown“-Liste zur Auswahl der Bodenart

Abb. 17: „Dropdown“-Liste zur Auswahl eines Festgesteins

Abb. 18: konzeptionelle Skizze zur Ermittlung der Länge der Kontaminationsfläche in Grundwasserfließrichtung

Abb. 19: Arbeitsblatt „Quelle“ zur Eingabe der Parameter für die Beschreibung der Quelle

Abb. 20: Eingabemaske zur Auswahl des Schadstoffes (Anorganischer Schadstoff)

Abb. 21: Auswahl des Schadstoffes durch Eingabe des Schadstoffnamens in das Feld „Suche“

Abb. 22: Eingabemaske zur Auswahl des Schadstoffes (Organischer Schadstoff)

Abb. 23: Eingabeparameter zur Ermittlung der Schadstoffmasse (Ermittlung über Kubatur)

Abb. 24: Eingabeparameter zur Ermittlung der Schadstoffmasse über Sondierungen

Abb. 25: Eingabeparameter zur Beschreibung des Schadstofffreisetzungsverhaltens

Abb. 26: Eingabeparameter zur schichtweisen Beschreibung der Transportstrecke im Arbeitsblatt „Transport“

Abb. 27: Eingabeparameter zur schichtspezifischen Beschreibung der Transportstrecke für anorganische Schadstoffe

Abb. 28: Eingabeparameter zur schichtspezifischen Beschreibung der Transportstrecke für organische Schadstoffe

Abb. 29: Eingabefenster zum Start der Berechnung

Abb. 30: Informationsfenster zum Fortschritt der Berechnung

Abb. 31: Arbeitsblatt-Register nach dem Ende der Berechnung

Abb. 32: Darstellung der Eingabeparameter zum Standort im Arbeitsblatt „ErgebnisausgabeA bzw. ErgebnisausgabeB“

Abb. 33: Darstellung der Eingabeparameter zur Beschreibung der Quelle im Arbeitsblatt „ErgebnisausgabeA bzw. ErgebnisausgabeB“

Abb. 34: Darstellung der Transport-Kennwerte im Arbeitsblatt „ErgebnisausgabeA bzw. ErgebnisausgabeB“

Abb. 35: Darstellung der Prognose-Ergebnisse im Arbeitsblatt „ErgebnisausgabeA bzw. ErgebnisausgabeB“

Abb. 36: Graphische Darstellung des Konzentrationsverlaufes am OdB und des Konzentrationsprofils im Arbeitsblatt „ErgebnisausgabeA bzw. ErgebnisausgabeB“

Abb. 37: Graphische Darstellung der Schadstoffverteilung in der Transportstrecke und der Massenbilanz im Arbeitsblatt „ErgebnisausgabeA bzw. ErgebnisausgabeB“

Abb. 38: Zeitliche Entwicklung der Jahreswerte von Konzentrationen und Frachten im Arbeitsblatt „Jahreswerte am OdB“

Abb. 39: Ausgabe der vertikalen Schadstoffverteilung in der Transportstrecke im Arbeitsblatt „Werte Tiefenprofil“

Abb. 40: Schaltfläche zur Ausgabe des Ergebnisberichts (pdf-Datei)

Abb. 41: Ergebnisbericht (Seite 1) der Sickerwasserprognose (pdf-Datei)

Abb. 42: Abfrage zur Speicherung des Ergebnisberichts als pdf-Datei

- Abb. 43: Schaltfläche zur Auswahl und Anzeige der Stoffdatentabellen (Anorganik/Organik)
- Abb. 44: Schaltfläche zur Anzeige der Benutzungsanleitung (Kurzfassung)
- Abb. 45: Standortskizze und standorttypisches Schichtprofil für das Fallbeispiel 1
- Abb. 46: Projektinformationen im Arbeitsblatt „Projekt“
- Abb. 47: Eingabedaten zur Standortbeschreibung im Arbeitsblatt „Standort“ für das Fallbeispiel 1
- Abb. 48: Auswahl des Schadstoffes Antimon im Eingabefenster „Schadstoff-Auswahl“
- Abb. 49: Eingabedaten zur Beschreibung der Quelle im Arbeitsblatt „Quelle“ für den Schadstoff Antimon
- Abb. 50: Eingabefenster „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ im Arbeitsblatt „Transport“ für den Schadstoff Antimon
- Abb. 51: Auswahlfenster zur Berechnung der Situation nach 40 Jahren Schießbetrieb
- Abb. 52: Vertikalprofil der im Sickerwasser gelösten Bleikonzentration in der Transportstrecke nach 40 Jahren Schießbetrieb für die Varianten 1 (kd BGR) und 2 (kd vdBR)
- Abb. 53: Vertikalprofil der im Sickerwasser gelösten Antimonkonzentration in der Transportstrecke nach 40 Jahren Schießbetrieb
- Abb. 54: Verlauf der Bleikonzentration im Sickerwasser (Berechnung bis Unterschreitung PW)
- Abb. 55: Verlauf der Antimonkonzentration im Sickerwasser am OdB (Berechnung bis Unterschreitung PW)
- Abb. 56: Verlauf der Quellkonzentration bei einem „fiktiven“ Antimongehalt der Quelle von 8,6 mg/kg
- Abb. 57: Verlauf der Antimonkonzentration im Sickerwasser am OdB nach einer simulierten Sanierungsmaßnahme (Beseitigung der Quelle nach 40 Jahren Schießbetrieb)
- Abb. 58: Standortskizze und standorttypisches Schichtprofil für das Fallbeispiel 2
- Abb. 59: Eingabedaten zur Standortbeschreibung im Arbeitsblatt „Standort“ für das Fallbeispiel 2
- Abb. 60: Eingabedaten zur Beschreibung der Quelle im Arbeitsblatt „Quelle“ für den Schadstoff Cadmium
- Abb. 61: Eingabefenster „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ im Arbeitsblatt „Transport“ für den Schadstoff Cadmium (Ausgangszustand)
- Abb. 62: Verlauf der Cadmium-Konzentration am OdB für das Szenario 1 (Ausgangszustand nach 50 Jahren Verrieselungsbetrieb)
- Abb. 63: Verlauf der Cadmium-Konzentration am OdB nach Durchführung einer Maßnahme zur Mobilitätskontrolle (Einfräsen von basischem Bodenmaterial)
- Abb. 64: Standortskizze und standorttypisches Schichtprofil für Fallbeispiel 3 (Bohrschlammgrube)
- Abb. 65: Eingabedaten zur Standortbeschreibung im Arbeitsblatt „Standort“ für das Fallbeispiel 3
- Abb. 66: Auswahl des Schadstoffes Benzol im Eingabefenster „Schadstoff-Auswahl“
- Abb. 67: Eingabedaten zur Beschreibung der Quelle im Arbeitsblatt „Quelle“ für den Schadstoff Benzol
- Abb. 68: Eingabefenster „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ im Arbeitsblatt „Transport“ für den Schadstoff Benzol
- Abb. 69: Verlauf der Benzol-Konzentration am OdB und Profil der Benzol-Konzentration (Halbwertszeit: Maximalwert der Spannweite) für den aktuellen Zustand (55 a nach Emissionsbeginn)

Abb. 70: Schadstoffverteilung in der Transportstrecke und Massenbilanz für Benzol für den aktuellen Zustand (55 a nach Emissionsbeginn)

Abb. 71: Konzentrationsverlauf am OdB und Massenbilanz für Benzol bei Annahme einer Halbwertszeit von 0,4 a (aktueller Zustand 55 a nach Emissionsbeginn)

Abb. 72: Konzentrationsverlauf am OdB für n-Decan und Naphthalin (Halbwertszeit: Maximalwert der Spannweite) für den aktuellen Zustand (55 a nach Emissionsbeginn)

Abb. 73: Massenbilanzen für n-Decan und Naphthalin (Halbwertszeit: Maximalwert der Spannweite) für den aktuellen Zustand (55 a nach Emissionsbeginn)

Abb. 74: Konzentrationsverlauf am OdB (Gesamtzeitraum bis zur PW-Unterschreitung) für Benzol und Naphthalin bei Annahme der maximalen Halbwertszeit

Abb. 75: Konzentrationsverlauf am OdB für Benzol und Naphthalin bei Annahme einer reduzierten Halbwertszeit (Benzol: 0,4 a, Naphthalin: 0,8 a)

Abb. 76: Standortskizze und standorttypisches Schichtprofil für Fallbsp. 4 (Rangierbahnhof)

Abb. 77: Eingabedaten zur Standortbeschreibung im Arbeitsblatt „Standort“ für das Fallbeispiel 4

Abb. 78: Auswahl des Schadstoffes Diuron im Eingabefenster „Schadstoff-Auswahl“

Abb. 79: Eingabedaten zur Beschreibung der Quelle im Arbeitsblatt „Quelle“ für den Schadstoff Diuron

Abb. 80: Eingabefenster „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ im Arbeitsblatt „Transport“ für den Schadstoff Diuron

Abb. 81: Ergebnis der Sickerwasserprognose für den Schadstoff Diuron

## **Tabellen Anhang**

Tab. 1: Vergleich der mit Hydrus-1D, Mathematica und ALTEX-1D (Version 3) berechneten Massenbilanz für das Fallbeispiel 3 der Arbeitshilfe DU [1] zum Zeitpunkt 100 a nach Emissionsbeginn

Tab. 2: Bodenparameter der Transportstrecke für Fallbeispiel 1a

Tab. 3: Verwendete Daten zur Validierung des Cadmiumprofils

Tab. 4: Hinweise zu den Parameterwerten im Arbeitsblatt „Standort“

Tab. 5: Hinweise zu den Parameterwerten im Arbeitsblatt „Quelle“

Tab. 6: Hinweise zu den Parameterwerten zur Ermittlung der Bodenkennwerte im Arbeitsblatt „Transport“

Tab. 7: Hinweise zu den Parameterwerten zur Ermittlung der  $k_d$ -Werte im Arbeitsblatt „Transport“

## **Abbildungen Anhang**

Abb. 1: Konzeptionelle Modellvorstellung für die Sickerwasserprognose mit ALTEX-1D

Abb. 2: Aufbau der Transportstrecke für Fallbeispiel 1a

Abb. 3: Vergleich der Ergebnisse zwischen den ALTEX-1D Versionen 2.4 und 3 für den Quelltyp A und organische Schadstoffe (Monte Carlo Simulation)

Abb. 4: Vergleich der Ergebnisse zwischen den ALTEX-1D Versionen 2.4 und 3 für den Quelltyp A und anorganische Schadstoffe (Monte Carlo Simulation)

Abb. 5: Vergleich der Ergebnisse zwischen den ALTEX-1D Versionen 2.4 und 3 für den Quelltyp B und organische Schadstoffe (Monte Carlo Simulation)

Abb. 6: Vergleich der Ergebnisse zwischen den ALTEX-1D Versionen 2.4 und 3 für den Quelltyp B und anorganische Schadstoffe (Monte Carlo Simulation)

Abb. 7: Vergleich der berechneten Konzentrations-Ganglinien am Ort der Beurteilung für den 3-Schicht-Fall (Fallbeispiel 1A Arbeitshilfe DU; Quelltyp A)

Abb. 8: Mit Hydrus-1D berechnete Konzentrationsprofile für den 3-Schicht-Fall (Fallbeispiel 1a Arbeitshilfe DU, Quelltyp A)

Abb. 9: Mit Hydrus-1D berechnete Konzentrationsprofile für den 3-Schicht-Fall (Fallbeispiel 1a Arbeitshilfe DU; Quelltyp B)

Abb. 10: Mit HYDRUS-1D berechnetes Konzentrationsprofil für den 3-Schicht-Fall (Fallbeispiel 1a der Arbeitshilfe DU) im Vergleich zu dem mit Mathematica und ALTEX-1D (Version 3) berechneten Profil (äquivalente Parameter)

Abb. 11: Gemessener Wassergehalt im Tiefenprofil und in ALTEX-1D verwendete Wassergehalte

Abb. 12: Gemessene und mit der Version 3 von ALTEX-1D berechnete Konzentrationsprofile für Chlorid

Abb. 13: Vergleich zwischen den mit ALTEX-1D (Version 3) berechneten und den gemessenen Cadmiumkonzentrationen für den Zeitpunkt  $t = 111$  Jahre im Tiefenprofil

Abb. 14: Abschätzformel für den Dispersivitäts-Skalenfaktor

Abb. 15: Abschätzformel für die Trockenraumdichte



## B1 Einleitung

### B1.1 Entwicklungshistorie der Version 3

Der Altlastenausschuss (ALA) der Länderarbeitsgemeinschaft Boden (LABO) hat zur fachlichen Unterstützung des Vollzuges bei der Durchführung von Sickerwasserprognosen nach der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) zwei Arbeitshilfen (AH) erstellt, die von der Umweltministerkonferenz (UMK) den Ländern zur Anwendung im Vollzug empfohlen wurden. Die Arbeitshilfen beschreiben die Vorgehensweise bei der Orientierenden Untersuchung (OU) und der Detailuntersuchung (DU).

Die Arbeitshilfe DU [1] enthält als Anhang 3 das Berechnungsinstrument ALTEX-1D (Anytische Lösung der 1-dimensionalen Transportgleichung mit Excel). Damit kann die zeitliche Entwicklung von Stoffkonzentrationen und –frachten für den Ort der Beurteilung (OdB) quantitativ abgeschätzt werden. Die bisherige Version 2.4 vom 23.2.2010 wird von der LABO über einen Link zur Webseite des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG) zum Herunterladen bereitgestellt. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes TASK (Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum) wurde im Jahr 2012 für die Vollzugsbehörden der Länder eine Schulungsmaßnahme zur praktischen Anwendung von ALTEX-1D durchgeführt. Dabei wurde von zahlreichen Teilnehmern eine Weiterentwicklung von ALTEX-1D im Hinblick auf Benutzerfreundlichkeit und zusätzlicher Funktionalität angeregt. Dies betraf insbesondere die Punkte Benutzerfreundlichkeit (u. a. automatisierte Übernahme von Eingaben zwischen den Hilfstabellenblättern und den Haupttabellenblättern, einfachere Handhabung insbesondere bei mehrschichtigen Bodenprofilen und flüchtigen Stoffen, Integration einer Suchfunktion in den Stoffdatenblättern, automatische Erzeugung der Eingabetabellen für schichtbezogene Parameter entsprechend der vorgegebenen Schichtanzahl, automatische Erstellung eines Ergebnisberichtes) und Erweiterung der Funktionalität (u. a. Berechnung von Konzentrationsprofilen, Berechnung für einen vom Anwender vorgebbaren Berechnungszeitpunkt, Erstellung von Massenbilanzen, Berücksichtigung der Feldkapazität von Festgesteinen).

Die fachlichen Schwerpunkte der Weiterentwicklung wurden mit den ALA-Mitgliedern abgestimmt und eine Priorisierung durchgeführt. Die softwaretechnischen Entwicklungsarbeiten wurden im April 2016 begonnen und nach einer umfangreichen internen Testphase Ende April 2018 mit der Vorlage der vorläufigen Version 3 abgeschlossen. Diese wurde Anfang Mai 2018 ausgewählten Ländern für eine externe Testphase zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse der externen Testphase wurden bei der Erstellung der finalen Version 3.3.6 (Stand: 15.11.2018) berücksichtigt.

### B1.2 Änderungen in der Version 3 gegenüber der Version 2.4

Entsprechend dem wesentlichen Ziel der Weiterentwicklung zeichnet sich die neue Version 3 vor allem durch eine grundlegend veränderte Benutzeroberfläche (s. a. Pkt. B3.1) aus. Darüber hinaus enthält die Version 3 auch Erweiterungen der Funktionalität.

#### B1.2.1 Benutzeroberfläche

Zu den wesentlichen Änderungen bei der Bedienung zählen:

- Vollständige Integration der Programm-Steuerung in die Excel-Umgebung,

- Strukturierung des Arbeitsablaufes (Workflow) entsprechend der konzeptionellen Vorgehensweise bei der Sickerwasserprognose (s. a. Kap. 4.2 Arbeitshilfe DU [1]) durch Eingabe in den Tabellenblättern „Standort“, „Quelle“, „Transport“ (kein Ausfüllen von Hilfstabellenblättern mit manueller Übertragung von Zwischenergebnissen mehr erforderlich),
- Eingabesteuerung über Auswahlfelder mit Drop-Down-Listen,
- Bereitstellung von speziell gestalteten Masken zur Eingabe von Daten („User-Forms“) mit Auswahlfeldern,
- Automatische Übernahme der Eingabedaten in die Tabellenblätter,
- Integration der sogenannten „äquivalenten Parameter“ zur direkten Berücksichtigung mehrschichtiger Profile und der Flüchtigkeit von Schadstoffen in den grundsätzlichen Berechnungsablauf (keine Fallunterscheidung einschichtig/mehrschichtig oder flüchtiger Stoff mehr notwendig),
- Auswahl des Quelltyps (A bzw. B) während der Berechnung (keine Berechnung in unterschiedlichen Tabellenblättern mehr erforderlich),
- Integration einer Suchfunktion für die Schadstoffauswahl,
- Dynamische Anpassung der konzeptionellen Standortskizze entsprechend der gewählten Schichtanzahl,
- Integration von Plausibilitätskriterien für die Eingabe,
- Erstellung eines Ergebnisberichtes im pdf-Format möglich.

### **B1.2.2 Funktionalität**

Die neue Version 3 enthält zahlreiche Ergänzungen der Funktionalität. Hierzu gehören:

- Berechnung des Konzentrationsverlaufes am Ort der Beurteilung für einen vorgebbaren Zeitpunkt (in der bisherigen Version 2.4 erfolgt die Berechnung immer bis zur Prüfwertunterschreitung),
- Berechnung von vertikalen Konzentrationsprofilen für die Transportstrecke für einen vorgebbaren Zeitpunkt,
- Berechnung der Schadstoffmasse aus Sondierungsergebnissen entsprechend Kap. 6.2 der AH DU [1] (bisher nur Berechnung über kontaminierte Kubatur möglich),
- Erstellung von Massenbilanzen (Quelle, Transportstrecke, Grundwasser) mit Differenzierung der Schadstoffmasse in der Transportstrecke nach Masse im Sickerwasser, sorbierter Masse und Masse in der Bodenluft,
- Berücksichtigung des Einmischvorganges (Rührkesselmodell) von Sickerwasser in das Grundwasser,
- Berücksichtigung der Diffusion (über hydrodynamische Dispersion) bei anorganischen Schadstoffen mit Erstellung eines Stoffdatenblattes „Anorganik“,
- Integration von Spannweiten (Min/Max-Werte) für die Halbwertszeiten von organischen Schadstoffen,
- Berücksichtigung der Feldkapazitäten von Festgesteinen/Festgesteinszersatz,
- Integration der neuen GFS (LAWA 2016) in die Stoffdatentabellen (Anorganik/Organik),
- Verzicht auf die Berücksichtigung von Fällen mit asymptotischer Endkonzentration (s. Arbeitshilfe DU),
- Verzicht auf die Ermittlung von Quellkonzentrationen mit Hilfe der Arbeitsblätter „Teeröl“ und „MKW“ (Raoult'sches Gesetz).

## B2 Systemvoraussetzungen und Einstellungen

Die weiterentwickelte Version 3 von ALTEX-1D ist eine Excel-Anwendung mit eingebetteten VBA-Makros und ist auf allen PC's mit dem Betriebssystem Windows (ab Windows 7) und installiertem MS-Office-Paket mit Excel (ab Excel 2010) lauffähig. Beim erstmaligen Start von ALTEX-1D müssen die Makros in zwei Schritten (1. Bearbeitung aktivieren, 2. Inhalt aktivieren) aktiviert werden (Abb. 1)

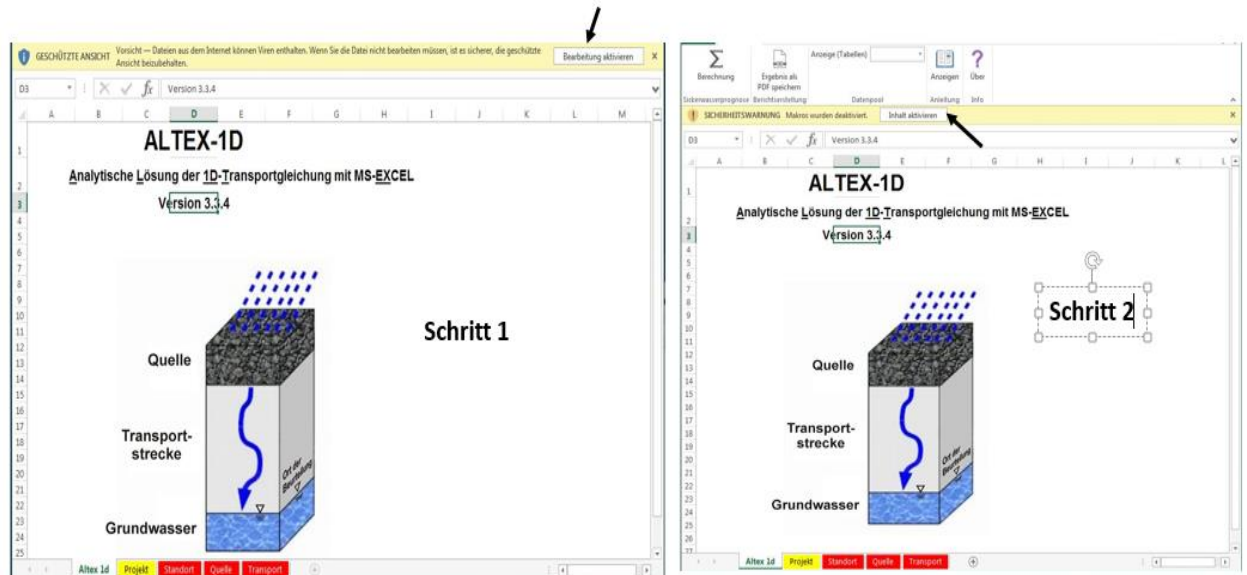


Abb. 1: Aktivierung der Makros beim erstmaligen Start des Programmes

## B3 Bearbeitungsablauf

### B3.1 Programm-Steuerung

ALTEX-1D (Version 3) ist eine Excel-Arbeitsmappe, die Excel-Arbeitsblätter und eingebettete Makro-Module (VBA) zur Berechnung enthält. Die Anwendung wird entweder durch Doppelklick auf die Original-Datei `altex-1d_ver_3_3_6.xlsm` (Stand 15.11.2018) oder auf eine bereits vom Anwender unter eigenem Namen gespeicherte Projektdatei geöffnet. Nach dem Öffnen ist im Standard-Menüband von Excel die Registerkarte „ALTEX-1D“ (Abb. 2a) aktiviert und das für ALTEX-1D spezifische Menüband wird angezeigt. Die gesamte sonstige Excel-Funktionalität ist über die entsprechenden Registerkarten (Datei, Start, Einfügen ...) des Excel-Menübandes verfügbar.

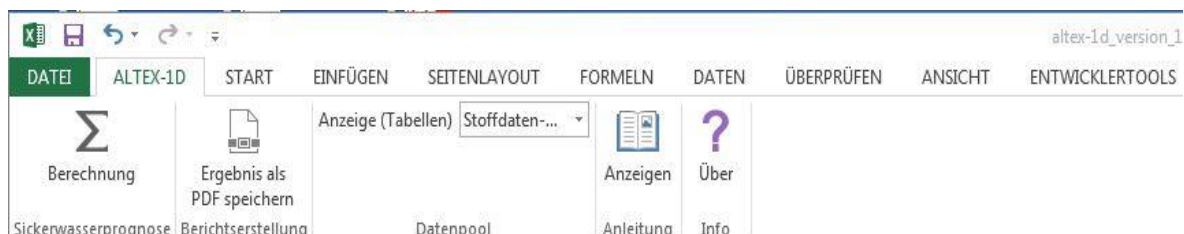


Abb. 2a: Excel-Menüband mit Registerkarte ALTEX-1D

Die Steuerung von ALTEX-1D erfolgt durch Anklicken der Schaltflächen im ALTEX-1D-spezifischen Menüband. Über die Schaltfläche  $\Sigma$ /Berechnung (ganz links) wird nach der Eingabe der Daten in den Arbeitsblättern (s. Kap. B3.2) die Berechnung der Sicker-

wasserprognose gestartet. Durch Anklicken der Schaltfläche „Ergebnis als PDF speichern/Berichtserstellung“ kann nach der Berechnung ein Ergebnis-Bericht im PDF-Format erzeugt werden. Über die Schaltfläche „Anzeige (Tabellen)/Datenpool“ können die in ALTEX-1D hinterlegten Stoffdaten-Tabellen für anorganische und organische Stoffe eingeblendet werden. Über die Schaltfläche „Anzeigen/Anleitung“ (Buchsymbol) kann die Kurzanleitung eingeblendet werden. Beim Anklicken der Schaltfläche „Über/Info“ (Fragezeichen) werden Informationen zur Versions-Nr. (Stand 15.11.2018 Version 3\_3\_6) und zur Software-Entwicklung angezeigt.

Das Abspeichern, Öffnen oder Drucken von Projektdateien ist über die Registerkarte „Datei“ des Excel-Menübandes möglich. Beim Anklicken der Excel-Registerkarte „Datei“ erscheint links das Auswahlmenü mit den Menüpunkten „Informationen, Neu, Öffnen, Speichern ...“. Standardmäßig wird zunächst das Fenster „Informationen“ angezeigt (Abb. 2b). Der gelb hinterlegte Bereich „Arbeitsmappe schützen“ zeigt die mit Passwort geschützten Arbeitsblätter der Arbeitsmappe an, in denen keine Veränderungen vorgenommen werden können. Eine Aufhebung des Schutzes durch den Anwender ist nicht vorgesehen.

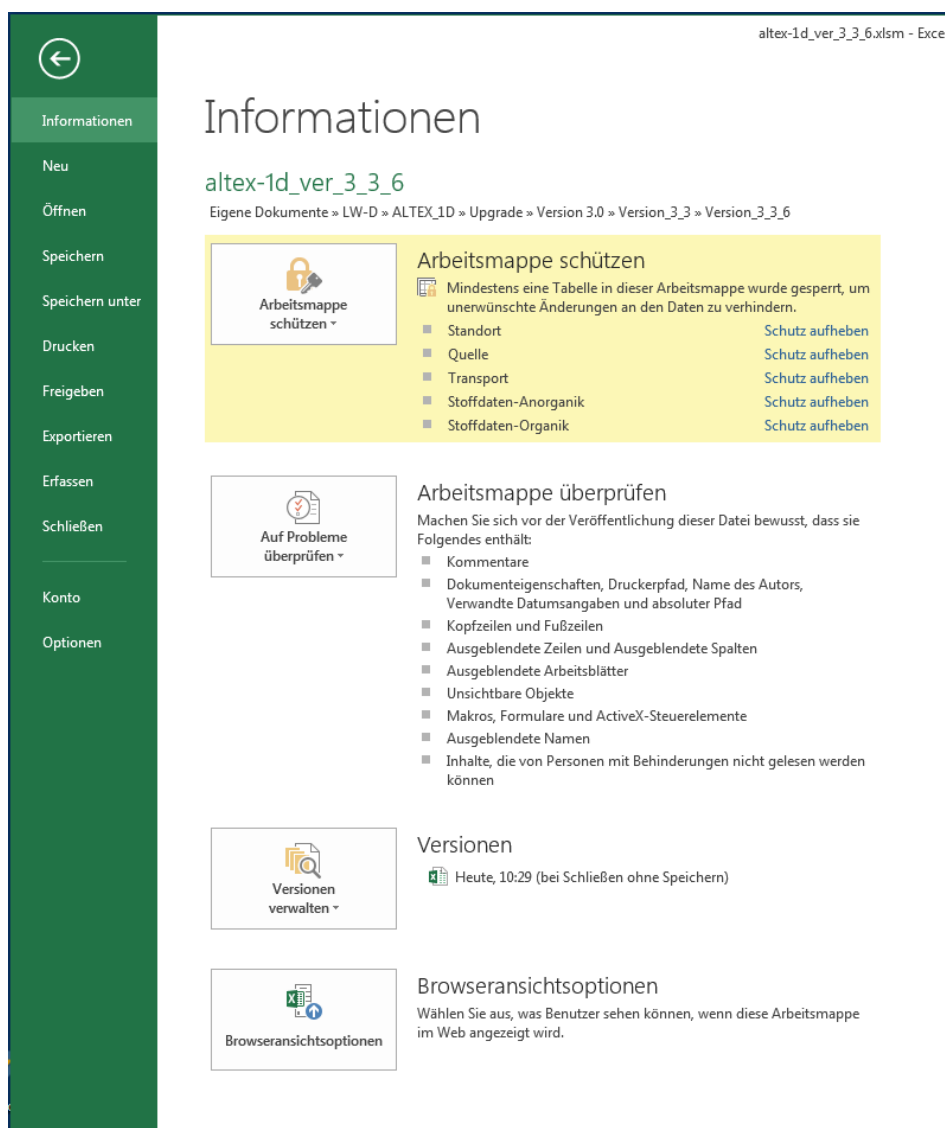


Abb. 2b: Fenster unter Menüpunkt „Informationen“

Im Arbeitsblatt-Register am unteren Rand werden nach dem Öffnen von ALTEX-1D fünf Arbeitsblätter (von links nach rechts: ALTEX-1D, Projekt, Standort, Quelle, Transport) angezeigt (Abb. 3). Nach dem Öffnen ist das Arbeitsblatt ALTEX-1D aktiviert. Dieses Arbeitsblatt dient ausschließlich als Start-Tabellenblatt (Abb. 4) und enthält außer der konzeptionellen Skizze zu ALTEX-1D und dem Hinweis, dass die Weiterentwicklung von ALTEX-1D im durch das Länderfinanzierungsprogramm „Wasser, Boden und Abfall“ finanziert wurde, keine sonstigen Funktionen.



Abb. 3: Arbeitsblatt-Register in ALTEX-1D nach dem Start der Anwendung (ALTEX-1D aktiv)

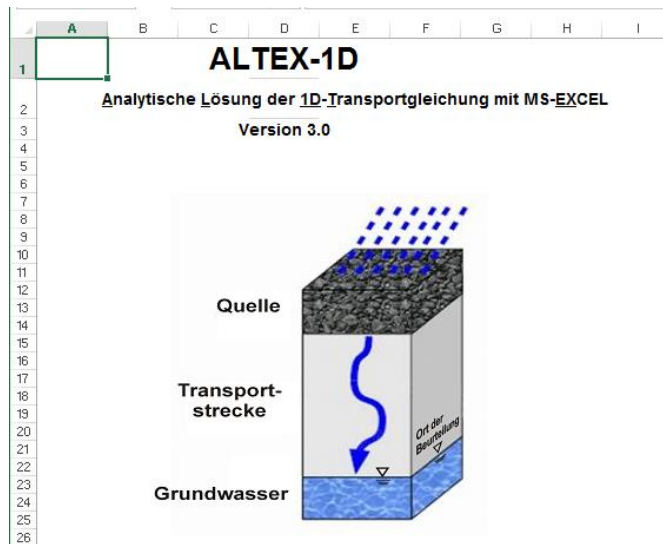


Abb. 4: Start-Arbeitsblatt von ALTEX-1D

Die weiteren Arbeitsblätter sind zur Eingabe von Daten vorgesehen (s. Kap. B3.2) und werden in der Regel von links nach rechts bearbeitet. Die für die Berechnung relevanten Eingabeparameter sind in den Arbeitsblättern „Standort“, „Quelle“ und „Transport“ (rot eingefärbte Registerkarten in Abb. 3) einzugeben. Die Bearbeitungssystematik folgt damit der in der Arbeitshilfe DU [1] im Kap. 4.2 beschriebenen Vorgehensweise. Zwischenstände können vom Anwender jederzeit über die Datei/Speichern-Funktion von Excel unter einem eigenen Projekt-Namen abgespeichert werden.

Nach der Berechnung einer Prognose werden die Ergebnisse in drei zusätzlichen Arbeitsblättern „ErgebnisausgabeA“ bzw. „ErgebnisausgabeB“ (abhängig vom jeweils gewählten Quelltyp A oder B bei der Berechnung), „Jahreswerte am OdB“ und „Werte Tiefenprofil“ angezeigt (Abb. 5b).

Falls eine bereits berechnete und abgespeicherte Projektdatei geöffnet wird, können die Ergebnisse über Rechtsklick mit der Maus auf eine der Arbeitsblatt-Registerkarten und Auswahl der Arbeitsblätter „Ergebnisausgabe A“ bzw. „ErgebnisausgabeB“, „Jahreswerte am OdB“, und „Werte Tiefenprofil“ im erscheinenden Auswahlfenster (Abb. 5a)

eingebledet werden. Auch weitere Arbeitsblätter wie bspw. „Stoffdaten-Organik“, „Stoffdaten-Anorganik“ können jederzeit durch Rechts-Klick mit der Maus auf eine Arbeitsblatt-Registerkarte und Auswahl Einblenden/Ausblenden ein- bzw. ausgeblendet werden. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass die zahlreichen weiteren Hilfstabellenblätter im Auswahlfenster (bspw. Export1, Hilfsrechnungen u. a.) nicht eingebledet oder verändert werden sollten! Für die bestimmungsgemäße Anwendung von ALTEX-1D sind ausschließlich die oben erwähnten Arbeitsblätter (ALTEX-1D, Projekt, Standort, Quelle, Transport, ErgebnisausgabeA, ErgebnisausgabeB, Jahreswerte am OdB, Werte Tiefenprofil, Stoffdaten-Anorganik, Stoffdaten-Organik und Anleitung) relevant.

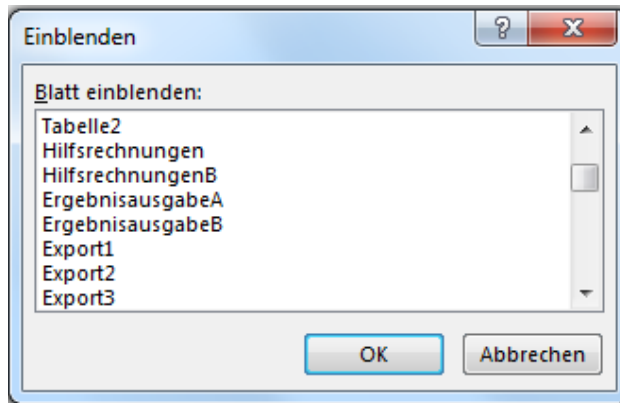


Abb. 5a: Auswahlfenster für Arbeitsblätter beim Rechts-Klick auf eine Arbeitsblatt-Registerkarte (bspw. „Projekt“)



Abb. 5b: Arbeitsblatt-Register in ALTEX-1D nach Durchführung einer Berechnung (ErgebnisausgabeA aktiv)

### B3.2 Parameter-Eingabe

Bei der Eingabe von Daten in den Arbeitsblättern sind folgende Punkte zu beachten:

- Eingaben können nur in grau gefärbten Feldern gemacht werden,
- weiße Felder sind Berechnungsfelder und dienen zur Anzeige von Zwischenergebnissen. Hier können keine Eingaben gemacht werden, da die Felder gegen eine Eingabe geschützt sind,
- blau gefärbte Felder sind Optionsfelder: beim Klicken auf das Feld erscheint rechts neben dem Feld ein Pfeilsymbol (Abb. 6). Beim Anklicken des Pfeilsymbols wird eine „Dropdown“-Liste mit Auswahlmöglichkeiten angezeigt,

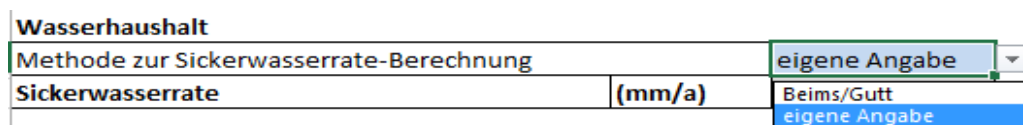


Abb. 6: Optionsfeld mit Pfeilsymbol zur Auswahl der Methode zur Berechnung der Sickerwasserrate

- grün gefärbte Felder sind Befehlsschaltflächen, bei denen sich beim Anklicken

ein Fenster (Abb. 7a) mit einer Maske zur Eingabe von Daten („UserForm“) öffnet (Abb. 7b). Die eingegebenen Daten werden anschließend in das jeweilige Arbeitsblatt übernommen,

| Vergleichswert am OdB |                               |            |                        |                                       |
|-----------------------|-------------------------------|------------|------------------------|---------------------------------------|
| Schadstoff            | Prüfwert BBodSchV (PW) (µg/l) | GFS (µg/l) | Ersatzwert (EW) (µg/l) | Diff-koeff Wasser (m <sup>2</sup> /a) |
| Cadmium               | 5,00                          | 0,3000     |                        | 0,000E+00                             |

Abb. 7a: Schaltfläche (grün) zur Anzeige der Eingabemaske „Schadstoff Auswahl“

Abb. 7b: Eingabemaske „Schadstoff-Auswahl“ (Cadmium)

- e) Um fehlerhafte Eingaben zu vermeiden, sind für eine Reihe von Parametern Plausibilitätskriterien gesetzt, die bei der Eingabe geprüft werden. Bei Verletzung eines Plausibilitätskriteriums bekommt der Anwender einen entsprechenden Warnhinweis (Abb. 8)

| Schadstoffmasse                                           | Ermittlung über Sondierungen |                                                    |       |       |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------|-------|-------|
|                                                           | Anzahl Sondierungen          | Flächenanteile müssen in Summe genau 100 % ergeben |       |       |
| Sondierungs-Nr                                            | S1                           | S2                                                 | S3    | S4    |
| Anzahl Schichten (Quelle)                                 | 2                            | 2                                                  | 2     | 2     |
| repräsentativer Flächenanteil in %                        | 25,00                        | 30                                                 | 25    | 25    |
| flächenspezifische Bodentrockenmasse [kg/m <sup>2</sup> ] | 90,0                         | 108                                                | 90    | 90    |
| flächenspezifische Schadstoffmasse [g/m <sup>2</sup> ]    | 2,6                          | 2,214                                              | 2,565 | 3,105 |

Abb. 8: Warnhinweis bei Verletzung eines Plausibilitätskriteriums für die Eingabe

In der Originaldatei altex-1d\_ver\_3\_3\_6.xlsm (Stand 15.11.2018) sind die Eingabedaten für das Fallbeispiel 2 (Kap. B4.2) bereits eingegeben und können in den jeweiligen Feldern durch eigene Daten überschrieben werden.

### B3.2.1 Arbeitsblatt „Projekt“

Im Arbeitsblatt „Projekt“ werden die allgemeinen Projektinformationen (Abb. 9) eingegeben.

| Projektinformationen |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|
| Projekt-Name         | Standard-Fall                       |
| Projektbeschreibung  | Fallbeispiel 1/LABO Arbeitshilfe DU |
| Bearbeiter           | LABO                                |
| Datum/Zeitpunkt      | 29.08.2018                          |
| ALTEX-1D Versions-Nr | Ver. 3.0.0.0                        |

Abb. 9: Arbeitsblatt „Projekt“ zur Eingabe allgemeiner Projektinformationen

### B3.2.2 Arbeitsblatt „Standort“

Im Arbeitsblatt „Standort“ (Abb. 10) werden die allgemeinen Parameter für die Standortbeschreibung eingegeben.

| Standortbeschreibung                              |                   |                | Konzeptionelle Standortskizze |                |
|---------------------------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------------|----------------|
| <b>Kontaminationsgeometrie</b>                    | <b>Einheit</b>    |                | GOK                           | OK             |
| Kontaminationsfläche                              | (m <sup>2</sup> ) | 1700,0         |                               | OK             |
| Quelle OK (m u. GOK)                              | (m)               | 0,00           |                               | UK             |
| Quelle UK (m u. GOK)                              | (m)               | 0,50           |                               |                |
| <b>kontaminierte Kubatur</b>                      | (m <sup>3</sup> ) | 850,0          |                               |                |
| <b>Wasserhaushalt</b>                             |                   |                |                               |                |
| Methode zur Sickerwasserrate-Berechnung           |                   | eigene Angabe  |                               |                |
| <b>Sickerwasserrate</b>                           | (mm/a)            | 250,0          |                               |                |
| <b>Transportstrecke</b>                           |                   |                |                               |                |
| Ort der Beurteilung OdB (m. u. GOK)               | (m)               | 3,50           |                               |                |
| mittl. Temp. Transportstrecke                     | (°C)              | 15             |                               |                |
| Disp-SF (gesamte Transportstrecke)                | (-)               | 0,100          |                               |                |
| Vorbelastung Transportstrecke                     | (µg/l)            | 0,000          |                               |                |
| <b>Typisches Schichtprofil</b>                    |                   |                |                               |                |
| Schicht-Anzahl                                    | 1                 |                |                               |                |
|                                                   | von (m u. GOK)    | bis (m u. GOK) | Bodenart                      | Festgestein    |
| Schichtaufbau                                     |                   |                | Tab. 30/31KA                  | GeoBerichte 19 |
| Schicht-Nr. 1                                     | 0,50              | 3,50           | Su2                           |                |
| <b>Aquiferparameter</b>                           |                   |                |                               |                |
| Länge der Kont.Fläche in Grundwasserfließrichtung | (m)               | 40,0           |                               |                |
| Mächtigkeit der Einmischzone                      | (m)               | 1,0            |                               |                |
| Aquiferdurchlässigkeit                            | (m/s)             | 1,000E-03      |                               |                |
| hydr. Gefälle                                     | (m/m)             | 1,000E-03      |                               |                |
| Schadstoff-Anstromkonzentration                   | (µg/l)            | 0,000          |                               |                |

Abb. 10: Arbeitsblatt „Standort“ zur Eingabe der Parameter für die Standortbeschreibung

Das Arbeitsblatt ist in die Themenblöcke

- a) Kontaminationsgeometrie
- b) Wasserhaushalt
- c) Transportstrecke
- d) Typisches Schichtprofil
- e) Aquiferparameter

strukturiert. Zur Visualisierung der konzeptionellen Standortsituation enthält das Arbeitsblatt eine Skizze, die dynamisch entsprechend den Eingaben zum Schichtprofil angepasst wird.

#### a) Kontaminationsgeometrie

Hier sind die Größe der Kontaminationsfläche ( $\text{m}^2$ ) sowie die Lage der Oberkante (OK) und Unterkante (UK) der Quelle bezüglich der Geländeoberkante (m u. GOK) einzugeben. Sofern die OK der Quelle höher als die Geländeoberkante (bspw. Deponie) liegt, sind negative Werte einzugeben. Aus den Eingaben wird die kontaminierte Kubatur ( $\text{m}^3$ ) errechnet. Grundsätzlich wird eine rechteckförmige Kontur der kontaminierten Fläche zugrundegelegt (s. a. Pkt e).

#### b) Wasserhaushalt

Bei den Angaben zum Wasserhaushalt ist im Optionsfeld „Methode der Sickerwasserrate-Berechnung“ zunächst die Auswahl zu treffen, ob ein eigener Wert für die Sickerwasserrate (bspw. ein aus einem Kartenwerk entnommener Wert oder ein nach DIN 19687 oder TUB-BGR berechneter Wert) verwendet oder die Sickerwasserrate nach dem Verfahren von „Beims/Gutt“ [2] berechnet werden soll (Abb. 11)

| Wasserhaushalt                          |               |
|-----------------------------------------|---------------|
| Methode zur Sickerwasserrate-Berechnung | Beims/Gutt    |
| Abschätzung nach Beims und Gutt         | Beims/Gutt    |
|                                         | eigene Angabe |

Abb. 11: Auswahl der Methode zur Sickerwasser-Berechnung

Bei Auswahl „eigene Angabe“ ist der Wert der Sickerwasserrate in  $\text{mm}/\text{Jahr}$  einzugeben. Bei Auswahl „Beims/Gutt“ werden die zur Berechnung nach dem Verfahren von „Beims/Gutt“ erforderlichen Eingabeparameter (Abb. 12) angezeigt.

| Wasserhaushalt                          |                          |            |
|-----------------------------------------|--------------------------|------------|
| Methode zur Sickerwasserrate-Berechnung |                          | Beims/Gutt |
| Abschätzung nach Beims und Gutt         |                          |            |
| Niederschlag                            | ( $\text{mm}/\text{a}$ ) | 695,0      |
| Bodentyp                                | (-)                      | Sand (S)   |
| Vegetationsart                          | (-)                      | Ödland (Ö) |
| Versiegelungsgrad Flächenanteil         | (%)                      | 25         |
| Grundwasserneubildung n. Beims/Gutt     | ( $\text{mm}/\text{a}$ ) | 249,8      |

Abb. 12: Eingabeparameter zur Berechnung der Sickerwasserrate nach dem Verfahren „Beims/Gutt“

Neben der Eingabe des jährlichen Niederschlages ( $\text{mm}/\text{a}$ ) sind dazu Angaben zum Bodentyp, zur Vegetationsart und zum Versiegelungsanteil zu machen. Diese können über die entsprechenden Optionsfelder („Dropdown“-Liste) ausgewählt werden (Abb. 13).

| Wasserhaushalt                          |            |                                                                    |
|-----------------------------------------|------------|--------------------------------------------------------------------|
| Methode zur Sickerwasserrate-Berechnung | Beims/Gutt |                                                                    |
| Abschätzung nach Beims und Gutt         |            |                                                                    |
| Niederschlag                            | (mm/a)     | 695,0                                                              |
| Bodentyp                                | (-)        | Sand (S)                                                           |
| Vegetationsart                          | (-)        | Sand (S)                                                           |
| Versiegelungsgrad Flächenanteil         | (%)        | lehmiger Schluff (Uls)<br>sandiger Ton (Ts2)<br>toniger Lehm (Lt3) |
| Grundwasserneubildung n. Beims/Gutt     | (mm/a)     |                                                                    |

| Wasserhaushalt                          |            |                                                             |
|-----------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------|
| Methode zur Sickerwasserrate-Berechnung | Beims/Gutt |                                                             |
| Abschätzung nach Beims und Gutt         |            |                                                             |
| Niederschlag                            | (mm/a)     | 695,0                                                       |
| Bodentyp                                | (-)        | Sand (S)                                                    |
| Vegetationsart                          | (-)        | Ödland (Ö)                                                  |
| Versiegelungsgrad Flächenanteil         | (%)        | Ödland (Ö)<br>Gras (G)<br>landw. Nutzfläche (N)<br>Wald (W) |
| Grundwasserneubildung n. Beims/Gutt     | (mm/a)     |                                                             |

| Wasserhaushalt                          |            |                     |
|-----------------------------------------|------------|---------------------|
| Methode zur Sickerwasserrate-Berechnung | Beims/Gutt |                     |
| Abschätzung nach Beims und Gutt         |            |                     |
| Niederschlag                            | (mm/a)     | 695,0               |
| Bodentyp                                | (-)        | Sand (S)            |
| Vegetationsart                          | (-)        | Ödland (Ö)          |
| Versiegelungsgrad Flächenanteil         | (%)        | 25                  |
| Grundwasserneubildung n. Beims/Gutt     | (mm/a)     | 0<br>25<br>50<br>75 |

Abb. 13: Optionsfelder zur Auswahl der „Beims/Gutt“-Parameter zur Berechnung der Sickerwasserrate

### c) Transportstrecke

Die Eingaben unter dem Themenblock Transportstrecke dienen der grundsätzlichen Beschreibung der Transportstrecke (Abb. 14). Die eigentliche Charakterisierung mit der Zuordnung und Ermittlung der relevanten Bodenkennwerte erfolgt im Arbeitsblatt „Transport“ (s. Kap. B3.2.4).

| Transportstrecke                    |        |       |
|-------------------------------------|--------|-------|
| Ort der Beurteilung OdB (m. u. GOK) | (m)    | 3,50  |
| mittl. Temp. Transportstrecke       | (°C)   | 15    |
| Disp-SF (gesamte Transportstrecke)  | (-)    | 0,100 |
| Vorbelastung Transportstrecke       | (µg/l) | 0,000 |

Abb. 14: Eingabeparameter zur Beschreibung der Transportstrecke

Zur Beschreibung der Transportstrecke ist die Eingabe des Ortes der Beurteilung (OdB) bezüglich der GOK (m u. GOK) erforderlich. Aus der Differenz des Ortes der Beurteilung und der UK Quelle (s. konzeptionelle Skizze in Abb. 10) ergibt sich die Länge der Transportstrecke (m). Die mittlere Temperatur (°C) wird zur Berechnung der temperaturabhängigen physikalisch-chemischen Parameter (bspw. Henry-Konstante oder Diffusionskoeffizienten) benötigt. Als Standardwert kann 15°C angenommen werden. Zur Berechnung der skalenabhängigen Dispersivität (m) benutzt ALTEX-1D die in der Modellierungspraxis häufig benutzte lineare Proportionalität zwischen der Dispersivität und der Länge der Transportstrecke (Kap. 7.3.3 in der Arbeitshilfe DU [1]). Als Standard-Skalenfaktor wird dabei der Wert von 0,1 verwendet. Abhängig von den Standortbedingungen

kann der Skalenfaktor größer oder auch kleiner sein. Im Regelfall wird davon ausgegangen, dass die Transportstrecke zu Beginn einer Berechnung unbelastet ist. In manchen Fällen kann es sinnvoll sein, bereits von einer Vorbelastung auszugehen. In diesem Fall kann im Feld „Vorbelastung“ eine entsprechende Konzentration im Sickerwasser ( $\mu\text{g/l}$ ) vorgegeben werden. Dabei wird von einer einheitlichen, konstanten mittleren Vorbelastung über die Transportstrecke ausgegangen. Die Vorbelastung bezieht sich auf den jeweils betrachteten Schadstoff, wie er im Arbeitsblatt „Quelle“ ausgewählt wird (Kap. B3.2.3). Die Eingabe eines „realen“ Konzentrationsprofils ist allerdings nicht möglich.

#### d) Schichtaufbau

In diesem Themenblock ist das typische Schichtprofil des Standortes einzugeben. Als Quelle sind die aus der Erkundung stammenden Schichtprofile auszuwerten und daraus ein standörtliches, typisches Schichtprofil zu ermitteln. Zunächst ist dabei die Anzahl der Schichten (Abb. 15) einzugeben.

| Typisches Schichtprofil |                   |                   |                             |                               |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Schicht-Anzahl          | 3                 |                   |                             |                               |
| Schichtaufbau           | von<br>(m u. GOK) | bis<br>(m u. GOK) | Bodenart<br>Tab. 30/31 KA 5 | Festgestein<br>GeoBerichte 19 |
| Schicht-Nr. 1           | 0,50              | 3,50              | Su2                         |                               |
| Schicht-Nr. 2           |                   |                   |                             |                               |
| Schicht-Nr. 3           |                   |                   |                             |                               |

Abb. 15: Felder für die Eingabe des typischen Schichtprofils

Entsprechend der eingegebenen Schicht-Anzahl (bspw. 3/Abb. 15) werden dann für die Einzelschichten dynamisch die entsprechenden Eingabefelder erzeugt und in der konzeptionellen Standortskizze berücksichtigt. Die Einzelschichten sind von oben nach unten mit ihren Ober- und Unterkanten (von – bis) bezogen auf GOK (m u. GOK) einzugeben. Zu beachten ist, dass die OK der obersten Schicht der UK Quelle entspricht und die UK der untersten Schicht mit dem OdB übereinstimmt. Das Eingabefeld Bodenart ist ein Optionsfeld, über das beim Anklicken des Pfeilsymbols rechts daneben die Feinbodenart (Symbol) entsprechend den Tabellen 30/31 der bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 ausgewählt werden kann (Abb. 16).

| 3                 |                   |                             |                               |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| von<br>(m u. GOK) | bis<br>(m u. GOK) | Bodenart<br>Tab. 30/31 KA 5 | Festgestein<br>GeoBerichte 19 |
| 0,50              | 3,50              | Su2                         |                               |
|                   |                   | Su2                         |                               |
|                   |                   | Su3                         |                               |
|                   |                   | Su4                         |                               |
|                   |                   | Ls2                         |                               |
|                   |                   | Ls3                         |                               |
|                   |                   | Ls4                         |                               |
|                   |                   | Lt2                         |                               |
|                   |                   | Lt3                         |                               |

Abb. 16: „Dropdown“-Liste zur Auswahl der Bodenart

Alternativ kann statt der Auswahl einer Feinbodenart auch ein Festgestein/Festgesteinszersatz (Symbol) entsprechend den Tabellen in den Arbeitsheften Boden [3] ausgewählt werden (Abb. 17). Zu beachten ist, dass in der jeweiligen Schicht entweder eine Bodenart oder ein Festgestein (nicht beides) ausgewählt sein kann. Bereits ausgewählte Schicht-Symbole können mit der Backspace-Taste gelöscht werden.

| 3                 |                   |                             |                                                                                                                                                 |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| von<br>(m u. GOK) | bis<br>(m u. GOK) | Bodenart<br>Tab. 30/31 KA 5 | Festgestein<br>GeoBerichte 19                                                                                                                   |
| 0,50              | 3,50              |                             |                                                                                                                                                 |
|                   |                   |                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>^s</li> <li>^fs</li> <li>^ms</li> <li>^gs</li> <li>^sq</li> <li>^sk</li> <li>^d</li> <li>^koo</li> </ul> |

Abb. 17: „Dropdown“-Liste zur Auswahl eines Festgesteins

Die für die einzelnen Schichten ausgewählten Bodenarten werden dann automatisch im Arbeitsblatt „Transport“ (s. Kap. B3.2.4) bei der Zuordnung und Ermittlung der Bodenkennwerte (bspw. Feldkapazität) verwendet.

### e) Aquiferparameter

In der neuen Version 3 von ALTEX-1D kann der Einmischprozess von Sickerwasser in das Grundwasser berücksichtigt werden und damit die Auswirkungen von Sickerwasserfrachten auf das Grundwasser abgeschätzt werden. Die konzeptionelle Grundlage dafür bildet das sogenannte „Rührkesselmodell“ [4]. Dabei wird davon ausgegangen, dass das am Ort der Beurteilung in den gesättigten Bereich übertretende Sickerwasser sich in einer Einmischzone mit definierter Mächtigkeit mit dem Grundwasser vermischt. Die resultierende Konzentration in der Einmischzone ist abhängig von der Mächtigkeit der Einmischzone, der Länge des Eintrittsbereiches von kontaminiertem Sickerwasser in Grundwasserfließrichtung (horizontal projizierte Länge der kontaminierten Fläche, Abb. 18) und den Eigenschaften des Grundwasserleiters (hydraulisches Gefälle, Durchlässigkeit) sowie der Anstromkonzentration.



Abb. 18: konzeptionelle Skizze zur Ermittlung der Länge der Kontaminationsfläche in Grundwasserfließrichtung

Die Länge der Kontaminationsfläche in Grundwasserfließrichtung kann graphisch durch Projektion der Grundwasserfließrichtung in einem Lageplan abgeschätzt werden. Bei unregelmäßigen nicht-rechteckförmigen Konturen ist die maximale Länge zu verwenden, um bei der Berechnung auf der sicheren Seite zu liegen. Der Verdünnungsfaktor wird mit zunehmender Länge der Kontaminationsfläche in Grundwasserfließrichtung geringer. Die Mächtigkeit der Einmischzone hat erheblichen Einfluss auf das Ergebnis. Je größer die Mächtigkeit gewählt wird, desto höher wird die resultierende Verdünnung des Sickerwassers durch die Vermischung mit Grundwasser. Gemäß LAWA/LABO-Papier [5] kann standardmäßig ein Meter als Mächtigkeit der Einmischzone berücksichtigt werden. Diese Vorgehensweise ist auch in dem seit 2017 vorliegenden Referenten-Entwurf

zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (Artikel 2 der Mantelverordnung) [6] berücksichtigt.

Die Aquiferparameter haben jedoch keinen Einfluss auf die Berechnung der Stoffkonzentration am Ort der Beurteilung (OdB).

### B3.2.3 Arbeitsblatt „Quelle“

Im Arbeitsblatt „Quelle“ (Abb. 19) werden die erforderlichen Daten zur Beschreibung der Quelle eingegeben.

| Beschreibung der Schadstoffquelle                  |                                      | Vergleichswert am OdB         |            |                        |                                       |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|------------|------------------------|---------------------------------------|
| Schadstoffcharakterisierung                        | Schadstoff                           | Prüfwert BBodSchV (PW) (µg/l) | GFS (µg/l) | Ersatzwert (EW) (µg/l) | Diff-koeff Wasser (m <sup>2</sup> /a) |
|                                                    | Cadmium                              | 5,00                          | 0,3000     |                        | 0,000E+00                             |
| Schadstoffmasse                                    | Ermittlung über Kubatur (Standort) ▼ |                               |            |                        |                                       |
| durchschn. Trockenraumdichte (kg/dm <sup>3</sup> ) | 1,3                                  |                               |            |                        |                                       |
| durchschn. Schadstoffgehalt (mg/kg)                | 476,00                               |                               |            |                        |                                       |
| Schadstoffmasse gesamt (kg)                        | 526,0                                |                               |            |                        |                                       |
| Schadstofffreisetzung                              |                                      |                               |            |                        |                                       |
| zeitliche Entwicklung Quellkonzentration           | konstant                             | exponentiell abklingend       |            |                        |                                       |
| Fallkonstellation                                  | A                                    | B                             |            |                        |                                       |
| mobilisierbarer Anteil (%)                         | 10,0                                 | 10,0                          |            |                        |                                       |
| initiale Quellkonzentration (µg/l)                 | 550,000                              | 550,000                       |            |                        |                                       |
| Abklingkonstante berechnet (1/a)                   |                                      | 4,444E-03                     |            |                        |                                       |

Abb. 19: Arbeitsblatt „Quelle“ zur Eingabe der Parameter für die Beschreibung der Quelle.

Das Arbeitsblatt ist in die Themenblöcke

- Schadstoffcharakterisierung
- Schadstoffmasse
- Schadstofffreisetzung

strukturiert.

#### a) Schadstoffcharakterisierung

Die Berechnung einer Sickerwasserprognose mit ALTEX-1D ist nur für einen konkreten Einzelstoff jedoch nicht für Summenparameter wie MKW, BTEX oder PAK möglich. Die Charakterisierung des Schadstoffes erfolgt über eine Eingabemaske (Abb. 20 - 22), die beim Anklicken des Feldes Schadstoff (grün) erscheint (Cadmium, Abb. 19). Die angezeigten und einzugebenden Parameter sind abhängig davon, ob ein anorganischer oder organischer Schadstoff ausgewählt wird.

### Anorganischer Schadstoff

Bei Markierung des Auswahlfeldes „Anorganik“ im Fenster „Schadstoff-Auswahl“ oben links (Abb. 20) werden nur die anorganischen Schadstoffe selektiert und in der mittleren Spalte unter Schadstoff angezeigt. Eine weitere Selektion kann über Auswahl der Gruppe Kationen bzw. Anionen getroffen werden.

Abb. 20: Eingabemaske zur Auswahl des Schadstoffes (Anorganischer Schadstoff)

Ein Schadstoff kann aber auch ohne vorherige Auswahl der Gruppe (Kationen/Anionen) direkt durch Eingabe in das Feld „Suche“ (bspw. Cadmium) selektiert und ausgewählt werden (Abb. 21).

Die relevanten Schadstoffinformationen werden in den Feldern rechts angezeigt. Sie werden aus dem Arbeitsblatt „Stoffdaten-Anorganik“ (kann auch eingeblendet werden, s. Kap. B3.1) automatisch übernommen. Im Feld „Gruppe“ wird angezeigt, ob der Schadstoff vorwiegend als Kation oder Anion vorliegt. Sofern für den Schadstoff ein Prüfwert (PW) aus der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) oder ein Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) der LAWA (Stand 2016) [7] vorliegt, werden diese in den entsprechenden Feldern angezeigt. Die ausgegraute Schrift weist darauf hin, dass die Felder gesperrt sind und nicht überschrieben werden können. Ist für den Schadstoff weder ein PW noch eine GFS vorhanden, muss der Anwender zwingend einen Ersatzwert (EW) eingeben. In diesem Feld sind nur Eingaben möglich, wenn weder ein PW noch eine GFS vorhanden sind. PW, GFS oder EW werden als Vergleichswerte (VW) bei der

Berechnung benötigt. Sofern ein PW vorliegt, wird dieser immer vorrangig als VW verwendet, ansonsten die GFS oder, sofern weder ein PW oder ein GFS vorhanden ist, der EW. Falls der Anwender bei vorhandenem PW oder GFS einen anderen Wert als Vergleichswert verwenden möchte, muss dafür zunächst im Arbeitsblatt „Quelle“ der Wert unter PW und/oder GFS gelöscht werden und dann der entsprechende Wert unter Ersatzwert eingegeben werden.

Weiterhin wird der Diffusionskoeffizient im Wasser ( $\text{m}^2/\text{a}$ ) als Richtwert angezeigt. Der Anwender hat die Möglichkeit, hier auch einen eigenen Wert einzugeben. Durch Anklicken der Schaltfläche „Eingabe übernehmen“ werden die Werte dann in das Arbeitsblatt „Quelle“ übernommen. Sofern erforderlich, kann die Eingabe über die Schaltfläche „Abbrechen“ auch abgebrochen werden.

Schadstoff Auswahl

Schadstoffcharakterisierung  
☐ Organik ☒ Anorganik

Suche

Gruppe  
 Alle  
 Kationen  
 Anionen

Schadstoff  
 Cadmium

Gruppe

Prüfwert BBodSchV (PW)

GFS

Ersatzwert (EW)

Diff-koeff Wasser ( $\text{m}^2/\text{a}$ )  Richtwert: 0.0172111654116

Abbrechen Eingaben übernehmen

Abb. 21: Auswahl des Schadstoffes durch Eingabe des Schadstoffnamens in das Feld „Suche“

### Organischer Schadstoff

Bei Markierung des Auswahlfeldes „Organik“ im Fenster „Schadstoff-Auswahl“ oben links (Abb. 22) werden nur die organischen Schadstoffe selektiert und in der mittleren Spalte unter Schadstoff angezeigt. Eine weitere Selektion kann durch Auswahl der entsprechenden Stoffgruppe (bspw. Aromaten) vorgenommen und der Schadstoff dann direkt ausgewählt werden (Abb. 22). Ein Schadstoff kann aber auch ohne vorherige Auswahl der Gruppe direkt durch Eingabe in das Feld „Suche“ (s. Anorganischer Schadstoff, Abb. 21) selektiert und ausgewählt werden.

Die relevanten Schadstoff-Informationen für organische Schadstoffe sind wesentlich umfangreicher als bei anorganischen Stoffen und werden in den Feldern rechts angezeigt. Sie werden aus dem Arbeitsblatt „Stoffdaten-Organik“ (kann auch eingeblendet

werden, s. Kap. B3.1) automatisch übernommen. Im Feld „Gruppe“ wird die entsprechende organische Stoffgruppe (bspw. Aromaten) angezeigt. Sofern für den Schadstoff ein Prüfwert (PW) aus der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) oder ein Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) der LAWA (Stand 2016) vorliegt, werden diese in den entsprechenden Feldern angezeigt (siehe Anorganik).

Weiterhin werden die Diffusionskoeffizienten im Wasser ( $\text{m}^2/\text{a}$ ) und in der Luft ( $\text{m}^2/\text{a}$ ) als Richtwerte angezeigt. Der Diffusionskoeffizient in der Luft und die Henry-Konstante werden zur Berücksichtigung des Sickerwasser/Bodenluft-Gleichgewichtes benötigt und sind insbesondere relevant bei flüchtigen Stoffen. Der Anwender hat die Möglichkeit hier auch eigene Werte einzugeben.

Abb. 22: Eingabemaske zur Auswahl des Schadstoffes (Organischer Schadstoff)

Eine das Ergebnis stark beeinflussende Stoffeigenschaft bei organischen Schadstoffen ist die Halbwertszeit als Kennwert für die Abbaubarkeit (s.a. Arbeitshilfe DU, Kap. A2.5). In der neuen Version 3 wird die Spannweite (Min/Max-Werte) der Halbwertszeit angezeigt. Diese Werte stammen aus qualitätsgeprüften Stoffdatenbanken (US EPA „EpiSuite“ und „CalTox“) und sollen dem Anwender zur Orientierung bei der Eingabe eines eigenen Wertes in das Feld „Halbwertszeit gewählt“ dienen.

Durch Anklicken der Schaltfläche „Eingabe übernehmen“ werden die Werte dann in das Arbeitsblatt „Quelle“ übernommen. Sofern erforderlich, kann die Eingabe über die Schaltfläche „Abbrechen“ auch abgebrochen werden.

### b) Schadstoffmasse

Die gesamte auf einem kontaminierten Standort vorhandene Schadstoffmasse hat großen Einfluss auf das Ergebnis der Sickerwasserprognose, da sie neben anderen Parametern maßgeblich die Lebensdauer (Emissionsdauer) der Quelle bestimmt. Die Ermittlung der Schadstoffmasse kann entweder direkt über die kontaminierte Kubatur (kontaminiertes Bodenvolumen) oder über die Eingabe von Ergebnissen aus Sondierungen erfolgen. Die Auswahl erfolgt durch Anklicken des Pfeilsymbols rechts neben dem Auswahlfeld (Abb. 23).

| Schadstoffmasse                                    | Ermittlung über Kubatur (Standort) ▼ |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------|
| durchschn. Trockenraumdichte (kg/dm <sup>3</sup> ) | Ermittlung über Kubatur (Standort)   |
| durchschn. Schadstoffgehalt (mg/kg)                | Ermittlung über Sondierungen         |
| Schadstoffmasse gesamt (kg)                        | 476,00                               |
|                                                    | 526,0                                |

Abb. 23: Eingabeparameter zur Ermittlung der Schadstoffmasse (Ermittlung über Kubatur)

#### Ermittlung über Kubatur

Bei der Ermittlung der Schadstoffmasse über die Kubatur wird der Wert für die kontaminierte Kubatur aus dem Arbeitsblatt „Standort“ verwendet. Dabei wird angenommen, dass relativ homogene Verhältnisse vorliegen und für das gesamte kontaminierte Bodenvolumen repräsentative durchschnittliche Werte für die Trockenraumdichte (kg/dm<sup>3</sup>) und den Schadstoffgehalt (mg/kg) ermittelt wurden (Abb. 23).

#### Ermittlung über Sondierungen

Im Falle inhomogener Verhältnisse kann die Schadstoffmasse aus dem Ergebnis von Sondierungen/Bohrungen ermittelt werden. Grundlage dafür sind die analysierten Schadstoff-Gesamtgehalte in den einzelnen untersuchten Bodenschichten der Profile.

Aus den Gesamtgehalten der einzelnen Schichten lassen sich flächen- oder volumenspezifische Schadstoffgehalte berechnen. Aus den Schadstoffmassen der einzelnen Schichtprofile kann bei Kenntnis der Flächenrepräsentanz der einzelnen Profile die durchschnittliche flächenspezifische Masse des kontaminierten Bodenvolumens berechnet werden. Daraus wird dann eine für die Fläche repräsentative mittlere Schadstoffmasse berechnet. Das Verfahren ist in der Arbeitshilfe DU [1] im Kap. 6.2 beschrieben und die Anwendung in den Fallbeispielen (Kap. B4.2.2) erläutert.

Bei Auswahl „Ermittlung über Sondierungen“ wird das Arbeitsblatt dynamisch entsprechend der Anzahl der Sondierungen und Schichten angepasst (Abb. 24).

| Schadstoffmasse                                              | Ermittlung über Sondierungen |                       |                                |                  |                              |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|------------------------------|
| Anzahl Sondierungen                                          | 3                            |                       |                                |                  |                              |
| Sondierungs-Nr                                               | S1                           | S2                    | S3                             |                  |                              |
| Anzahl Schichten (Quelle)                                    | 4                            | 2                     | 3                              |                  |                              |
| repräsentativer Flächenanteil in %                           | 50,00                        | 30                    | 20                             |                  |                              |
| flächenspezifische Bodentrockenmasse [kg/m <sup>2</sup> ]    | 325,0                        | 195                   | 130                            |                  |                              |
| flächenspezifische Schadstoffmasse [g/m <sup>2</sup> ]       | 113,8                        | 116,025               | 79,56                          |                  |                              |
|                                                              |                              |                       |                                |                  |                              |
| Sondierungen                                                 | Mächtigkeit                  | Trockenraumdichte     | schichtspez. Bodentrockenmasse | Schadstoffgehalt | schichtspez. Schadstoffmasse |
|                                                              | (m)                          | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (kg/m <sup>2</sup> )           | (mg/kg)          | (g/m <sup>2</sup> )          |
| S1 (gesamt)                                                  | 0,50                         | 1,3                   | 650,0                          |                  | 227,5                        |
| Schicht-Nr. 1 (S1.1)                                         | 0,20                         | 1,3                   | 260,0                          | 415,00           | 107,9                        |
| Schicht-Nr. 2 (S1.2)                                         | 0,10                         | 1,3                   | 130,0                          | 280,00           | 36,4                         |
| Schicht-Nr. 3 (S1.3)                                         | 0,10                         | 1,3                   | 130,0                          | 350,00           | 45,5                         |
| Schicht-Nr. 4 (S1.4)                                         | 0,10                         | 1,3                   | 130,0                          | 290,00           | 37,7                         |
|                                                              |                              |                       |                                |                  |                              |
| S2 (gesamt)                                                  | 0,50                         | 1,3                   | 650,0                          |                  | 386,8                        |
| Schicht-Nr. 1 (S2.1)                                         | 0,30                         | 1,3                   | 390,0                          | 675,00           | 263,3                        |
| Schicht-Nr. 2 (S2.2)                                         | 0,20                         | 1,3                   | 260,0                          | 475,00           | 123,5                        |
|                                                              |                              |                       |                                |                  |                              |
| S3 (gesamt)                                                  | 0,50                         | 1,3                   | 650,0                          |                  | 397,8                        |
| Schicht-Nr. 1 (S3.1)                                         | 0,20                         | 1,3                   | 260,0                          | 765,00           | 198,9                        |
| Schicht-Nr. 2 (S3.2)                                         | 0,20                         | 1,3                   | 260,0                          | 535,00           | 139,1                        |
| Schicht-Nr. 3 (S3.3)                                         | 0,10                         | 1,3                   | 130,0                          | 460,00           | 59,8                         |
|                                                              |                              |                       |                                |                  |                              |
| gesamtflächenspezifische Schadstoffmasse (g/m <sup>2</sup> ) | 309,3                        |                       |                                |                  |                              |
| Schadstoffmasse gesamt (g)                                   | 525.869,500                  |                       |                                |                  |                              |

Abb. 24: Eingabeparameter zur Ermittlung der Schadstoffmasse über Sondierungen

Zunächst muss die Anzahl der verfügbaren Sondierungen eingegeben werden (Abb. 24). Für jede Sondierung (fortlaufend nummeriert als S1, S2, S3...) werden dann dynamisch die entsprechenden Eingabespalten erzeugt. Für jede Sondierung ist anschließend die Anzahl der Schichten und die jeweilige Flächenrepräsentanz (%) einzugeben. Dabei ist darauf zu achten, dass die Summe der Flächenrepräsentanz 100 % ergibt.

Entsprechend der für die einzelnen Sondierungen eingegebenen Schichtanzahl werden dann dynamisch die entsprechenden Felder/Spalten zur Eingabe von Mächtigkeit (m), Trockenraumdichte (kg/dm<sup>3</sup>) und Schadstoffgehalt (mg/kg) der Schichten erzeugt. Dabei ist zu beachten, dass die Schichten sich auf die Untersuchung der Quelle beziehen und nichts mit dem im Arbeitsblatt „Standort“ eingegeben typischen Schichtprofil für die Transportstrecke zu tun haben. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass die gesamte Mächtigkeit der einzelnen Sondierungen der aus der Eingabe zur OK und UK (Differenz) der Quelle im Arbeitsblatt „Standort“ resultierenden Mächtigkeit entspricht. Daraus wird dann für jede Sondierung die flächenspezifische Schadstoffmasse (g/m<sup>2</sup>) und über Multiplikation mit dem Flächenanteil und anschließende Aufsummierung die gesamtflächenspezifische Schadstoffmasse (g/m<sup>2</sup>) berechnet und angezeigt. Durch Multiplikation mit der kontaminierten Fläche (Arbeitsblatt „Standort“) wird die gesamte Schadstoffmasse (g) errechnet und angezeigt (Abb. 24).

### c) Schadstofffreisetzung

Bei der Betrachtung des Schadstofffreisetzungsverhaltens der Quelle können zwei Quelltypen unterschieden werden:

- zeitlich konstante Quellskonzentration (Quelltyp A)
- exponentiell abfallende Quellskonzentration (Quelltyp B)

Die theoretischen Grundlagen dazu sind in der Arbeitshilfe DU [1] im Kap. A1.2.3 beschrieben. Das Freisetzungsverhalten wird bei beiden Quelltypen vom mobilisierbaren Anteil (Masse %) und der initialen Quellskonzentration ( $\mu\text{g/l}$ ) bestimmt (Abb. 25). Der mobilisierbare Anteil stellt den Anteil an der gesamten Schadstoffmasse dar, der bei Durchsickerung der Quelle mit Niederschlagswasser mobilisierbar ist. Er ist vom Anwender aufgrund von Erfahrungen oder von Laborversuchen (Elutionstests) abzuschätzen. Die initiale Quellskonzentration ist die Stoffkonzentration im Sickerwasser zu Beginn der Emission. Sie wird in der Regel ebenfalls aus Laborversuchen (Elutionstests) bestimmt.

Beim Quelltyp A bleibt die Konzentration konstant auf dem Niveau der initialen Quellskonzentration, während sie beim Quelltyp B exponentiell entsprechend der Abklingkonstante ( $1/a$ ) abfällt. Die Abklingkonstante, die die Schnelligkeit des Konzentrationsabfalles beschreibt, wird entsprechend der in der Arbeitshilfe DU im Kap. A1.2.3 beschriebenen Formel (A1) berechnet. Bei Eingabe der entsprechenden Daten für beide Quelltypen A und B hat der Anwender die Möglichkeit, erst nach dem Start der Berechnung zu entscheiden, für welchen Quelltyp er die Berechnung durchführen will. In manchen Fällen kann es auch sinnvoll sein, Berechnungen für beide Quelltypen durchzuführen und die Ergebnisse zu vergleichen.

#### Schadstofffreisetzung

| zeitliche Entwicklung Quellskonzentration        | konstant | exponentiell abklingend |
|--------------------------------------------------|----------|-------------------------|
| Quelltyp                                         | A        | B                       |
| mobilisierbarer Anteil (%)                       | 10,0     | 10,0                    |
| initiale Quellskonzentration ( $\mu\text{g/l}$ ) | 550,000  | 550,000                 |
| Abklingkonstante berechnet ( $1/a$ )             |          | 4,444E-03               |

Abb. 25: Eingabeparameter zur Beschreibung des Schadstofffreisetzungsverhaltens

### B3.2.4 Arbeitsblatt „Transport“

Im Arbeitsblatt „Transport“ (Abb. 26) werden die erforderlichen Daten zur Beschreibung der Transportstrecke eingegeben. Entsprechend der im typischen Schichtprofil im Arbeitsblatt „Standort“ angegebenen Schichtanzahl werden für jede Schicht entsprechende Eingabezeilen mit den relevanten Bodenkennwerten und  $k_d$ -Werten erzeugt.

| Schicht-Nr | Tiefe      |            | Boden-/Gesteinsart             | Parameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte |                      |                  |                                 |                                 |                               |                               |         | Parameter zur Ermittlung der $k_d$ -Werte Cadmium |           |                                              |                                   |                                                       |                        |
|------------|------------|------------|--------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|---------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------|
|            | von        | bis        | Symbol<br>(KAS/GeoBerichte 19) | Trocken-<br>rohdichte                       | Grobboden-<br>anteil | Humus-<br>gehalt | Feld-<br>kapazität<br>Richtwert | Luft-<br>kapazität<br>Richtwert | Feld-<br>kapazität<br>gewählt | Luft-<br>kapazität<br>gewählt | pH-Wert | Tongehalt                                         | Corg      | Referenz-<br>Konzentration<br>Linearisierung | $k_d$ -Wert<br>berechnet<br>(BGP) | $k_d$ -Wert<br>berechnet<br>(Van den Berg<br>& Poels) | $k_d$ -Wert<br>gewählt |
| Einheit    | (m u. GOK) | (m u. GOK) |                                | ( $\text{kg/dm}^3$ )                        | (Vol %)              | (Masse %)        | (Vol %)                         | (Vol %)                         | (Vol %)                       | (Vol %)                       |         | (Masse %)                                         | (Masse %) | ( $\mu\text{g/l}$ )                          | ( $\text{l/kg}$ )                 | ( $\text{l/kg}$ )                                     | ( $\text{l/kg}$ )      |
| 1          | 0,50       | 1,00       | Su2                            | 1,5                                         | 0,0                  | 0,0              | 23,0                            | 21,0                            | 23,0                          | 0,0                           | 4,0     | 1,0                                               | 0,1       | 500,0                                        | 2,989                             | 7,006                                                 | 3,000                  |
| 2          | 1,00       | 2,00       | Si3                            |                                             |                      |                  |                                 |                                 |                               |                               |         |                                                   |           |                                              |                                   |                                                       |                        |
| 3          | 2,00       | 3,50       | LS2                            |                                             |                      |                  |                                 |                                 |                               |                               |         |                                                   |           |                                              |                                   |                                                       |                        |

Abb. 26: Eingabeparameter zur schichtweisen Beschreibung der Transportstrecke im Arbeitsblatt „Transport“

Die schichtspezifische Eingabe erfolgt über eine Eingabemaske (Abb. 27), die sich beim Anklicken der jeweiligen Schicht-Nr (grünes Feld) öffnet (Abb. 26). Der Aufbau der Eingabemaske „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ ist abhängig von der im Arbeitsblatt „Quelle“ eingegebenen Schadstoffart (Anorganik/Organik).

#### a) Eingabemaske für anorganische Schadstoffe

Im Eingabefenster links oben werden unter Schichtauswahl die aus dem Arbeitsblatt „Standort“ übernommenen Schichten des standorttypischen Schichtprofils angezeigt (Abb. 27). Die zuvor beim Anklicken im Arbeitsblatt „Transport“ ausgewählte Schicht-Nr ist in der Eingabemaske bereits vorausgewählt (blau unterlegt). Sofern bereits Werte eingetragen sind, werden diese in den Eingabefeldern angezeigt und können durch neue Werte überschrieben werden.

In den Eingabefeldern in der linken unteren Hälfte des Eingabefensters werden die Parameter zur Ermittlung der Feld- und Luftkapazität eingegeben. Entsprechend der Feinbodenart bzw. dem Festgestein des Schichtprofils und den einzugebenden Werten für die Trockenrohdichte ( $\text{kg/dm}^3$ ), dem Grobbodenanteil (Vol. %) und dem Humusgehalt (Masse %) werden gem. Tab. 70 der KA 5 die Werte der Feld- und Luftkapazität (Vol. %) ermittelt und als Richtwert in das Eingabefeld übernommen. Der Anwender hat die Möglichkeit, auch von den Richtwerten abweichende Werte einzugeben. Besteht die Schicht aus Festgestein/Festgesteinsersatz wird der entsprechende Wert aus dem Arbeitsheft Boden/Auswertungsmethoden im Bodenschutz [3] als Richtwert für die Feld-/Luftkapazität angezeigt und übernommen.

Schichtspezifische Boden- und Transportparameter

Gewählter Schadstoff: Cadmium

| Schicht | Von | Bis | Bodenart | Festgestein |
|---------|-----|-----|----------|-------------|
| Nr. 1   | 0,5 | 1   | Su2      |             |
| Nr. 2   | 1   | 2   | Sl3      |             |
| Nr. 3   | 2   | 3,5 | Ls2      |             |

Feld-/Luftkapazität

Trockenrohdichte ( $\text{kg/dm}^3$ ) 1,5

Grobbodenanteil (Vol. %) 0

Humusgehalt (Gehalt %) 0

Feldkapazität (Vol. %) 23 Richtwert: 23

Luftkapazität (Vol. %) 21 Richtwert: 21

kd-Werte

pH 4

Tongehalt (Masse %) 1

Corg (Masse %) 0,1

Referenz-Konzentration Linearisierung ( $\mu\text{g/l}$ ) 500

kd BGR ( $\text{l/kg}$ ) 2,98889877558656 Übernehmen

kd vdB ( $\text{l/kg}$ ) 7,00605301656741 Übernehmen

kd\_Org ( $\text{l/kg}$ ) Übernehmen

kd Auswahl ( $\text{l/kg}$ ) 3

Abbrechen Eingaben übernehmen

Abb. 27: Eingabeparameter zur schichtspezifischen Beschreibung der Transportstrecke für anorganische Schadstoffe

In der rechten Hälfte des Eingabefensters werden die Eingabeparameter zur Berechnung der  $k_d$ -Werte (l/kg) angezeigt. Da sich das Berechnungsverfahren für die  $k_d$ -Werte bei anorganischen und organischen Stoffen unterscheidet, werden die Felder für die jeweils nicht benötigten Parameter ausgegraut und sind für eine Eingabe gesperrt. Die Berechnung des  $k_d$ -Wertes für anorganische Stoffe erfolgt entweder über die statistisch ermittelten Pedotransferfunktionen der BGR ( $k_d$  BGR) [8] oder nach dem Verfahren nach „van den Bergh & Roels“ ( $k_d$  vdBR) [9]. Die Verfahren sind in der Arbeitshilfe DU im Kap. A2.4 [1] beschrieben.

Für anorganische Schadstoffe werden dazu die Parameter pH, Tongehalt (Masse %), organischer Kohlenstoffgehalt Corg (Masse %) und die Referenzkonzentration für die Linearisierung benötigt. Als Vorgabewert für die Linearisierung wird automatisch der Wert der initialen Quellkonzentration aus dem Arbeitsblatt „Quelle“ übernommen. Der Anwender kann hier auch einen eigenen Wert eingeben und kann so die Auswirkung der Referenzkonzentration „Linearisierung“ auf den  $k_d$ -Wert unmittelbar prüfen. Grundsätzlich verringert sich der  $k_d$ -Wert mit zunehmender Referenzkonzentration. Die nach den Verfahren BGR bzw. vdBR berechneten  $k_d$ -Werte (l/kg) können durch Klick auf die Schaltfläche „Übernehmen“ in das Feld „ $k_d$ -Auswahl“ (l/kg) übernommen werden. Alternativ kann dort aber auch ein vom Anwender ermittelter Wert (bspw. Laborwert aus der Bestimmung einer standortspezifischen Sorptionsisotherme) eingegeben werden. Die im Eingabefenster eingegebenen/angezeigten Werte können abschließend durch Anklicken der Schaltfläche „Eingabe übernehmen“ in das Arbeitsblatt „Transport“ übernommen. Sofern erforderlich, kann die Eingabe über die Schaltfläche „Abbrechen“ auch abgebrochen werden. Bei weiteren Schichten wird die Eingabe entsprechend wiederholt.

#### **b) Eingabemaske für organische Schadstoffe**

Die Eingabemaske für organische Schadstoffe unterscheidet sich von der Eingabemaske für anorganische Stoffe nur bei der Ermittlung der  $k_d$ -Werte in der rechten Hälfte des Eingabefensters (Abb. 28). Die Eingabe der Parameter zur Ermittlung der Feld-/Luftkapazität entspricht der Vorgehensweise bei anorganischen Stoffen (siehe oben). Die Ermittlung des  $k_d$ -Wertes für organische Stoffe erfolgt nach dem sogenannten „koc-Konzept“ und ist in der Arbeitshilfe DU im Kap. A2.4 [1] beschrieben.

Dafür wird neben dem koc-Wert (Stoffeigenschaft) der organische Kohlenstoffgehalt Corg (Masse %) benötigt. Die für organische Stoffe nicht benötigten Parameter sind ausgegraut und für eine Eingabe gesperrt. Der im Auswahlfenster nicht angezeigte koc-Wert wird automatisch aus dem Arbeitsblatt „Stoffdaten-Organik“ entnommen und zur Berechnung des  $k_d$ -Wertes (l/kg) verwendet. Der berechnete  $k_d$ -Wert  $k_d\_Org$  (l/kg) kann durch Klick auf die Schaltfläche „Übernehmen“ in das Feld „ $k_d$ -Auswahl“ übernommen werden. Alternativ kann dort aber auch ein vom Anwender ermittelter Wert (bspw. Laborwert) eingegeben werden. Die im Eingabefenster eingegebenen/angezeigten Werte können abschließend durch Anklicken der Schaltfläche „Eingabe übernehmen“ in das Arbeitsblatt „Transport“ übernommen werden. Sofern erforderlich, kann die Eingabe über die Schaltfläche „Abbrechen“ auch abgebrochen werden. Bei weiteren Schichten wird die Eingabe entsprechend wiederholt.

Schichtspezifische Boden- und Transportparameter

Gewählter Schadstoff: Benzol

Schichtauswahl

| Schicht | Von | Bis | Bodenart | Festgestein |
|---------|-----|-----|----------|-------------|
| Nr. 1   | 0,5 | 1   | Su2      |             |
| Nr. 2   | 1   | 2   | Sl3      |             |
| Nr. 3   | 2   | 3,5 | Ls2      |             |

Feld-/Luftkapazität

Trockenrohdichte (kg/dm³)

Grobbodenanteil (Vol %)

Humusgehalt (Gehalt %)

Feldkapazität (Vol %)  Richtwert: 23

Luftkapazität (Vol %)  Richtwert: 21

kd-Werte

pH

Tongehalt (Masse %)

Corg (Masse %)

Referenz-Konzentration Linearisierung (µg/l)

kd BGR (l/kg)  Übernehmen

kd vdB (l/kg)  Übernehmen

kd\_Org (l/kg)  Übernehmen

kd Auswahl (l/kg)

Abbrechen Eingaben übernehmen

Abb. 28: Eingabeparameter zur schichtspezifischen Beschreibung der Transportstrecke für organische Schadstoffe

### B3.3 Durchführung der Berechnung

Nach der Eingabe der Daten in die Arbeitsblätter „Projekt“, „Standort“, „Quelle“ und „Transport“ kann die Berechnung der Sickerwasserprognose gestartet werden. Es wird empfohlen, vorher nochmal die Eingaben in den Arbeitsblättern auf Plausibilität zu prüfen. Die Berechnung wird durch Anklicken der Schaltfläche mit dem Symbol  $\Sigma$  (ganz links) im ALTEX-1D-Menüband (s. Kap. B3.1) gestartet. Nach dem Anklicken erscheint zunächst das Eingabefenster „Sickerwasserprognose starten“ (Abb. 29)

Sickerwasserprognose starten

Zeitpunkt

☒ PW-Unterschreitung

☐ gewählt (Jahre)

Berechne Fall A Berechne Fall B

Userform schließen

Sickerwasserprognose starten

Zeitpunkt

☐ PW-Unterschreitung

☒ gewählt (Jahre)

Berechne Fall A Berechne Fall B

Userform schließen

Abb. 29: Eingabefenster zum Start der Berechnung

Im Eingabefenster muss der Anwender durch Markierung der entsprechenden Schaltfläche zunächst entscheiden, ob die Berechnung bis zur Unterschreitung des Prüfwertes am OdB bzw. des entsprechenden Vergleichswertes (GFS oder EW) oder bis zu einem vom Anwender vorgebbaren Zeitpunkt durchgeführt werden soll.

#### **Zeitpunkt „PW-Unterschreitung“**

Bei Auswahl „PW-Unterschreitung“ (Abb. 29 links) wird die Berechnung solange durchgeführt, bis die Konzentration im Sickerwasser am OdB den PW bzw. Vergleichswert unterschreitet. Um eine adäquate graphische Darstellung des Konzentrationsverlaufes am OdB zu ermöglichen, wird die Berechnung immer einige Jahre über den Zeitpunkt der PW/Vergleichswert-Unterschreitung hinaus fortgesetzt. Die Berechnung der entsprechenden Kenngrößen (siehe unten) und Massenbilanzen sowie die graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgt für den Zeitpunkt der PW-Unterschreitung. Als Startzeitpunkt wird in der Regel der Beginn der Schadstoff-Emission aus der Quelle zugrundegelegt.

#### **Zeitpunkt „gewählt (Jahre)“**

Bei Auswahl der Schaltfläche „gewählt (Jahre)“ (Abb. 29 rechts) erscheint ein Feld zur Eingabe des gewünschten Berechnungszeitpunktes (Jahre nach Emissionsbeginn). Die Berechnung der entsprechenden Kenngrößen (siehe unten) und Massenbilanzen sowie die graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgt dann für den eingegebenen Zeitpunkt.

Nach Auswahl/Eingabe des Berechnungszeitpunktes hat der Anwender die Möglichkeit, durch Anklicken der entsprechenden Schaltflächen „Berechne Fall A“ bzw. „Berechne Fall B“ (Abb. 29) die Berechnung entweder für den Quelltyp A (konstante Quellkonzentration) oder B (exponentiell abfallende Quellkonzentration) durchführen zu lassen. Falls gewünscht, kann der Anwender vor dem Start der Berechnung das Eingabefenster auch durch Anklicken der Schaltfläche „UserForm schließen“ verlassen.

Nach dem Anklicken der Schaltflächen zur Berechnung wird ein Fenster (Abb. 30) eingeblendet, das den Anwender durch eine Balkendarstellung über den Berechnungsfortschritt informiert. Da ALTEX-1D bei jeder Berechnung den Konzentrationsverlauf am OdB und ein Konzentrationsprofil der Transportstrecke für den jeweiligen Berechnungszeitpunkt ermittelt, werden im Fortschrittsdiagramm entsprechend zwei Balken angezeigt.

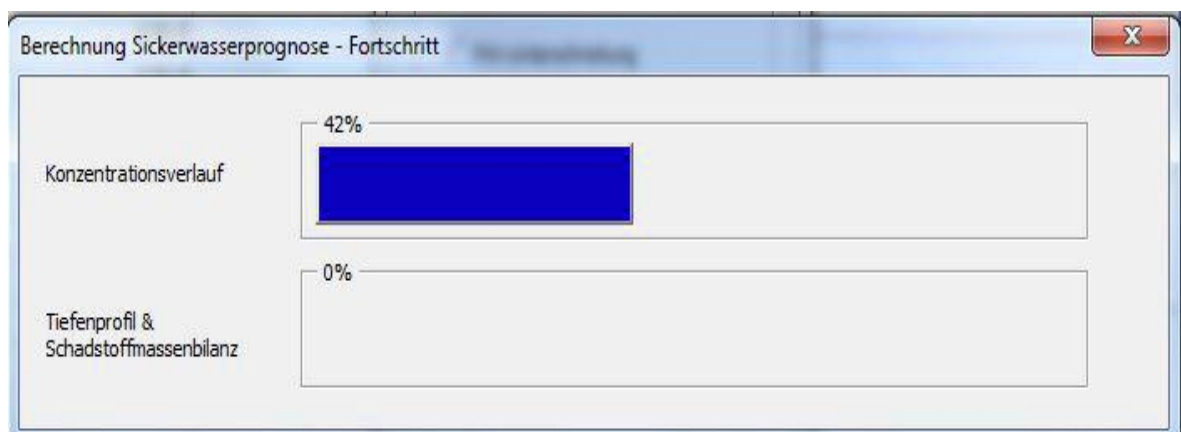


Abb. 30: Informationsfenster zum Fortschritt der Berechnung

Nach dem Abschluss der Berechnung erscheinen im Arbeitsblatt-Register am unteren Rand drei zusätzliche Arbeitsblätter („ErgebnisausgabeA“ bzw. „ErgebnisausgabeB“, „Jahreswerte am OdB“, „Werte Tiefenprofil“), in denen die Ergebnisse der Berechnung ausgegeben werden (Abb. 31), wobei das Arbeitsblatt „ErgebnisausgabeA“ bzw. „ErgebnisausgabeB“ aktiviert ist.



Abb. 31: Arbeitsblatt-Register nach dem Ende der Berechnung

#### a) Arbeitsblatt „Ergebnisausgabe A“ bzw. „ErgebnisausgabeB“

Im Arbeitsblatt „ErgebnisausgabeA“ (bei Berechnung des Quelltyps B „ErgebnisausgabeB“) ist das Ergebnis der Prognose mit den Graphiken und den Eingabeparametern zusammenfassend dargestellt. Die jeweiligen Bereiche des Arbeitsblattes können durch vertikales Scrollen nach oben/unten angezeigt werden. Im oberen Teil des Arbeitsblattes sind die Eingabeparameter der Arbeitsblätter „Standort“, „Quelle“, „Transport“ sowie wichtige Berechnungsgrößen für die Transportstrecke dargestellt. Im Themenblock „Standort“ sind auch die entsprechenden Skizzen zur Darstellung der konzeptionellen Standortsituation enthalten (Abb. 32).

Im Themenblock „Quelle“ ist eine graphische Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Quellkonzentration enthalten (Abb. 33). Daraus ist auch die Emissionsdauer ersichtlich.

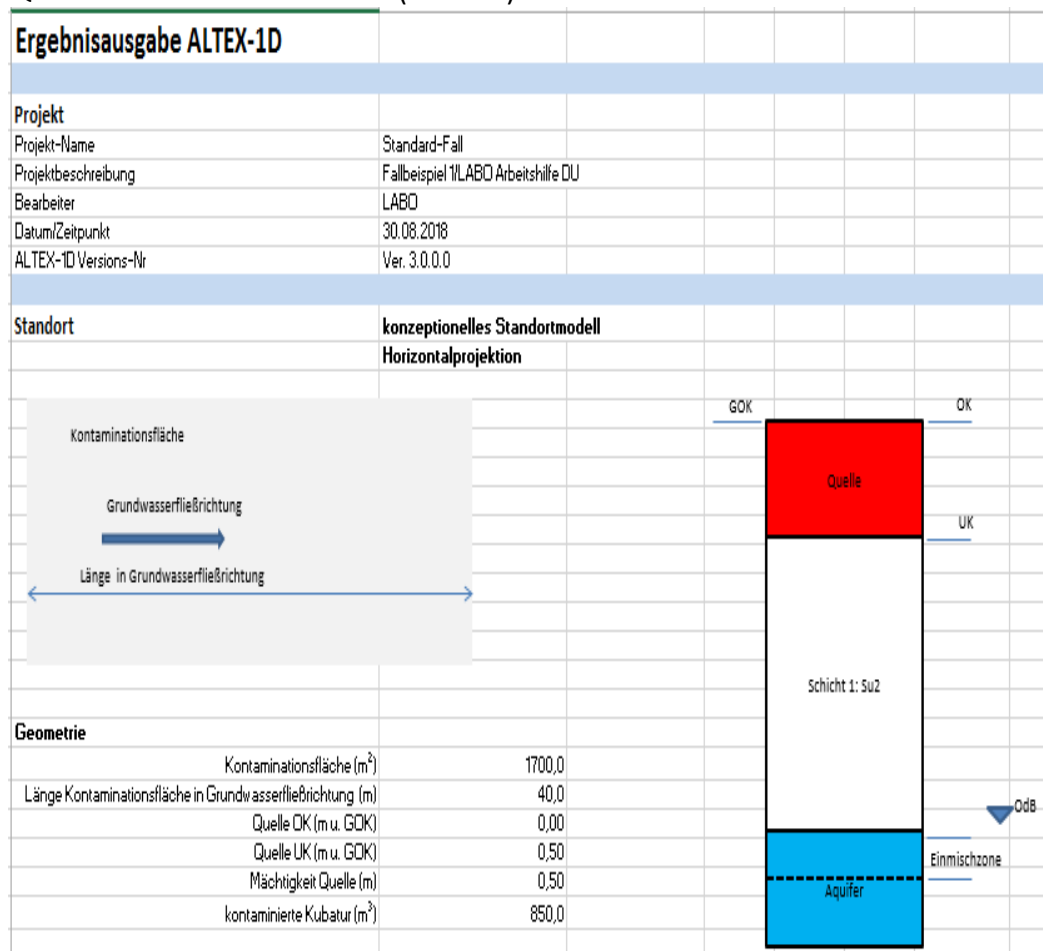


Abb. 32: Darstellung der Eingabeparameter zum Standort im Arbeitsblatt „ErgebnisausgabeA/ErgebnisausgabeB“

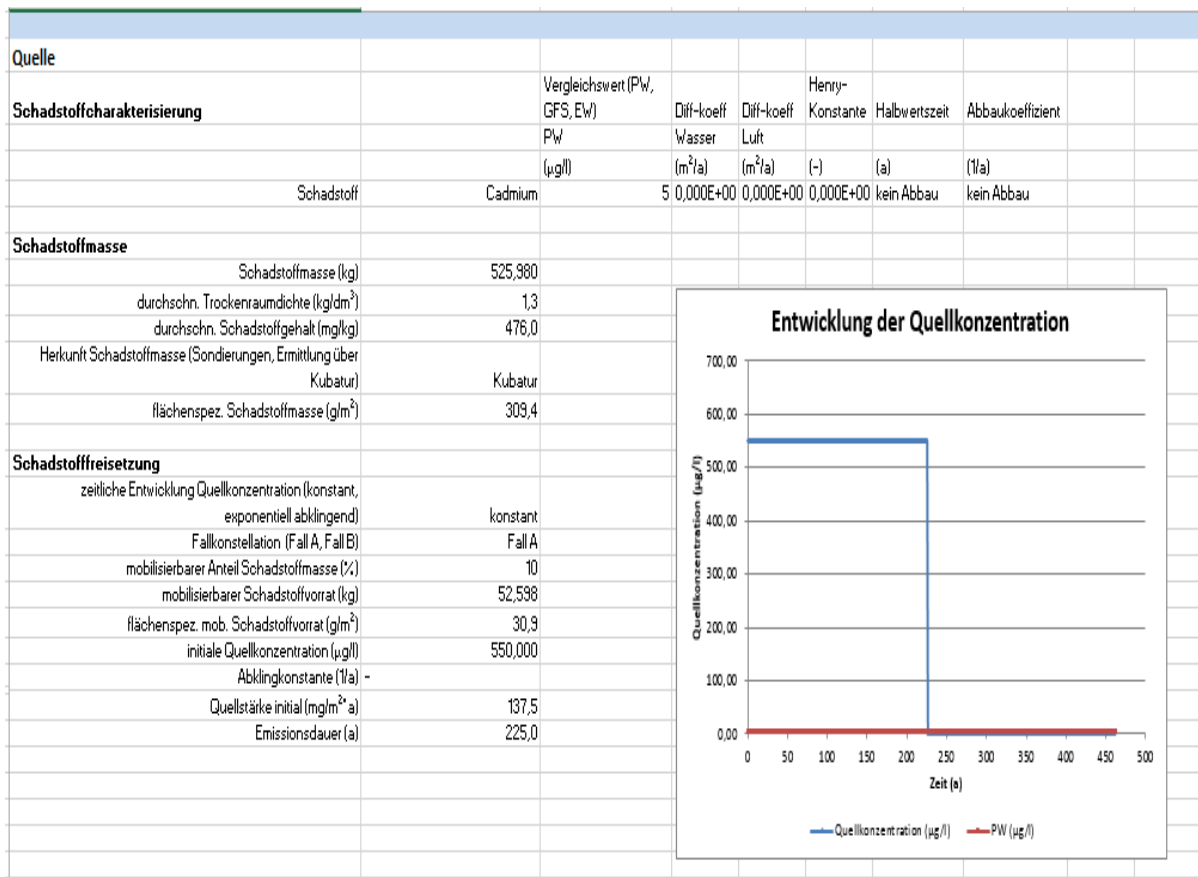


Abb. 33: Darstellung der Eingabeparameter zur Beschreibung der Quelle im Arbeitsblatt „ErgebnisAusgabeA/ErgebnisAusgabeB“

Die Ausgabe von Informationen zur Charakterisierung der Transportstrecke erfolgt unter der Überschrift „Transport-Kennwerte“ (Abb. 34).

| Transport-Kennwerte                                     |       |
|---------------------------------------------------------|-------|
| Länge Transportstrecke (m)                              | 3,00  |
| Sickerwassergeschwindigkeit (m/a)                       | 1,087 |
| Sickerwasserverweilzeit (a)                             | 2,8   |
| äquiv. Trockenraumdichte (kg/dm³)                       | 1,50  |
| äquiv. Feldkapazität (Vol. %)                           | 23,00 |
| äquiv. Dispersions-Skalenfaktor                         | 0,100 |
| äquiv. kd-Wert (l/kg)                                   | 3,000 |
| long. Dispersivität (m)                                 | 0,300 |
| long. Dispersionskoeffizient (m²/a)                     | 0,326 |
| Retardationsfaktor                                      | 20,6  |
| Schadstoff-Aufenthaltsdauer in der Transportstrecke (a) | 56,8  |

Abb. 34: Darstellung der Transport-Kennwerte im Arbeitsblatt „ErgebnisAusgabeA/ErgebnisAusgabeB“

Unter der Überschrift „Prognose“ werden für den gewählten Berechnungszeitpunkt Ergebnisse zu den Themen „Kenngrößen für den OdB“, „Kenngrößen für die Transportstrecke“, „Schadstoffmassenbilanz“ und „Auswirkungen auf das Grundwasser“ ausgegeben (Abb. 35).

| A                                                              | B        |
|----------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Prognose</b>                                                |          |
| Zeitraum (Jahre nach Emissionsbeginn)                          | 452,0    |
| <b>Kenngroßen für den OdB</b>                                  |          |
| Maximalkonzentration ( $\mu\text{g/l}$ )                       | 549,895  |
| Zeitpunkt der Maximalkonzentration (a)                         | 236,0    |
| Zeitpunkt der Prüfwertüberschreitung (a)                       | 21,0     |
| Zeitpunkt der Prüfwertunterschreitung (a)                      | 376,0    |
| Dauer der Prüfwertüberschreitung (a)                           | 355,0    |
| maximale Fracht ( $\text{g/a}$ )                               | 233,7    |
| mittlere Fracht ( $\text{g/a}$ )                               | 148,0    |
| maximale Emissionsstärke ( $\text{mg/m}^2\cdot\text{a}$ )      | 137,5    |
| mittlere Emissionsstärke ( $\text{mg/m}^2\cdot\text{a}$ )      | 87,1     |
| <b>Kenngroßen für die Transportstrecke</b>                     |          |
| Maximalkonzentration ( $\mu\text{g/l}$ )                       | 5,098    |
| Tiefe der Maximalkonzentration (m)                             | 2,99     |
| Schadstoffmasse sorbiert am Bodenfeststoff (kg)                | 0,026172 |
| Schadstoffmasse gelöst im Sickerwasser (kg)                    | 0,001338 |
| Schadstoffmasse in der Bodenluft (kg)                          | 0,000000 |
| Summe Schadstoffmasse in der Transportstrecke (kg)             | 0,027509 |
| <b>Schadstoffmassenbilanz</b>                                  |          |
| Schadstoffemission aus der Quelle (kg)                         | 52,598   |
| Schadstoffmasse in der Transportstrecke (kg)                   | 0,028    |
| abgebaute Schadstoffmasse (kg)                                 | 0,000    |
| Schadstoffemission in das Grundwasser (kg)                     | 52,548   |
| <b>Auswirkungen auf das Grundwasser</b>                        |          |
| maximale Konzentration in der Einmischzone ( $\mu\text{g/l}$ ) | 132,390  |
| mittlere Konzentration in der Einmischzone ( $\mu\text{g/l}$ ) | 83,853   |
| max. Verdünnungsfaktor                                         | 4,2      |
| max. Überschreitungsfaktor GFS                                 | 441,3    |

Abb. 35: Darstellung der Prognose-Ergebnisse im Arbeitsblatt „ErgebnisausgabeA/ErgebnisausgabeB“

Die graphische Darstellung der Prognose-Ergebnisse erfolgt rechts davon (durch horizontales Scrollen des Bildschirms erreichbar). Dargestellt werden der Konzentrationsverlauf am OdB (Abb. 36 links) und das vertikale Konzentrationsprofil in der Transportstrecke (gelöste Konzentration im Sickerwasser) (Abb. 36 rechts) für den Berechnungszeitpunkt.

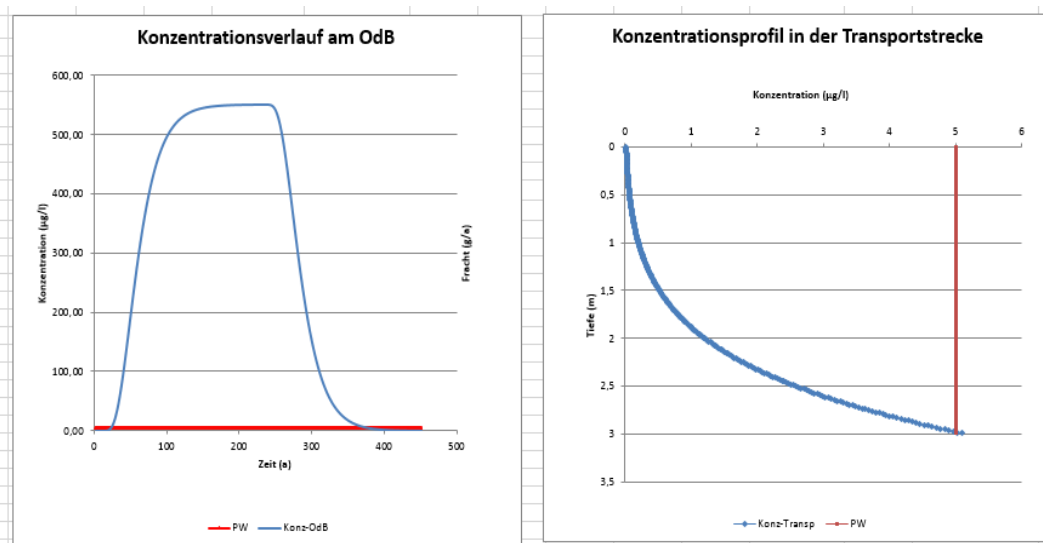


Abb.

36: Graphische Darstellung des Konzentrationsverlaufes am OdB und des Konzentrationsprofils im Arbeitsblatt „ErgebnisausgabeA/ErgebnisausgabeB“

Darüber hinaus erfolgt eine graphische Darstellung der Schadstoffverteilung in der Transportstrecke (Abb. 37 links) für den Berechnungszeitpunkt sowie eine Darstellung der Massenbilanz (Abb. 37 rechts).

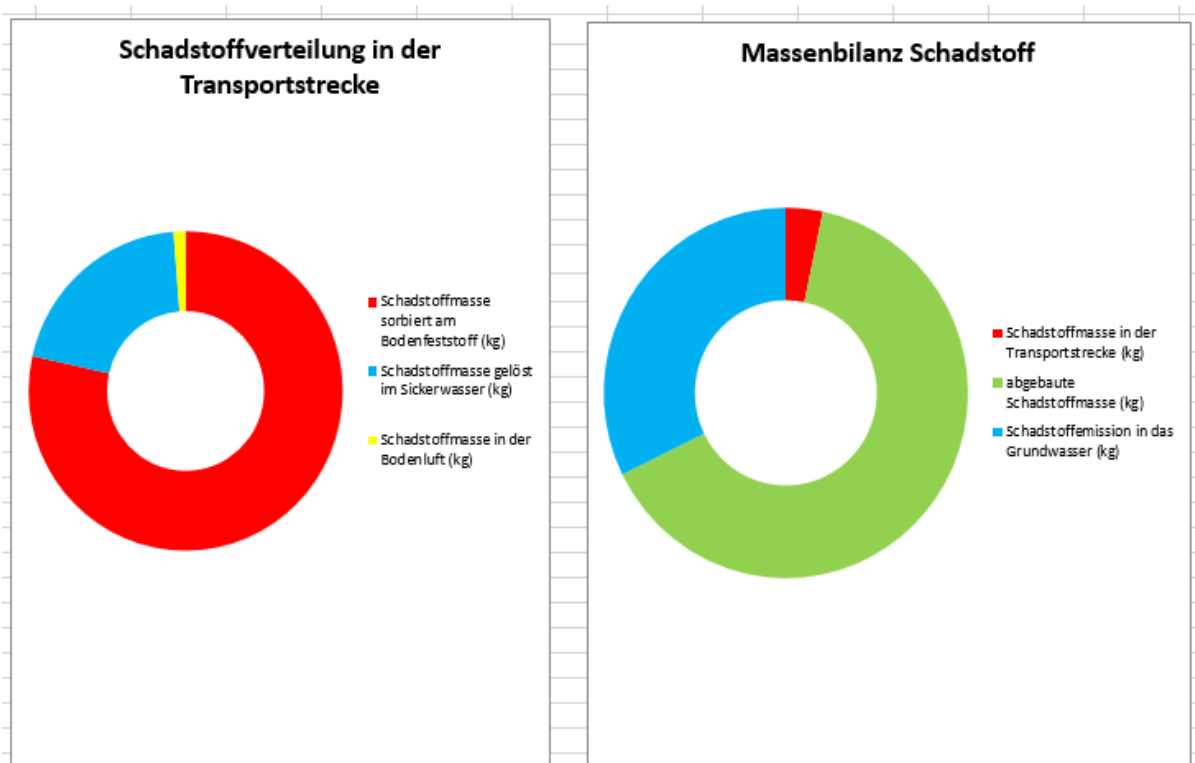


Abb. 37: Graphische Darstellung der Schadstoffverteilung in der Transportstrecke und der Massenbilanz im Arbeitsblatt „ErgebnisAusgabeA/ErgebnisAusgabeB“

### **Kenngrößen für den OdB**

Die im Arbeitsblatt „ErgebnisAusgabeA“ bzw. „ErgebnisAusgabeB“ dargestellten Kenngrößen für den OdB können der Abb. 35 entnommen werden. Dabei handelt es sich um charakteristische Größen zum prognostizierten Verlauf der zeitlichen Entwicklung der Konzentrationen (Abb. 36 links) und Frachten ( $\text{g/a}$ ) sowie Emissionsstärken ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{a}$ ) am OdB.

### **Kenngrößen für die Transportstrecke**

Die im Arbeitsblatt „ErgebnisAusgabeA“ bzw. „ErgebnisAusgabeB“ dargestellten Kenngrößen für die Transportstrecke sind aus Abb. 35 ersichtlich. Sie beschreiben die Kontaminationssituation in der Transportstrecke mit Informationen zum vertikalen Kontaminationsprofil sowie zur Tiefe und zum Betrag der Maximalkonzentration (Abb. 35) und der Schadstoffverteilung in der Transportstrecke (Abb. 37 links) zum Berechnungszeitpunkt.

### **Schadstoffmassenbilanz**

ALTEX-1D erstellt im Rahmen der Prognoserechnung eine Massenbilanz für den Berechnungszeitpunkt (Abb. 35). Daraus wird ersichtlich, welcher Anteil der aus der Quelle emittierten Schadstoffmasse sich noch in der Transportstrecke befindet und welcher Anteil der Schadstoffmasse abgebaut wurde oder bereits in das Grundwasser übergetreten ist (Abb. 37 rechts).

### Auswirkungen auf das Grundwasser

Wie im Kap. B3.2.2 e) erläutert, kann in der neuen Version von ALTEX-1D der Einmischprozess von Sickerwasser in das Grundwasser berücksichtigt werden und damit die Auswirkungen von Sickerwasserfrachten auf das Grundwasser abgeschätzt werden. ALTEX-1D berechnet aus der in das Grundwasser übergetretenen Schadstofffracht die Konzentrationen in der Einmischzone (maximale und mittlere Konzentration) sowie den resultierenden Verdünnungsfaktor und, sofern für den Schadstoff eine GFS vorhanden ist, den entsprechenden Überschreitungsfaktor (Abb. 35). Damit kann der Anwender unmittelbar eine Bewertung im Hinblick auf eine mögliche nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit [7] infolge einer PW-Überschreitung am OdB vornehmen.

### b) Arbeitsblatt „Jahreswerte am OdB“

Im Arbeitsblatt „Jahreswerte am OdB“ werden die jährlichen Konzentrations- und Frachtwerte am OdB und an der UK der Quelle (Austritt in die Transportstrecke) für den Prognosezeitraum ausgegeben und können für eigene Auswertungen weiterverwendet werden (Abb. 38)

| Konzentrations- und Frachtentwicklung im Prognosezeitraum |                    |              |                     |                       |                        |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|--------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Version Ver. 3.0.0.0                                      |                    |              |                     |                       |                        |
| Jahr                                                      | Konz-ODB<br>(µg/l) | PW<br>(µg/l) | Fracht-ODB<br>(g/a) | Konz-Quelle<br>(µg/l) | Fracht-Quelle<br>(g/a) |
| 1                                                         | 0,000              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |
| 2                                                         | 0,000              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |
| 3                                                         | 0,000              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |
| 4                                                         | 0,000              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |
| 5                                                         | 0,000              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |
| 6                                                         | 0,000              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |
| 7                                                         | 0,000              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |
| 8                                                         | 0,000              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |
| 9                                                         | 0,000              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |
| 10                                                        | 0,002              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |
| 11                                                        | 0,006              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |
| 12                                                        | 0,019              | 5,000        | 0,0                 | 550,000               | 233,8                  |

Abb. 38: Zeitliche Entwicklung der Jahreswerte von Konzentrationen und Frachten im Arbeitsblatt „Jahreswerte am OdB“

### c) Arbeitsblatt „Werte Tiefenprofil“

Im Arbeitsblatt „Werte Tiefenprofil“ werden die Werte der Schadstoffverteilung in der Transportstrecke als Tiefenprofil über die Transportstrecke (Standardschrittweite: 5 mm) für den jeweiligen Berechnungszeitpunkt (Zeitpunkt der PW-Unterschreitung oder vom Anwender gewählt) ausgegeben und können für eigene Auswertungen weiterverwendet werden (Abb. 39).

| Konzentrationsprofil in der Transportstrecke |                               |                                |                                  |
|----------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Tiefe<br>(mm)                                | gelöst<br>( $\mu\text{g/l}$ ) | sorbiert<br>( $\text{mg/kg}$ ) | Bodenluft<br>( $\text{mg/m}^3$ ) |
| 1                                            | 0,017                         | 1,266                          | 0,000                            |
| 11                                           | 0,017                         | 1,308                          | 0,000                            |
| 21                                           | 0,018                         | 1,352                          | 0,000                            |
| 31                                           | 0,018                         | 1,397                          | 0,000                            |
| 41                                           | 0,019                         | 1,442                          | 0,000                            |
| 51                                           | 0,019                         | 1,489                          | 0,000                            |
| 61                                           | 0,020                         | 1,537                          | 0,000                            |
| 71                                           | 0,021                         | 1,586                          | 0,000                            |
| 81                                           | 0,021                         | 1,636                          | 0,000                            |
| 91                                           | 0,022                         | 1,687                          | 0,000                            |
| 101                                          | 0,023                         | 1,740                          | 0,000                            |
| 111                                          | 0,023                         | 1,793                          | 0,000                            |
| 121                                          | 0,024                         | 1,848                          | 0,000                            |
| 131                                          | 0,025                         | 1,904                          | 0,000                            |
| 141                                          | 0,026                         | 1,962                          | 0,000                            |
| 151                                          | 0,026                         | 2,020                          | 0,000                            |

Abb. 39: Ausgabe der vertikalen Schadstoffverteilung in der Transportstrecke im Arbeitsblatt „Werte Tiefenprofil“

Dabei ist zu beachten, dass der Nullpunkt der Tiefenkoordinate (mm) nicht auf GOK sondern auf den Anfangspunkt der Transportstrecke (UK Quelle) bezogen ist. Mit Bezug auf die graphische Ausgabe des Konzentrationsprofils (Abb. 36 rechts) ist darauf hinzuweisen, dass der erste berechnete Wert nicht exakt für den Beginn der Transportstrecke (0 mm) sondern für die Tiefe 1 mm ausgegeben wird (Abb. 39).

Für jeden Tiefenschritt (standardmäßig: 5 mm) wird die im Sickerwasser gelöste Stoffkonzentration ( $\mu\text{g/l}$ ), der am Bodenfeststoff sorbierte Gehalt ( $\text{mg/kg}$ ) und die Konzentration in der Bodenluft ( $\text{mg/m}^3$ ) dargestellt. Für die Berechnung wird ein Gleichgewichtszustand zwischen den drei Phasen Sickerwasser, Bodenfeststoff und Bodenluft zugrundegelegt (s. Kap. A3.4.3.1/Arbeitshilfe DU [1]).

#### B3.4 Erstellung eines Ergebnisberichtes

Durch Anklicken der Schaltfläche „Ergebnis als PDF speichern“ im Menüband von ALTEX-1D (Abb. 40) kann der Anwender einen Ergebnisbericht im pdf-Format erstellen lassen (Abb. 41).



Abb. 40: Schaltfläche zur Ausgabe des Ergebnisberichts (pdf-Datei)

1

### Modellgestützte Sickerwasserprognose mit ALTEX-1D

Version 3.0  
LABO Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz  
[www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen-Altex](http://www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen-Altex)

| Projektdaten         |  |
|----------------------|--|
| Projektname:         |  |
| Test-Fall ALA        |  |
| Projektbeschreibung: |  |
| ALA_Demo_Fall A      |  |
| bearbeitet von :     |  |
| Engeser              |  |

Quelle  
Transportstrecke  
Grundwasser

---

#### Eingabedaten - Standortbeschreibung

##### Kontaminationsgeometrie

|                           |      |       |
|---------------------------|------|-------|
| Kontaminationsfläche      | (m²) | 400,0 |
| Quelle OK (m u. GOK)      | (m)  | 0,00  |
| Quelle UK (m u. GOK)      | (m)  | 0,30  |
| Länge in GW-Fließrichtung | (m)  | 20,0  |

##### Wasserhaushalt

| Verfahren zur Berechnung der Sickerwasserrate |        |     |
|-----------------------------------------------|--------|-----|
| eigene Angabe                                 | (mm/a) | 250 |
| Abschätzung nach Beims/Gutt                   | (mm/a) |     |
| Niederschlag                                  | (mm/a) | (-) |
| Bodentyp                                      | (-)    | (-) |
| Vegetationsart                                | (-)    | (-) |
| Verlegetungsgrad                              | (%)    | (-) |
| Sickerwasserrate n. Beims/Gutt                | (mm/a) | (-) |

##### Transportstrecke

|                                     |        |       |
|-------------------------------------|--------|-------|
| Ort der Beurteilung OdB (m. u. GOK) | (m)    | 3,00  |
| mittl. Temp. Transportstrecke       | (°C)   | 15    |
| Disp-Stf (gesamte Transportstrecke) | (-)    | 0,100 |
| Vorbelastung Transportstrecke       | (µg/l) | 0,000 |

##### Aquiferparameter

|                                 |        |           |
|---------------------------------|--------|-----------|
| Mächtigkeit der Einmischzone    | (m)    | 1,0       |
| Durchlässigkeit kf-Wert         | (m/s)  | 1,000E-03 |
| hydraulisches Gefälle           | (m/m)  | 1,000E-03 |
| Schadstoff-Anstromkonzentration | (µg/l) | 0,000     |

21.06.2018

Abb. 41: Ergebnisbericht (Seite 1) der Sickerwasserprognose (pdf-Datei)

Der Ergebnisbericht enthält eine komplette Zusammenfassung der Eingabeparameter und der Ergebnisse der Sickerwasserprognose und umfasst 10 Seiten. Dabei wird eine pdf-Datei erzeugt, die unter eigenem Namen in einem vom Anwender auswählbaren Verzeichnis gespeichert werden kann (Abb. 42).

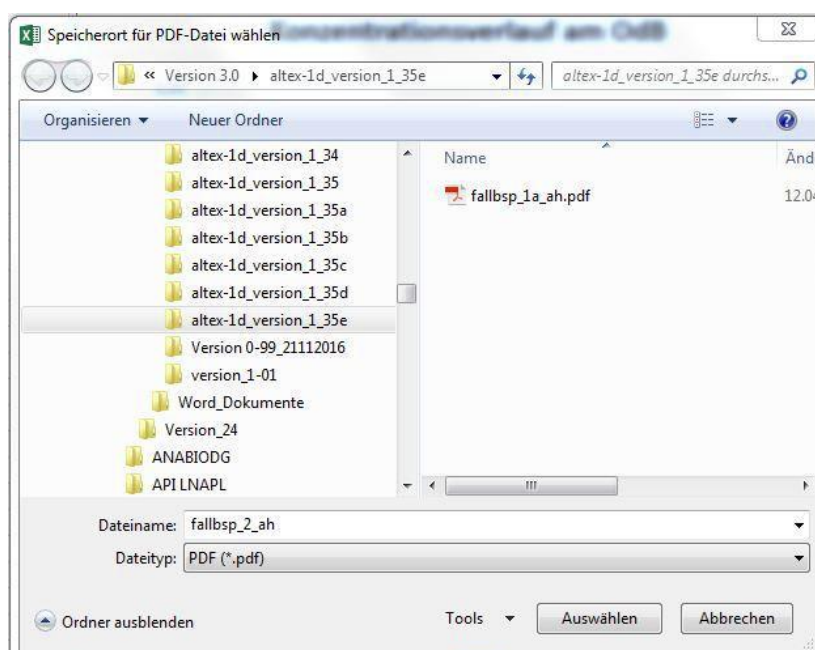


Abb. 42: Abfrage zur Speicherung des Ergebnisberichts als pdf-Datei

### B3.5 Anzeige der Stoffdatentabellen

Die in ALTEX-1D hinterlegten Stoffdatentabellen (Stoffdaten-Anorganik/-Organik) können durch Anklicken der Schaltfläche „Anzeige Stoffdaten“ im ALTEX-1D-Menüband ausgewählt und angezeigt werden (Abb. 43).

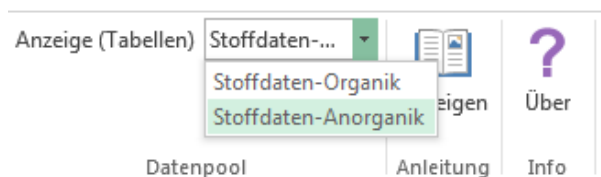


Abb. 43: Schaltfläche zur Auswahl und Anzeige der Stoffdatentabellen (Anorganik/Organik)

Die Stoffdatentabellen enthalten die für die Berechnung erforderlichen physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften und sofern vorhanden, die Prüfwerte der BBodSchV und die GFS der LAWA (2004 und 2016). Die Arbeitsblätter mit den Stoffdaten können über Rechts-Klick mit der Maus und das Auswahl-Menü von Excel auch wieder ausgeblendet werden. Die Stoffdatentabellen sind geschützt und können nicht verändert werden.

### B3.6 Anzeige der Benutzungsanleitung (Kurzanleitung)

Eine Kurzversion der Benutzungsanleitung kann über die Schaltfläche „Anzeigen/Anleitung“ (Abb. 44) als eingebettetes Arbeitsblatt angezeigt werden. Das Arbeitsblatt kann über Rechts-Klick mit der Maus auch wieder ausgeblendet werden.

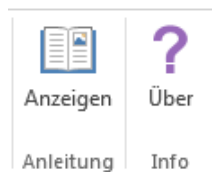


Abb. 44: Schaltfläche zur Anzeige der Benutzungsanleitung (Kurzfassung)

## B4 Fallbeispiele

Die Anwendung von ALTEX-1D wird an Hand von 4 konkreten Fallbeispielen gezeigt. Die Fallbeispiele wurden auf Grundlage „realer“ Fälle erstellt und im Hinblick auf eine möglichst umfassende Demonstration der Funktionalität von ALTEX-1D aufbereitet. Da sich die Anwendung von ALTEX-1D insbesondere bei den Stoffen (Anorganik/Organik) und beim Freisetzungsverhalten (Quelltyp A/Quelltyp B) unterscheidet, ergeben sich die 4 Fallbeispiele:

- (1) Anorganik/Quelltyp A
- (2) Anorganik/Quelltyp B
- (3) Organik/Quelltyp A
- (4) Organik/Quelltyp B

## B4.1 Fallbeispiel 1 (Anorganik/Quelltyp A)

### B4.1.1 Beschreibung des Falles (Wurfscheibenschießanlage)

#### a) Standort

Es handelt sich um eine Wurfscheibenschießanlage für das Trap- und Skeetschießen, die über einen Zeitraum von 40 Jahren betrieben wurde (Abb. 45). Aufgrund des langjährigen Betriebes liegt im Depositionsbereich (15000 m<sup>2</sup>) eine hohe Belastung der oberflächennahen Bodenschicht (0 – 5 cm u. GOK) mit Bleischrot vor. Die Abschätzung auf der Grundlage der jährlichen Schusszahlen ergab eine im Bereich der Depositionsfläche vorhandene Masse an Bleischrot in der Größenordnung von ca. 32 t. Der kontaminierte Bereich wurde durch rasterförmig (25 m x 25 m) durchgeführte Sondierungen mit 7 x 5 Beprobungspunkten untersucht. Je Beprobungspunkt wurden 2 Tiefenintervalle (0 - 5 cm, 5 – 15 cm) untersucht. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tab. 1 aufgeführt.

| Tiefenintervall | Bodenart                    | mittl. Gehalte (mg/kg) |         |
|-----------------|-----------------------------|------------------------|---------|
| (cm u. GOK)     |                             | Blei                   | Antimon |
| 0 - 5           | Ah-Horizont (Humus-Auflage) | 28000                  | 1200    |
| 5 - 15          | Uls                         | 165                    | 34      |

Tab. 1: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen für das Fallbeispiel 1

Weiterhin wurden 4 Rammkernsondierungen (bis 2 m u. GOK) zur Charakterisierung der ungesättigten Zone bis in den Grundwasserbereich durchgeführt.

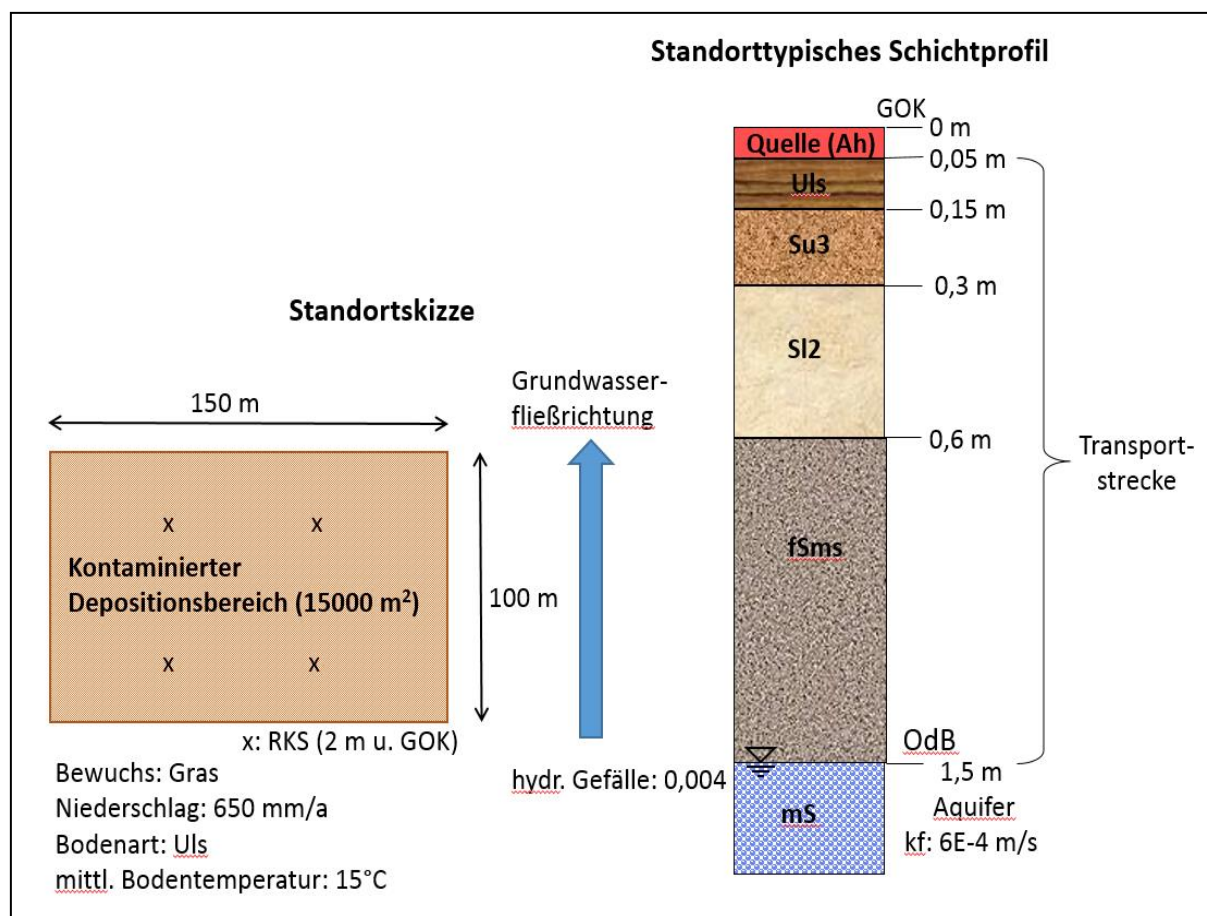


Abb. 45: Standortsskizze und standorttypisches Schichtprofil für das Fallbeispiel 1

Die relevanten schichtspezifischen Bodenparameter sind aus Tab. 2 ersichtlich. Daraus wurde ein standorttypisches Schichtprofil (Abb. 45 rechts) erstellt. Der in den Sondierungen angetroffene mittlere Grundwasserstand (OdB) liegt bei 1,5 m u. GOK. Das hydraulische Gefälle (0,004) wurde aus den in den Sondierungen angetroffenen Grundwasserständen bestimmt. Der kf-Wert ( $6 \cdot 10^{-4}$  m/s) wurde aus Korngrößenanalysen des Probenmaterials der Rammkernsondierungen (RKS) ermittelt. Die aus dem Bereich der Grundwasseroberfläche entnommenen Grundwasserproben ergaben keine Hinweise auf schießplatztypische Schadstoffbelastungen (Blei, Antimon, PAK).

| Schicht Nr. | von  | bis  | Bodenart | Trockenroh-dichte     | Grob boden | Humusgehalt | H   | on  | Corg |
|-------------|------|------|----------|-----------------------|------------|-------------|-----|-----|------|
|             | (m)  | (m)  |          | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (%)        | (%)         |     | (%) | (%)  |
| 0           | 0    | 0,05 | Ah       | 1,1                   |            |             |     |     |      |
| 1           | 0,05 | 0,15 | Uls      | 1,3                   | 5          | 5           | 4,8 | 9,0 | 3    |
| 2           | 0,15 | 0,3  | Su3      | 1,3                   | 0,5        | 2           | 5,0 | 3,0 | 1    |
| 3           | 0,3  | 0,6  | Sl2      | 1,4                   | 0          | 0           | 5,5 | 6,0 | 0,1  |
| 4           | 0,6  | 1,5  | fSms     | 1,5                   | 0          | 0           | 6   | 1,0 | 0,1  |

Tab. 2: schichtspezifische Bodenparameter für das Fallbeispiel 1

#### b) Quelle

Die Quelle für die Blei- und Antimonbelastung (Tab. 1) auf dem Standort wird durch die im Oberboden (0 – 5 cm/Schicht Nr. 0) vorhandene Belastung mit Bleischrotkugeln gebildet. Die Bleischrotkugeln wiesen teilweise erhebliche Korrosionserscheinungen auf, so dass eine gravimetrische Ermittlung der Schrotanteile nur vereinzelt möglich war. Die Schrotkugeln enthalten neben Blei (ca. 95 Masse-%) auch bis zu 3 Masse-% Antimon als Legierungszusatz [10]. Bei den in Tab. 1 aufgeführten mittleren Gehalten (0 – 5 cm) handelt es sich um Gesamtgehalte unter Berücksichtigung der Bleischrotkugeln. Die erhöhten Blei- und Antimongehalte in der Schicht 1 (0,05 – 0,15 m) weisen darauf hin, dass bereits eine Schadstoffverlagerung in tiefere Schichten stattgefunden hat. Zur Untersuchung des Freisetungsverhaltens wurden an Proben aus der Quellschicht (Oberboden 0 – 5 cm, mit Bleischrot) Eluatuntersuchungen (Schütteluat) entsprechend DIN 19740-2 [10]) mit unterschiedlichen Wasser-/Feststoffverhältnissen (2:1, 10:1) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 dargestellt.

| Schütteluat W/F | Blei (µg/l) | Antimon (µg/l) |
|-----------------|-------------|----------------|
| 2:1             | 380         | 65             |
| 10:1            | 350         | 61             |

Tab. 3: Ergebnisse der Eluatuntersuchungen

#### c) Transportstrecke

Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Mobilitäten (kd-Werte) von Blei und Antimon wird die Sickerwasserprognose für beide Elemente durchgeführt. Die zur Berechnung der kd-Werte (Sorptionseigenschaften) erforderlichen Bodenparameter sind aus Tab. 2 ersichtlich.

### B4.1.2 Parametereingabe

Nach Eingabe der Projektinformationen im Arbeitsblatt „Projekt“ (Abb. 46) werden die Informationen aus der Fallbeschreibung in die Arbeitsblätter „Standort“, Quelle“ und „Transport“ eingegeben.

| Projektinformationen |                                      |
|----------------------|--------------------------------------|
| Projekt-Name         | Wurfscheibenschießanlage (Pb/Sb)     |
| Projektbeschreibung  | Benutzungsanleitung (Fallbeispiel 1) |
| Bearbeiter           | LABO                                 |
| Datum/Zeitpunkt      | 21.09.2018                           |
| ALTEX-1D Versions-Nr | Ver. 3.0.0.0                         |

Abb. 46: Projektinformationen im Arbeitsblatt „Projekt“

#### a) Standort

Die für die Eingabe im Arbeitsblatt „Standort“ erforderlichen Parameter können der Standortskizze (Abb. 45) und der Tab. 2 aus der Fallbeschreibung entnommen werden. Unter dem Themenblock „Kontaminationsgeometrie“ ist die Kontaminationsfläche (1 000 m<sup>2</sup>) sowie die OK (0 m) und UK (0,05 m) der Quelle bezogen auf die GOK einzugeben (Abb. 47).

| Standortbeschreibung                    |                   |                     | Konzeptionelle Standortskizze |                               |    |              |
|-----------------------------------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|----|--------------|
| Kontaminationsgeometrie                 |                   | Einheit             | GOK                           |                               | OK |              |
| Kontaminationsfläche                    | (m <sup>2</sup> ) | 15000,0             |                               | Quelle                        |    |              |
| Quelle OK (m u. GOK)                    | (m)               | 0,00                |                               | Schicht 1                     |    | UK           |
| Quelle UK (m u. GOK)                    | (m)               | 0,05                |                               | Schicht 2                     |    |              |
| kontaminierte Kubatur                   | (m <sup>3</sup> ) | 750,0               |                               | Schicht 3                     |    |              |
| <b>Wasserhaushalt</b>                   |                   |                     |                               | Schicht 4                     |    | OdB          |
| Methode zur Sickerwasserrate-Berechnung | Beims/Gutt        |                     |                               | Aquifer                       |    | Einmischzone |
| Abschätzung nach Beims und Gutt         |                   |                     |                               |                               |    |              |
| Niederschlag                            | (mm/a)            | 650,0               |                               |                               |    |              |
| Bodentyp                                | (-)               | miger Schluff (Uls) |                               |                               |    |              |
| Vegetationsart                          | (-)               | Gras (G)            |                               |                               |    |              |
| Versiegelungsgrad Flächenanteil         | (%)               | 0                   |                               |                               |    |              |
| Grundwasserneubildung n. Beims/Gutt     | (mm/a)            | 182,0               |                               |                               |    |              |
| <b>Transportstrecke</b>                 |                   |                     |                               |                               |    |              |
| Ort der Beurteilung OdB (m. u. GOK)     | (m)               | 1,50                |                               |                               |    |              |
| mittl. Temp. Transportstrecke           | (°C)              | 15                  |                               |                               |    |              |
| Disp-SF (gesamte Transportstrecke)      | (-)               | 0,100               |                               |                               |    |              |
| Vorbelastung Transportstrecke           | (µg/l)            | 0,000               |                               |                               |    |              |
| <b>Typisches Schichtprofil</b>          |                   |                     |                               |                               |    |              |
| Schicht-Anzahl                          | 4                 |                     |                               |                               |    |              |
| Schichtaufbau                           | von<br>(m u. GOK) | bis<br>(m u. GOK)   | Bodenart<br>Tab. 30/31 KA 5   | Festgestein<br>GeoBerichte 19 |    |              |
| Schicht-Nr. 1                           | 0,05              | 0,15                | Uls                           |                               |    |              |
| Schicht-Nr. 2                           | 0,15              | 0,30                | SI2                           |                               |    |              |
| Schicht-Nr. 3                           | 0,30              | 0,60                | Su3                           |                               |    |              |
| Schicht-Nr. 4                           | 0,60              | 1,50                | fs, fSms, fSgs                |                               |    |              |
| <b>Aquiferparameter</b>                 |                   |                     |                               |                               |    |              |
| Länge der Kont.Fläche in                |                   |                     |                               |                               |    |              |
| Grundwasserfließrichtung                | (m)               | 100,0               |                               |                               |    |              |
| Mächtigkeit der Einmischzone            | (m)               | 1,0                 |                               |                               |    |              |
| Aquiferdurchlässigkeit                  | (m/s)             | 6,000E-04           |                               |                               |    |              |
| hydr. Gefälle                           | (m/m)             | 4,000E-03           |                               |                               |    |              |
| Schadstoff-Anstromkonzentration         | (µg/l)            | 0,000               |                               |                               |    |              |

Abb. 47: Eingabedaten zur Standortbeschreibung im Arbeitsblatt „Standort“ für das Fallbeispiel 1

Unter dem Themenblock „Wasserhaushalt“ ist zunächst auszuwählen, welche Methode zur Berechnung der Sickerwasserrate herangezogen werden soll. Im vorliegenden Fall liegen aus der Standortskizze (Abb. 45) alle Informationen vor, um die Sickerwasserrate nach der Methode „Beims/Gutt“ abzuschätzen. Neben der Eingabe des jährlichen Niederschlages (650 mm/a) ist hierzu der Bodentyp (Uls), die Vegetationsart (Gras) und der Versiegelungsanteil (0 %) auszuwählen. Dabei wird näherungsweise angenommen, dass die Sickerwasserrate im wesentlichen durch die oberste bindige Schicht der Transportstrecke (Bodentyp: Uls) bestimmt wird. Nach „Beims/Gutt“ ergibt sich daraus eine Sickerwasserrate von 182 mm/a (Abb. 47).

Im Themenblock „Transportstrecke“ sind zunächst die allgemeinen Informationen zur Beschreibung der Transportstrecke einzugeben. Als Ort der Beurteilung (OdB) wird der mittlere Grundwasserstand unter GOK (1,5 m) eingegeben. Er definiert die untere Grenze der Transportstrecke, die obere Grenze wird durch die UK der Quelle (0,05 m) gebildet (s. konzeptionelle Standortskizze in Abb. 47). Die mittlere Temperatur (Standardwert: 15 °C) wird zur Berechnung der temperaturabhängigen physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften benötigt. Als Dispersivitätsskalenfaktor wird der Standardwert (0,1) verwendet. Die Sickerwasserprognose wird ab Beginn des Schießbetriebes durchgeführt und daher keine Vorbelastung (0 µg/l) für die beiden betrachteten Schadstoffe Blei und Antimon angenommen.

Für das typische Schichtprofil ist zunächst die Anzahl der Schichten (4) entsprechend den Angaben in Abb. 45 und Tab. 2 einzugeben. Die Tabelle zur Eingabe der Schichten und die Standortskizze (Abb. 47) werden dann dynamisch entsprechend der eingegebenen Schichtanzahl angepasst. Die einzelnen Schichten sind mit ihrer Tiefenlage (von, bis) bezogen auf GOK einzugeben. Für jede Schicht ist eine Bodenart gem. Tab. 30/31 der KA 5 auszuwählen.

Es ist darauf zu achten, dass die OK der obersten Schicht (0,05 m) mit der UK der Quelle und die UK der untersten Schicht (1,5 m) mit dem OdB übereinstimmt. Die Informationen zum Aufbau des Schichtprofils werden für die Berechnung der relevanten Bodenkennwerte im Arbeitsblatt „Transport“ übernommen.

Im Themenblock „Aquiferparameter“ sind die relevanten Parameter zur Berücksichtigung des Einmischprozesses von Sickerwasser in das Grundwasser (Rührkesselmodell) einzugeben. Die Länge der Kontaminationsfläche in Grundwasserfließrichtung (100 m), die Aquiferdurchlässigkeit (kf:  $6 \cdot 10^{-4}$  m/s) und das hydraulische Gefälle (0,004) sind der Standortskizze (Abb. 45) zu entnehmen. Als Mächtigkeit der Einmischzone wird der Standardwert (1 m) nach LAWA/LABO [5] verwendet.

## **b) Quelle**

Die für die Eingabe im Arbeitsblatt „Quelle“ erforderlichen Parameter sind aus den Tabellen 1 – 3 der Fallbeschreibung ersichtlich. Zunächst muss das Eingabefenster „Schadstoff-Auswahl“ (Abb. 48) durch Anklicken des grünen Feldes in der Spalte B/Schadstoff (Abb. 49) geöffnet werden.

Abb. 48: Auswahl des Schadstoffes Antimon im Eingabefenster „Schadstoff-Auswahl“

Da es im vorliegenden Fall um die Schadstoffe Blei und Antimon geht, ist im Feld Schadstoffcharakterisierung die Auswahl Anorganik zu treffen. Im mittleren Fenster werden dann alle anorganischen Stoffe angezeigt und können direkt ausgewählt werden. Alternativ kann der Name des Stoffes im Feld „Suche“ (Abb. 48) eingegeben oder die Liste der Schadstoffe durch Auswahl der Gruppe Kationen bzw. Anionen im linken Teil des Fensters eingengt werden. Nach Auswahl des Schadstoffes werden die relevanten Stoffdaten im rechten Bereich des Eingabefensters angezeigt. Dargestellt wird die Gruppe (Kation oder Anion), sofern vorhanden der Prüfwert der BBodSchV oder die GFS (LAWA 2016). Wenn weder ein PW noch ein GFS vorhanden sind, muss im Feld Ersatzwert (EW) zwingend ein entsprechender Wert eingegeben werden. Weiterhin wird der Diffusionskoeffizient in Wasser ( $\text{m}^2/\text{a}$ ) angezeigt. Die angezeigten Daten stammen aus dem in ALTEX-1D integrierten Stoffdatenblatt „Anorganik“, das über die Menüleiste angezeigt werden kann (s. Kap. B3.5). Der Anwender hat die Möglichkeit, im Feld „Diffusionskoeffizient Wasser“ auch einen eigenen Wert einzugeben.

Die im Eingabefenster angezeigten Daten werden abschließend durch Anklicken der Schaltfläche „Eingaben übernehmen“ in das Arbeitsblatt „Quelle“ übernommen. Die im vorliegenden Fall relevanten Stoffdaten für Blei und Antimon sind in Tab. 4 zusammengefasst.

| Schadstoff | PW ( $\mu\text{g/l}$ ) | GFS ( $\mu\text{g/l}$ ) | Diffusionskoeffizient Wasser ( $\text{m}^2/\text{a}$ ) |
|------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------|
| Blei       | 25                     | 1,2                     | 2,268E-2                                               |
| Antimon    | 10                     | 5                       | 2,038E-2                                               |

Tab. 4: Stoffdaten für Blei und Antimon

Die gesamte auf dem Standort vorhandene Schadstoffmasse kann entweder über die kontaminierte Kubatur durch Eingabe der durchschnittlichen Trockenraumdichte ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ) und des durchschnittlichen Schadstoffgehaltes ( $\text{mg}/\text{kg}$ ) ermittelt werden (Auswahl über das entsprechende Optionsfeld) oder über Daten aus Einzelsondierungen berechnet werden. Im vorliegenden Fall wird die Masse über die kontaminierte Kubatur und die Angaben zum mittleren Schadstoffgehalt im Oberboden (0 – 5 cm) in Tab. 1 und zur Trockenraumdichte (Schicht Nr. 0) in Tab. 2 ermittelt (Abb. 49).

### Beschreibung der Schadstoffquelle

| Schadstoffcharakterisierung | Vergleichswert am OdB |                                                   |                                            |                                               |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | Schadstoff            | Prüfwert BBodSchV (PW) ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) | GFS (LAWA 2016) ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) | Ersatzwert (EW) ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )    |
|                             |                       |                                                   |                                            | Diff.-koeff. Wasser ( $\text{m}^2/\text{a}$ ) |
|                             | Antimon               | 10,00                                             | 5,0000                                     |                                               |
|                             |                       |                                                   |                                            | 2,038E-02                                     |

| Schadstoffmasse                                          | Ermittlung über Kubatur (Standort) |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------|
| durchschn. Trockenraumdichte ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ) | 1,1                                |
| durchschn. Schadstoffgehalt ( $\text{mg}/\text{kg}$ )    | 1200,00                            |
| Schadstoffmasse gesamt (kg)                              | 990,0                              |

| Schadstofffreisetzung                                  |          |                         |
|--------------------------------------------------------|----------|-------------------------|
| zeitliche Entwicklung Quellkonzentration               | konstant | exponentiell abklingend |
| Fallkonstellation                                      | A        | B                       |
| mobilisierbarer Anteil (%)                             | 100,0    | 100,0                   |
| initiale Quellkonzentration ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) | 65,000   | 65,000                  |
| Abklingkonstante berechnet ( $1/\text{a}$ )            |          | 1,792E-04               |

Abb. 49: Eingabedaten zur Beschreibung der Quelle im Arbeitsblatt „Quelle“ für den Schadstoff Antimon

Das Freisetzungsverhalten wird durch die zeitliche Entwicklung der Quellkonzentration bestimmt. Dabei werden die Quelltypen A (konstante Quellkonzentration) und B (exponentiell abklingende Quellkonzentration) unterschieden. Im Arbeitsblatt „Quelle“ (Abb. 49) sind die relevanten Eingabeparameter zur Beschreibung der Quelle (mobilisierbarer Anteil und initiale Quellkonzentration) für beide Quelltypen einzugeben. Die Werte werden in der Regel den Ergebnissen von Elutionsuntersuchungen entnommen. Der mobilisierbare Anteil (%) ist der Prozentsatz der gesamten Schadstoffmasse, der mit dem Sickerwasser mobilisierbar ist. Er wird aus den Bindungseigenschaften des Schadstoffs (mineralische oder organische Phase, sorptive Bindung) und/oder dem Elutionsverhalten bei unterschiedlichen W/F-Verhältnissen abgeschätzt (Arbeitshilfe DU [1], Kap. 6.3.2).

Im vorliegenden Fall erfolgt die Freisetzung von Blei und Antimon aus der metallischen Legierung des Bleischrots, die unter der Einwirkung von Sauerstoff und Feuchtigkeit langsam korrodiert und einen Übergang der Elemente in das Sickerwasser entsprechend der Wasserlöslichkeit der entstandenen Korrosionsprodukte ermöglicht. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass dieser Prozess solange stattfindet, bis die Bleischrotbestandteile komplett aufgelöst sind. Darauf weisen auch die Ergebnisse der Elutionsuntersuchungen hin, bei denen nur geringe Konzentrationsunterschiede zwischen den

W/F-Verhältnissen 2:1 und 10:1 festgestellt wurden (Tab. 3). Es wird daher davon ausgegangen, dass langfristig der gesamte Schadstoffgehalt an Blei und Antimon mobilisierbar ist (mobilisierbarer Anteil: 100 %).

Als initiale Quellkonzentration wird für beide Quelltypen (A und B) der Wert des 2:1-Eluates (Tab. 3) verwendet. Aus den Angaben zum Gesamtgehalt (mg/kg), dem mobilisierbaren Anteil (%) und der initialen Quellkonzentration ( $\mu\text{g/l}$ ) wird für den Quelltyp B (exponentiell abfallende Quellkonzentration) die Abklingkonstante ( $1/a$ ) errechnet. Die Entscheidung, welcher Quelltyp der Berechnung zugrunde gelegt wird, erfolgt erst nach dem Start der Berechnung (s. Kap. B4.1.3).

Die relevanten Eingabeparameter zur Beschreibung der Quelle sind für die betrachteten Schadstoffe Blei und Antimon in Tab. 5 zusammengefasst.

| Schadstoff | Schadstoffgehalt | Trockenraumdichte    | Initiale Quellkonz. | Mob. Anteil |
|------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------|
|            | (mg/kg)          | ( $\text{kg/dm}^3$ ) | ( $\mu\text{g/l}$ ) | (%)         |
| Blei       | 28000            | 1,1                  | 380                 | 100         |
| Antimon    | 1200             | 1,1                  | 65                  | 100         |

Tab. 5: Eingabeparameter zur Beschreibung der Schadstoffquelle

### c) Transport

Im Arbeitsblatt „Transport“ werden die Daten des standorttypischen Schichtprofils aus dem Arbeitsblatt „Standort“ automatisch übernommen. Die Eingabe der Parameter zur Berechnung der Bodenkennwerte (Feldkapazität und Luftkapazität) und der  $k_d$ -Werte erfolgt schichtweise über das Eingabefenster „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ (Abb. 50), das sich beim Anklicken des grünen Feldes mit der jeweiligen Schicht-Nr. öffnet.

Im oberen linken Teil des Eingabefensters werden die einzelnen Schichten angezeigt, die aus dem typischen Schichtprofil im Arbeitsblatt „Standort“ übernommen wurden. Die aktuell ausgewählte Schicht ist blau hinterlegt. Im linken unteren Teil des Eingabefensters erfolgt die Eingabe der Parameter zur Berechnung der Feld- und Luftkapazität entsprechend Tab. 70 der KA 5. Die Eingabeparameter (Trockenraumdichte, Grobbo-denanteil und Humusgehalt) für den vorliegenden Fall sind aus Tab. 2 der Fallbeschreibung ersichtlich. Nach Eingabe der Parameter wird in den Feldern „Feld“- und „Luftkapazität“ automatisch der nach Tab. 70/KA 5 berechnete und rechts neben den Eingabefeldern dargestellte Richtwert eingetragen. Der Anwender hat die Möglichkeit, davon abweichend den Wert durch einen eigenen Wert zu überschreiben.

Schichtspezifische Boden- und Transportparameter

Gewählter Schadstoff: Antimon

Schichtauswahl

| Schicht | Von  | Bis  | Bodenart       | Festgestein |
|---------|------|------|----------------|-------------|
| Nr. 1   | 0,05 | 0,15 | Uls            |             |
| Nr. 2   | 0,15 | 0,3  | Sl2            |             |
| Nr. 3   | 0,3  | 0,6  | Su3            |             |
| Nr. 4   | 0,6  | 1,5  | fS, fSms, fSGs |             |

Feld-/Luftkapazität

Trockenrohdichte (kg/dm<sup>3</sup>)

Grobbodenanteil (Vol %)

Humusgehalt (Gehalt %)

Feldkapazität (Vol %)  Richtwert: 47,05

Luftkapazität (Vol %)  Richtwert: 23

kd-Werte

pH

Tongehalt (Masse %)

Corg (Masse %)

Referenz-Konzentration Linearisierung (µg/l)

kd BGR (l/kg)  Übernehmen

kd vdB (l/kg)  Übernehmen

kd\_Org (l/kg)  Übernehmen

kd Auswahl (l/kg)

Abbrechen Eingaben übernehmen

Abb. 50: Eingabefenster „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ im Arbeitsblatt „Transport“ für den Schadstoff Antimon

In der rechten Hälfte des Eingabefensters erfolgen die Parametereingaben zur Berechnung des kd-Wertes. Da die Berechnung für anorganische und organische Schadstoffe unterschiedlich erfolgt, sind die Eingabeparameter abhängig vom jeweils betrachteten Schadstoff (wird in der Überschrift „Gewählter Schadstoff“ angezeigt). Für die anorganischen Schadstoffe Blei und Antimon ist die Eingabe des pH-Wertes des Bodens, des Tongehaltes (Masse-%) und des organischen Kohlenstoffgehaltes Corg (Masse-%) in den jeweiligen Eingabefeldern erforderlich (Abb. 50).

Die Berechnung eines kd-Wertes mit dem Sorptionsmodell nach „Freundlich“ erfordert eine Linearisierung der Sorptionsisotherme (nur relevant für die Berechnung des kd-Wertes aus Pedotransferfaktoren nach BGR [8]). Dafür ist eine Referenzkonzentration, bei der die Linearisierung durchgeführt wird, einzugeben. Das Verfahren ist in der Arbeitshilfe DU [1] im Kap. A2.4 (Gl. A15) beschrieben. ALTEX-1D übernimmt im entsprechenden Feld automatisch die im Arbeitsblatt „Quelle“ eingegebene initiale Quellskonzentration als Referenzkonzentration. Damit ist sichergestellt, dass der berechnete kd-Wert auf der sicheren Seite liegt, da dieser mit steigender Referenzkonzentration abnimmt. Der Anwender hat die Möglichkeit, hier einen eigenen Wert einzugeben und so die Auswirkungen der Linearisierung zu überprüfen.

Sofern für den ausgewählten Schadstoff ein Pedotransferfaktor nach „BGR„ (Freundlich-Modell) oder eine Regressionsbeziehung nach „van den Berg und Roels“ (lineares Modell) vorliegt, wird der berechnete  $k_d$ -Wert (l/kg) in den entsprechenden Feldern „ $k_d$  BGR“ (l/kg) bzw. „ $k_d$  vdBR“ (l/kg) angezeigt. Der Anwender hat die Möglichkeit, entweder einen der berechneten Werte durch Anklicken der Schaltfläche „Übernehmen“ in das unten stehende Feld „ $k_d$  Auswahl“ (l/kg) zu übernehmen, oder im Feld „ $k_d$  Auswahl“ einen eigenen Wert einzugeben. Nach dem abschließenden Anklicken der Schaltfläche „Eingaben übernehmen“ werden die im Eingabefenster für die ausgewählte Schicht angezeigten Werte in das Arbeitsblatt „Transport“ übernommen. Die beschriebene Eingabeprozedur wird dann für die weiteren Schichten wiederholt.

Die relevanten Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte (Feld- und Luftkapazität) und  $k_d$ -Werte für die Schadstoffe Blei und Antimon sind in Tab. 6 und Tab. 7 zusammengefasst.

| Schicht Nr. | von  | bis  | Bodenart | Trockenroh-dichte     | Grob boden | Humusgehalt | Feld-ka-pazität | Luftkapazität |
|-------------|------|------|----------|-----------------------|------------|-------------|-----------------|---------------|
|             | (m)  | (m)  |          | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (%)        | (%)         | (%)             | (%)           |
| 1           | 0,05 | 0,15 | Uls      | 1,3                   | 5          | 5           | 47,1            | 23,0          |
| 2           | 0,15 | 0,3  | Su3      | 1,3                   | 0,5        | 2           | 33,9            | 29,0          |
| 3           | 0,3  | 0,6  | Sl2      | 1,4                   | 0          | 0           | 29,0            | 14,0          |
| 4           | 0,6  | 1,5  | fSms     | 1,5                   | 0          | 0           | 14,0            | 31            |

Tab. 6: schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte Feldkapazität/Luftkapazität

|             | Eingabeparameter |           |      |                 | $k_d$ BGR |        | $k_d$ vdBR |        |
|-------------|------------------|-----------|------|-----------------|-----------|--------|------------|--------|
| Schicht Nr. | pH               | Tongehalt | Corg | Ref.-konz. Lin. | Pb        | Sb     | Pb         | Sb     |
|             |                  | (%)       | (%)  | (µg/l)          | (l/kg)    | (l/kg) | (l/kg)     | (l/kg) |
| 1           | 4,8              | 9,0       | 3,0  | 380/65          | 684       | 22,4   | 70,9       | (-)    |
| 2           | 5,0              | 6,0       | 1,0  | 380/65          | 691       | 19,3   | 113,7      | (-)    |
| 3           | 5,5              | 3,0       | 0,1  | 380/65          | 823       | 15,1   | 440        | (-)    |
| 4           | 6,0              | 1,0       | 0,1  | 380/65          | 812       | 4,4    | 1175       | (-)    |

Tab. 7: schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der  $k_d$ -Werte für Blei und Antimon (Ref.-konz. Lin. : Blei/Antimon)

#### B4.1.3 Durchführung der Berechnung

Nach der Parametereingabe kann die Prognoseberechnung durch Anklicken der Schaltfläche  $\Sigma$  im ALTEX-1D-Menüband gestartet werden. Nach dem Anklicken der Schaltfläche erscheint das Auswahlfenster zur Steuerung der Berechnung (Abb. 51).

##### a) Bewertung der aktuellen Situation nach 40 Jahren Schießbetrieb

Mit der Prognoserechnung soll die aktuelle Belastungssituation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser nach 40 Jahren Schießbetrieb ermittelt und die Plausibilität durch Vergleich mit den Ergebnissen aus den Boden- und Grundwasseruntersuchungen überprüft werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Ausgangssituation zu Beginn des Schießbetriebes wegen des großen Schadstoffvorrates und des Quelltyps A

(konstante Quellkonzentration) im Wesentlichen dem aktuellen Emissionszustand der Quelle (40 Jahre nach Emissionsbeginn) entspricht und die Ergebnisse aus den aktuellen Untersuchungen bezüglich Feststoffgehalten und Quellkonzentrationen insofern als Eingabeparameter für die Ausgangssituation herangezogen werden können. In Anbetracht der hohen Bleischrotbelastung und der bereits nachgewiesenen Verlagerung der Blei- und Antimonbelastung in tiefere Bodenschichten (Schicht 1) ist insbesondere von Interesse, wie tief die Verlagerung bereits fortgeschritten ist und ob eine Beseitigung der Quelle durch Auskoffnung des Oberbodens (0 – 5 cm) ausreicht, um eine zukünftige Verunreinigung des Grundwassers zu verhindern. Die Berechnungen werden daher für Blei und Antimon durchgeführt.

Im Auswahlfenster (Abb. 51) wird dazu der Zeitpunkt „gewählt (Jahre)“ markiert und im rechts daneben erscheinenden Eingabefeld der Wert 40 eingetragen. Nach der Auswahl des Berechnungsfensters muss der Anwender die Entscheidung treffen, für welchen Quelltyp (A/ konstante Quellkonzentration oder B/exponentiell abfallende Quellkonzentration) die Berechnung durchgeführt werden soll. Entsprechend der Beschreibung der Quelle (s. Kap. 4.1.1.1b und 4.1.1.2b) wird von einer lösungslimitierten Freisetzung mit weitgehend konstanter Konzentration auf dem Niveau der Eluat-Konzentrationen ausgegangen und die Berechnung daher für Quelltyp A (Anklicken der entsprechenden Schaltfläche) durchgeführt.

Abb. 51: Auswahlfenster zur Berechnung der Situation nach 40 Jahren Schießbetrieb

### Ergebnisse

Da sich für Blei die nach BGR und vdBR berechneten  $k_d$ -Werte und damit die Rückhaltung in der Transportstrecke stark unterscheiden, wurden die Berechnungen für beide Methoden (Variante 1:  $k_d$  BGR, Variante 2:  $k_d$  vdBR) durchgeführt. Für beide Varianten ergibt sich nach 40 Jahren Schießbetrieb noch keine Überschreitung des Prüfwertes am OdB. Die aus der Quelle mit dem Sickerwasser emittierte Schadstoffmasse befindet sich in sorbierter Form noch vollständig im oberen Teil der Transportstrecke. Dies gilt insbesondere für die Variante 1 ( $k_d$  BGR), bei der die emittierte Schadstoffmasse noch nahezu vollständig in der obersten Schicht (UIs) (Abb. 52 links) gebunden ist, während für

die Variante 2 (kd vdBR) der Schadstoff bereits deutlich in die Schicht 2 (SI2) vorgedrungen ist (Abb. 52 rechts).

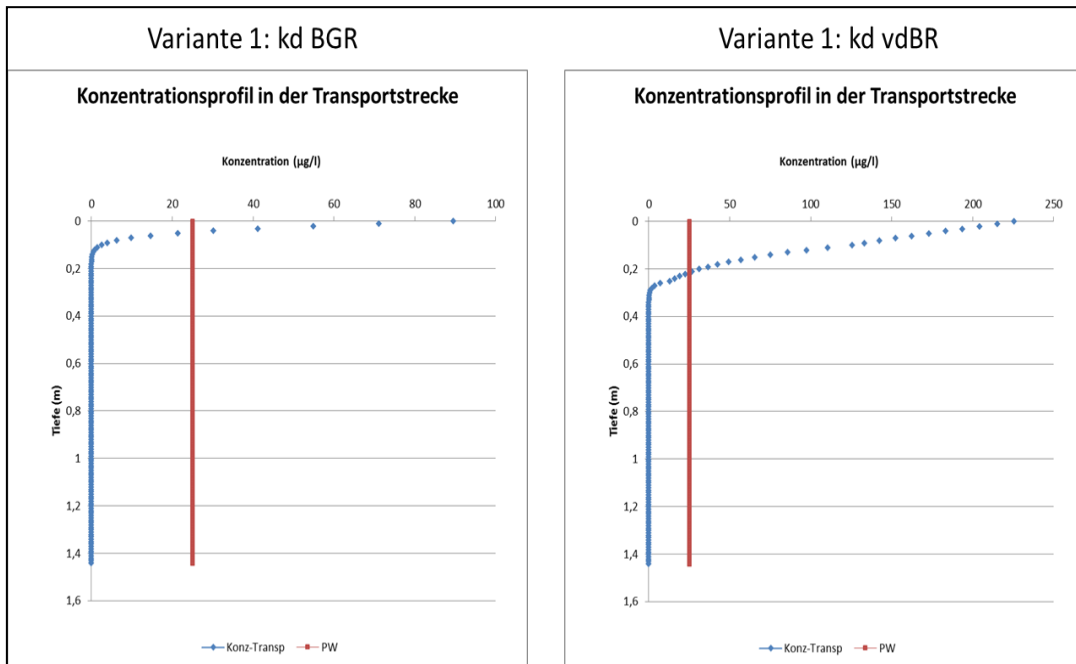


Abb. 52: Vertikalprofil der im Sickerwasser gelösten Bleikonzentration in der Transportstrecke nach 40 Jahren Schießbetrieb für die Varianten 1 (kd BGR) und 2 (kd vdBR)

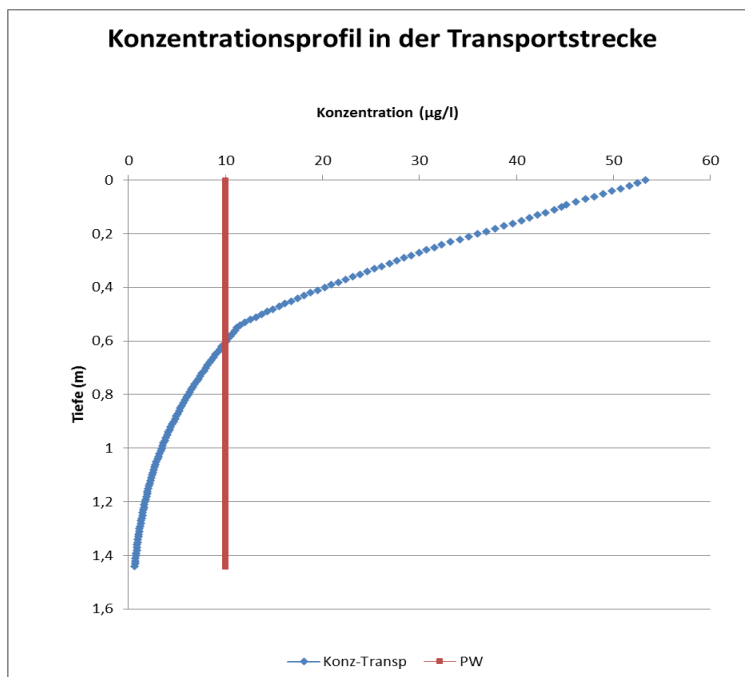


Abb. 53: Vertikalprofil der im Sickerwasser gelösten Antimonkonzentration in der Transportstrecke nach 40 Jahren Schießbetrieb

Auch für Antimon ergibt sich nach 40 Jahren noch keine Überschreitung des Prüfwertes. Aufgrund der gegenüber Blei deutlich höheren Mobilität von Antimon ist die Kontamination aber bereits deutlich tiefer eingedrungen (Abb. 53). Die Tiefe, in der das Sickerwasser den Prüfwert überschreitet, befindet sich bei ca. 0,6 m (Tab. 8).

Die wesentlichen Kenngrößen der Prognose für Blei und Antimon zum Zeitpunkt 40 Jahre nach Beginn des Schießbetriebes sind in Tab. 8 zusammengefasst.

|                                  | Einheit | Pb (kd BGR) | Sb    |
|----------------------------------|---------|-------------|-------|
| Tiefe Überschreitung PW          | (m)     | 0,045       | 0,6   |
| Emission aus der Quelle          | (kg)    | 41,496      | 7,098 |
| sorbierte Masse Transportstrecke | (kg)    | 40,383      | 6,59  |

Tab. 8: Kenngrößen für die Sickerwasserprognose zum Zeitpunkt 40 Jahre nach Beginn des Schießbetriebes

Das Ergebnis ist im Einklang mit den Befunden der Grundwasseranalysen, die nach 40 Jahren noch keine Hinweise auf schießplatztypische Belastungen ergeben haben. Allerdings sind die für die Schicht 1 (5 – 15 cm) aus dem Arbeitsblatt „Werte Tiefenprofil“ berechneten sorbierten Gehalte (Tab. 9) deutlich geringer als die gemessenen Gehalte (Tab. 1). Als mögliche Ursache kommen höhere Quellkonzentrationen als die in den Elutionstests ermittelten in Betracht. Darüber hinaus sind in den gemessenen Gehalten auch die natürlichen pedo-/geogenen Gehalte berücksichtigt.

|         | Einheit | gemessen (Tab. 1) | berechnet |
|---------|---------|-------------------|-----------|
| Blei    | mg/kg   | 165               | 20,9      |
| Antimon | (mg/kg) | 34                | 1,1       |

Tab. 9: Mittlere Blei- und Antimon-Gehalte für die Schicht 1

#### b) Prognose im Hinblick auf eine zukünftige Überschreitung des Prüfwertes

Gemäß §4 (3) der BBodSchV ist zur Bewertung der von altlastverdächtigen Flächen ausgehenden Gefahren für das Grundwasser eine Sickerwasserprognose zu erstellen und zu bewerten, ob Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser den Prüfwert am Ort der Beurteilung (OdB) überschreiten. Bei der Bewertung ist nach § 2 (5) BBodSchV auch der Zeitpunkt („überschaubare Zukunft“) einer möglichen Überschreitung des PW zu berücksichtigen. Mit ALTEX-1D kann eine Prognose der zeitlichen Entwicklung der Blei- und Antimonkonzentrationen im Sickerwasser für den OdB berechnet werden. Der Prognosezeitraum umfasst den gesamten beurteilungsrelevanten Zeitraum vom Beginn der Emission (Beginn des Schießbetriebes vor 40 Jahren) über den Zeitpunkt der erstmaligen Prüfwertüberschreitung bis zur Prüfwertunterschreitung nach Erschöpfung des mobilisierbaren Schadstoffvorrats. Dazu wird nach dem Anklicken der Schaltfläche  $\Sigma$  im ALTEX-1D-Menüband im erscheinenden Auswahlfenster als Berechnungszeitpunkt „PW-Unterschreitung“ ausgewählt. Aufgrund des Freisetungsverhaltens der Quelle (s. B4.1.1a und B4.1.1b) wird die Berechnung für den Quelltyp A (konstante Quellkonzentration) durchgeführt.

#### Ergebnisse

Aufgrund der starken Rückhaltung von Blei infolge der hohen kd-Werte (s. Tab. 7) ist die Überschreitung des Prüfwertes am OdB erst nach mehreren tausend Jahren zu erwarten, hält aber aufgrund des hohen Schadstoffvorrates und der langen Emissionsdauer (> 20000 Jahre) für mehrere zehntausend Jahre an (Abb. 54).

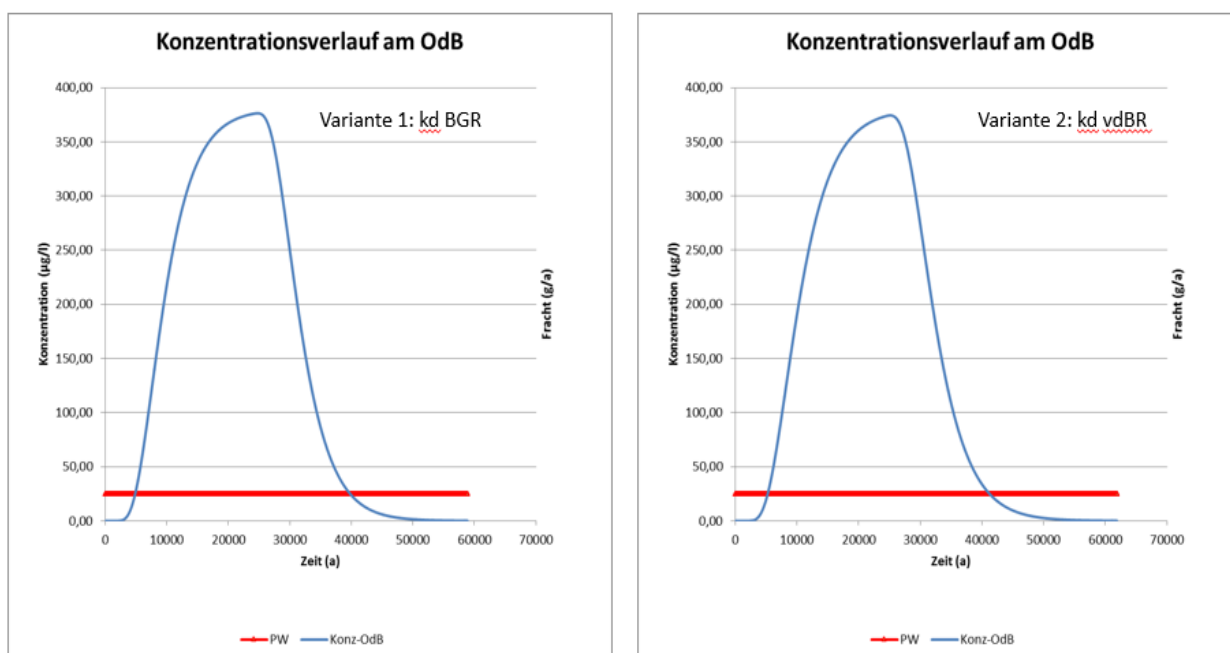


Abb. 54: Verlauf der Bleikonzentration im Sickerwasser (Berechnung bis Unterschreitung PW)

Die maximale Konzentration erreicht nahezu die Quellkonzentration (380 µg/l). Daraus resultiert eine maximale Konzentration in der Einmischzone von 73 µg/l (Tab. 10).

Im Vergleich mit Blei weist Antimon im vorherrschenden pH-Bereich (4,8 – 6) eine deutlich geringere Rückhaltung auf. Dadurch kommt es bereits 68 Jahre nach Beginn des Schießbetriebes (bezogen auf den Zeitpunkt der Bewertung nach 40 Jahren Schießbetrieb also bereits in 28 Jahren) zur Überschreitung des Prüfwertes am OdB (Abb. 55). Aufgrund der langen Emissionsdauer (5579 a) und der vergleichsweise kurzen Transportzeit (106 a) kommt es zum Durchbruch der Quellkonzentration (65 µg/l) am OdB, der über mehrere tausend Jahre anhält (Abb. 55). Bei Berücksichtigung der Einmischung ergibt sich daraus eine maximale Konzentration in der Einmischzone von 12,6 µg/l (Tab. 10).

Die wesentlichen Kenngrößen der Prognose für Blei und Antimon sind in Tab. 10 zusammengefasst.

| Schadstoff   | Emissionsdauer | Zeitpunkt PW-Üb. | Dauer PW-Üb. | Max. Konz. OdB | Max. Fracht OdB | Max. Konz. Einmischzone |
|--------------|----------------|------------------|--------------|----------------|-----------------|-------------------------|
|              | (Jahre)        | (J. n. EB)       | (Jahre)      | (µg/l)         | (g/a)           | (µg/l)                  |
| Pb (kd BGR)  | 22267          | 4845             | 34936        | 376,4          | 1028            | 73                      |
| Pb (kd vdBR) | 22267          | 5245             | 35972        | 374,4          | 1022            | 72,6                    |
| Sb           | 5579           | 68               | 5744         | 65             | 177,4           | 12,6                    |

Tab. 10: Kenngrößen für die Sickerwasserprognose zum Zeitpunkt der Prüfwertunterschreitung (J. n. EB : Jahre nach Emissionsbeginn)

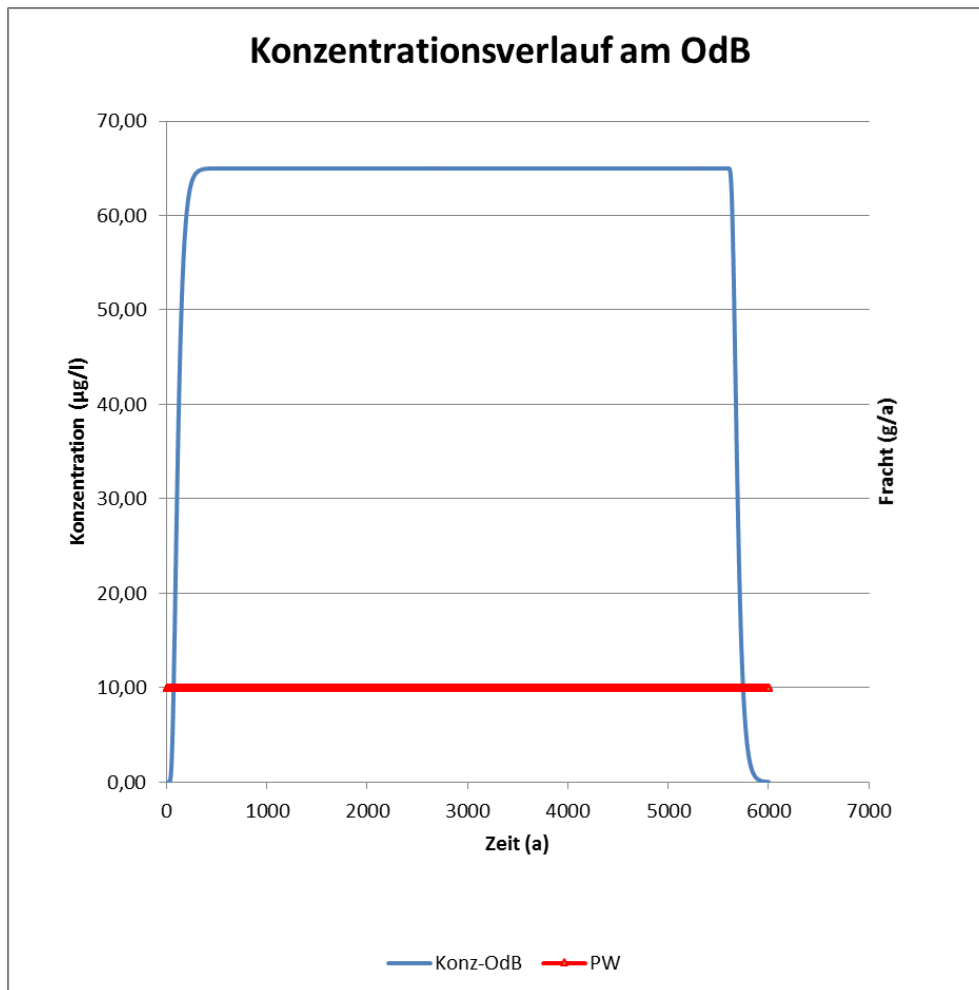


Abb. 55: Verlauf der Antimonkonzentration im Sickerwasser am OdB (Berechnung bis Unterschreitung PW)

### c) Auswirkung einer Sanierung (Beseitigung der Quelle)

Während für Blei trotz des großen Schadstoffvorrates aufgrund der hohen Rückhaltung keine Überschreitung des Prüfwertes in überschaubarer Zukunft zu erwarten ist, trifft dies für Antimon nicht zu. Insofern stellt sich insbesondere im Hinblick auf Antimon die Frage, ob durch eine Sanierungsmaßnahme mit Beseitigung der Quelle (Abtrag des mit Bleischrot belasteten Oberbodens bis 5 cm Tiefe) noch eine Verunreinigung des Grundwassers verhindert werden kann, oder eine Verunreinigung des Grundwassers aufgrund der bereits fortgeschrittenen Verlagerung der Antimon-Kontamination zur Tiefe auch durch eine Sanierung nicht mehr aufgehalten werden kann. Auch diese Frage kann durch eine Sickerwasserprognose mit ALTEX-1D beantwortet werden. Dazu wird durch eine iterative Anpassung des durchschnittlichen Schadstoffgehaltes in der Zelle B42 des Arbeitsblattes „Quelle“ die mobilisierbare Schadstoffmasse so eingestellt, dass sich gerade eine Emissionsdauer von 40 Jahren ergibt. Anschließend wird eine Prognose bis zur Unterschreitung des Prüfwertes durchgeführt. Dadurch kann die Wirkung einer Sanierungsmaßnahme mit Beseitigung der Quelle nach 40 Jahren simuliert werden. Eine Emissionsdauer von 40 Jahren ergibt sich bei einem „fiktiven“ Antimongehalt von 8,6 mg/kg. (Abb. 56)

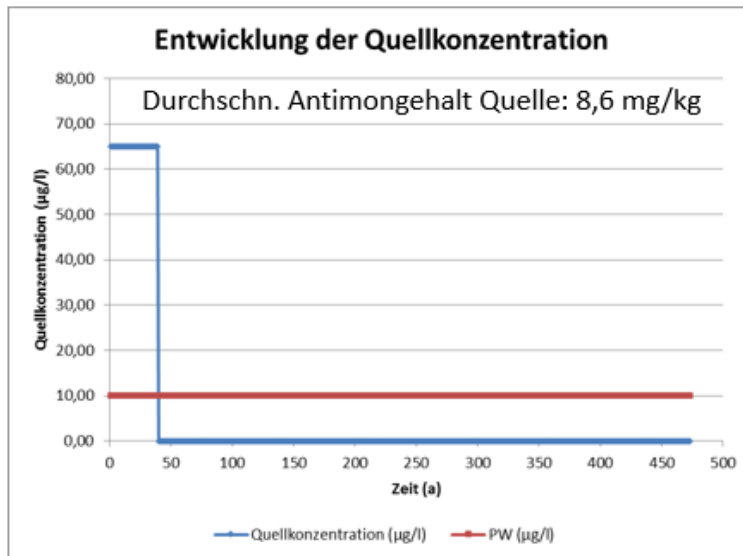


Abb. 56: Verlauf der Quellkonzentration bei einem „fiktiven“ Antimongehalt der Quelle von 8,6 mg/kg

Aus dem Konzentrationsverlauf am OdB (Abb. 57) ist ersichtlich, dass eine Prüfwert-überschreitung auch bei einer Sanierung mit Beseitigung der Quelle nicht mehr verhindert werden kann. Die Maximalkonzentration wird aber durch die dispersive Abminderung in der Transportstrecke erheblich reduziert, so dass bei Berücksichtigung des Einmischprozesses sich keine Überschreitung der GFS im Grundwasser (Tab. 11) ergibt.

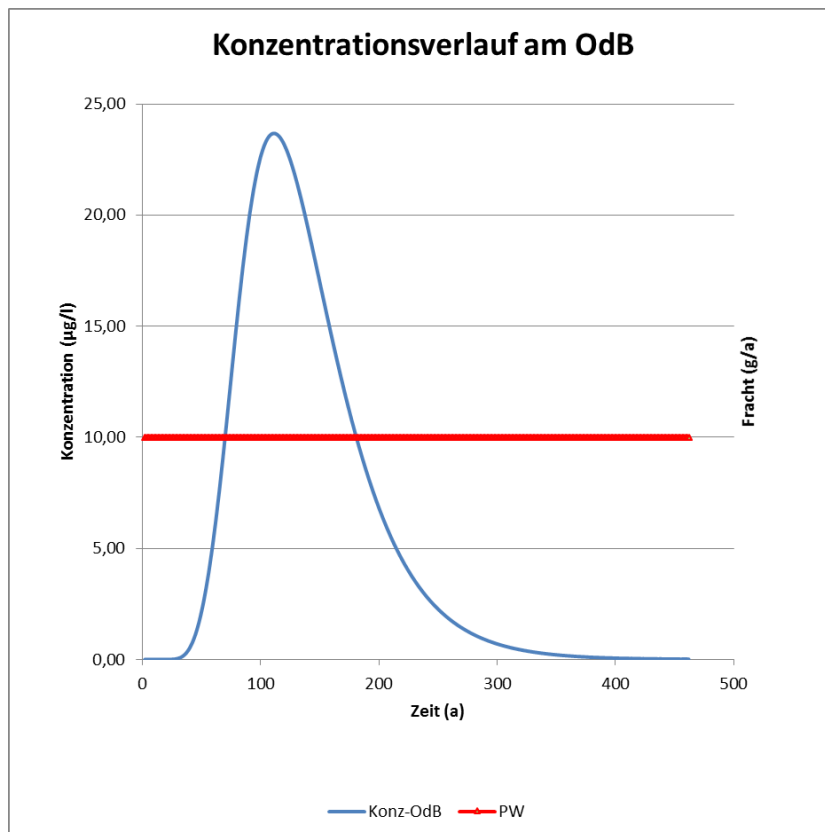


Abb. 57: Verlauf der Antimonkonzentration im Sickerwasser am OdB nach einer simulierten Sanierungsmaßnahme (Beseitigung der Quelle nach 40 Jahren Schießbetrieb)

Für Blei kann eine Emissionsdauer von 40 Jahren durch einen „fiktiven“ Schadstoffgehalt von 50,3 mg/kg simuliert werden. Durch die simulierte Beseitigung der Quelle nach 40 Jahren Schießbetrieb kann die für Blei in fernerer Zukunft zu erwartende Überschreitung des Prüfwertes am OdB (s. B.4.1.3b/Abb. 54) verhindert werden.

Die relevanten Kenngrößen für die Sickerwasserprognose bei Simulation einer Sanierung mit Beseitigung der Quelle nach 40 Jahren sind in Tab. 11 zusammengefasst.

| Schadstoff | Emissionsdauer | Zeitpunkt PW-Üb. | Dauer PW-Üb | Max. Konz. OdB | Max. Fracht | Max. Konz. Einmischzone |
|------------|----------------|------------------|-------------|----------------|-------------|-------------------------|
|            | (Jahre)        | (J. n. EB)       | (Jahre)     | (µg/l)         | (g/a)       | (µg/l)                  |
| Sb         | 40             | 68               | 111         | 23,7           | 64,6        | 4,6                     |
| Pb         | 40             | (-)              | (-)         | 1,7            | (-)         | 0,3                     |

Tab. 11: Kenngrößen für die Sickerwasserprognose bei Simulation einer Sanierung mit Beseitigung der Quelle nach 40 Jahren Schießbetrieb.

## B4.2 Fallbeispiel 2 (Anorganik/Quellentyp B)

### B4.2.1 Beschreibung des Falles (Abwasserverrieselungsfläche)

#### a) Standort

Es handelt sich um eine ehemalige Verrieselungsfläche (10 ha), auf der über 50 Jahre belastetes Abwasser verrieselt wurde (Abb. 58). Aufgrund der langjährigen Abwasserverrieselung ist der Oberboden (0 – 30 cm) der Fläche erheblich mit Schwermetallen, insbesondere mit Cadmium belastet. Darüber hinaus hat die Abwasserverrieselung zu einer tiefgründigen Versauerung des Untergrundes geführt.

Mit Hilfe einer Sickerwasserprognose soll abgeschätzt werden, ob durch ein Einfräsen von Bodenaushub mit basischen Eigenschaften (mit Branntkalk versetzter Geschiebemergel) die Mobilität von Cadmium so weit reduziert werden kann, dass eine Überschreitung des Prüfwertes am OdB verhindert und eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit durch Überschreitung der GFS vermieden werden kann.

Die Untersuchung der Fläche erfolgte durch 4 Sondierungen (S1 – S4) bis 60 cm u. GOK (Abb. 58). Je Sondierung wurden drei Tiefenintervalle (0 – 15 cm, 15 – 30 cm, 30 – 60 cm) untersucht. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tab. 12 aufgeführt.

|                             | Cadmium-Gehalte (mg/kg) |     |     |     |
|-----------------------------|-------------------------|-----|-----|-----|
| Tiefenintervall (cm u. GOK) | S1                      | S2  | S3  | S4  |
| 0 - 15                      | 21                      | 26  | 23  | 18  |
| 15 - 30                     | 15                      | 12  | 17  | 15  |
| 30 - 60                     | 1,2                     | 1,6 | 0,8 | 2,1 |

Tab. 12: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen auf der Verrieselungsfläche

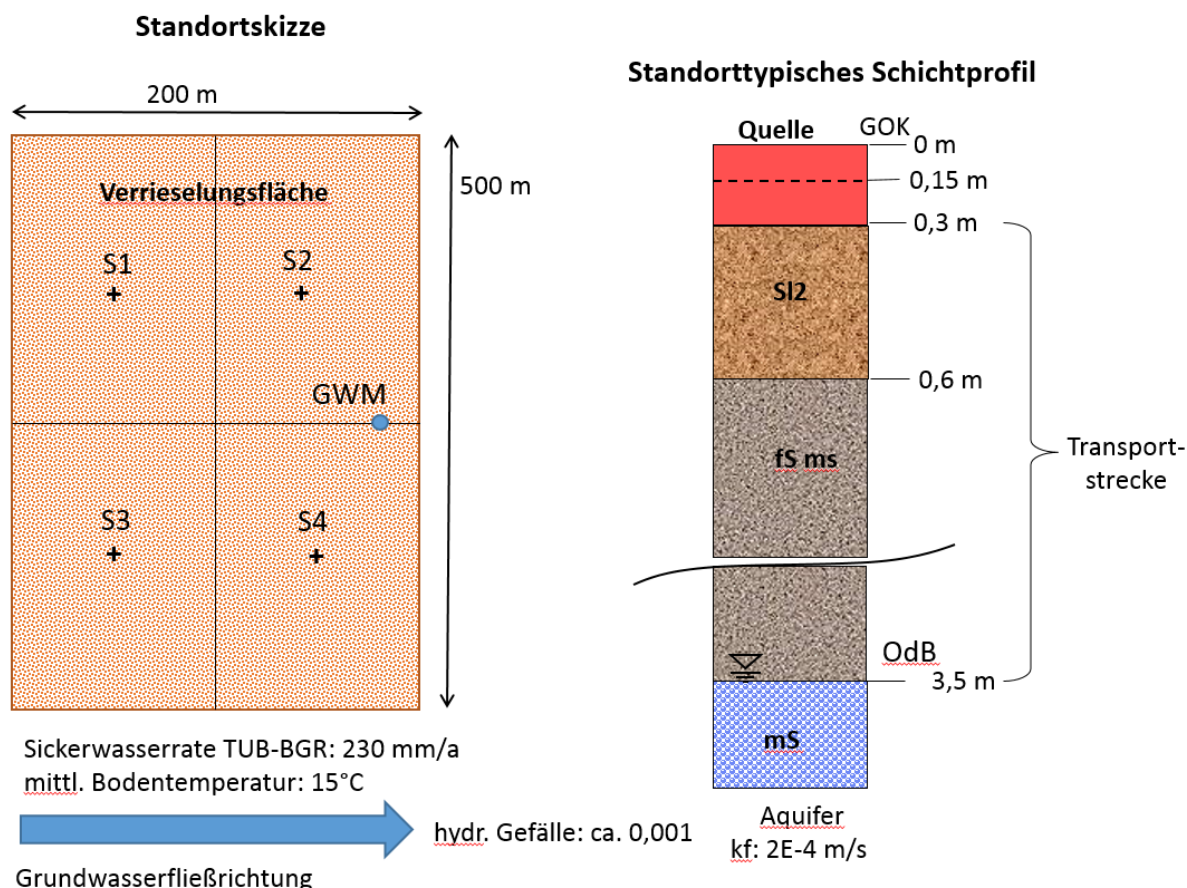


Abb. 58: Standortskizze und standorttypisches Schichtprofil für das Fallbeispiel 2

Darüber hinaus wurde abstromseitig auf der Fläche eine Rammkernsondierung (RKS) bis 5 m u. GOK niedergebracht und als Grundwassermessstelle (GWM) ausgebaut. Das Schichtenverzeichnis der RKS wurde zur Erstellung des typischen Schichtprofils (Abb. 58 rechts) herangezogen. Der Grundwasserstand in der Messstelle liegt bei 3,5 m u. GOK. Das hydraulische Gefälle (0,001) wurde aus Kartenwerken entnommen. Der kf-Wert ( $2 \cdot 10^{-4}$  m/s) des Aquifers wurde aus Korngrößenanalysen ermittelt. Die aus der Grundwassermessstelle (Filterstrecke 3,5 – 5 m u. GOK) entnommene Grundwasserprobe ergab keinen Hinweis auf erhöhte Cadmium-Konzentrationen.

Die relevanten schichtspezifischen Bodenparameter sind aus Tab. 13 ersichtlich.

| Schicht Nr. | von (m) | bis (m) | Bodenart  | Trockenroh-dichte (kg/dm <sup>3</sup> ) | Grob boden (%) | Humusgehalt (%) | pH  | Ton (%) | Corg (%) |
|-------------|---------|---------|-----------|-----------------------------------------|----------------|-----------------|-----|---------|----------|
| Quelle      | 0       | 0,3     | Oberboden | 1,2                                     |                |                 |     |         |          |
| 1           | 0,3     | 0,6     | SI3       | 1,4                                     | 1              | 1               | 3,8 | 10      | 0,5      |
| 2           | 0,6     | 3,5     | fSms      | 1,5                                     | 0              | 0               | 5   | 3       | 0,1      |

Tab. 13: schichtspezifische Bodenparameter

## b) Quelle

Aus den Ergebnissen der Bodenuntersuchungen (Tab. 12) wird deutlich, dass die Cad-

miumbelastung auf den Oberboden (0 – 30 cm) beschränkt ist. Es ist daher davon auszugehen, dass eine sorptive Anreicherung von Cadmium aus dem belasteten Abwasser während des Verrieselungsbetriebes erfolgte. Darauf weisen auch die Ergebnisse des nach DIN 19528 durchgeführten Säulenversuches (Tab. 14) hin, der zur Charakterisierung des Freisetungsverhaltens an einer Mischprobe (Sondierung S2) aus den beiden Schichten des Oberbodens (0 – 15 cm, 15 – 30 cm) durchgeführt wurde. Danach ist mit zunehmendem W/F-Verhältnis eine deutliche Abnahme der Schadstoffkonzentration zu beobachten.

|                       |                     | Ausgangsmaterial | Nach Einfräsen |
|-----------------------|---------------------|------------------|----------------|
| mittl. Cadmium-Gehalt | (mg/kg)             | 19               | 13,5           |
| Säuleneluat           | Kum. W/F-Verhältnis | Cadmium-Konz.    | Cadmium-Konz.  |
| Fraktions-Nr          | (l/kg)              | (µg/l)           | (µg/l)         |
| 1                     | 0,3                 | 25               | 15             |
| 2                     | 1,0                 | 21               | 9              |
| 3                     | 2,0                 | 17               | 6              |
| 4                     | 4,0                 | 8                | 4              |

Tab. 14: Ergebnisse des Säulenversuches

Als Auswirkung der Maßnahme zur Mobilitätskontrolle („Einfräsen von basischem Bodenmaterial“) auf die Quelle ergibt sich neben einer Reduzierung des mittleren Cadmium-Gehaltes um 30 % insbesondere eine deutliche Verringerung der Quellskonzentration (Tab. 14).

### c) Transportstrecke

Die Sickerwasserprognose wird für Cadmium durchgeführt. Die zur Berechnung der  $k_d$ -Werte (Sorptionseigenschaften) erforderlichen Bodenparameter sind aus Tab. 13 ersichtlich.

## B4.2.2 Parametereingabe

Die Parametereingabe erfolgt analog zum Fallbeispiel 1 entsprechend den aus der Fallbeschreibung vorliegenden Informationen. Insofern wird nachfolgend nur noch auf Besonderheiten beim Fallbeispiel 2 eingegangen.

### a) Standort

Die für die Eingabe im Arbeitsblatt „Standort“ (Abb. 59) erforderlichen Parameter können der Standortskizze (Abb. 58) und der Tab. 13 entnommen werden.

### b) Quelle

Die für die Eingabe im Arbeitsblatt „Quelle“ (Abb. 60) erforderlichen Parameter sind aus den Tabellen 12 - 14 ersichtlich. Die im vorliegenden Fall relevanten Stoffdaten für Cadmium sind in Tab. 15 zusammengefasst.

| Schadstoff | PW (µg/l) | GFS (µg/l) | Diffusionskoeffizient Wasser (m²/a) |
|------------|-----------|------------|-------------------------------------|
| Cadmium    | 5         | 0,3        | 1,721E-2                            |

Tab. 15: Stoffdaten für Cadmium

| Standortbeschreibung                                                                                                                                                        |                   |                   |          |             |                 |                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|----------|-------------|-----------------|----------------|
| <b>Kontaminationsgeometrie</b>                                                                                                                                              | <b>Einheit</b>    |                   |          |             |                 |                |
| Kontaminationsfläche                                                                                                                                                        | (m <sup>2</sup> ) | 100000,0          |          |             |                 |                |
| Quelle OK (m u. GOK)                                                                                                                                                        | (m)               | 0,00              |          |             |                 |                |
| Quelle UK (m u. GOK)                                                                                                                                                        | (m)               | 0,30              |          |             |                 |                |
| kontaminierte Kubatur                                                                                                                                                       | (m <sup>3</sup> ) | 30000,0           |          |             |                 |                |
| <b>Wasserhaushalt</b>                                                                                                                                                       |                   |                   |          |             |                 |                |
| Methode zur Sickerwasserrate-Berechnung                                                                                                                                     | eigene Angabe     |                   |          |             |                 |                |
| Sickerwasserrate                                                                                                                                                            | (mm/a)            | 230,0             |          |             |                 |                |
| <b>Transportstrecke</b>                                                                                                                                                     |                   |                   |          |             |                 |                |
| Ort der Beurteilung OdB (m. u. GOK)                                                                                                                                         | (m)               | 3,50              |          |             |                 |                |
| mittl. Temp. Transportstrecke                                                                                                                                               | (°C)              | 15                |          |             |                 |                |
| Disp-SF (gesamte Transportstrecke)                                                                                                                                          | (-)               | 0,100             |          |             |                 |                |
| Vorbelastung Transportstrecke                                                                                                                                               | (µg/l)            | 0,000             |          |             |                 |                |
| <b>Typisches Schichtprofil</b>                                                                                                                                              |                   |                   |          |             |                 |                |
| Schicht-Anzahl                                                                                                                                                              | 2                 |                   |          |             |                 |                |
| Schichtaufbau                                                                                                                                                               | von<br>(m u. GOK) | bis<br>(m u. GOK) |          |             |                 |                |
| Schicht-Nr. 1                                                                                                                                                               | 0,30              | 0,60              |          |             |                 |                |
| Schicht-Nr. 2                                                                                                                                                               | 0,60              | 3,50              |          |             |                 |                |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>Bodenart</th> <th>Festgestein</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tab. 30/31 KA 5</td> <td>GeoBerichte 19</td> </tr> </tbody> </table> |                   |                   | Bodenart | Festgestein | Tab. 30/31 KA 5 | GeoBerichte 19 |
| Bodenart                                                                                                                                                                    | Festgestein       |                   |          |             |                 |                |
| Tab. 30/31 KA 5                                                                                                                                                             | GeoBerichte 19    |                   |          |             |                 |                |
| <b>Aquiferparameter</b>                                                                                                                                                     |                   |                   |          |             |                 |                |
| Länge der Kont.Fläche in Grundwasserfließrichtung                                                                                                                           | (m)               | 200,0             |          |             |                 |                |
| Mächtigkeit der Einmischzone                                                                                                                                                | (m)               | 1,0               |          |             |                 |                |
| Aquiferdurchlässigkeit                                                                                                                                                      | (m/s)             | 2,000E-04         |          |             |                 |                |
| hydr. Gefälle                                                                                                                                                               | (m/m)             | 1,000E-03         |          |             |                 |                |
| Schadstoff-Anstromkonzentration                                                                                                                                             | (µg/l)            | 0,000             |          |             |                 |                |

**Konzeptionelle Standortskizze**

Abb. 59: Eingabedaten zur Standortbeschreibung im Arbeitsblatt „Standort“ für das Fallbeispiel 2

Die auf dem Standort vorhandene Schadstoffmasse wird im vorliegenden Fall aus den Untersuchungsergebnissen (Oberboden: 0 - 15 cm, 15 – 30 cm) der 4 Sondierungen (Tab. 12) berechnet. Damit ergibt sich für die Gesamtfläche eine Schadstoffmasse von 661,5 kg (Abb. 60) und bei einer Masse der kontaminierten Bodenkubatur von 36000 t (berechnet mit dem kontaminierten Volumen und der Trockenraumdichte von 1,2 kg/dm<sup>3</sup>) ein mittlerer Cadmium-Gehalt von 18,4 mg/kg.

Das Freisetungsverhalten wird durch die zeitliche Entwicklung der Quellkonzentration bestimmt. Das Ergebnis des Säulenversuches weist darauf hin, dass das Freisetungsverhalten dem Fall B (exponentiell abfallende Quellkonzentration) entspricht, wie es für einen hauptsächlich sorptiv gebundenen Schadstoff zu erwarten ist (s. Kap. A2.2.3 der Arbeitshilfe DU [1]). Es wird davon ausgegangen, dass die sorptive Bindung reversibel ist und langfristig der gesamte sorptiv gebundene Schadstoffvorrat wieder mobilisierbar ist (mob. Anteil 100 %).

Als initiale Quellkonzentration wird die Konzentration der ersten Fraktion des Säuleneeluates bei einem kumulativen W/F-Verhältnis von 0,3 l/kg (Tab. 14) verwendet. Damit ergibt sich für den Quelltyp B (exponentiell abfallende Quellkonzentration) die Abklingkonstante 8,692E-4 (1/a).

**Beschreibung der Schadstoffquelle**

| Schadstoffcharakterisierung | Vergleichswert am OdB |                               |                        |                                         |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|
|                             | Schadstoff            | Prüfwert BBodSchV (PW) (µg/l) | GFS (LAWA 2016) (µg/l) | Ersatzwert (EW) (µg/l)                  |
|                             | Cadmium               | 5,00                          | 0,3000                 |                                         |
|                             |                       |                               |                        | Diff.-koeff. Wasser (m <sup>2</sup> /a) |
|                             |                       |                               |                        | 1,721E-02                               |

**Schadstoffmasse****Ermittlung über Sondierungen**

|                                                           |       |      |     |       |
|-----------------------------------------------------------|-------|------|-----|-------|
| Anzahl Sondierungen                                       | 4     |      |     |       |
| Sondierungs-Nr                                            | S1    | S2   | S3  | S4    |
| Anzahl Schichten (Quelle)                                 | 2     | 2    | 2   | 2     |
| repräsentativer Flächenanteil in %                        | 25,00 | 25   | 25  | 25    |
| flächenspezifische Bodentrockenmasse [kg/m <sup>2</sup> ] | 90,0  | 90   | 90  | 90    |
| flächenspezifische Schadstoffmasse [g/m <sup>2</sup> ]    | 1,6   | 1,71 | 1,8 | 1,485 |

| Sondierungen         | Mächtigkeit | Trockenraumdichte     | schichtspez. Bodentrockenmasse | Schadstoffgehalt | schichtspez. Schadstoffmasse |
|----------------------|-------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|------------------------------|
|                      | (m)         | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (kg/m <sup>2</sup> )           | (mg/kg)          | (g/m <sup>2</sup> )          |
| S1 (gesamt)          | 0,30        | 1,2                   | 360,0                          |                  | 6,5                          |
| Schicht-Nr. 1 (S1.1) | 0,15        | 1,2                   | 180,0                          | 21,00            | 3,8                          |
| Schicht-Nr. 2 (S1.2) | 0,15        | 1,2                   | 180,0                          | 15,00            | 2,7                          |

|                      |      |     |       |       |     |
|----------------------|------|-----|-------|-------|-----|
| S2 (gesamt)          | 0,30 | 1,2 | 360,0 |       | 6,8 |
| Schicht-Nr. 1 (S2.1) | 0,15 | 1,2 | 180,0 | 26,00 | 4,7 |
| Schicht-Nr. 2 (S2.2) | 0,15 | 1,2 | 180,0 | 12,00 | 2,2 |

|                      |      |     |       |       |     |
|----------------------|------|-----|-------|-------|-----|
| S3 (gesamt)          | 0,30 | 1,2 | 360,0 |       | 7,2 |
| Schicht-Nr. 1 (S3.1) | 0,15 | 1,2 | 180,0 | 23,00 | 4,1 |
| Schicht-Nr. 2 (S3.2) | 0,15 | 1,2 | 180,0 | 17,00 | 3,1 |

|                      |      |     |       |       |     |
|----------------------|------|-----|-------|-------|-----|
| S4 (gesamt)          | 0,30 | 1,2 | 360,0 |       | 5,9 |
| Schicht-Nr. 1 (S4.1) | 0,15 | 1,2 | 180,0 | 18,00 | 3,2 |
| Schicht-Nr. 2 (S4.2) | 0,15 | 1,2 | 180,0 | 15,00 | 2,7 |

|                                                       |             |
|-------------------------------------------------------|-------------|
| gesamtspezifische Schadstoffmasse (g/m <sup>2</sup> ) | 6,6         |
| Schadstoffmasse gesamt (g)                            | 661.500,000 |

**Schadstofffreisetzung**

| zeitliche Entwicklung Quellkonzentration | konstant | exponentiell abklingend |
|------------------------------------------|----------|-------------------------|
| Fallkonstellation                        | A        | B                       |
| mobilisierbarer Anteil (%)               | 100,0    | 100,0                   |
| initiale Quellkonzentration (µg/l)       | 25,000   | 25,000                  |
| Abklingkonstante berechnet (1/a)         |          | 8,692E-04               |

Abb. 60: Eingabedaten zur Beschreibung der Quelle im Arbeitsblatt „Quelle“ für den Schadstoff Cadmium

Die relevanten Eingabeparameter zur Beschreibung der Quelle sind in Tab. 16 zusammengefasst.

| Zustand    | Schadstoffmasse | mittl. Schadstoffgehalt | Trockenraumdichte     | Initiale Quellkonz. | Mob. Anteil | Abkling-Konstante (berechnet) |
|------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|-------------|-------------------------------|
|            | (kg)            | (mg/kg)                 | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (µg/l)              | (%)         | (1/a)                         |
| ohne Maßn. | 661,5           | 18,4                    | 1,2                   | 25                  | 100         | 8,692E-4                      |
| mit Maßn.  | 486             | 13,5                    | 1,2                   | 15                  | 100         | 7,099E-4                      |

Tab. 16: Eingabeparameter zur Beschreibung der Schadstoffquelle ohne und mit Maßnahme zur Mobilitätskontrolle

**c) Transport**

Im Arbeitsblatt „Transport“ erfolgt die schichtweise Eingabe der Parameter zur Berechnung der Bodenkennwerte (Feldkapazität und Luftkapazität) und der  $k_d$ -Werte über das Eingabefenster „Schichtspezifische Boden und Transportparameter“ (Abb. 61). Da im vorliegenden Fall die Auswirkungen einer Anhebung des pH-Wertes („Einfräsen von basisch reagierendem Bodenmaterial“) geprüft werden soll, werden zwei Szenarien betrachtet:

**Szenario 1:**

Im Szenario 1 werden die nach Ende des Verrieselungsbetriebes festgestellten pH-Werte für die Berechnung der schichtspezifischen  $k_d$ -Werte zugrunde gelegt.

**Szenario 2:**

Im Szenario 2 wird davon ausgegangen, dass durch das Einfräsen von Bodenmaterial der pH-Wert in der Transportstrecke bis in den Neutralbereich (pH 7) angehoben werden kann.

Die relevanten Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte und  $k_d$ -Werte sind in Tab. 17 - 19 zusammengefasst.

| Schicht Nr. | von | bis | Bodenart | Trockenrohdichte      | Grobboden | Humusgehalt | Feldkapazität | Luftkapazität |
|-------------|-----|-----|----------|-----------------------|-----------|-------------|---------------|---------------|
|             | (m) | (m) |          | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (%)       | (%)         | (%)           | (%)           |
| 1           | 0,3 | 0,6 | Sl3      | 1,4                   | 1         | 1           | 29,7          | 18            |
| 2           | 0,6 | 3,5 | fS ms    | 1,5                   | 0         | 0           | 14            | 31            |

Tab. 17: schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte Feldkapazität/Luftkapazität

| Schichten |     |     | Bodenart | Eingabeparameter |           |      |                    | $k_d$ BGR |
|-----------|-----|-----|----------|------------------|-----------|------|--------------------|-----------|
| Nr.       | von | bis |          | pH               | Tongehalt | Corg | Referenzkonz. Lin. | Cadmium   |
|           | (m) | (m) |          |                  | (%)       | (%)  | (µg/l)             | (l/kg)    |
| 1         | 0,3 | 0,6 | Sl3      | 3,8              | 10        | 0,5  | 25                 | 18,4      |
| 2         | 0,6 | 3,5 | fS ms    | 5,0              | 3         | 0,1  | 25                 | 25,6      |

Tab. 18: schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der  $k_d$ -Werte für Szenario 1 (Ausgangszustand)

| Schichten |     |     | Bodenart | Eingabeparameter |           |      |                    | $k_d$ BGR |
|-----------|-----|-----|----------|------------------|-----------|------|--------------------|-----------|
| Nr.       | von | bis |          | pH               | Tongehalt | Corg | Referenzkonz. Lin. | Cadmium   |
|           | (m) | (m) |          |                  | (%)       | (%)  | (µg/l)             | (l/kg)    |
| 1         | 0,3 | 0,6 | Sl3      | 7                | 10        | 0,5  | 15                 | 924       |
| 2         | 0,6 | 3,5 | fS ms    | 6,5              | 3         | 0,1  | 15                 | 167       |

Tab. 19: schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der  $k_d$ -Werte für Szenario 2 (Maßnahme zur Mobilitätskontrolle)

Schichtspezifische Boden- und Transportparameter

Gewählter Schadstoff: Cadmium

Schichtauswahl

| Schicht | Von | Bis | Bodenart       | Festgestein |
|---------|-----|-----|----------------|-------------|
| Nr. 1   | 0,3 | 0,6 | Sl3            |             |
| Nr. 2   | 0,6 | 3,5 | fS, fSms, fSgs |             |

Feld-/Luftkapazität

Trockenrohdichte (kg/dm³)

Grobbodenanteil (Vol %)

Humusgehalt (Gehalt %)

Feldkapazität (Vol %)  Richtwert: 29,73

Luftkapazität (Vol %)  Richtwert: 18

kd-Werte

pH

Tongehalt (Masse %)

Corg (Masse %)

Referenz-Konzentration Linearisierung (µg/l)

kd BGR (l/kg)

kd vdBR (l/kg)

kd\_Org (l/kg)

kd Auswahl (l/kg)

Abb. 61: Eingabefenster „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ im Arbeitsblatt „Transport“ für den Schadstoff Cadmium (Ausgangszustand)

#### B4.2.3 Durchführung der Berechnung

##### a) Prognose unter Berücksichtigung des Ausgangszustandes nach 50 Jahren Verrieselungsbetrieb

Die Untersuchungen nach der Stilllegung des Verrieselungsbetriebes haben eine deutliche, auf den Oberboden der Verrieselungsfläche beschränkte Kontamination mit Cadmium ergeben (Tab. 12). Da noch keine Beeinflussung des Grundwassers festgestellt werden konnte, soll mit einer Sickerwasserprognose geklärt werden, ob von dem kontaminierten Oberboden eine Gefahr für das Grundwasser ausgeht. Dazu wird nach dem Start der Berechnung im Auswahlfenster der Zeitpunkt „PW-Unterschreitung“ gewählt und die Berechnung für Quelltyp B (exponentiell abfallende Quellkonzentration) durchgeführt.

Das Ergebnis der Berechnung mit dem Konzentrationsverlauf am OdB ist in Abb. 62 dargestellt. Danach ist die Überschreitung des Prüfwertes nach 372 Jahren (Tab. 20) zu erwarten. Aufgrund des erheblichen Schadstoffvorrates hält die Prüfwertüberschreitung für mehr als 2000 Jahre an. Das Maximum der Konzentration (16,3 µg/l) wird nach 859 Jahren erreicht.

Aufgrund der lang anhaltenden, deutlichen Prüfwertüberschreitung und des geringen Verdünnungsfaktors infolge der erheblichen Ausdehnung der Fläche in Grundwasserfließrichtung (200 m) ist eine deutliche Überschreitung der GFS in der Einmischzone

und damit eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit zu erwarten. (Tab. 20)

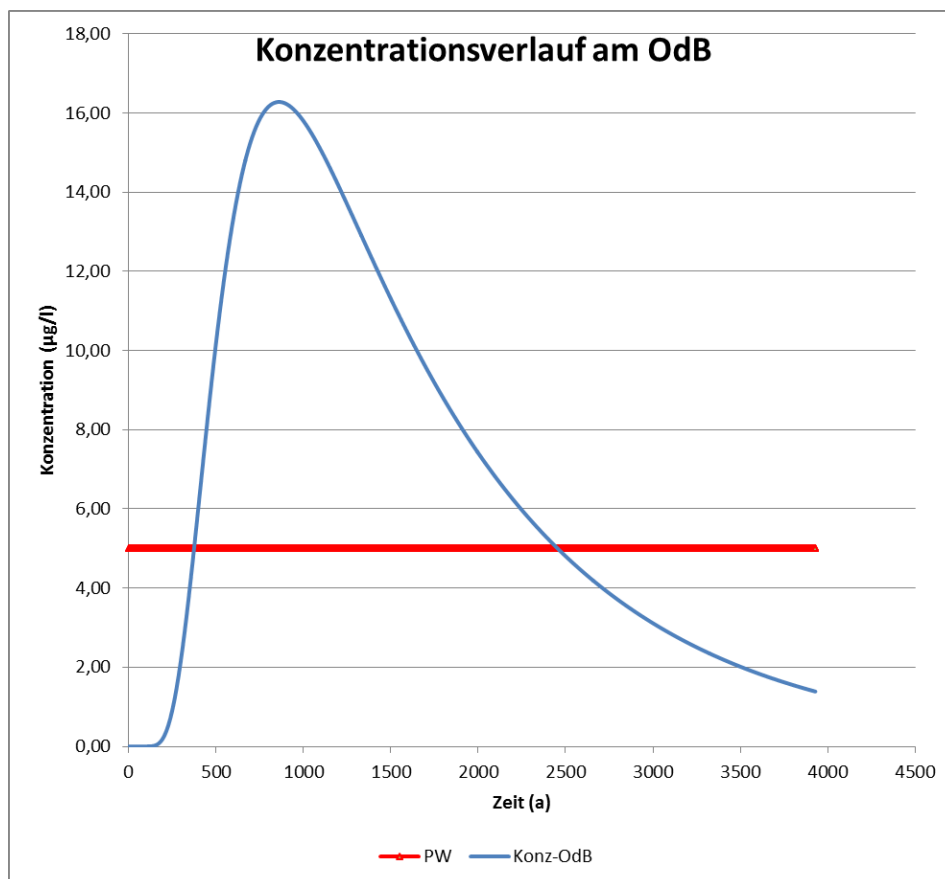


Abb. 62: Verlauf der Cadmium-Konzentration am OdB für das Szenario 1 (Ausgangszustand nach 50 Jahren Verrieselungsbetrieb)

Die wesentlichen Kenngrößen der Prognose sind in Tab. 20 zusammenfassend dargestellt.

| Schadstoff | Emissionsdauer | Zeitpunkt PW-Üb. | Dauer PW-Üb. | Max. Konz. OdB | Max. Fracht | Max. Konz. Einmischzone |
|------------|----------------|------------------|--------------|----------------|-------------|-------------------------|
|            | (Jahre)        | (Jahre)          | (Jahre)      | (µg/l)         | (g/a)       | (µg/l)                  |
| Cadmium    | 1852           | 372              | 2081         | 16,3           | 374,3       | 14,3                    |

Tab. 20: Kenngrößen für die Sickerwasserprognose zum Zeitpunkt der Prüfwertunterschreitung (Szenario 1: Ausgangszustand nach 50 Jahren Verrieselungsbetrieb)

#### b) Auswirkung einer Maßnahme zur Reduzierung der Mobilität

Aufgrund der längerfristig zu erwartenden Grundwasserverunreinigung wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie mögliche Sanierungsmaßnahmen betrachtet. Die Beseitigung der Quelle (komplette Auskoffnung des Oberbodens) erwies sich aufgrund der großen Fläche (10 ha) und der daraus resultierenden kontaminierten Bodenmasse von 36000 t als nicht verhältnismäßig. Als Alternative wurde eine Maßnahme zur Mobilitätskontrolle durch Einfräsen von mit Branntkalk (CaO) versetztem Geschiebemergel betrachtet.

Die Auswirkungen dieser Maßnahme (Erhöhung der pH-Werte in der Quelle und der Transportstrecke) wurden mit einer Sickerwasserprognose geprüft. Durch die Maßnahme ergeben sich Veränderungen bei der Quelle (Reduzierung des mittleren Gesamtgehaltes und Verringerung der Quellskonzentration, Tab. 14) und bei der Transportstrecke. Dabei wird angenommen, dass durch die Maßnahme auch in der Transportstrecke eine deutliche Anhebung des pH-Wertes und eine daraus resultierende Erhöhung der  $k_d$ -Werte (Tab. 19) erreicht werden kann.

Das Ergebnis der Berechnung mit dem Konzentrationsverlauf am OdB ist in Abb. 63 dargestellt. Danach wäre bei Durchführung der Maßnahme keine Überschreitung des Prüfwertes am OdB mehr zu erwarten. Grund dafür ist die starke dispersive Abminderung in der Transportstrecke infolge der im Vergleich mit der Emissionsdauer (1479 a) deutlich längeren Transportzeit (4886 a). Aufgrund der für Cadmium sehr geringen GFS (0,3 µg/l) reicht die Abminderung allerdings nicht aus, um langfristig auch eine Überschreitung der GFS im Grundwasser und damit eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit zu verhindern (Tab. 21).

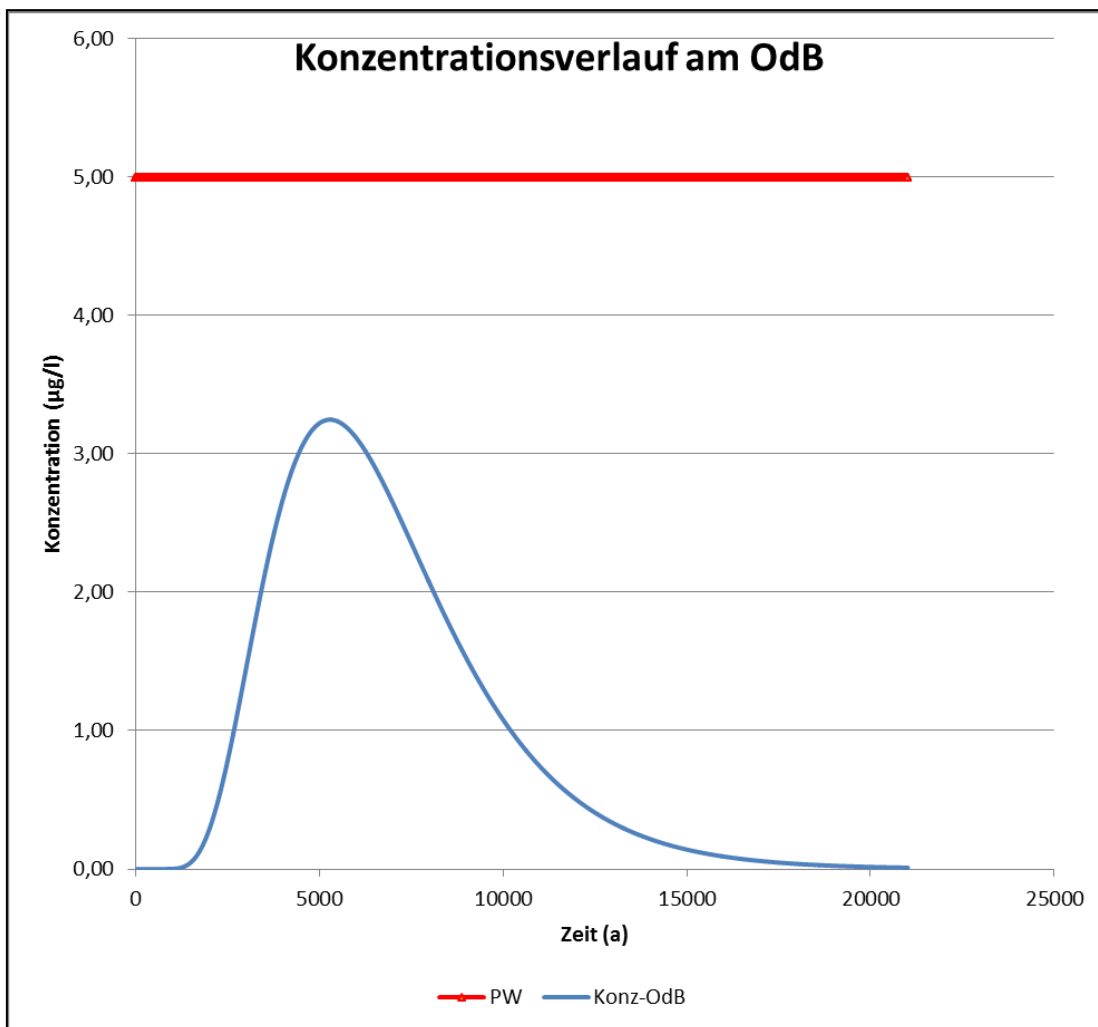


Abb. 63: Verlauf der Cadmium-Konzentration am OdB nach Durchführung einer Maßnahme zur Mobilitätskontrolle (Einfüllen von basischem Bodenmaterial)

Die wesentlichen Kenngrößen der Prognose sind in Tab. 21 zusammenfassend dargestellt.

| Schadstoff | Emissionsdauer | Aufenthaltsdauer | Zeitpunkt PW-Üb. | Dauer PW-Üb. | Max. Konz. OdB | Max. Fracht | Max. Konz. Einmischzone |
|------------|----------------|------------------|------------------|--------------|----------------|-------------|-------------------------|
|            | (a)            | (a)              | (a)              | (a)          | (µg/l)         | (g/a)       | (µg/l)                  |
| Cadmium    | 1548           | 4848             | (-)              | (-)          | 3,6            | (-)         | 3,14                    |

Tab. 21: Kenngrößen für die Sickerwasserprognose zum Zeitpunkt der Prüfwertunterschreitung (Szenario 2: nach Durchführung einer Maßnahme zur Mobilitätskontrolle)

### B4.3 Fallbeispiel 3 (Organik/Quellentyp A)

#### B4.3.1 Beschreibung des Falles (Bohrschlammgrube)

##### a) Standort

Es handelt sich um eine ehemalige Bohrschlammgrube (Abb. 64), in der von 1963 - 1965 Bohrschlamm und Bohrgut, die beim Abteufen von Bohrungen auf Erdöl- und Erdgas anfielen, abgelagert wurden.

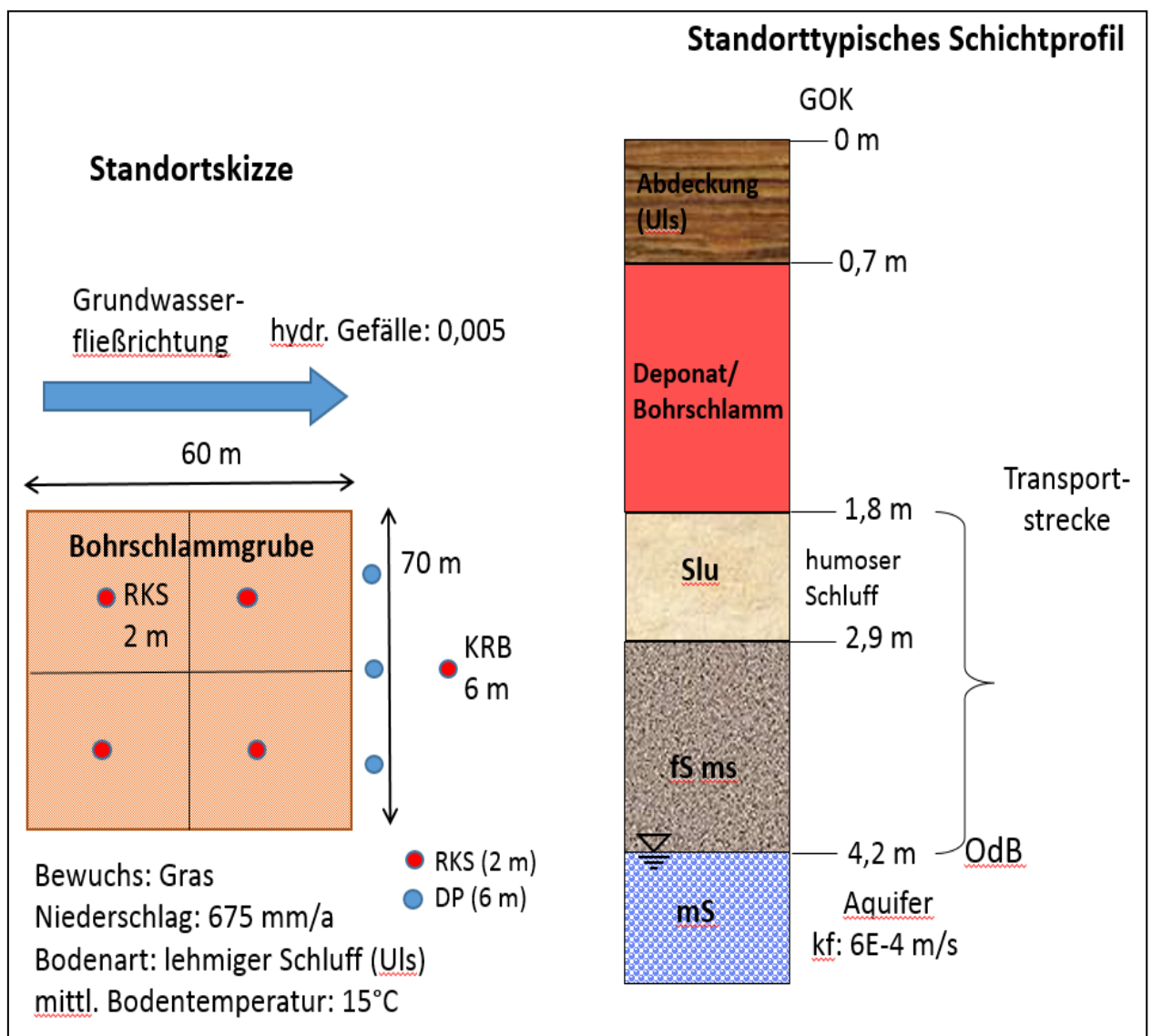


Abb. 64: Standortsskizze und standorttypisches Schichtprofil für Fallbeispiel 3 (Bohrschlammgrube)

Der Bohrschlamm wurde entsprechend der damals üblichen Praxis ohne Einrichtung einer Basisabdichtung in der bis dahin zum Sandabbau genutzten Grube eingelagert und nach der Ablagerungsphase mit Boden abgedeckt und rekultiviert. Aufgrund des Stoffinventars (Chlorid, Sulfat, MKW, BTEX, PAK) werden Bohrschlammgruben grundsätzlich als Altlastverdachtsflächen betrachtet. Die Fläche wurde daher einer orientierenden Untersuchung (OU) unterzogen, um den Gefahrenverdacht zu bestätigen oder auszuräumen.

Dazu wurden 4 Rammkernsondierungen (RKS) bis 2 m u. GOK abgeteuft (Abb. 64). Der abgelagerte Bohrschlamm (Deponat) wurde im Tiefenbereich von 0,7 – 1,8 m u. GOK angetroffen. Aus dem Deponatbereich der einzelnen RKS wurde jeweils eine Mischprobe (MP-S1 – MP-S4) erstellt und auf MKW, BTEX/Benzol und PAK/Naphthalin im Feststoff untersucht. Das Deponat wies einen deutlichen MKW-Geruch auf.

Die Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen sind in Tab. 22 dargestellt. Die Feststoffgehalte des Oberbodens und der Abdeckung oberhalb des Deponats zeigten keine Auffälligkeiten. Auch die Bodenschicht unterhalb des Deponats wies keine Belastungen auf.

Im vermuteten Abstrom außerhalb der Ablagerungsfläche wurden zur Untersuchung des Grundwassers eine KRB und 3 DP-Sondierungen bis 6 m u. GOK niedergebracht (Abb. 64). Das Schichtenverzeichnis der KRB (6 m) wurde zur Erstellung des typischen Schichtprofils herangezogen. Der Grundwasserstand wurde bei 4,2 m u. GOK angetroffen. Das hydraulische Gefälle (0,005) wurde aus Kartenwerken entnommen. Der kf-Wert ( $6 \cdot 10^{-4}$  m/s) wurde aus Korngrößenanalysen ermittelt.

Die mit den DP-Sondierungen aus dem Tiefenintervall (4,5 – 5,5 m u. GOK) entnommenen Grundwasserproben ergaben keine Hinweise auf eine Beeinflussung durch Schadstoffausträge aus der Bohrschlammgrube.

| Parameter (mg/kg) | MP-S1 | MP-S2 | MP-S3 | MP-S4 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| KW-Index C10-C40  | 25700 | 16300 | 31600 | 12400 |
| KW-Index C10-C22  | 12100 | 7600  | 13700 | 3800  |
| BTEX              | 23,5  | 5,1   | 37    | 1,3   |
| Benzol            | 1,3   | 0,4   | 7,2   | 0,3   |
| ΣPAK              | 12,2  | 7,3   | 22,5  | 6,8   |
| Naphthalin        | 8,2   | 4,1   | 10,9  | 3,1   |

Tab. 22: Ergebnisse der Feststoff-Untersuchungen des Deponats

## b) Quelle

Aus den Ergebnissen der Feststoffuntersuchungen ist ersichtlich, dass der abgelagerte Bohrschlamm (Deponat) als Schadstoffquelle betrachtet werden muss. Aufgrund der organoleptischen Auffälligkeiten und der deutlichen Belastungen des Deponats mit mineralölytypischen Schadstoffen wurden an der Mischprobe MP-S3 zwei Schütteluquats bei einem W/F-Verhältnis von 2:1 und 10:1 untersucht. Dabei wurde mit zunehmendem W/F-Verhältnis nur ein geringer Rückgang der Konzentrationen festgestellt (Tab. 23)

| Parameter    | Einheit | W/F-Verhältnis |      |
|--------------|---------|----------------|------|
|              |         | 2:1            | 10:1 |
| KW (C10-C40) | µg/l    | 1350           | 1320 |
| KW (C10-C22) | µg/l    | 1200           | 1175 |
| BTEX         | µg/l    | 75             | 58   |
| Benzol       | µg/l    | 14             | 12   |
| PAK          | µg/l    | 25             | 21   |
| Naphthalin   | µg/l    | 16             | 14   |

Tab. 23: Ergebnisse der Eluat-Untersuchungen der MP-S3

**c) Transportstrecke**

Die relevanten schichtspezifischen Bodenparameter sind aus Tab. 24 ersichtlich.

| Schicht Nr. | von | bis | Bodenart | Trockenrohdichte      | Grobboden | Humusgehalt | Corg |
|-------------|-----|-----|----------|-----------------------|-----------|-------------|------|
|             | (m) | (m) |          | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (%)       | (%)         | (%)  |
| Quelle      | 0,7 | 1,8 | Schluff  | 1,5                   |           |             |      |
| 1           | 1,8 | 2,9 | Slu      | 1,6                   | 0         | 5           | 3    |
| 2           | 2,9 | 4,2 | fS ms    | 1,6                   | 0         | 0           | 0,1  |

Tab. 24: schichtspezifische Bodenparameter für das Fallbeispiel 3

**B4.3.2 Parametereingabe**

Die Parametereingabe erfolgt analog zu den Fallbeispielen 1 und 2 entsprechend den aus der Fallbeschreibung vorliegenden Informationen.

**a) Standort**

Die für die Eingabe im Arbeitsblatt „Standort“ (Abb. 65) erforderlichen Parameter können der Standortskizze (Abb. 64) und der Tab. 24 entnommen werden.

**b) Quelle**

Die für die Eingabe im Arbeitsblatt „Quelle“ erforderlichen Parameter sind aus den Tabellen 22 - 24 ersichtlich. Aufgrund der Ergebnisse der Feststoff- und Eluatuntersuchungen wurde entschieden, die Sickerwasserprognose für die Einzelstoffe n-Decan, Benzol und Naphthalin durchzuführen. Der Einzelstoff n-Decan wurde als Vertreter der aliphatischen (Alkane) Mineralölkohlenwasserstoffe (C10-C40) ausgewählt, da eine Sickerwasserprognose immer nur für einen Einzelstoff durchgeführt werden kann und n-Decan die höchste Wasserlöslichkeit der C10 – C20 - Fraktion der Alkane besitzt. Die Prognose liegt damit auf der sicheren Seite.

Da es im vorliegenden Fall um organische Schadstoffe geht, ist nach dem Öffnen des Eingabefensters „Schadstoff-Auswahl“ (Abb. 66) im Feld Schadstoffcharakterisierung die Auswahl „Organik“ zu treffen. Im linken Teil des Fensters werden dann die organischen Stoffgruppen (Alkane, Aromaten u. a.) angezeigt. Bei Auswahl der Gruppe Aromaten wird Benzol als typischer Vertreter der Aromaten im mittleren Teil des Fensters oben angezeigt und kann direkt ausgewählt werden. Alternativ kann der Name des Stoffes im Feld „Suche“ eingegeben werden.

| Standortbeschreibung                    |                   |                     |                 |
|-----------------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|
| <b>Kontaminationsgeometrie</b>          | <b>Einheit</b>    |                     |                 |
| Kontaminationsfläche                    | (m <sup>2</sup> ) | 4200,0              |                 |
| Quelle OK (m u. GOK)                    | (m)               | 0,70                |                 |
| Quelle UK (m u. GOK)                    | (m)               | 1,80                |                 |
| kontaminierte Kubatur                   | (m <sup>3</sup> ) | 4620,0              |                 |
| <b>Wasserhaushalt</b>                   |                   |                     |                 |
| Methode zur Sickerwasserrate-Berechnung | Beims/Gutt        |                     |                 |
| Abschätzung nach Beims und Gutt         |                   |                     |                 |
| Niederschlag                            | (mm/a)            | 675,0               |                 |
| Bodentyp                                | (-)               | miger Schluff (Uls) |                 |
| Vegetationsart                          | (-)               | Gras (G)            |                 |
| Versiegelungsgrad Flächenanteil         | (%)               | 0                   |                 |
| Grundwasserneubildung n. Beims/Gutt     | (mm/a)            | 195,0               |                 |
| <b>Transportstrecke</b>                 |                   |                     |                 |
| Ort der Beurteilung OdB (m. u. GOK)     | (m)               | 4,20                |                 |
| mittl. Temp. Transportstrecke           | (°C)              | 15                  |                 |
| Disp-SF (gesamte Transportstrecke)      | (-)               | 0,100               |                 |
| Vorbelastung Transportstrecke           | (µg/l)            | 0,000               |                 |
| <b>Typisches Schichtprofil</b>          |                   |                     |                 |
| Schicht-Anzahl                          | 2                 |                     |                 |
|                                         | von               | bis                 | Bodenart        |
|                                         | (m u. GOK)        | (m u. GOK)          | Tab. 30/31 KA 5 |
| Schichtaufbau                           |                   |                     | Festgestein     |
|                                         |                   |                     | GeoBerichte 19  |
| Schicht-Nr. 1                           | 1,80              | 2,90                | Slu             |
| Schicht-Nr. 2                           | 2,90              | 4,20                | fS, fSms, fSgs  |
| <b>Aquiferparameter</b>                 |                   |                     |                 |
| Länge der Kont.Fläche in                |                   |                     |                 |
| Grundwasserfließrichtung                | (m)               |                     | 60,0            |
| Mächtigkeit der Einmischzone            | (m)               |                     | 1,0             |
| Aquiferdurchlässigkeit                  | (m/s)             |                     | 6,000E-04       |
| hydr. Gefälle                           | (m/m)             |                     | 5,000E-03       |
| Schadstoff-Anstromkonzentration         | (µg/l)            |                     | 0,000           |

**Konzeptionelle Standortskizze**

Abb. 65: Eingabedaten zur Standortbeschreibung im Arbeitsblatt „Standort“ für das Fallbeispiel 3

Nach Auswahl des Schadstoffes werden die relevanten Stoffdaten im rechten Bereich des Eingabefensters angezeigt. Dargestellt wird die Stoffgruppe (Aromaten), sofern vorhanden der Prüfwert der BBodSchV oder die GFS (LAWA 2016). Wenn weder ein PW noch eine GFS vorhanden sind, muss im Feld Ersatzwert (EW) zwingend ein entsprechender Wert eingegeben werden. Im vorliegenden Fall wird für den Einzelstoff n-Decan als Vertreter der Alkane der PW der BBodSchV für MKW (200 µg/l) verwendet.

Weiterhin werden die Diffusionskoeffizienten in Wasser und in Luft (m<sup>2</sup>/a) sowie die Henry-Konstante angezeigt. Die angezeigten Daten stammen aus dem in ALTEX-1D integrierten Stoffdatenblatt „Stoffdaten - Organik“, das über die Menüleiste angezeigt werden kann. Der Anwender hat die Möglichkeit in den Feldern für die Diffusionskoeffizienten und die Henry-Konstante auch einen eigenen Wert einzugeben. Im unteren Bereich wird die Spannweite der Halbwertszeit als Max-/Min-Wert (a) angezeigt. Diese Werte können dem Anwender als Orientierung zur Eingabe eines plausiblen Wertes in das Feld „Halbwertszeit gewählt“ dienen. Die im Eingabefenster angezeigten Daten werden abschließend durch Anklicken der Schaltfläche „Eingaben übernehmen“ in das Arbeitsblatt „Quelle“ übernommen.

Abb. 66: Auswahl des Schadstoffes Benzol im Eingabefenster „Schadstoff-Auswahl“

Die im vorliegenden Fall relevanten Stoffdaten für Benzol, n-Decan und Naphthalin sind in Tab. 25 zusammengefasst. Um Ergebnisse auf der sicheren Seite zu erhalten, wurden dabei zunächst die jeweiligen Maximalwerte der Halbwertszeit ausgewählt.

| Schadstoff | PW     | GFS    | EW     | Diffusionskoeff. |        | Henry-Konst. | Spannweite Halbwertszeit |       |         |
|------------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------------|--------------------------|-------|---------|
|            |        |        |        | Wasser           | Luft   |              | Min                      | Max   | gewählt |
|            | (µg/l) | (µg/l) | (µg/l) | (m²/a)           | (m²/a) | (-)          | (a)                      | (a)   | (a)     |
| Benzol     | 1      | 1      |        | 3,243E-2         | 277,6  | 0,1424       | 0,175                    | 0,666 | 0,666   |
| n-Decan    |        |        | 200    | 2,36E-2          | 206,9  | 78,27        | 0,024                    | 0,235 | 0,235   |
| Naphthalin | 2      | 2      |        | 2,494E-2         | 217,6  | 1,18E-2      | 0,217                    | 1,244 | 1,244   |

Tab. 25: Stoffdaten für Benzol, n-Decan und Naphthalin (EW für n-Decan entspricht dem PW der BBodSchV für MKW)

Die auf dem Standort vorhandene Schadstoffmasse wird im vorliegenden Fall aus den Untersuchungsergebnissen der 4 Mischproben aus dem Deponat (Tab. 22) berechnet. In Abb. 67 sind die Eingaben für den Schadstoff Benzol gezeigt. Die für die Gesamtfläche

berechneten Schadstoffmassen für Benzol, n-Decan und Naphthalin sind in Tab. 26 zusammengefasst. Im Sinne einer „Worst-Case“-Annahme wurde als Schadstoffgehalt für n-Decan der Gehalt der C10-C22-Fraktion verwendet.

Das Freisetzungsverhalten wird durch die zeitliche Entwicklung der Quellkonzentration bestimmt. Das Ergebnis der Elutionstests bei den W/F-Verhältnissen 2:1 und 10:1 weist darauf hin, dass das Freisetzungsverhalten dem Quelltyp A (konstante Quellkonzentration) entspricht. Es ist davon auszugehen, dass die Schadstoffgehalte an residuale Mineralölphase gebunden sind und insofern eine löslichkeitslimitierte Freisetzung mit langfristig vollständiger Mobilisierbarkeit (mob. Anteil 100 %) zu erwarten ist.

Als initiale Quellkonzentration wird die Konzentration bei einem kumulativen W/F-Verhältnis von 2:1 (Tab. 23) verwendet. Im Sinne einer „Worst-Case“-Annahme wird als Konzentration für n-Decan der Wert für die C10-C22-Fraktion verwendet.

| Beschreibung der Schadstoffquelle |                       |                               |                        |                                         |                                       |                     |                                        |                                        |                              |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|
| Schadstoffcharakterisierung       | Vergleichswert am OdB |                               |                        | Diff.-koeff. Wasser (m <sup>2</sup> /a) | Diff.-koeff. Luft (m <sup>2</sup> /a) | Henry-Konstante (-) | Spannweite<br>Halbwertszeit<br>Min (a) | Spannweite<br>Halbwertszeit<br>Max (a) | Halbwertszeit<br>gewählt (a) |
|                                   | Schadstoff            | Prüfwert BBodSchV (PW) (µg/l) | GFS (LAWA 2016) (µg/l) |                                         |                                       |                     |                                        |                                        |                              |
| Benzol                            |                       | 1,00                          | 1,0000                 | 3,243E-02                               | 2,776E+02                             | 1,424E-01           | 0,175                                  | 0,666                                  | 0,666                        |

| Schadstoffmasse                                           |       |       |       |         |
|-----------------------------------------------------------|-------|-------|-------|---------|
| Ermittlung über Sondierungen                              |       |       |       |         |
| Anzahl Sondierungen                                       | 4     |       |       |         |
| Sondierungs-Nr                                            | S1    | S2    | S3    | S4      |
| Anzahl Schichten (Quelle)                                 | 1     | 1     | 1     | 1       |
| repräsentativer Flächenanteil in %                        | 25,00 | 25    | 25    | 25      |
| flächenspezifische Bodentrockenmasse [kg/m <sup>2</sup> ] | 412,5 | 412,5 | 412,5 | 412,5   |
| flächenspezifische Schadstoffmasse [g/m <sup>2</sup> ]    | 0,5   | 0,165 | 2,97  | 0,12375 |

| Sondierungen                                                 | Mächtigkeit | Trockenraumdichte     | schichtspez. Bodentrockenmasse | Schadstoffgehalt | schichtspez. Schadstoffmasse |
|--------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|------------------------------|
|                                                              | (m)         | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (kg/m <sup>2</sup> )           | (mg/kg)          | (g/m <sup>2</sup> )          |
| S1 (gesamt)                                                  | 1,10        | 1,5                   | 1650,0                         |                  | 2,1                          |
| Schicht-Nr. 1 (S1.1)                                         | 1,10        | 1,5                   | 1650,0                         | 1,30             | 2,1                          |
| S2 (gesamt)                                                  | 1,10        | 1,5                   | 1650,0                         |                  | 0,7                          |
| Schicht-Nr. 1 (S2.1)                                         | 1,10        | 1,5                   | 1650,0                         | 0,40             | 0,7                          |
| S3 (gesamt)                                                  | 1,10        | 1,5                   | 1650,0                         |                  | 11,9                         |
| Schicht-Nr. 1 (S3.1)                                         | 1,10        | 1,5                   | 1650,0                         | 7,20             | 11,9                         |
| S4 (gesamt)                                                  | 1,10        | 1,5                   | 1650,0                         |                  | 0,5                          |
| Schicht-Nr. 1 (S4.1)                                         | 1,10        | 1,5                   | 1650,0                         | 0,30             | 0,5                          |
| gesamtflächenspezifische Schadstoffmasse (g/m <sup>2</sup> ) | 3,8         |                       |                                |                  |                              |
| Schadstoffmasse gesamt (g)                                   | 15.939,000  |                       |                                |                  |                              |

| Schadstofffreisetzung                    |          |                         |
|------------------------------------------|----------|-------------------------|
| zeitliche Entwicklung Quellkonzentration | konstant | exponentiell abklingend |
| Fallkonstellation                        | A        | B                       |
| mobilisierbarer Anteil (%)               | 100,0    | 100,0                   |
| initiale Quellkonzentration (µg/l)       | 14,000   | 14,000                  |
| Abklingkonstante berechnet (1/a)         |          | 7,194E-04               |

Abb. 67: Eingabedaten zur Beschreibung der Quelle im Arbeitsblatt „Quelle“ für den Schadstoff Benzol

Die relevanten Eingabeparameter zur Beschreibung der Quelle sind in Tab. 26 zusammengefasst. Der mittlere Schadstoffgehalt (mg/kg) ergibt sich aus der über die Sondierungen ermittelten Schadstoffmasse und der Masse des kontaminierten Bodenvolumens (6930 t).

| Schadstoff | Schadstoffmasse | mittl. Schadstoffgehalt | Trockenraumdichte     | Initiale Quellkonz. | Mob. Anteil |
|------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|-------------|
|            | (kg)            | (mg/kg)                 | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (µg/l)              | (%)         |
| Benzol     | 15,94           | 2,3                     | 1,5                   | 14                  | 100         |
| n-Decan    | 64449           | 12681                   | 1,5                   | 1200                | 100         |
| Naphthalin | 45,56           | 6,57                    | 1,5                   | 16                  | 100         |

Tab. 26: Eingabeparameter zur Beschreibung der Schadstoffquelle für das Fallbeispiel 3

### c) Transport

Im Arbeitsblatt „Transport“ erfolgt die schichtweise Eingabe der Parameter zur Berechnung der Bodenkennwerte (Feldkapazität und Luftkapazität) und der kd-Werte über das Eingabefenster „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ (Abb. 68).

Abb. 68: Eingabefenster „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ im Arbeitsblatt „Transport“ für den Schadstoff Benzol

Die Eingabeparameter (Trockenraumdichte, Grobbodenanteil und Humusgehalt) für den vorliegenden Fall sind aus Tab. 24 ersichtlich. Nach Eingabe der Parameter wird in den Feldern Feld- und Luftkapazität automatisch der nach Tab. 70/KA 5 berechnete und

rechts neben den Eingabefeldern dargestellte Richtwert eingetragen (Abb. 68). Der Anwender hat die Möglichkeit, davon abweichend den Wert durch einen eigenen Wert zu überschreiben.

In der rechten Hälfte des Eingabefensters erfolgen die Parametereingaben zur Berechnung des  $k_d$ -Wertes. Für die Berechnung des  $k_d$ -Wertes für organische Schadstoffe wird im Unterschied zu den anorganischen Stoffen (Eingabefelder ausgegraut) nur der organische Kohlenstoffgehalt Corg (Masse %) benötigt, da die Berechnung nach dem sogenannten „koc-Konzept“ (s. Kap. A2.4 Arbeitshilfe DU [1]) erfolgt. Der Anwender hat die Möglichkeit, entweder den berechneten Wert durch Anklicken der Schaltfläche „Übernehmen“ in das unten stehende Feld „ $k_d$  Auswahl“ (l/kg) zu übernehmen, oder im Feld „ $k_d$  Auswahl“ einen eigenen Wert einzugeben. Nach dem abschließenden Anklicken der Schaltfläche „Eingaben übernehmen“ werden die im Eingabefenster für die ausgewählte Schicht angezeigten Werte in das Arbeitsblatt „Transport“ übernommen. Die beschriebene Eingabeprozedur wird dann für die zweite Schicht wiederholt.

Die relevanten Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte und der  $k_d$ -Werte für die Schadstoffe Benzol, n-Decan und Naphthalin sind in Tab. 27 und Tab. 28 zusammengefasst.

| Schicht Nr. | von | bis | Bodenart | Trockenrohdichte      | Grobboden | Humusgehalt | Feldkapazität | Luftkapazität |
|-------------|-----|-----|----------|-----------------------|-----------|-------------|---------------|---------------|
|             | (m) | (m) |          | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (%)       | (%)         | (%)           | (%)           |
| 1           | 1,8 | 2,9 | Slu      | 1,6                   | 0         | 5           | 38            | 15            |
| 2           | 2,9 | 4,2 | fS ms    | 1,6                   | 0         | 0           | 12            | 23            |

Tab. 27: schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte Feldkapazität/Luftkapazität

| Schicht Nr. | von | bis | Bodenart | Corg | $k_d$ -Wert Benzol | $k_d$ -Wert n-Decan | $k_d$ -Wert Naphthalin |
|-------------|-----|-----|----------|------|--------------------|---------------------|------------------------|
|             | (m) | (m) |          | (%)  | (l/kg)             | (l/kg)              | (l/kg)                 |
| 1           | 1,8 | 2,9 | Slu      | 3,0  | 5                  | 51,7                | 55,1                   |
| 2           | 2,9 | 4,2 | fS ms    | 0,1  | 0,166              | 1,7                 | 1,84                   |

Tab. 28: schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der  $k_d$ -Werte für Benzol, n-Decan und Naphthalin

#### B4.3.3 Durchführung der Berechnung

Nach der Parametereingabe kann die Prognoseberechnung durch Anklicken der Schaltfläche  $\Sigma$  im ALTEX-1D-Menüband gestartet werden.

##### a) Bewertung der aktuellen Situation

Mit der Prognoserechnung soll die aktuelle Belastungssituation in der ungesättigten Zone und im Grundwasser 55 Jahre nach Beginn der Einlagerung des Bohrschlammes ermittelt und die Plausibilität durch Vergleich mit den Ergebnissen aus den Boden- und Grundwasseruntersuchungen überprüft werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Ausgangssituation zu Beginn der Bohrschlammereinlagerung wegen des großen Schadstoffvorrates und des Quelltyps A (konstante Quellkonzentration) im wesentli-

chen dem aktuellen Emissionszustand der Quelle (55 Jahre nach Emissionsbeginn) entspricht und die Ergebnisse aus den aktuellen Untersuchungen bezüglich Feststoffgehalten und Quellkonzentrationen insofern als Eingabeparameter für die Ausgangssituation herangezogen werden können.

Die Berechnungen werden für Benzol, n-Decan und Naphthalin durchgeführt. Entsprechend der Beschreibung der Quelle (s. Kap. 4.3.1b) wird der Quelltyp A (konstante Quellkonzentration) zugrundegelegt.

### Ergebnis Benzol

Mit dem gewählten Maximalwert für die Halbwertszeit (0,666 a) ergibt sich nach 55 Jahren eine geringfügige Überschreitung des Prüfwertes am OdB (Abb. 69).

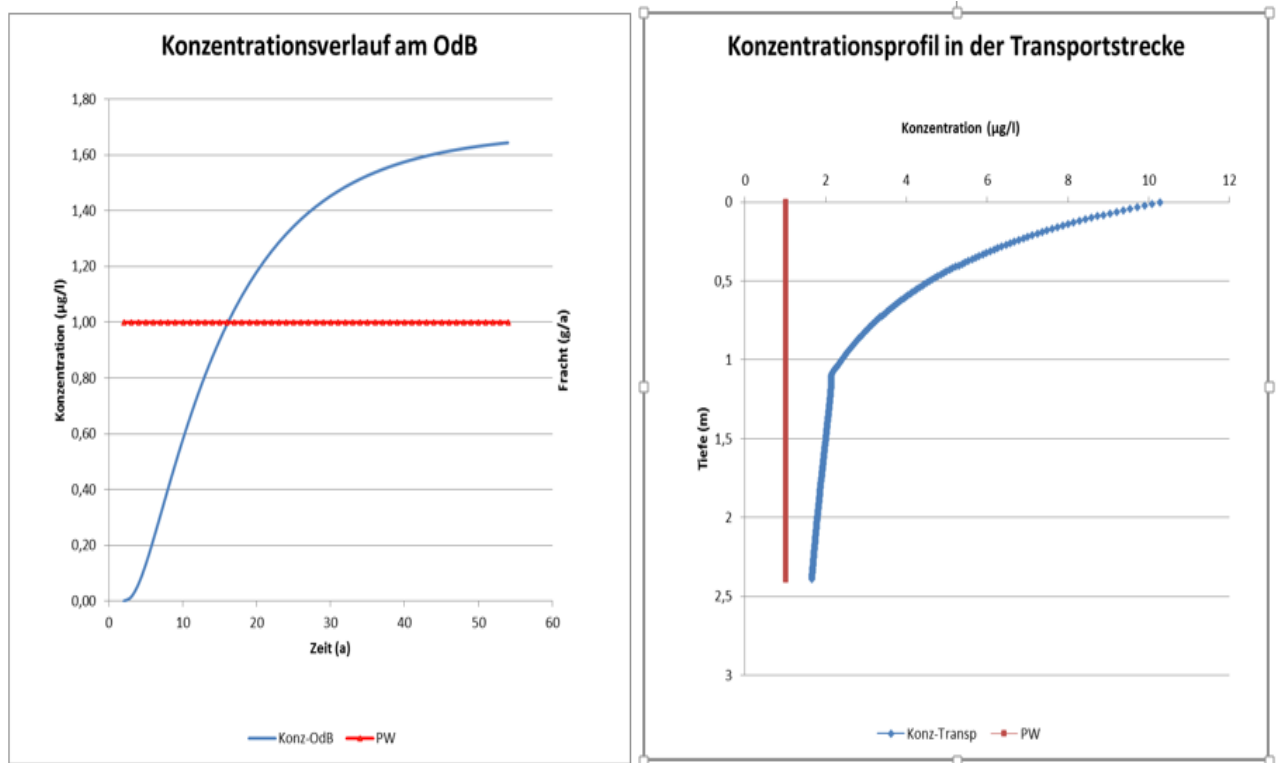


Abb. 69: Verlauf der Benzol-Konzentration am OdB und Profil der Benzol-Konzentration (Halbwertszeit: Maximalwert der Spannweite) für den aktuellen Zustand (55 a nach Emissionsbeginn)

Aufgrund der erheblichen Verdünnung bei der Einmischung führt die Überschreitung des PW am OdB allerdings nicht zu einer Überschreitung der GFS in der Einmischzone (Tab. 29) und einer daraus resultierenden nachteiligen Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit.

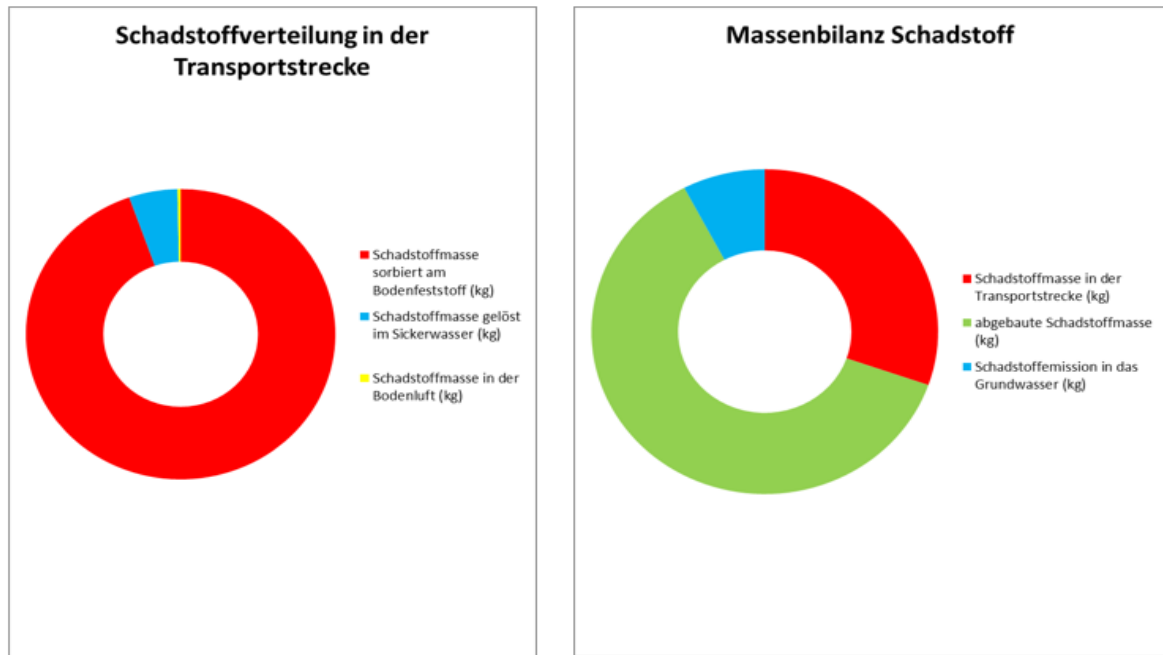


Abb. 70: Schadstoffverteilung in der Transportstrecke und Massenbilanz für Benzol für den aktuellen Zustand (55 a nach Emissionsbeginn)

Der überwiegende Teil der emittierten Schadstoffmasse wird in der Schicht 1 (humoser Schluff) sorptiv zurückgehalten oder abgebaut (Abb. 69 rechts und 70 links). Nur ein geringer Teil (knapp 8 %) der emittierten Masse gelangt ins Grundwasser (Abb. 70 rechts). Dies liegt vor allem an der Wirkung des Abbaues. Nimmt man an Stelle des Maximalwertes für die Halbwertszeit (0,666 a) einen Wert von 0,4 a an, ergibt sich bereits keine Überschreitung des Prüfwertes (Abb. 71 links) und auch keine Emission von Benzol in das Grundwasser mehr (Abb. 71 rechts und Tab. 29). Der Wert von 0,4 a für die Halbwertszeit liegt noch deutlich oberhalb des Minimalwertes (0,175 a) der Halbwertszeit-Spannweite und kann insofern als realistisch angesehen werden.

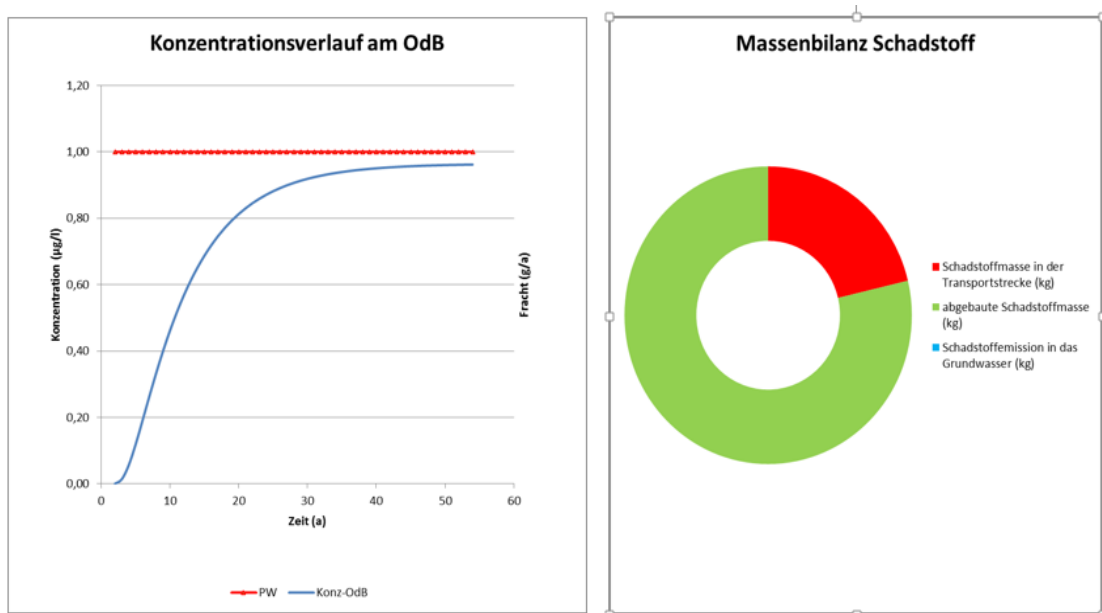


Abb. 71: Konzentrationsverlauf am OdB und Massenbilanz für Benzol bei Annahme einer Halbwertszeit von 0,4 a (aktueller Zustand 55 a nach Emissionsbeginn)

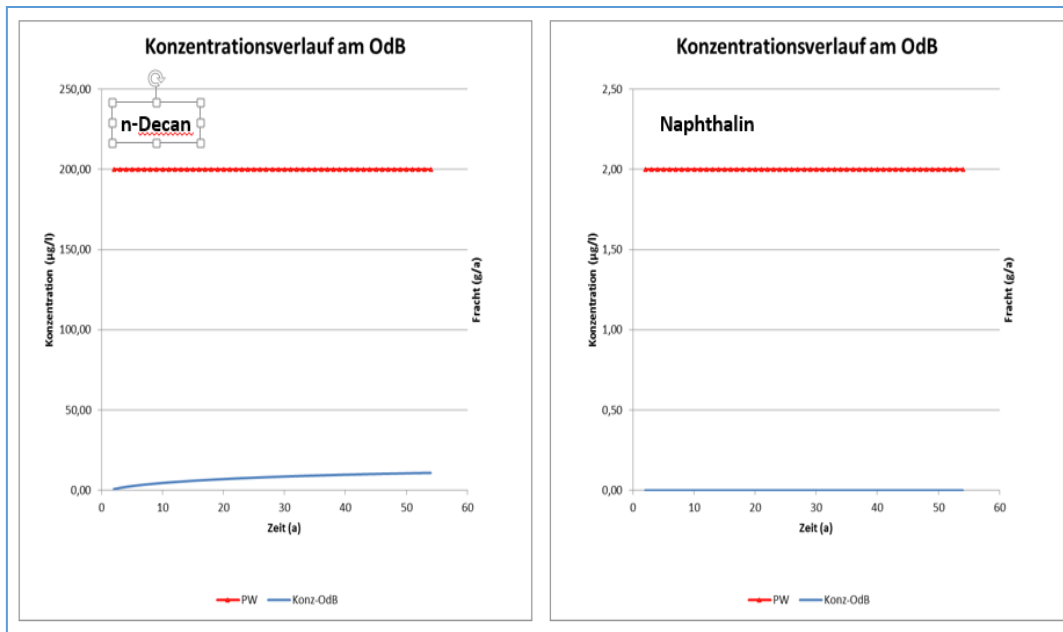


Abb. 72: Konzentrationsverlauf am OdB für n-Decan und Naphthalin (Halbwertszeit: Maximalwert der Spannweite) für den aktuellen Zustand (55 a nach Emissionsbeginn)

Für n-Decan und Naphthalin ergibt sich selbst bei Annahme der Maximalwerte für die Halbwertszeit (Tab. 25) nach 55 a keine Überschreitung des PW am OdB (Abb. 72).

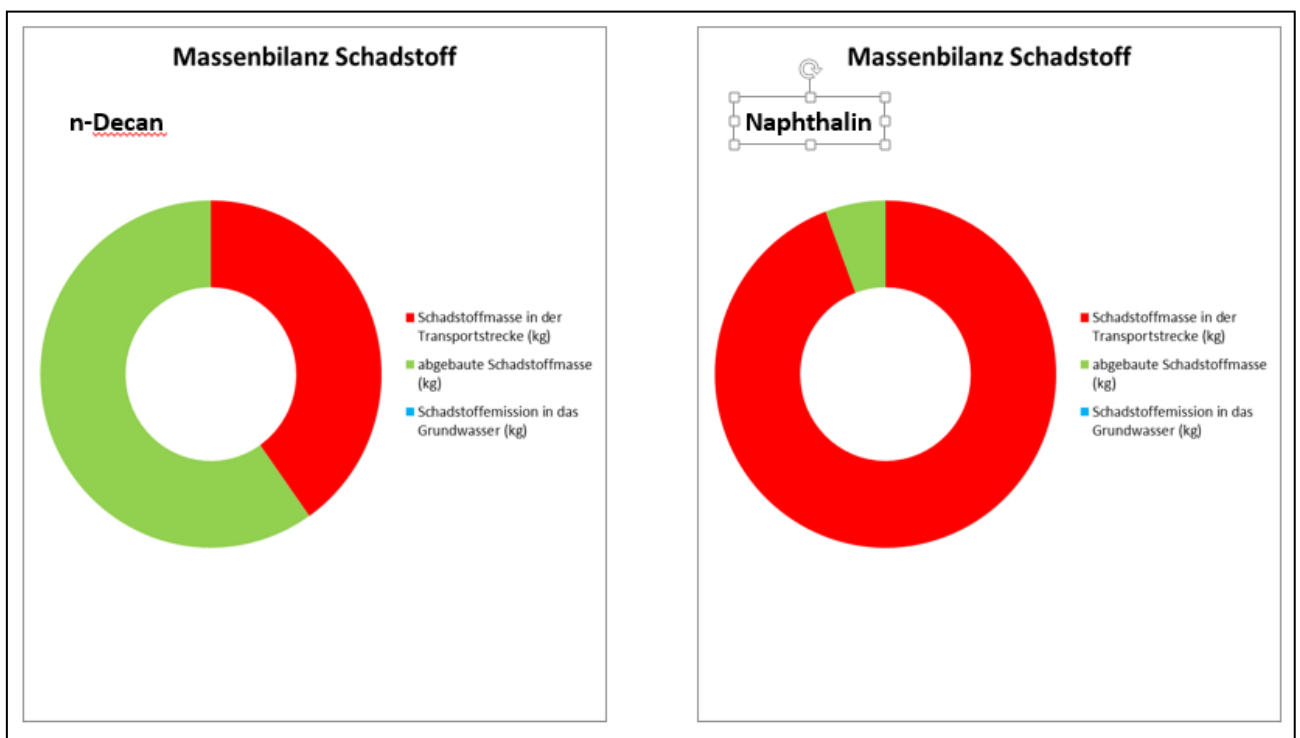


Abb. 73: Massenbilanzen für n-Decan und Naphthalin (Halbwertszeit: Maximalwert der Spannweite) für den aktuellen Zustand (55 a nach Emissionsbeginn)

Dies liegt im Falle von n-Decan an der guten Abbaubarkeit (geringe Halbwertszeit) in Kombination mit dem durch die Berücksichtigung der Flüchtigkeit (hohe Henry-Konstante, Tab. 25) deutlich erhöhten Retardationsfaktor und im Falle von Naphthalin an

der hohen sorptiven Rückhaltung in Kombination mit der Wirkung des Abbaues, wie aus den Massenbilanzen deutlich wird (Abb. 73).

Die wesentlichen Kenngrößen der Prognosen für den aktuellen Zeitpunkt (55 Jahre nach Beginn der Einlagerung von Bohrschlamm) sind in Tab. 29 zusammengefasst.

|                               |        | Benzol    |         | n-Decan   | Naphthalin |
|-------------------------------|--------|-----------|---------|-----------|------------|
|                               |        | HWZ       | HWZ     | HWZ       | HWZ        |
|                               |        | 0,666 (a) | 0,4 (a) | 0,235 (a) | 1,244 (a)  |
| Max. Konz. am OdB             | (µg/l) | 1,64      | 0,99    | 8,4       | 0,0        |
| Max. Konz. Einmischzone       | (µg/l) | 0,18      | 0,11    | 0,92      | 0,0        |
| Emission aus der Quelle       | (kg)   | 0,631     | 0,631   | 54,054    | 0,721      |
| sorbierte Masse Transportstr. | (kg)   | 0,181     | 0,129   | 15,4      | 0,676      |
| Abgebaute Masse               | (kg)   | 0,399     | 0,501   | 38,7      | 0,044      |
| Emission in das Grundwasser   | (kg)   | 0,045     | 0,0     | 0,0       | 0,0        |

Tab. 29: Kenngrößen für die Sickerwasserprognose (aktueller Zustand 55 a nach Emissionsbeginn)

Das Ergebnis der Sickerwasserprognosen ist in Übereinstimmung mit den Befunden der DP-Sondierungen, bei denen im Grundwasser unmittelbar abstromseitig der BSG keine Hinweise auf Schadstoffausträge aus der BSG festgestellt werden konnten.

#### **b) Prognose im Hinblick auf eine zukünftige Überschreitung des Prüfwertes**

Um zu bewerten, ob von der Bohrschlammgrube ein Gefahrenverdacht für das Grundwasser ausgeht, soll mit Bezug auf § 4 (3) BBodSchV durch eine Sickerwasserprognose geprüft werden, ob zukünftig am OdB eine Überschreitung des Prüfwertes zu erwarten ist, und damit eine Detailuntersuchung erforderlich ist. Die Prognose wird für den gesamten beurteilungsrelevanten Zeitraum vom Beginn der Emission (Beginn der Bohrschlammeinlagerung vor 55 Jahren) über den Zeitpunkt der erstmaligen Prüfwertüberschreitung bis zur Prüfwertunterschreitung nach Erschöpfung des mobilisierbaren Schadstoffvorrats durchgeführt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Ausgangssituation zu Beginn der Bohrschlammeinlagerung wegen des großen Schadstoffvorrates und des Quelltyps A (konstante Quellkonzentration) im wesentlichen dem aktuellen Emissionszustand der Quelle (55 Jahre nach Emissionsbeginn) entspricht und die Ergebnisse aus den aktuellen Untersuchungen bezüglich Feststoffgehalten und Quellkonzentrationen insofern als Eingabeparameter für die Ausgangssituation herangezogen werden können. Dazu wird nach dem Anklicken der Schaltfläche  $\Sigma$  im ALTEX-1D-Menüband im dann erscheinenden Auswahlfenster als Berechnungszeitpunkt „PW-Unterschreitung“ ausgewählt und für die relevanten Schadstoffe der Quelltyp A berechnet.

Für Benzol und Naphthalin ergibt sich bei Annahme der maximalen Halbwertszeiten eine geringfügige Überschreitung des Prüfwertes (Abb. 74) allerdings ohne Überschreitung der GFS in der Einmischzone (Tab. 30).

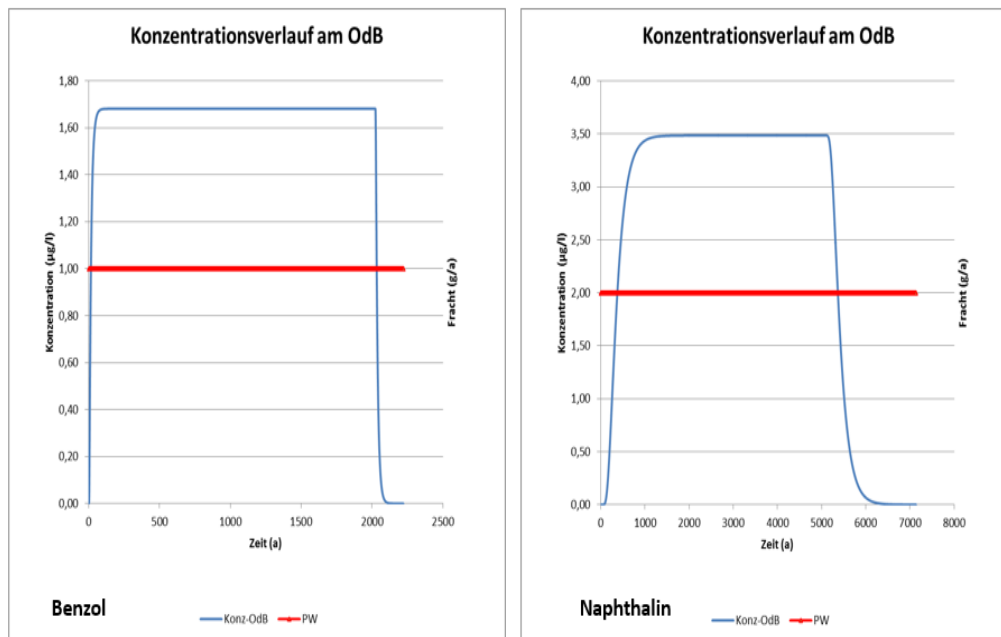


Abb. 74: Konzentrationsverlauf am OdB (Gesamtzeitraum bis zur PW-Überschreitung) für Benzol und Naphthalin bei Annahme der maximalen Halbwertszeit

Für n-Decan ergibt sich selbst bei Annahme der maximalen Halbwertszeit keine Überschreitung des PW am OdB (Tab. 30).

Nimmt man statt der Maximalwerte für die Halbwertszeiten moderat reduzierte Werte (Benzol: 0,4 a, Naphthalin: 0,8 a) an, ergibt sich bereits keine Überschreitung des PW am OdB mehr (Abb. 75). Diese Halbwertszeiten liegen noch deutlich oberhalb des Minimalwertes der von ALTEX-1D vorgeschlagenen Spannweite und können insofern als realistisch betrachtet werden.

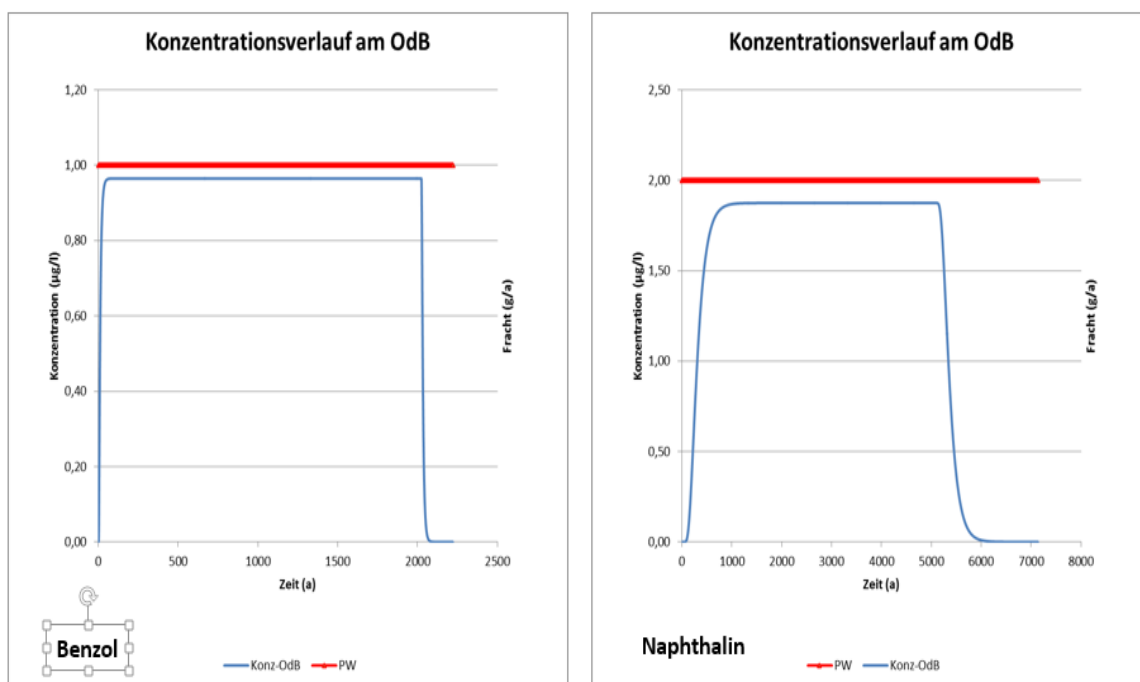


Abb. 75: Konzentrationsverlauf am OdB für Benzol und Naphthalin bei Annahme einer reduzierten Halbwertszeit (Benzol: 0,4 a, Naphthalin: 0,8 a)

Die wesentlichen Kenngrößen der Prognosen sind in Tab. 30 zusammengefasst.

| Kenngröße               | Einheit | Benzol           |                | n-Decan          | Naphthalin       |                |
|-------------------------|---------|------------------|----------------|------------------|------------------|----------------|
|                         |         | HWZ (a)<br>0,666 | HWZ (a)<br>0,4 | HWZ (a)<br>0,235 | HWZ (a)<br>1,244 | HWZ (a)<br>0,8 |
| Emissionsdauer          | (a)     | 1390             | 1390           | 65577            | 3477             | 3477           |
| Schadstofftransportzeit | (a)     | 50,2             | 50,2           | 674              | 520              | 520            |
| Zeitpunkt PW-Überschr.  | (Jahr)  | 14               | (-)            | (-)              | 359              | (-)            |
| Dauer PW-Überschr.      | (Jahr)  | 1385             | (-)            | (-)              | 3415             | (-)            |
| Max. Konz. am OdB       | (µg/l)  | 1,67             | 0,97           | 11,23            | 3,51             | 1,926          |
| Emission aus der Quelle | (kg)    | 15,94            | 15,94          | 64449            | 45,565           | 45,56          |
| abgebaute Masse         | (kg)    | 13,96            | 15,94          | 64449            | 35,25            | 45,565         |
| Emission in das GW      | (kg)    | 1,89             | 0,0            | 0,0              | 9,47             | 0,0            |
| max. Konz. Einmischzone | (µg/l)  | 0,184            | 0,11           | 1,236            | 0,386            | 0,212          |

Tab. 30: Kenngrößen für die Sickerwasserprognose bei Betrachtung des Gesamtzeitraumes

Auf Grundlage dieser Prognose-Ergebnisse ist eine zukünftige Überschreitung von Prüfwerten am OdB trotz der erheblichen MKW-Gesamtgehalte und der deutlichen Freisetzung von Schadstoffen im Eluat unwahrscheinlich. Der Gefahrenverdacht für das Grundwasser kann damit als ausgeräumt angesehen werden und auf weitere Untersuchungen im Rahmen einer Detailuntersuchung verzichtet werden.

#### B4.4 Fallbeispiel 4 (Organik/Quelltyp B)

##### B4.4.1 Beschreibung des Falles (Rangierbahnhof)

###### a) Standort

Es handelt sich um das brachliegende Gelände eines ehemaligen Rangierbahnhofes, auf dem zur Bekämpfung von Unkraut bis 1996 das Breitbandherbizid Diuron eingesetzt wurde (Abb. 76). Aufgrund von Diuronbelastungen des Grundwassers aus Gartenbrunnen einer abstromig gelegenen Kleingartenanlage wurde eine Untersuchung der Fläche durchgeführt. Dabei wurden flächenhafte Belastungen des Oberbodens (0 – 30 cm) mit Diuron festgestellt.

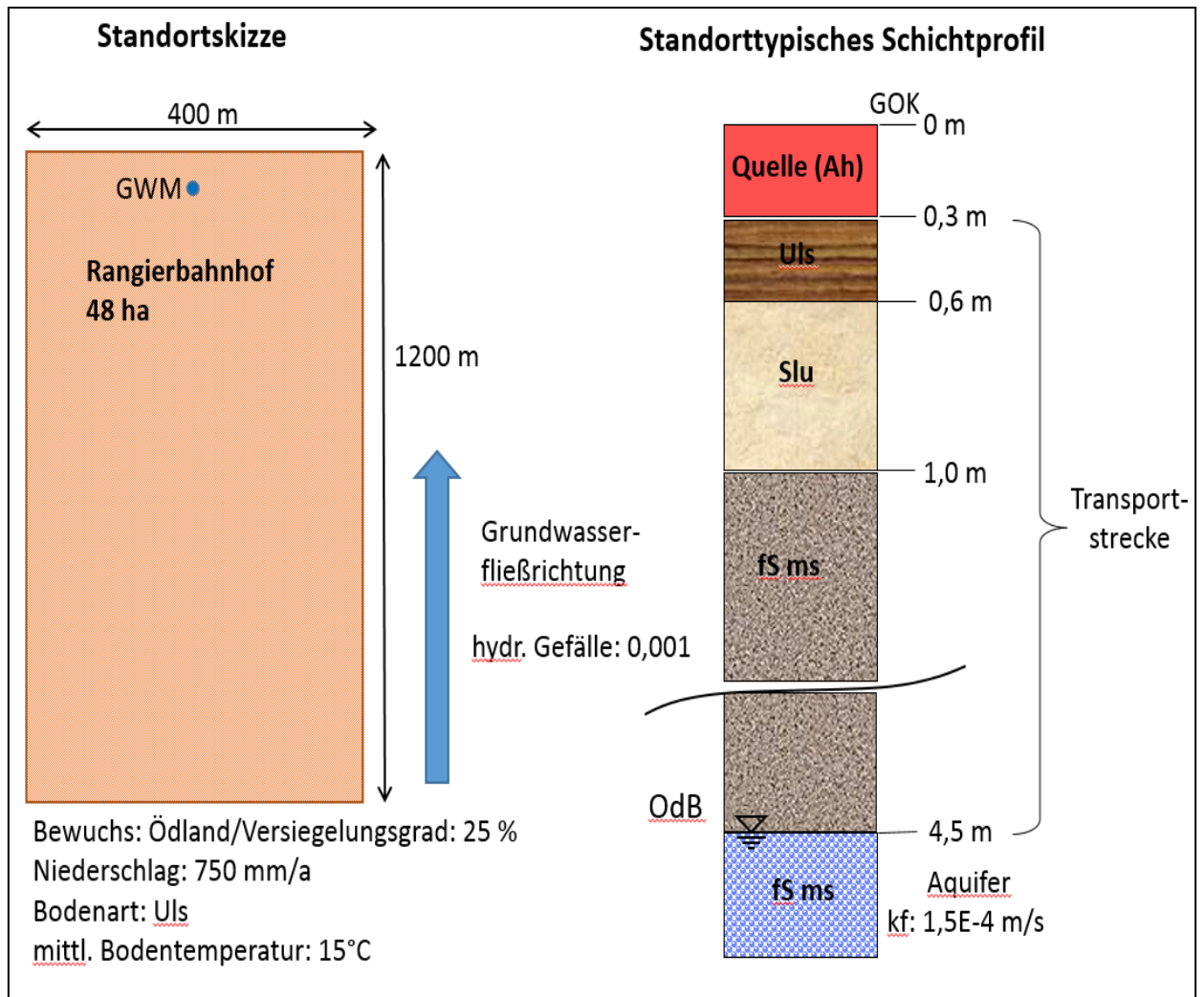


Abb. 76: Standortskizze und standorttypisches Schichtprofil für Fallbsp. 4 (Rangierbahnhof)

Die rasterförmig durchgeführten Untersuchungen ergaben einen mittleren Diuron-Gehalt des Oberbodens von 0,3 mg/kg. Eine Rammkernsondierung (bis 7 m u. GOK) am abstromseitigen Ende der Fläche wurde als Grundwassermessstelle (Filterstrecke 5 – 7 m u. GOK) ausgebaut. Das Schichtenverzeichnis der Rammkernsondierung (RKS) wurde zur Erstellung des typischen Schichtprofils (Abb. 76) herangezogen.

Der Grundwasserstand in der Messstelle wurde bei 4,5 m u. GOK angetroffen. Das hydraulische Gefälle (0,001) wurde aus den Gartenbrunnen im Abstrom ermittelt. Der kf-Wert ( $1,5 \cdot 10^{-4}$  m/s) wurde aus Korngrößenanalysen ermittelt. Die aus der Grundwassermessstelle entnommenen Grundwasserproben ergaben Diuron-Konzentrationen im Spurenbereich (0,02 – 0,03 µg/l).

#### b) Quelle

Die Ergebnisse der durchgeführten Feststoffuntersuchungen zeigen, dass auch mehr als 20 Jahre nach Beendigung des Herbizid-Einsatzes noch relevante Restbelastungen des Oberbodens mit Diuron vorliegen. Die durchgeführten Elutionstests (Schüttteleluat mit W/F-Verhältnis 2:1 und 10:1) belegen eine Freisetzung von Diuron, wobei die Konzentrationen mit zunehmendem W/F-Verhältnis deutlich abnehmen (Tab. 31). Dies weist

auf eine sorptive Bindung an das organische Bodenmaterial hin und lässt eine exponentiell abnehmende Quellskonzentration erwarten (Quellentyp B)

|                                |                |      |
|--------------------------------|----------------|------|
| mittl. Feststoffgehalt (mg/kg) | 0,3            |      |
|                                | W/F-Verhältnis |      |
| Schüttteleluat                 | 2:1            | 10:1 |
| Diuron-Konz. (µg/l)            | 23             | 7,5  |

Tab. 31: Ergebnisse der Feststoff- und Eluatuntersuchungen des mit Diuron belasteten Oberbodens

### c) Transportstrecke

Die relevanten schichtspezifischen Bodenparameter sind aus Tab. 32 ersichtlich.

| Schicht Nr. | von | bis | Bodenart  | Trockenrohdichte      | Grobboden | Humusgehalt | Corg |
|-------------|-----|-----|-----------|-----------------------|-----------|-------------|------|
|             | (m) | (m) |           | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (%)       | (%)         | (%)  |
| 0/Quelle    | 0   | 0,3 | Oberboden | 1,2                   | 3         | 5           | 3    |
| 1           | 0,3 | 0,6 | Uls       | 1,5                   | 1         | 1           | 0,5  |
| 2           | 0,6 | 1,0 | Slu       | 1,6                   | 0         | 0           | 0,2  |
| 3           | 1   | 4,5 | fS ms     | 1,6                   | 0         | 0           | 0,1  |

Tab. 32: schichtspezifische Bodenparameter für das Fallbeispiel 4

### B4.4.2 Parametereingabe

Die Parametereingabe erfolgt analog zu den Fallbeispielen 1 - 3 entsprechend den aus der Fallbeschreibung verfügbaren Informationen. Insofern wird nachfolgend nur noch auf Besonderheiten beim Fallbeispiel 4 eingegangen.

#### a) Standort

Die für die Eingabe im Arbeitsblatt „Standort“ (Abb. 77) erforderlichen Parameter können der Standortskizze (Abb. 76) entnommen werden.

| Standortbeschreibung                    |                   |                     | Konzeptionelle Standortskeizze |                |
|-----------------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|----------------|
| <b>Kontaminationsgeometrie</b>          | <b>Einheit</b>    |                     | GOK                            | OK             |
| Kontaminationsfläche                    | (m <sup>2</sup> ) | 480000,0            |                                | OK             |
| Quelle OK (m u. GOK)                    | (m)               | 0,00                |                                | UK             |
| Quelle UK (m u. GOK)                    | (m)               | 0,30                |                                |                |
| kontaminierte Kubatur                   | (m <sup>3</sup> ) | 144000,0            |                                |                |
| <b>Wasserhaushalt</b>                   |                   |                     |                                |                |
| Methode zur Sickerwasserrate-Berechnung | Beims/Gutt        |                     |                                |                |
| Abschätzung nach Beims und Gutt         |                   |                     |                                |                |
| Niederschlag                            | (mm/a)            | 750,0               |                                |                |
| Bodentyp                                | (-)               | miger Schluff (Uls) |                                |                |
| Vegetationsart                          | (-)               | Ödland (Ö)          |                                |                |
| Versiegelungsgrad Flächenanteil         | (%)               | 25                  |                                |                |
| Grundwasserneubildung n. Beims/Gutt     | (mm/a)            | 238,9               |                                |                |
| <b>Transportstrecke</b>                 |                   |                     |                                |                |
| Ort der Beurteilung OdB (m. u. GOK)     | (m)               | 4,50                |                                |                |
| mittl. Temp. Transportstrecke           | (°C)              | 15                  |                                |                |
| Disp-SF (gesamte Transportstrecke)      | (-)               | 0,100               |                                |                |
| Vorbelastung Transportstrecke           | (µg/l)            | 0,000               |                                |                |
| <b>Typisches Schichtprofil</b>          |                   |                     |                                |                |
| Schicht-Anzahl                          | 3                 |                     |                                |                |
|                                         | von               | bis                 | Bodenart                       | Festgestein    |
|                                         | (m u. GOK)        | (m u. GOK)          | Tab. 30/31 KA 5                | GeoBerichte 19 |
| Schichtaufbau                           |                   |                     |                                |                |
| Schicht-Nr. 1                           | 0,30              | 0,60                | Uls                            |                |
| Schicht-Nr. 2                           | 0,60              | 1,00                | Slu                            |                |
| Schicht-Nr. 3                           | 1,00              | 4,50                | fS, fSms, fSgs                 |                |
| <b>Aquiferparameter</b>                 |                   |                     |                                |                |
| Länge der Kont.Fläche in                |                   |                     |                                |                |
| Grundwasserfließrichtung                | (m)               | 1200,0              |                                |                |
| Mächtigkeit der Einmischzone            | (m)               | 1,0                 |                                |                |
| Aquiferdurchlässigkeit                  | (m/s)             | 1,500E-04           |                                |                |
| hydr. Gefälle                           | (m/m)             | 1,000E-03           |                                |                |
| Schadstoff-Anstromkonzentration         | (µg/l)            | 0,000               |                                |                |

Abb. 77: Eingabedaten zur Standortbeschreibung im Arbeitsblatt „Standort“ für das Fallbeispiel 4

#### b) Quelle

Die für die Eingabe im Arbeitsblatt „Quelle“ erforderlichen Parameter sind aus den Tabellen 31 - 32 ersichtlich. Nach dem Öffnen des Eingabefensters „Schadstoff-Auswahl“ erfolgt die Auswahl von Diuron über das Feld „Suche“ (Abb. 78)

Abb. 78: Auswahl des Schadstoffes Diuron im Eingabefenster „Schadstoff-Auswahl“

Für Diuron existiert kein PW der BBodSchV sondern nur eine GFS (0,1 µg/l). Als Halbwertszeit wird der Maximalwert (1,0 a) gewählt, um ein Ergebnis auf der sicheren Seite zu erhalten. Die für den vorliegenden Fall relevanten Stoffdaten für Diuron sind in Tab. 33 zusammengefasst.

| Schadstoff | PW     | GFS    | EW     | Diffusionskoeff. |        | Henry-Konst. | Spannweite Halbwertszeit |       |         |
|------------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------------|--------------------------|-------|---------|
|            |        |        |        | Wasser           | Luft   |              | Max                      | Min   | gewählt |
|            | (µg/l) | (µg/l) | (µg/l) | (m²/a)           | (m²/a) | (-)          | (a)                      | (a)   | (a)     |
| Diuron     | (-)    | 0,1    | (-)    | 1,817E-2         | 163,9  | 2,06E-8      | 1,019                    | 0,243 | 1,0     |

Tab. 33: Stoffdaten für Diuron

Die auf dem Standort vorhandene Schadstoffmasse wird im vorliegenden Fall über die kontaminierte Kubatur und die Angaben zum mittleren Schadstoffgehalt im Oberboden (0,3 mg/kg) und zur Trockenraumdichte (1,2 kg/dm³) in Schicht 0/Quelle in Tab. 32 ermittelt. Die für die Gesamtfläche damit berechnete Schadstoffmasse für Diuron beträgt 51,8 kg (Abb. 79)

Das Ergebnis der Elutionstests bei den W/F-Verhältnissen 2:1 und 10:1 (Tab. 31) weist darauf hin, dass das Freisetzungsverhalten dem Quelltyp B (exponentiell abfallende Quellkonzentration) entspricht. Es wird davon ausgegangen, dass Diuron am organi-

schen Kohlenstoff des humosen Oberbodens sorbiert ist und die sorptive Bindung langfristig vollständig reversibel ist (mob. Anteil 100 %).

### Beschreibung der Schadstoffquelle

| Schadstoffcharakterisierung | Vergleichswert am OdB |                               |            |                        |                          |                        |                     |                                  |                                  |                           |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------|------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
|                             | Schadstoff            | Prüfwert BBodSchV (PW) (µg/l) | GFS (µg/l) | Ersatzwert (EW) (µg/l) | Diff-koeff Wasser (m²/a) | Diff-koeff Luft (m²/a) | Henry-Konstante (-) | Spannweite Halbwertszeit Min (a) | Spannweite Halbwertszeit Max (a) | Halbwertszeit gewählt (a) |
| Diuron                      |                       |                               | 0,0500     |                        | 1,785E-02                | 1,589E+02              | 2,060E-08           | 0,243                            | 1,019                            | 1,000                     |

| Schadstoffmasse                       | Ermittlung über Kubatur (Standort) |  |
|---------------------------------------|------------------------------------|--|
| durchschn. Trockenraumdichte (kg/dm³) | 1,2                                |  |
| durchschn. Schadstoffgehalt (mg/kg)   | 0,30                               |  |
| Schadstoffmasse gesamt (kg)           | 51,8                               |  |

| Schadstofffreisetzung                    |          |                         |
|------------------------------------------|----------|-------------------------|
| zeitliche Entwicklung Quellkonzentration | konstant | exponentiell abklingend |
| Fallkonstellation                        | A        | B                       |
| mobilisierbarer Anteil (%)               | 100,0    | 100,0                   |
| initiale Quellkonzentration (µg/l)       | 23,000   | 23,000                  |
| Abklingkonstante berechnet (1/a)         |          | 5,088E-02               |

Abb. 79: Eingabedaten zur Beschreibung der Quelle im Arbeitsblatt „Quelle“ für den Schadstoff Diuron

Als initiale Quellkonzentration wird die Konzentration im Schütteleluat bei einem kumulativen W/F-Verhältnis von 2:1 (Tab. 31) verwendet. Die relevanten Eingabeparameter zur Beschreibung der Quelle sind in Tab. 34 zusammengefasst.

| Schadstoff | Schadstoffmasse | mittl. Schadstoffgehalt | Trockenraumdichte | Initiale Quellkonz. | Mob. Anteil | Abklingkonst. |
|------------|-----------------|-------------------------|-------------------|---------------------|-------------|---------------|
|            | (kg)            | (mg/kg)                 | (kg/dm³)          | (µg/l)              | (%)         | (1/a)         |
| Diuron     | 51,8            | 0,3                     | 1,2               | 35                  | 100         | 5,088E-2      |

Tab. 34: Eingabeparameter zur Beschreibung der Schadstoffquelle

### c) Transport

Die im linken Teil des Eingabefensters „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ (Abb. 80) benötigten Eingabeparameter Trockenraumdichte, Grobbodenanteil und Humusgehalt zur Berechnung der Feld- und Luftkapazität sind aus Tab. 32 ersichtlich.

In der rechten Hälfte des Eingabefensters erfolgt die Eingabe des organischen Kohlenstoffgehaltes Corg zur Berechnung des kd-Wertes und die Übernahme des berechneten kd-Wertes oder die Eingabe eines eigenen Wertes in das Feld „kd Auswahl“.

Schichtspezifische Boden- und Transportparameter

Gewählter Schadstoff: Diuron

Schichtauswahl

| Schicht | Von | Bis | Bodenart       | Festgestein |
|---------|-----|-----|----------------|-------------|
| Nr. 1   | 0,3 | 0,6 | Uls            |             |
| Nr. 2   | 0,6 | 1   | Slu            |             |
| Nr. 3   | 1   | 4,5 | fS, fSms, fSgs |             |

Feld-/Luftkapazität

Trockenrohdichte (kg/dm<sup>3</sup>)

Grobbodenanteil (Vol %)

Humusgehalt (Gehalt %)

Feldkapazität (Vol %)  Richtwert: 38,65

Luftkapazität (Vol %)  Richtwert: 12

kd-Werte

pH

Tongehalt (Masse %)

Corg (Masse %)

Referenz-Konzentration Linearisierung (µg/l)

kd BGR (l/kg)  Übernehmen

kd vdBR (l/kg)  Übernehmen

kd\_Org (l/kg)  Übernehmen

kd Auswahl (l/kg)

Abbrechen  Eingaben übernehmen

Abb. 80: Eingabefenster „Schichtspezifische Boden- und Transportparameter“ im Arbeitsblatt „Transport“ für den Schadstoff Diuron

Die relevanten Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte und der kd-Werte für den Schadstoff Diuron sind in Tab. 35 und Tab. 36 zusammengefasst.

| Schicht Nr. | von | bis | Bodenart | Trockenrohdichte      | Grobboden | Humusgehalt | Feldkapazität | Luftkapazität |
|-------------|-----|-----|----------|-----------------------|-----------|-------------|---------------|---------------|
|             | (m) | (m) |          | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (%)       | (%)         | (%)           | (%)           |
| 1           | 0,3 | 0,6 | Uls      | 1,5                   | 1         | 1           | 38,7          | 12            |
| 2           | 0,6 | 1,0 | Slu      | 1,6                   | 0         | 0,5         | 30            | 7             |
| 3           | 1,0 | 4,5 | fS ms    | 1,6                   | 0         | 0           | 12            | 23            |

Tab. 35: schichtspezifische Eingabeparameter zur Ermittlung der Bodenkennwerte Feldkapazität/Luftkapazität

| Schicht Nr. | von | bis | Bodenart | Corg | kd - Wert |
|-------------|-----|-----|----------|------|-----------|
|             | (m) | (m) |          | (%)  | (l/kg)    |
| 1           | 0,3 | 0,6 | Uls      | 0,5  | 0,7       |
| 2           | 0,6 | 1,0 | Slu      | 0,2  | 0,27      |
| 3           | 1,0 | 4,5 | fS ms    | 0,1  | 0,14      |

Tab. 36: schichtspezifische Eingabeparameter zur Berechnung der kd-Werte für Diuron

#### B4.4.3 Durchführung der Berechnung

Mit der Prognoseberechnung soll geklärt werden, ob von den Restbelastungen des Oberbodens mit Diuron eine Gefahr für das Grundwasser ausgeht und die im Grundwasserabstrom (Grundwassermessstelle und Gartenbrunnen) festgestellten Diuronbefunde in ursächlichem Zusammenhang mit den Diuronbelastungen des Oberbodens auf der Fläche des ehemaligen Rangierbahnhofes stehen können.

Dazu wird nach dem Anklicken der Schaltfläche  $\Sigma$  im erscheinenden Eingabefenster der Zeitpunkt „PW-Unterschreitung“ ausgewählt. Da für Diuron kein PW in der BBodSchV existiert, wird als Vergleichswert für die Gefahrenbeurteilung die GFS (0,1 µg/l) herangezogen. Die Prognose umfasst damit den gesamten Zeitraum von der aktuellen initialen Quellkonzentration bis zur Unterschreitung des Vergleichswertes am OdB. Entsprechend der Beschreibung der Quelle (s. Kap. 4.4.1b) wird für die Berechnung der Quelltyp B (exponentiell abfallende Quellkonzentration) zugrundegelegt.

Aus dem Konzentrationsverlauf am OdB (Abb. 81 links) wird deutlich, dass bei Annahme der maximalen Halbwertszeit für den Abbau (1,0 a) der Vergleichswert (GFS) bereits nach kurzer Zeit (2 a) überschritten wird, und die Überschreitung über mehrere Jahrzehnte (76 a) anhält.

Aus der Massenbilanz (Abb 81 rechts) ist ersichtlich, dass bei Annahme des Maximalwertes für die Halbwertszeit (1,0 a) trotz des erheblichen Abbaues (41,8 kg) in der Transportstrecke (Tab. 37) noch ein beträchtlicher Teil des aus den Restbelastungen freigesetzten Diurons in das Grundwasser (8,5 kg) gelangt und zu einer deutlichen Überschreitung der GFS im Grundwasser (max. Konzentration in der Einmischzone: 2,8 µg/l) führt (Tab. 37).

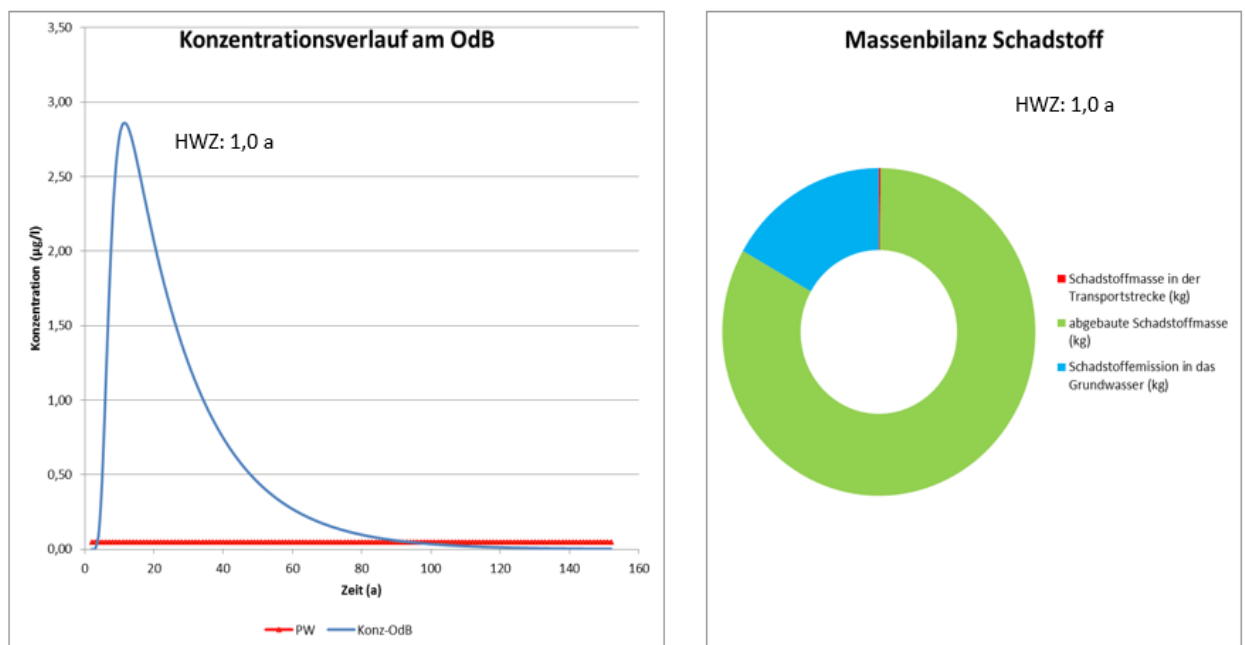


Abb. 81: Ergebnis der Sickerwasserprognose für den Schadstoff Diuron

Die wesentlichen Kenngrößen der Prognosen sind in Tab. 37 zusammengefasst.

| <b>Kenngroße</b>            |         | <b>Diuron</b>  |
|-----------------------------|---------|----------------|
|                             | Einheit | HWZ (a)<br>1,0 |
| Emissionsdauer              | (a)     | 107            |
| Schadstofftransportzeit     | (a)     | 8,0            |
| Zeitpunkt PW-Überschr.      | (Jahr)  | 2              |
| Dauer PW-Überschr.          | (Jahr)  | 76             |
| Max. Konz. am OdB           | (µg/l)  | 2,85           |
| Max. Konz. Einmischzone     | (µg/l)  | 2,81           |
| Emission aus der Quelle     | (kg)    | 50,37          |
| Abgebaute Masse             | (kg)    | 41,8           |
| Emission in das Grundwasser | (kg)    | 8,5            |

Tab. 37: Kenngroßen der Sickerwasserprognose für Diuron

Das Ergebnis der Sickerwasserprognose stützt insofern die Vermutung, dass die im Grundwasserabstrom (Grundwassermessstelle auf der Fläche und Gartenbrunnen außerhalb der Fläche) festgestellten Diuron-Belastungen in ursächlichem Zusammenhang mit der Diuronbelastung des Oberbodens auf der Fläche des ehemaligen Rangierbahnhofes stehen.



## B5 Anhang

### B5.1 Fachliche Grundlagen

#### B5.1.1 Allgemein

Das Excel-gestützte Berechnungsinstrument ALTEX-1D wurde zur Berechnung der zeitlichen Entwicklung von Stoffkonzentrationen im Sickerwasser am Ort der Beurteilung (OdB) entwickelt. Dies ist nach der BBodSchV der Übergangsbereich von der ungesättigten Bodenzone (Transportstrecke) in die gesättigte Bodenzone (Grundwasser). Die konzeptionelle Modellvorstellung, die der Berechnung zugrunde liegt, ist in Abb. 1 gezeigt und in der Arbeitshilfe DU beschrieben [1]

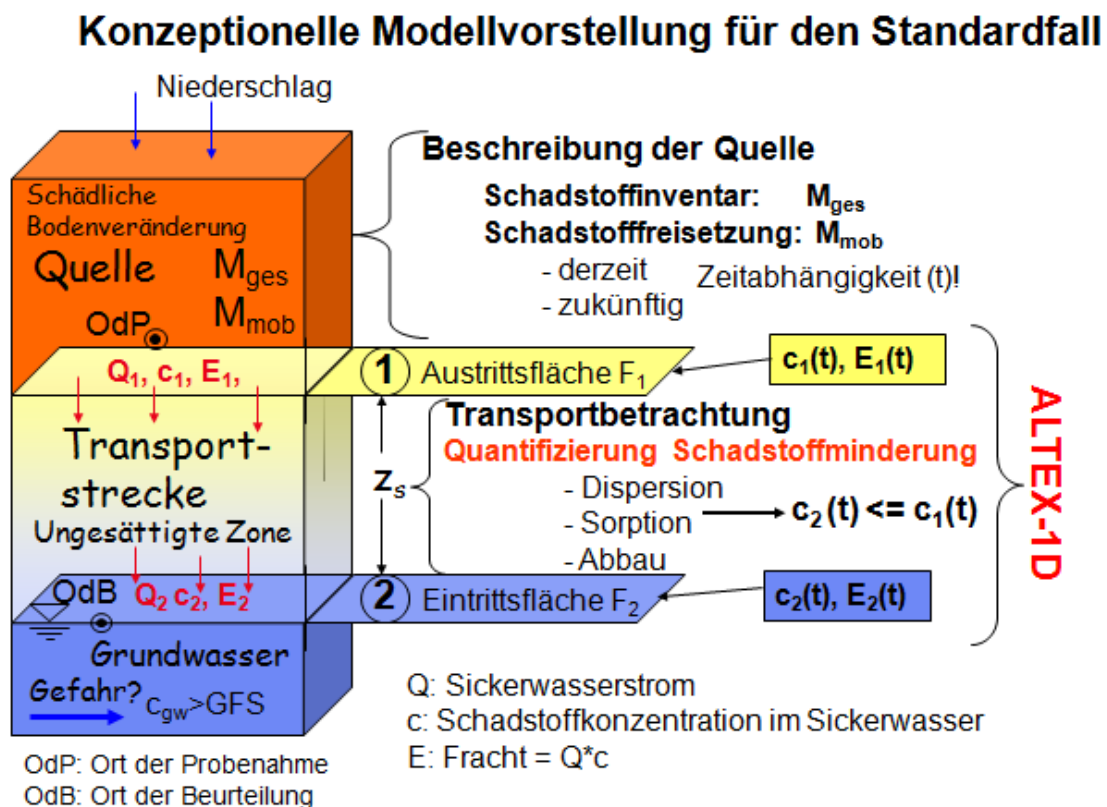


Abb. 1: Konzeptionelle Modellvorstellung für die Sickerwasserprognose mit ALTEX-1D

Diese geht von der Annahme aus, dass ein mit Schadstoffen kontaminierter Bodenkörper (Quelle) vom infiltrierenden Niederschlagswasser durchsickert wird. Bei der Durchsickerung des kontaminierten Bodens kommt es zur Freisetzung von Schadstoffen, die im Sickerwasser gelöst werden. An der Unterkante der Quelle tritt das mit Schadstoffen belastete Sickerwasser in die ungesättigte Bodenzone (Transportstrecke) ein und bewegt sich mit den gelösten Schadstoffen durch die Transportstrecke zur Grundwasseroberfläche. In der Transportstrecke wird ein Teil der Schadstoffe am Feststoff der Bodenmatrix sorbiert. Bei organischen Schadstoffen können darüber hinaus auch mikrobiologische Abbauprozesse stattfinden. Bei flüchtigen Stoffen geht ein Teil des Schadstoffes in die Bodenluft über und es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen dem am Bodenfeststoff sorbierten Schadstoffgehalt, dem im Sickerwasser gelösten und dem in der Bodenluft vorhandenen Schadstoff ein. Daneben findet eine Verdünnung der Konzentra-

tion durch Diffusions- und Dispersionsprozesse statt. Dies führt dazu, dass die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser beim Eintritt in das Grundwasser in der Regel geringer sind als beim Austritt aus der Quelle.

Die dem Programm ALTEX-1D zugrunde liegende Stofftransportgleichung berücksichtigt die Prozesse Advektion, Dispersion/Diffusion, lineare Sorption, sowie den biologischen Abbau (Kinetik 1. Ordnung). Gelöst wird die Gleichung mit den von VAN GENUCHTEN [11] entwickelten analytischen Lösungen. Dabei werden 2 unterschiedliche Arten von Schadstoffeinträgen aus der Quelle berücksichtigt. Zum einen kann eine endliche Quelle mit zeitlich konstanter Quellkonzentration (Quellentyp A) und zum anderen mit einer zeitlich abklingenden Quellkonzentration (Quellentyp B) nachgebildet werden. Durch Einführen von sogenannten „äquivalenten“ Systemparametern [12] ist es möglich, auch für geschichtete Profile und flüchtige Stoffe mit Berücksichtigung des 3-Phasen-Verteilungsgleichgewichtes zwischen Bodenfeststoff, Sickerwasser und Bodenluft die zeitliche Entwicklung der Stoffkonzentration am Ort der Beurteilung sowie das Schadstoffkonzentrationsprofil in der Transportstrecke für einen beliebigen Zeitpunkt zu berechnen.

### **B5.1.2 Neue Funktionalitäten in Version 3**

#### **a) Konzentrationsprofile**

Der in [12] beschriebene Ansatz zur Berechnung der Konzentrationsganglinie am Ort der Beurteilung für den Mehrschichten-Fall („äquivalente Parameter“) wurde in der Version 3 von ALTEX-1D auf die Berechnung von Konzentrationsprofilen übertragen. Dabei werden sukzessiv zwischen  $z = 0$  (Unterkante der Schadensquelle) und  $z = L$  (Ort der Beurteilung) für definierte Zeitpunkte die Konzentrationen für eine Vielzahl von Teil-Transportstrecken ( $z + \Delta z$ ) berechnet, indem die äquivalenten Parameter der jeweiligen Teil-Transportstrecke ermittelt werden. Es ergeben sich die Konzentrationen für die verwendeten Teil-Transportstrecken, die zu dem gewünschten Konzentrationsprofil führen. Der Test und die Validierung der Ergebnisse erfolgte numerisch mit Hydrus-1D (s. Kap. 5.2.4.1) und analytisch mit Hilfe eines mit Mathematica (s. Kap. 5.2.4.2) erstellten Programmes sowie durch Vergleich mit publizierten Feld-Ergebnissen (s. Kap. 5.2.4.3).

#### **b) Massenbilanzen**

Mit der Version 3 von ALTEX-1D ist es möglich, für einen gewählten Zeitpunkt Massenbilanzen zum Verbleib der aus einer Quelle emittierten Schadstoffmasse zu berechnen. Dazu wird der Konzentrationsverlauf am Ort der Beurteilung über die Zeit integriert und daraus die in das Grundwasser übertretende Schadstoffmasse berechnet. Gleichzeitig wird für den gewählten Zeitpunkt die noch in der Transportstrecke (Strecke zwischen Unterkante Quelle und Ort der Beurteilung) befindliche Schadstoffmasse berechnet. Diese setzt sich zusammen aus der im Sickerwasser gelösten Masse, der an der Bodenmatrix sorbierten Masse und der in der Bodenluft vorhandenen Masse. Die einzelnen Massen stehen im Gleichgewicht und können bei Kenntnis der gelösten Konzentration über die chemisch-physikalischen Eigenschaften und die Bodenkennwerte berechnet werden. Aus dem Profil der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser entlang der Transportstrecke kann damit das Profil der sorbierten Konzentration und das Profil der Bodenluftkonzentration berechnet werden.

Die insgesamt in der Transportstrecke vorhandenen Massen werden durch Integration der jeweiligen Profile über die Mächtigkeit ermittelt. Die abgebaute Masse (bei organischen Schadstoffen) kann aus der Differenz der emittierten Masse aus der Quelle und der Summe der in der Transportstrecke vorhandenen und der in das Grundwasser emittierten Masse berechnet werden.

Voraussetzung für die Berechnung von Massenbilanzen ist damit zunächst die Berechnung der Konzentrationsprofile (s. Pkt. a). Die mit der Version 3 von ALTEX-1D berechneten Massenbilanzen wurden mit Hydrus-1D (numerisch) und Mathematica (analytisch) geprüft. Wie aus Tab. 1 ersichtlich, konnte eine befriedigende Übereinstimmung erzielt werden. Allerdings können bei mehrschichtigen Profilen für bestimmte Parameter-Kombinationen (kd-Werte) geringfügige Abweichungen in der Massenbilanz auftreten. Dabei kann die in der Transportstrecke sorbierte Masse die aus der Quelle emittierte Masse geringfügig unterschreiten oder übersteigen.

| Masse (kg)              | Transportstrecke |          | Emission Quelle | Grundwasser | abgebaut |
|-------------------------|------------------|----------|-----------------|-------------|----------|
|                         | gelöst           | sorbiert |                 |             |          |
| Hydrus-1D               | 0,0937           | 4,2443   | 13,8446         | 0,0649      | 9,442    |
| Mathematica             | 0,0974           | 4,1079   | 13,9056         | 0,06487     | 9,635    |
| ALTEX-1D <sub>neu</sub> | 0,0909           | 4,1188   | 13,903          | 0,066       | 9,718    |

Tab. 1: Vergleich der mit Hydrus-1D, Mathematica und ALTEX-1D (Version 3) berechneten Massenbilanz für das Fallbeispiel 3 der Arbeitshilfe DU [1] zum Zeitpunkt 100 a nach Emissionsbeginn

## B5.2 Test und Validierung der Version 3

### B5.2.1 Allgemeine Vorgehensweise

Zunächst wurde überprüft, ob die weiterentwickelte Version 3 von ALTEX-1D für jegliche in der Praxis auftretende Parameterkombination die gleichen Ergebnisse liefert wie die bisherige Version 2.4. Dazu wurden für die einzelnen Eingabeparameter minimal und maximal mögliche Werte festgelegt und deren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion definiert. Mit diesen Festlegungen wurden nach der „Monte-Carlo“-Methode insgesamt 2000 zufällige Parameterkombinationen „gewürfelt“. Anschließend wurden jeweils 2000 Berechnungen mit beiden Versionen (2.4 und 3) von ALTEX-1D unter Verwendung der „gewürfelten“ Parameterkombinationen durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Auf diese Weise wird sichtbar, ob die Version 3 für alle möglichen Fälle die gleichen Ergebnisse wie die Version 2.4 liefert.

Um zu klären, ob das Konzept der „äquivalenten Parameter“ (Äquivalenzansatz [12]) in Altex-1D (Version 3) richtig umgesetzt wurde, wurden Vergleichsrechnungen mit Hydrus-1D durchgeführt. Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse aus Hydrus-1D als Vergleichswerte für den Äquivalenzansatz herangezogen werden können, wurde zunächst ein Vergleich der Modelle ALTEX-1D (Version 2.4) und Hydrus-1D vorgenommen, indem die berechneten Konzentrationsganglinien am Ort der Beurteilung für das Fallbeispiel 1A (Fall A) der Arbeitshilfe DU [1] verglichen wurden.

Das Modell Hydrus-1D wurde als echtes 3-Schicht-Modell aufgebaut sowie als 1-Schicht-Modell unter Ansatz der äquivalenten Parameter. Durch diesen Vergleich wird deutlich, ob Hydrus-1D geeignet ist, zur Validierung der berechneten Konzentrationsprofile für den Mehrschichtfall verwendet werden zu können.

Nach diesem „Eignungstest“ wurden im nächsten Schritt die Validierungsberechnungen für Altex-1D (Version 3) für den Mehrschichtfall vorgenommen. Dabei wurden für das oben genannte Fallbeispiel 1a (Quellentyp A und B) die Konzentrationsganglinien am Ort der Beurteilung und die Konzentrationsprofile für mehrere Zeitpunkte mit ALTEX-1D (Version 3) und Hydrus-1D verglichen.

Für die Tests und Validierungen wurde das Fallbeispiel 1a der Arbeitshilfe DU [1] mit den Quelltypen A (konstante Quellkonzentration) und B (abklingende Quellkonzentration) verwendet. Die Quelltypen A und B unterscheiden sich lediglich durch die obere Randbedingung. Im Fall A liegt eine konstante Quellkonzentration von 550 µg/L über 225 Jahre vor. Nach 225 Jahren (Ende der Emission) geht die Quellkonzentration auf Null zurück. Im Fall B handelt es sich um eine exponentiell abklingende Quellkonzentration mit einem Anfangswert von 550 µg/L. Der Abklingkoeffizient der Quellkonzentration beträgt 0,004444 [1/Jahr].

Beim Fallbeispiel 1a werden 3 Schichten von jeweils 1 m Mächtigkeit zugrunde gelegt. Der Aufbau der Transportstrecke ist in Abb. 2 dargestellt. Die Bodenparameter der 3 Schichten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

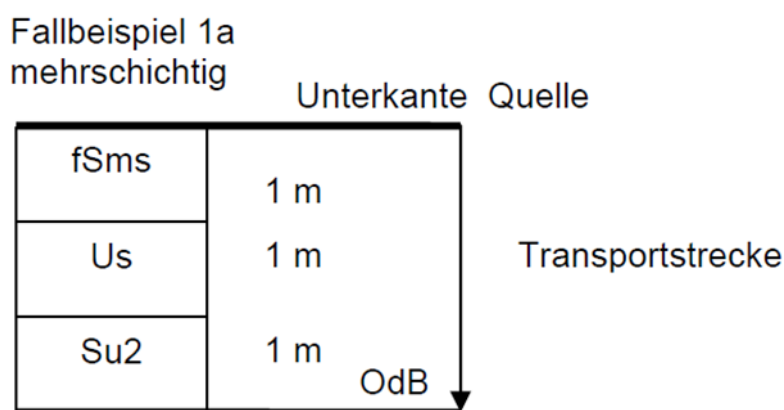


Abb. 2: Aufbau der Transportstrecke für Fallbeispiel 1a

| Bodenart | Mächtigkeit | Trocken-Raum-dichte   | Feldkapazität | pH | Corg | Tongehalt |
|----------|-------------|-----------------------|---------------|----|------|-----------|
|          | (m)         | (kg/dm <sup>3</sup> ) | (%)           |    | (%)  | (%)       |
| fSms     | 1           | 1,5                   | 14            | 4  | 0,1  | 0,5       |
| Us       | 1           | 1,6                   | 32            | 5  | 0,5  | 5         |
| Su2      | 1           | 1,5                   | 23            | 4  | 0,1  | 1         |

Tab. 2: Bodenparameter der Transportstrecke für Fallbeispiel 1A

### B5.2.2 Vergleich zwischen den ALTEX-1D Versionen 2.4 (alt) und 3 (neu)

Das Programm ALTEX-1D (Version 2.4) wurde im Rahmen seiner Erstellung umfangreich getestet und validiert (Kap. A3.6 der Arbeitshilfe DU [1]). Um die neue Version 3

von ALTEX-1D zu testen und zu validieren, wurden zunächst Vergleichsrechnungen mit beiden Versionen durchgeführt, indem „Monte-Carlo“-Simulationen für die Quelltypen A und B sowohl für organische als auch für anorganische Schadstoffe (in der Summe also 4 Unterscheidungsmerkmale) durchgeführt wurden.

Um nahezu sämtliche in der Praxis mögliche Parameterkombinationen bei dem Vergleich berücksichtigen zu können, wurde für jeden Eingabeparameter der Typ der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion festgelegt und mit deren Berücksichtigung eine hohe Zahl von Parameterkombinationen „gewürfelt“ (jeweils 500) und jede einzelne Parameterkombination mit den Versionen 2.4 und 3 berechnet. Es entstanden dadurch für jedes Unterscheidungsmerkmal jeweils 500 Ergebnissätze.

Um die Ergebnisse der Version 3 für das gesamte Parameterkombinationsspektrum mit den Ergebnissen der Version 2.4 zu vergleichen, wurden die jeweils erzielten Ergebnisse bezüglich der Ergebnisparameter

- Maximale Konzentration  $c_{max}$
- Zeitpunkt der maximalen Konzentration  $t_{cmax}$
- Zeitpunkt der Prüfwert-Überschreitung  $t_{pwü}$
- Zeitpunkt der Prüfwert-Unterschreitung  $t_{pwu}$
- Schadstoffemission aus der Quelle  $E_{s1ges}$
- Schadstoffemission ins Grundwasser  $E_{s2ges}$
- Maximale Fracht ins Grundwasser  $E_{s2max}$
- Mittlere Fracht ins Grundwasser  $E_{s2mittel}$
- Maximale Emissionsstärke ins Grundwasser  $J_{s2max}$
- Mittlere Emissionsstärke ins Grundwasser  $J_{s2mittel}$

in XY-Diagrammen (X-Achse: Version 2.4, Y-Achse: Version 3) gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3 bis 6 dargestellt. Aus den Abbildungen wird deutlich, dass die mit der Version 3 von ALTEX-1D berechneten Ergebnisse sehr gut mit den Ergebnissen der Version 2.4 übereinstimmen.

Insofern ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass für die in der Praxis vorkommenden Parameterkombinationen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Versionen 2.4 und 3 auftreten werden und die Kontinuität bezüglich der Gültigkeit der mit der bisherigen Version erzielten Ergebnisse gewährleistet ist.

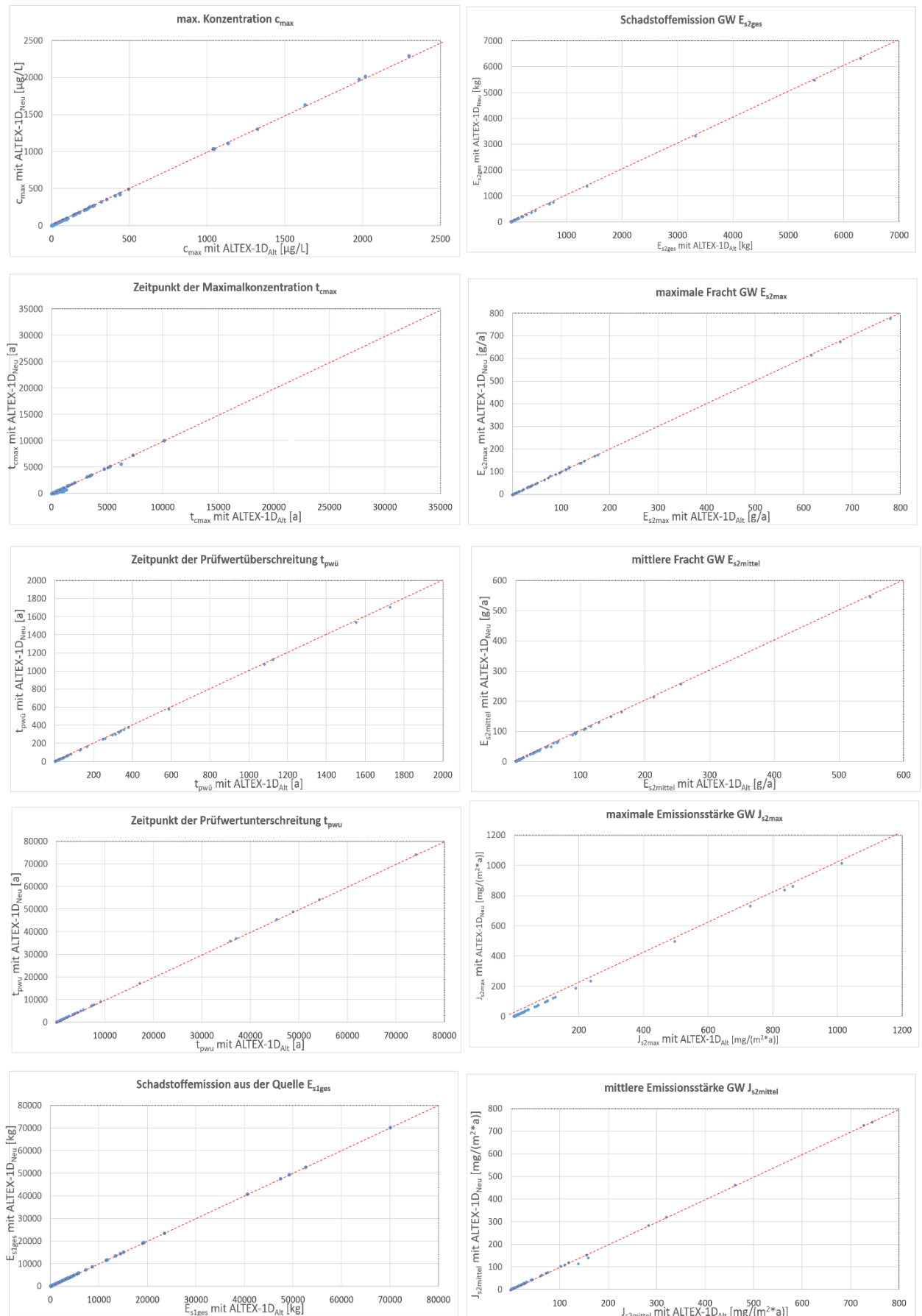


Abb. 3: Vergleich der Ergebnisse zwischen den ALTEX-1D Versionen 2.4 und 3 für den Quelltyp A und organische Schadstoffe („Monte-Carlo“ - Simulation)

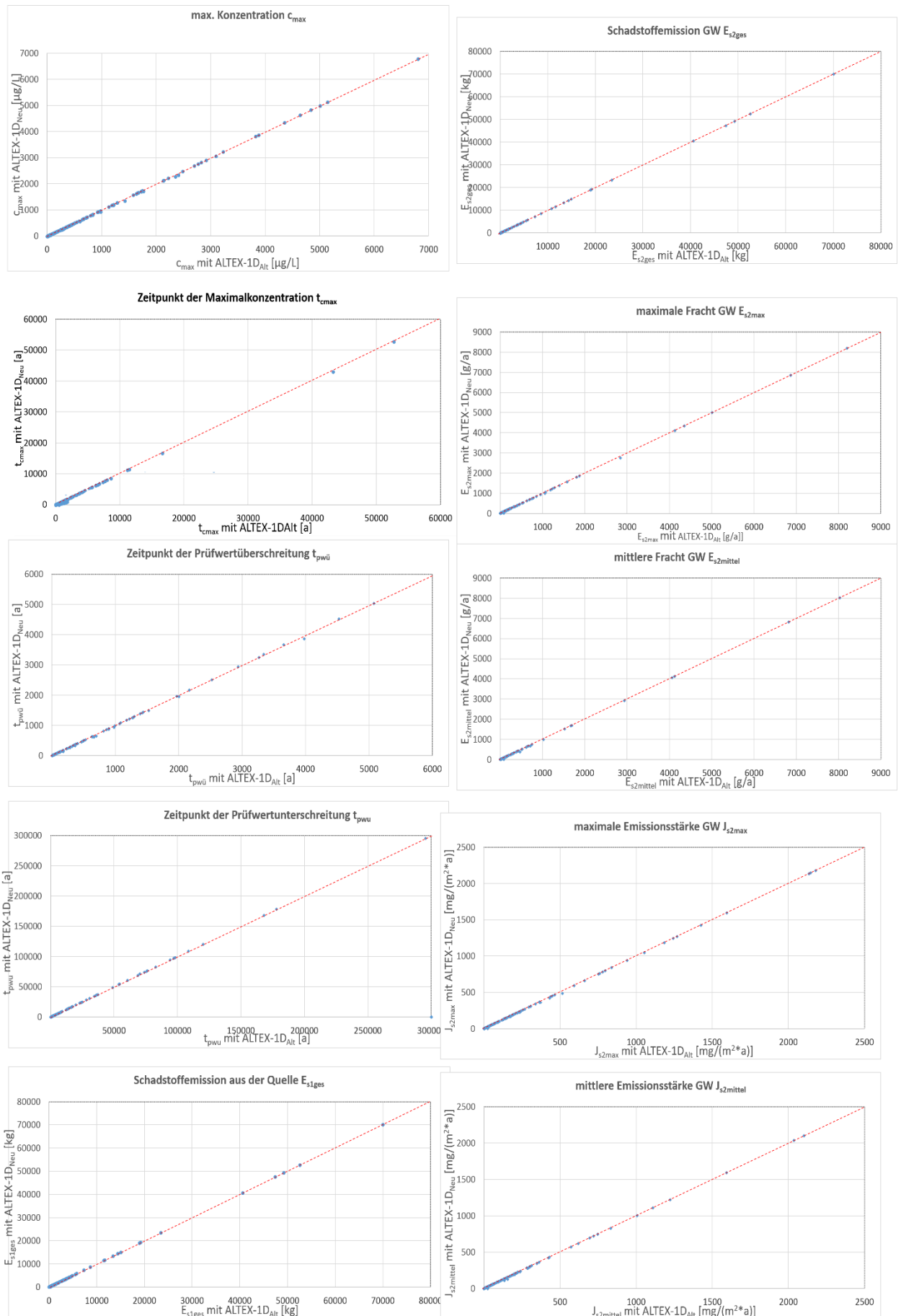


Abb. 4: Vergleich der Ergebnisse zwischen den ALTEX-1D Versionen 2.4 und 3 für den Quelltyp A und anorganische Schadstoffe („Monte-Carlo“ - Simulation)

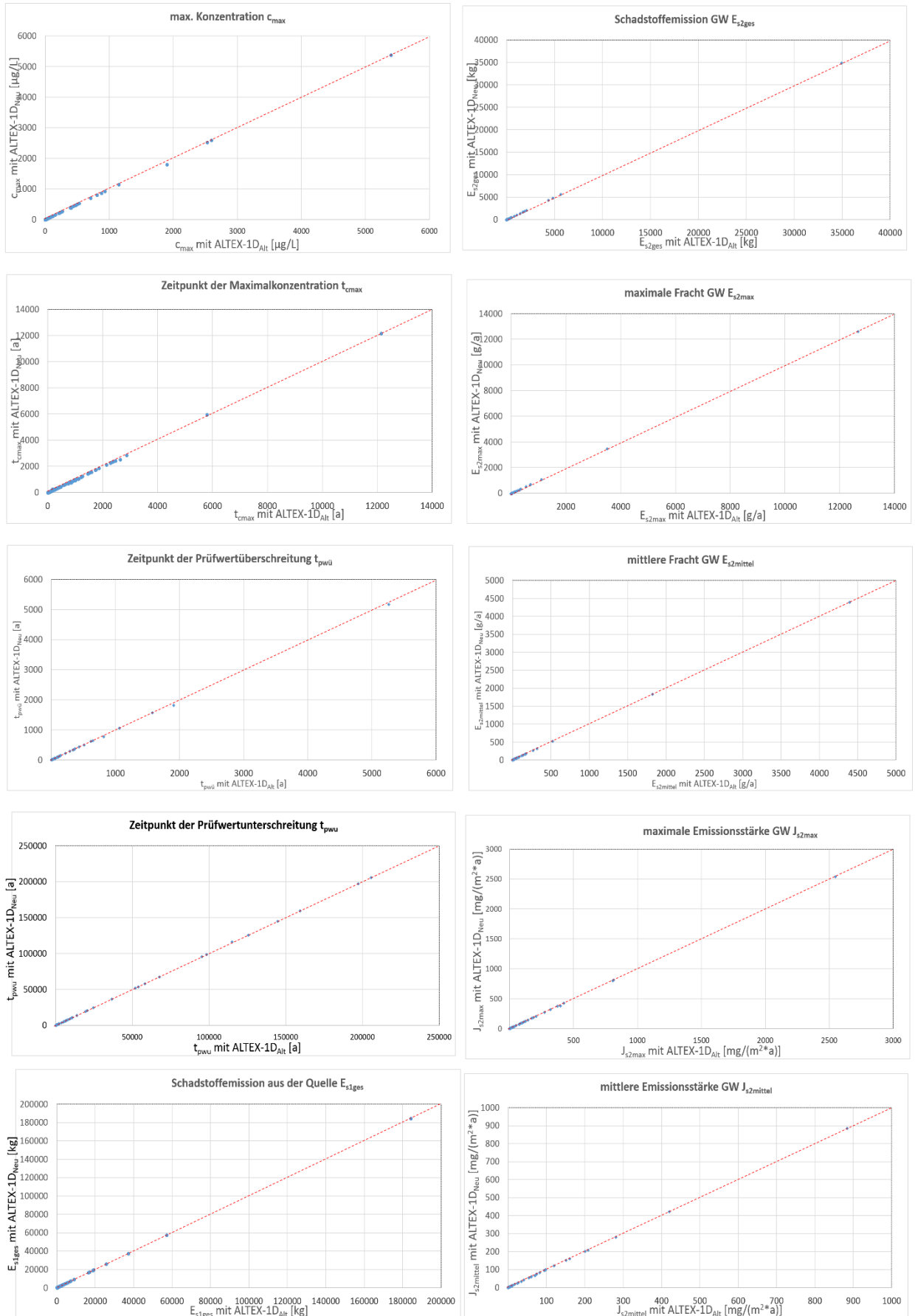


Abb. 5: Vergleich der Ergebnisse zwischen den ALTEX-1D Versionen 2.4 und 3 für den Quelltyp B und organische Schadstoffe („Monte-Carlo“ - Simulation)

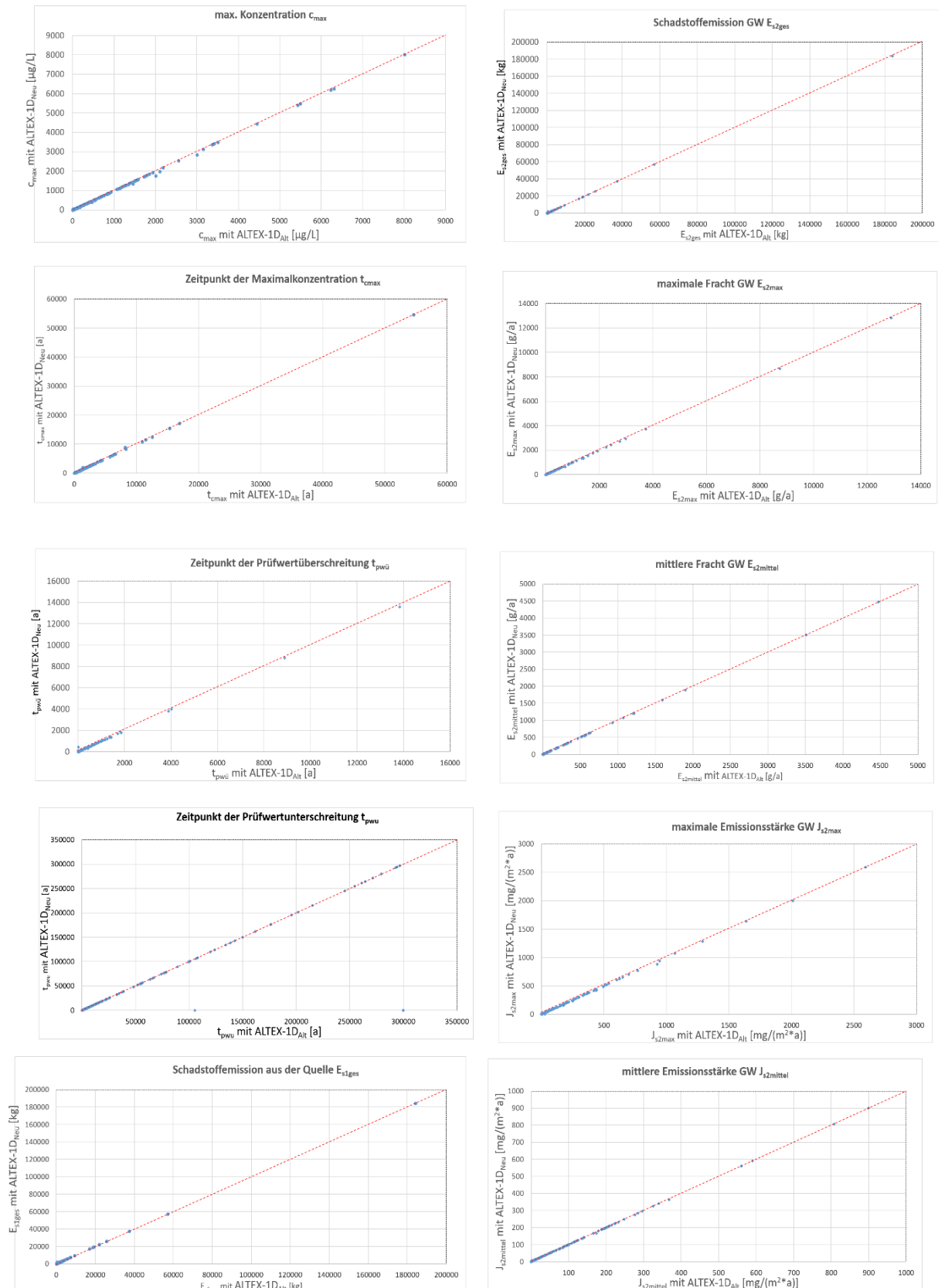


Abb. 6: Vergleich der Ergebnisse zwischen den ALTEX-1D Versionen 2.4 und 3 für den Quelltyp B und anorganische Schadstoffe („Monte-Carlo“ - Simulation)

### B5.2.3 Eignung von Hydrus-1D als Vergleichsmodell

Zur Überprüfung der mit ALTEX-1D (Version 3) berechneten Ergebnisse für mehrschichtige Profile wurde das Finite-Elemente-Modell Hydrus-1D verwendet. Um feststellen zu können, wie Hydrus-1D hinsichtlich der unteren Randbedingung (am Ort der Beurteilung) sowie hinsichtlich der Festlegung des Dispersionskoeffizienten eingestellt werden muss, um richtige Ergebnisse zu erzielen, wurden Vergleichsrechnungen mit der bisherigen Version 2.4 von ALTEX-1D durchgeführt. Gleichzeitig wurde der verwendete Äquivalenzansatz überprüft, indem dieser Ansatz auch in Hydrus-1D verwendet wurde. Somit wurden die folgenden 3 Berechnungsverfahren miteinander verglichen:

- (1) Hydrus-1D unter Berücksichtigung der 3 Bodenschichten (Hydrus-1D/3 Schicht)
- (2) Hydrus-1D unter Verwendung der äquivalenten Parameter (Hydrus-1D/„äquivalent“)
- (3) ALTEX-1D (Version 2.4) unter Verwendung der äquivalenten Parameter

Das Verfahren (1) wurde verwendet, um Vergleichsergebnisse zu erhalten, die unter Berücksichtigung des „realen“ Mehrschichtenfalls ermittelt wurden. Das Verfahren (2) wurde herangezogen, um zu überprüfen, ob der Ansatz der äquivalenten Parameter geeignet ist, die Konzentrations-Tiefenprofile im Mehrschichtenfall im Vergleich zum Verfahren (1) hinreichend genau zu berechnen. Der Nachweis, dass der Ansatz der äquivalenten Parameter geeignet ist, um die Konzentrations-Ganglinie am Ort der Beurteilung im Mehrschichtenfall exakt zu berechnen, ist bereits im Kap. A3.6.1 der Arbeitshilfe DU [1] enthalten. Das Verfahren (3) wurde eingesetzt, um zu überprüfen, ob der Äquivalenzansatz im Vergleich mit Hydrus-1D plausible Ergebnisse liefert

In Abb.7 sind die berechneten Konzentrations-Ganglinien über die Zeit für den Ort der Beurteilung dargestellt. Es zeigt sich eine exzellente Übereinstimmung zwischen dem Verfahren (2) und (3).

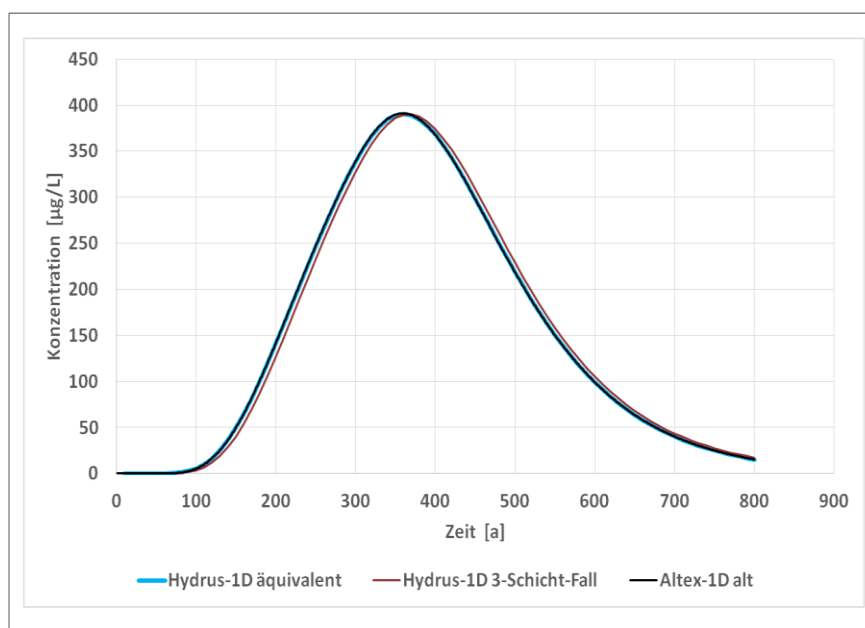


Abb. 7: Vergleich der berechneten Konzentrations-Ganglinien am Ort der Beurteilung für den 3-Schicht-Fall (Fallbeispiel 1A Arbeitshilfe DU; Quelltyp A)

Die beiden Konzentrations-Ganglinien liegen exakt übereinander und sind deshalb in Abb.7 nicht einzeln zu erkennen.

Das bedeutet, dass der Äquivalenzansatz geeignet ist, um die Konzentrationsganglinie am Ort der Beurteilung für den Mehrschichtenfall zu berechnen. Das Verfahren (1) (rote Kurve in Abb. 7) zeigt geringfügige Abweichungen, wobei jedoch die Übereinstimmung als sehr gut bezeichnet werden kann. Hydrus-1D kann somit so eingestellt werden, dass es als Vergleichsmodell bei Tests und Validierungen von ALTEX-1D verwendet werden kann.

#### **B5.2.4 Validierung der Version 3 für die Berechnung von Konzentrationsprofilen**

Mit der Version 3 von ALTEX-1D können für den Mehrschichtenfall neben der Konzentrationsganglinie am Ort der Beurteilung über die Zeit auch Konzentrationsprofile der Transportstrecke für beliebige Zeitpunkte berechnet werden, indem der Äquivalenzansatz verwendet wird.

Um zu überprüfen, ob diese Berechnungen richtig ausgeführt werden, wurde der 3-Schichten-Fall des Fallbeispiels 1a sowohl für den Quelltyp A als auch für den Quelltyp B mit Hydrus-1D berechnet.

Zur Überprüfung der Konzentrationsprofile entlang der Transportstrecke wurde neben Hydrus-1D auch ein mit Mathematica entwickeltes analytisches Programm auf Grundlage der äquivalenten Parameter eingesetzt.

##### **B5.2.4.1 Vergleich mit Hydrus-1D**

Die berechneten Konzentrationsprofile für den Quelltyp A sind in Abb. 8 für verschiedene Zeitpunkte dargestellt. Der Vergleich verdeutlicht, dass die Profile relativ gut übereinstimmen. An den Schichtgrenzen weichen die berechneten Konzentrationen etwas voneinander ab. Auch für den Quelltyp B stimmen die berechneten Konzentrationsprofile gut überein (Abb. 9).

##### **B5.2.4.2 Vergleich mit Mathematica**

Um eine schnelle und exakte Überprüfung der Ergebnisse aus den Konzentrationsprofil-Berechnungen mit ALTEX-1D (Version 3) ohne Heranziehung von aufwendigen Berechnungen mit Hydrus-1D zu ermöglichen, wurde ein mit Mathematica entwickeltes analytisches Programm auf Grundlage der äquivalenten Parameter eingesetzt.

Die Richtigkeit der Ergebnisse des Mathematica-Programmes wurde durch Vergleich mit Hydrus-1D geprüft. Wie aus Abb. 10 ersichtlich, konnte für das dreischichtige Profil des Fallbeispiels 1a eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden.

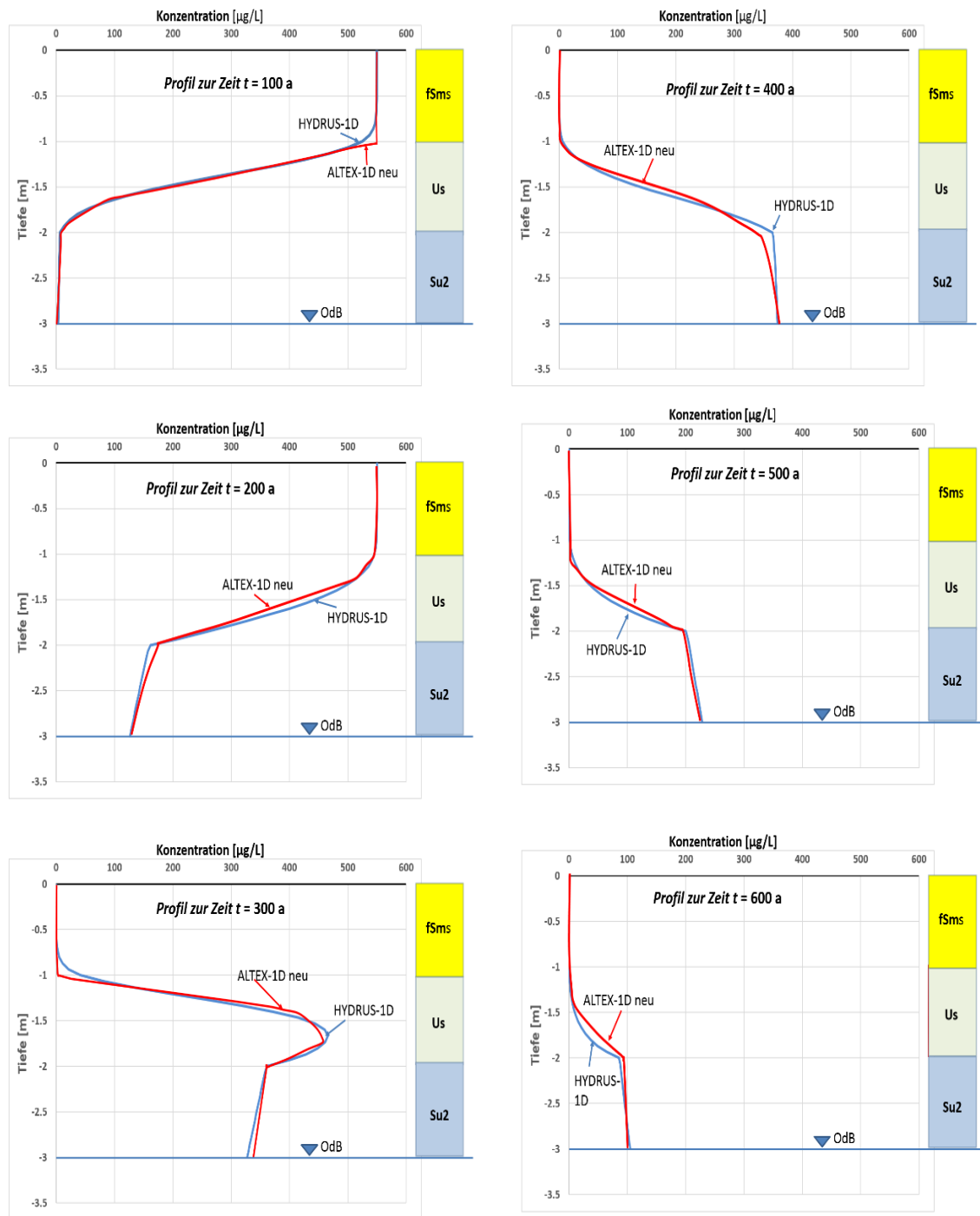


Abb. 8: Mit Hydrus-1D berechnete Konzentrationsprofile für den 3-Schicht-Fall (Fallbeispiel 1a Arbeitshilfe DU, Quelltyp A)

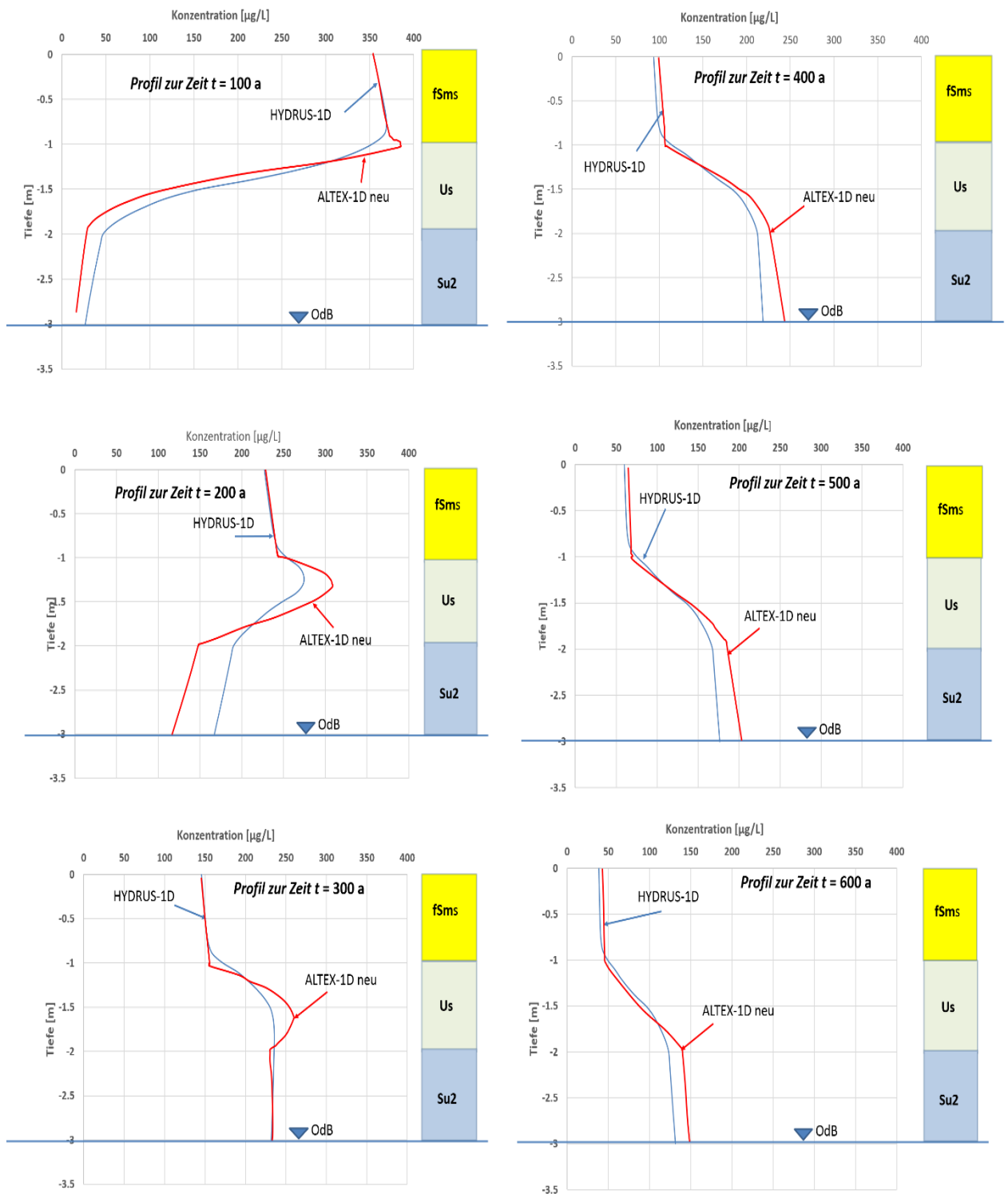


Abb. 9: Mit Hydrus-1D berechnete Konzentrationsprofile für den 3-Schicht-Fall (Fallbeispiel 1a Arbeitshilfe DU; Quelltyp B)

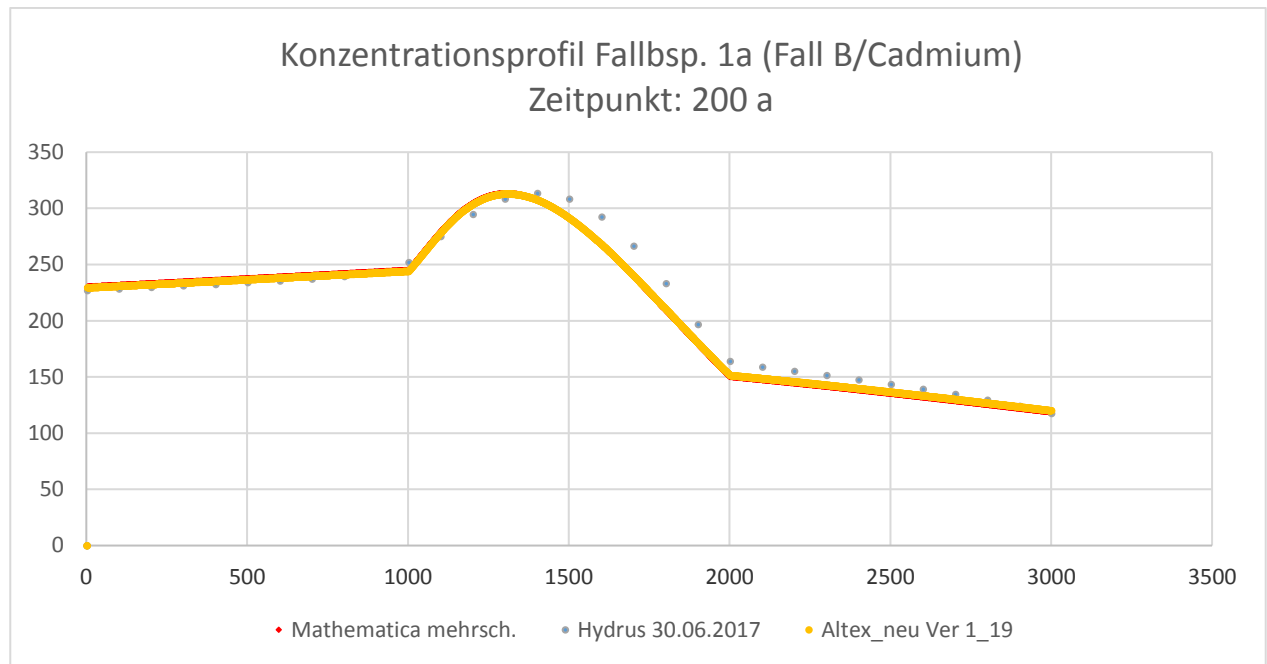


Abb. 10: Mit HYDRUS-1D berechnetes Konzentrationsprofil für den 3-Schicht-Fall (Fallbeispiel 1a der Arbeitshilfe DU) im Vergleich zu dem mit Mathematica und ALTEX-1D (Version 3) berechneten Profil (äquivalente Parameter)

#### B5.2.4.3 Vergleich mit Ergebnissen aus Feldmessungen

Anhand der folgenden zwei Fälle aus der Literatur wird verdeutlicht, dass die mit der Version 3 von ALTEX-1D berechneten Konzentrationsprofile hinreichend genau mit im Gelände gemessenen Konzentrationsprofilen übereinstimmen.

##### a) Chlorid

Zur Validierung wurde ein in [13] beschriebener Geländeversuch mit Chlorid verwendet. Bei diesem Experiment wurde ein natürlich anstehender lehmiger Sand durch vertikale Plastikwände bis zu einer Tiefe von 1,5 m eingegrenzt. Die Oberfläche des eingegrenzten Bereiches betrug  $6 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 18 \text{ m}^2$ . Diese Fläche wurde impulsartig mit wassergelöstem Chlorid beaufschlagt. Der Grundwasserspiegel (Ort der Beurteilung) lag während des Geländeversuchs bei 2,2 m unter GOK.

In 6 verschiedenen Tiefen ( $z = 0,15 \text{ m}$ ,  $0,45 \text{ m}$ ,  $0,75 \text{ m}$ ,  $1,05 \text{ m}$  und  $1,35 \text{ m}$ ) wurden zu 5 verschiedenen Zeitpunkten ( $t = 8 \text{ Tage}$ ,  $14 \text{ Tage}$ ,  $21 \text{ Tage}$ ,  $27 \text{ Tage}$  und  $33 \text{ Tage}$ ) die Chloridkonzentration sowie der Wassergehalt gemessen. Der gemessene Wassergehalt unmittelbar vor dem Chlorideintrag ist in Abb. 11 dargestellt. Während der Versuchsdauer traten nur minimale Änderungen in den Wassergehalten auf. Die mittlere Sickerwassergeschwindigkeit wurde mit  $2,56 \text{ cm/d}$  ermittelt. Ausgehend von dem Wassergehalt in der obersten Schicht von 20 % ergibt sich eine Sickerwasserrate von  $5,12 \text{ mm/d}$ . In der Publikation [13] sind die Dispersivitäten in Abhängigkeit der Transportzeiten von 1 Tag, 21 Tage und 27 Tage mit  $0,94 \text{ cm}$ ,  $1,4 \text{ cm}$  und  $1,8 \text{ cm}$  angegeben. Ausgehend von der Sickerwassergeschwindigkeit von  $2,56 \text{ cm/d}$  lässt sich aus den in [13] angegebenen Daten der Dispersivitäts-Skalenfaktor  $f_d = 0,0266$  berechnen.

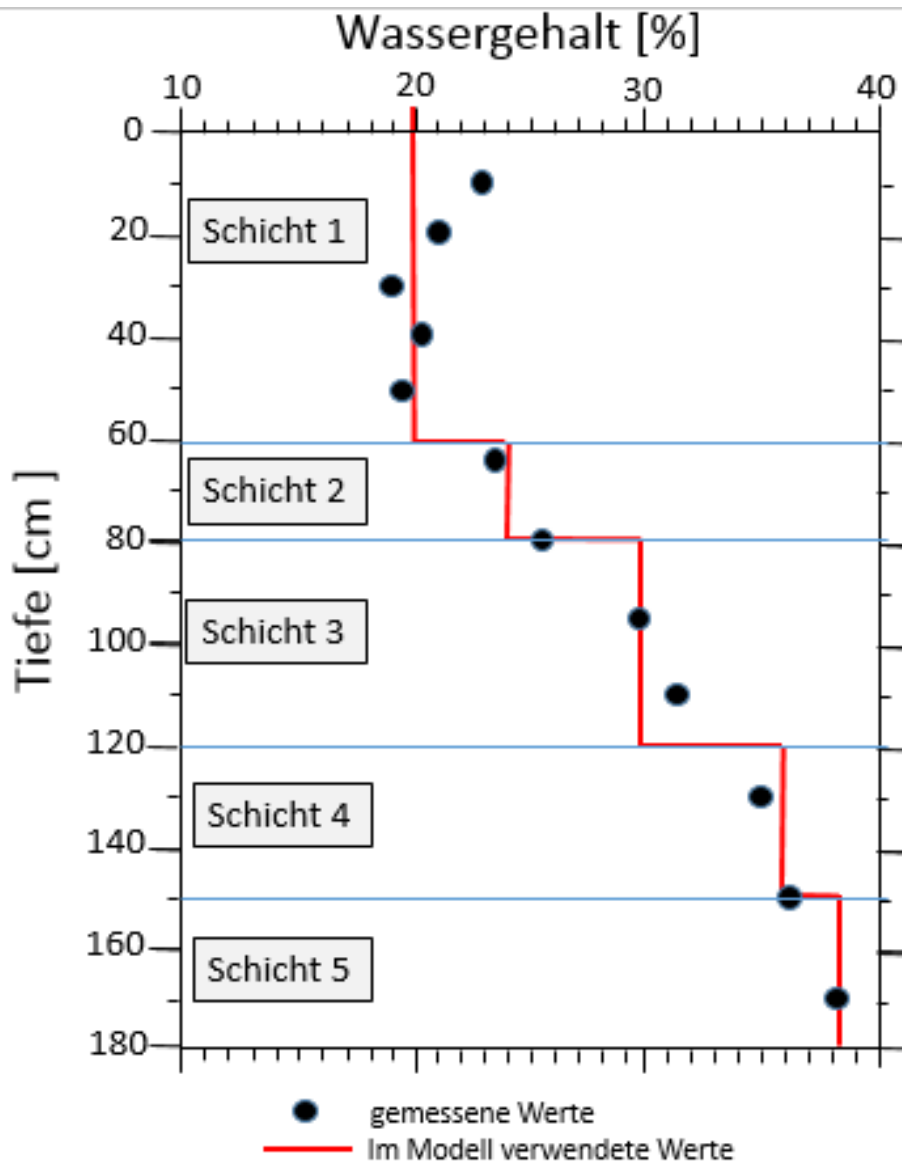


Abb. 11: Gemessener Wassergehalt im Tiefenprofil und mit ALTEX-1D verwendete Wassergehalte

Die beaufschlagte Chloridmasse sowie deren Chloridkonzentration werden in der Publikation [13] nicht genannt. Es wurde deshalb eine Chloridkonzentration ( $c_0 = 360 \text{ g/L}$ ) angenommen, die der maximalen Wasserlöslichkeit entspricht. Durch Kalibrierung der gemessenen Chloridkonzentrationen in der Tiefe von 8 cm wurde die über die gesamte Fläche von  $18 \text{ m}^2$  beaufschlagte Chloridmasse mit ALTEX-1D (Version 3) zu 47,5 kg ermittelt. Dabei wurde in ALTEX-1D eine Mächtigkeit der Chloridquelle von 0,01 m angenommen, um damit den impulsartigen Chlorideintrag nachbilden zu können.

Mit den angegebenen Daten wurden die Chloridkonzentrationsprofile für die Zeitpunkte  $t = 14 \text{ Tage}$ ,  $21 \text{ Tage}$ ,  $27 \text{ Tage}$  und  $33 \text{ Tage}$  mit ALTEX-1D (Version 3) berechnet und mit den gemessenen Werten verglichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 12 dargestellt.

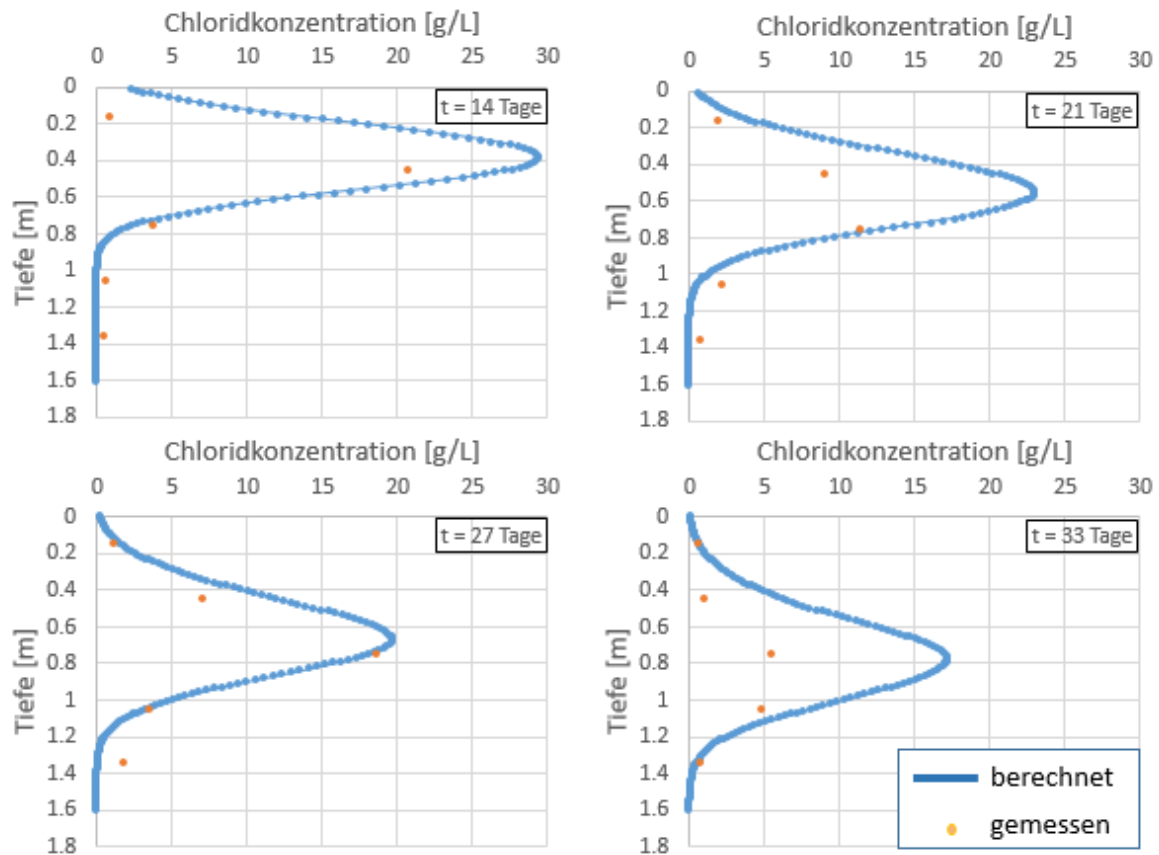


Abb. 12: Gemessene und mit der Version 3 von ALTEX-1D berechnete Konzentrationsprofile für Chlorid

Die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Chloridkonzentrationen kann insgesamt als befriedigend bezeichnet werden. In der frühen Phase des Experiments nach 14 Tagen wird die gemessene Chloridkonzentration nicht richtig berechnet, vermutlich weil keine Informationen über die Art und Weise des Chlorideintrags vorliegen. Die rechnerische Nachbildung für den Zeitpunkt  $t = 33$  Tage ist für 2 Tiefen ( $z = 0,45$  m und  $z = 0,75$  m) schlecht. Unter Berücksichtigung aller vorliegenden Systemdaten sind die Messwerte allerdings physikalisch unplausibel. Es ist nicht nachvollziehbar, dass sich in der Tiefe 0,75 m nach 27 Tagen die Chloridkonzentration von etwa 18 g/L innerhalb von 6 Tagen auf etwa 4 g/L reduziert. Der Versuch der Autoren des Experiments, die Chloridkonzentrationen rechnerisch nachzubilden, ist allerdings ebenso wie die Berechnungen mit der Version 3 von ALTEX-1D nur teilweise gelungen.

#### b) Cadmium

Die folgende Validierung wurde anhand von gemessenen Cadmium-Konzentrationsprofilen vorgenommen. Dazu wurden die Ergebnisse einer Geländeuntersuchung in Lommel (Belgien) an einem 1 m mächtigen geschichteten Podsol verwendet. Detaillierte Angaben zu den Geländeuntersuchungen befinden sich in der Publikation von Seuntjes [14]. Aus einem Transsekt mit der Länge von 180 m und 1 m Tiefe wurden die Porenwasser- und Bodenproben zur Analyse der gelösten und sorbierten Konzentrationen aus verschiedenen Tiefen entnommen. Die Untersuchungsfläche wurde über 111 Jahre durch atmosphärische Deposition mit Schwermetallen aus einem lokalem Industriebe-

trieb beaufschlagt. Der Grundwasserspiegel liegt im Mittel 2 m unter der Geländeoberkante. Aus den in [14] aufgeführten Standortdaten wurden die Eingabedaten für die Validierungsrechnung mit der Version 3 von ALTEX-1D abgeleitet.

Das Bodenprofil hat bis zum Grundwasserspiegel eine Mächtigkeit von 2 m und besteht aus einem Podsol, der aus 3 Schichten aufgebaut ist. Nach den in [14] angegebenen „van Genuchten-Parametern“ für die 3 Schichten, handelt es sich um schwach lehmigen Sand. Für die 3 Schichten wurden von dem Autor [14] die Verteilungskoeffizienten ( $k_d$ -Werte) ermittelt. Diese Werte wurden als Orientierungswerte bei der Kalibrierung der im Gelände gemessenen Cadmiumgehalte im Tiefenprofil des Podsoles verwendet. Für die Schichten 1 bis 3 wurden die Labor- $k_d$ -Werte im Rahmen der Kalibrierung geringfügig von 41 auf 63 kg/L, von 21 auf 40 kg/L bzw. von 11 auf 8 kg/L verändert. Die für die Validierung verwendeten Daten und deren Bezug zu den Standortdaten sind in Tab. 3 zusammengestellt.

Mit den in Tab. 3 genannten Daten wurde mit ALTEX-1D (Version 3) das Konzentrationsprofil der gelösten und sorbierten Cadmiumkonzentrationen für den Zeitpunkt  $t = 111$  Jahre berechnet und mit den gemessenen verglichen. Im Falle von Cadmium ist die Sorption der ausschlaggebende Mechanismus für die Konzentrationsverteilung über die Tiefe. In Abb. 13 ist der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Konzentrationen für gelöstes und sorbiertes Cadmium zum Zeitpunkt  $t = 111$  Jahre im Tiefenprofil dargestellt.

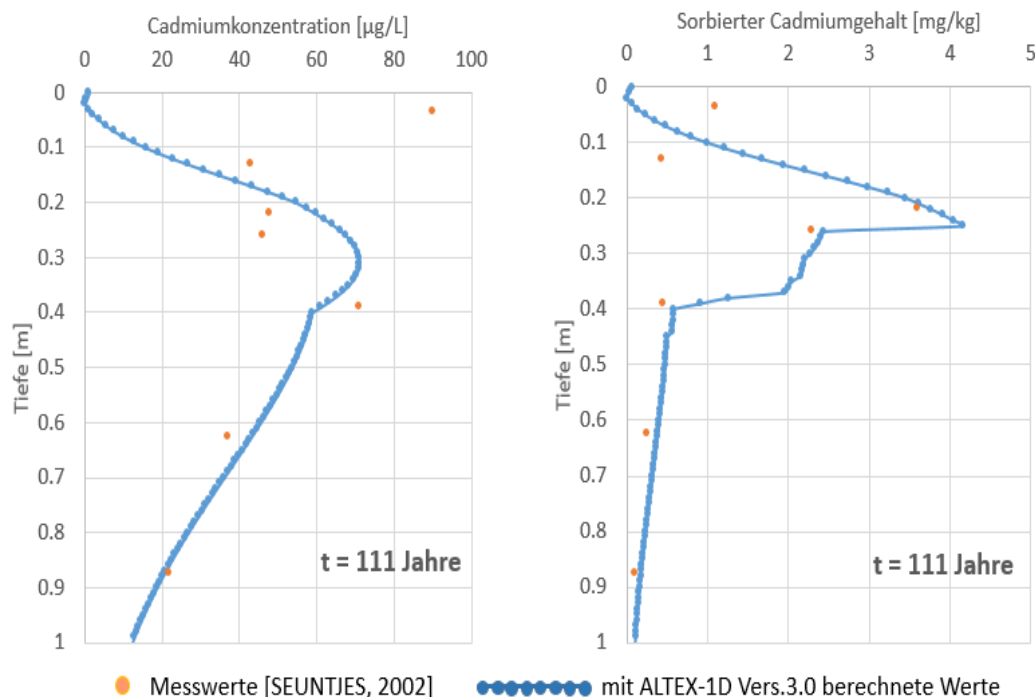


Abb. 13: Vergleich zwischen mit ALTEX-1D (Version 3) berechneten und gemessenen Cadmiumkonzentrationen für den Zeitpunkt  $t = 111$  Jahre im Tiefenprofil

Die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten ist insgesamt gut. Die mit der Version 3 von ALTEX-1D erzielten Ergebnisse zeigen, dass das Programm geeignet ist, um im Rahmen von Sickerwasserprognosen hinreichend genaue Prognosen zu erzielen.

| Parameter                                                                           | Einheit               | Im Modell verwendet                       | Datenquelle                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Beschreibung Quelle</b>                                                          |                       |                                           |                                                                                                                      |
| Diffusionskoeffizient                                                               | [m <sup>2</sup> /a]   | 0,01578                                   | Literatur                                                                                                            |
| Trockenraumdichte Quelle                                                            | [kg/dm <sup>3</sup> ] | 1,5                                       | Standortuntersuchung [14]                                                                                            |
| Schadstoffgehalt Quelle                                                             | [mg/kg]               | 40                                        | abgeleitet aus gemessener Schadstoffmasse: 3 g/m <sup>2</sup> [14]                                                   |
| Quellentyp                                                                          | [-]                   | B                                         | Verfügbarkeitslimitierte Freisetzung von Cadmium                                                                     |
| Mobilisierbarer Anteil                                                              | [%]                   | 100                                       | Annahme                                                                                                              |
| Initiale Quellkonzentration                                                         | [µg/L]                | 3920                                      | abgeleitet aus in [14] bestimmtem kd-Wert der obersten Bodenschicht                                                  |
| Abklingkoeffizient Quelle                                                           | [1/a]                 | 0,3811                                    | kalibriert anhand in [14] gemessener sorbierter Cadmiumgehalte im Profil                                             |
| <b>Standortbeschreibung</b>                                                         |                       |                                           |                                                                                                                      |
| Quelle OK                                                                           | [m u. GOK]            | 0                                         | Standortuntersuchung [14]                                                                                            |
| Quelle UK                                                                           | [m u. GOK]            | 0.05                                      | abgeleitet aus gemessener Schadstoffmasse: 3 g/m <sup>2</sup> [14]                                                   |
| Sickerwasserrate                                                                    | [mm/a]                | 234                                       | Standortuntersuchung [14]                                                                                            |
| Ort der Beurteilung                                                                 | [m u. GOK]            | 2,0                                       | Standortuntersuchung [14]                                                                                            |
| Temperatur Transportstrecke                                                         | [°C]                  | 15                                        | im vorliegenden Fall kein Einfluss                                                                                   |
| Disp-SF (gesamte Transportstrecke)                                                  | [-]                   | 0,014                                     | abgeleitet aus in [14] bestimmter Dispersivität von $\alpha = 1,4$ cm                                                |
| Anzahl der Schichten                                                                | [-]                   | 3                                         | Standortuntersuchung [14]                                                                                            |
| Bodenart                                                                            | [-]                   | Podsol (SI2)                              | Standortuntersuchung [14]                                                                                            |
| Schichtaufbau:<br>Schicht 1 von – bis<br>Schicht 2 von – bis<br>Schicht 3 von – bis | [m u. GOK]            | 0,05 – 0,25<br>0,25 – 0,45<br>0,45 - 2,00 | Standortuntersuchung [14]                                                                                            |
| <b>Transportparameter</b>                                                           |                       |                                           |                                                                                                                      |
| Trockenrohdichte Schicht 1 bis 3                                                    | [kg/dm <sup>3</sup> ] | 1,7                                       | berechnet aus Porosität und Reindichte von Sand: $\rho_t = n * \rho_s = 0,36 * 2,65$ kg/L                            |
| Feldkapazität Schicht 1 bis 3                                                       | [Vol%]                | 20                                        | nach KA5: SI2; $p_t=1,7$ ; $> 2\text{mm} = 13$ % und Humus = 0,25 %                                                  |
| Verteilungskoeffizient<br>Schicht 1<br>Schicht 2<br>Schicht 3                       | [L/kg]                | 63<br>40<br>8                             | ausgehend von Daten aus in [14] durchgeführten Laborversuchen kalibriert anhand im Gelände gemessener Cadmiumgehalte |

Tab. 3: Verwendete Eingabedaten zur Validierung des Cadmiumprofils

### B5.3 Hinweise zur Ermittlung der Eingabeparameter

Für die Durchführung einer Sickerwasserprognose mit ALTEX-1D (Version 3) ist der aufwändigste und zugleich kritischste Schritt die Ermittlung der Parameter, die für die realitätsnahe Nachbildung des Systems und der darin ablaufenden Stofftransprozesse notwendig sind. Um den Anwender bei der Parametrisierung zu unterstützen, werden in den folgenden Tabellen und Abbildungen Hinweise und Empfehlungen über

- den Einfluss des jeweiligen Parameters auf das Prognoseergebnis (hoch, mittel, gering),
- die typische Bandbreite der Parameterwerte,
- die Unsicherheit des Parameterwertes aufgrund des Bestimmungsverfahrens (hoch, mittel, gering) und
- die Herkunft der Werte

gegeben.

#### B5.3.1 Standort

Die Hinweise zu den Parametereingaben im Arbeitsblatt „Standort“ können der Tab. 4 entnommen werden.

| Kontaminations-<br>geometrie            | Einheit        | Einfluss | Bandbreite<br>(ungefähr) | Unsicherheit<br>Ermittlung | Herkunft                                                                     |
|-----------------------------------------|----------------|----------|--------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Kontaminationsfläche                    | m <sup>2</sup> | gering   | 10 – 100000              | gering                     | Standortuntersuchung                                                         |
| Quelle OK                               | m u. GOK       | hoch     | 0 - 20                   | gering                     | Standortuntersuchung                                                         |
| Quelle UK                               | m u. GOK       | hoch     | 0,1 - 20                 | gering                     | Standortuntersuchung                                                         |
| <b>Wasserhaushalt</b>                   |                |          |                          |                            |                                                                              |
| Sickerwasserrate                        | mm/a           | mittel   | 50 - 500                 | gering                     | im Programm integriert:<br>Beims & Gutt;<br>alternativ: TUBBGR-<br>Verfahren |
| <b>Transportstrecke</b>                 |                |          |                          |                            |                                                                              |
| Ort der Beurteilung                     | m u. GOK       | hoch     | 1 - 20                   | gering                     | Mittelwert der höchsten<br>Grundwasserstände                                 |
| mittlere Temperatur<br>Transportstrecke | °C             | gering   | 12 – 18                  | gering                     | Standortuntersuchung<br>Default: 15 °C                                       |
| Dispersivitäts-<br>Skalenfaktor         | -              | mittel   | 0,01 - 1                 | mittel                     | siehe Abb. 14 /<br>Default: 0.1 [-]                                          |
| Vorbelastung<br>Transportstrecke        | µg/L           | hoch     | 0 - 1                    | gering                     | Standortuntersuchung                                                         |
| <b>Typisches<br/>Schichtprofil</b>      |                |          |                          |                            |                                                                              |
| Schicht-Anzahl                          | -              | gering   | 1 - 20                   | gering                     | Standortuntersuchung                                                         |
| Schicht-Aufbau                          | -              | hoch     |                          | gering                     | Standortuntersuchung                                                         |

Tab. 4: Hinweise zu den Parameterwerten im Arbeitsblatt „Standort“

Sofern nicht der Standardwert (0,1) verwendet wird, kann der Dispersivitäts-Skalenfaktor mit der Formel in Abb. 14 abgeschätzt werden.

Der Dispersions-Skalenfaktor  $fd$  kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$fd = \frac{\alpha_L}{d} \quad \begin{array}{l} \alpha_L = \text{Longitudinale Dispersivität [cm]} \\ d = \text{Transportstrecke [cm]} \end{array}$$

Nach Vanderborght & Vereecken (2007) wurden die folgenden 2 Regressionsgleichungen zur Bestimmung von  $\alpha_L$  ermittelt:

$$\alpha_L = 0,046 \cdot d + 1,23$$

$$\alpha_L = 0,33 \cdot d^{0,62}$$

Abb. 14: Abschätzformel für den Dispersivitäts-Skalenfaktor

### B5.3.2 Quelle

Die Hinweise zu den Parametereingaben im Arbeitsblatt „Quelle“ können der Tab. 5 entnommen werden.

| Schadstoff-<br>charakterisierung                                                        | Einheit | Einfluss | Bandbreite<br>(ungefähr)       | Unsicherheit<br>Ermittlung | Herkunft                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------|
| Prüfwert BBodSchV<br>organischer Schadstoff<br>anorganischer Schadstoff                 | µg/L    | mittel   | 0,1 – 2<br>1 - 750             | gering                     | im Programm<br>angegebene Werte oder<br>Literatur |
| GFS<br>organischer Schadstoff<br>anorganischer Schadstoff                               | µg/L    | mittel   | 0,0002 – 200<br>0,1 - 250000   | gering                     | im Programm<br>angegebene Werte oder<br>Literatur |
| Diffusionskoeffizient –<br>Wasser<br>organischer Schadstoff<br>anorganischer Schadstoff | m²/a    | gering   | 0,013 – 0,056<br>0,014 – 0,066 | gering                     | im Programm<br>angegebene Werte oder<br>Literatur |
| Diffusionskoeffizient –Luft<br>)                                                        | m²/a    | gering   | 121 - 490                      | gering                     | im Programm<br>angegebene Werte oder<br>Literatur |
| Henry – Konstante<br>)                                                                  | -       | gering   | 0 - 80                         | gering                     | im Programm<br>angegebene Werte oder<br>Literatur |
| Halbwertszeit<br>)                                                                      | a       | hoch     | 0,1 – 10                       | hoch                       | im Programm<br>angegebene Werte oder<br>Literatur |
| <b>Schadstoffmasse</b>                                                                  |         |          |                                |                            |                                                   |
| Durchschnittliche<br>Trockenraumdichte                                                  | kg/dm³  | gering   | 1.1 – 2.3                      | gering                     | siehe Abb. 15 bzw.<br>Standortuntersuchung        |
| Durchschnittlicher<br>Schadstoffgehalt                                                  | mg/kg   | hoch     | 100 - 100000                   | gering                     | Standortuntersuchung                              |
| <b>Schadstofffreisetzung</b>                                                            |         |          |                                |                            |                                                   |
| mobilisierbarer Anteil                                                                  | %       | hoch     | 0,1 - 100                      | gering                     | Elutionsversuche im<br>Labor                      |
| initiale Quellkonzentration                                                             | µg/L    | hoch     | 0,01 - 1000000                 | gering                     | Standortuntersuchung                              |

Tab. 5: Hinweise zu den Parameterwerten im Arbeitsblatt „Quelle“

\*) Angaben nur für organische Schadstoffe

### B5.3.3 Transport

#### a) Bodenkennwerte

Die Hinweise zu den Parametereingaben für die Bodenkennwerte im Arbeitsblatt „Transport“ können der Tab. 6 entnommen werden.

|                    | Einheit            | Einfluss | Bandbreite (ungefähr) | Unsicherheit Ermittlung | Herkunft                                         |
|--------------------|--------------------|----------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------------------|
| Trockenrohdichte   | kg/dm <sup>3</sup> | gering   | 1,2 – 1,8             | gering                  | Standortuntersuchung bzw. Abb. 15                |
| Grobbodenanteil *) | Vol %              | mittel   | 0 - 80                | gering                  | Standortuntersuchung / Literatur                 |
| Humusanteil *)     | Masse %            | gering   | 0 - 30                | gering                  | Standortuntersuchung / Literatur                 |
| Feldkapazität      | Vol %              | mittel   | 5 – 40                | gering                  | im Programm angegebene Richtwerte / aus der KA 5 |
| Luftkapazität      | Vol %              | mittel   | 2 - 40                | gering                  | im Programm angegebene Richtwerte                |

Tab. 6: Hinweise zu den Parameterwerten zur Ermittlung der Bodenkennwerte im Arbeitsblatt „Transport“ (\* Angaben zur Berechnung der Feld- und Luftkapazität)

Die Trockenraumdichte kann mit der Formel in Abb. 15 abgeschätzt werden.

Die Trockenraumdichte  $\rho_d$  kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$\rho_d = (1 - n) \cdot \rho_s$$

$$\rho_s = \rho_{\text{mineral}} \cdot c_{\text{mineral}} + \rho_{\text{org}} \cdot c_{\text{org}}$$

$\rho_s$  = Dichte der festen Bodensubstanz [kg/L]

$n$  = Gesamtporosität [-]

$\rho_{\text{mineral}}$  = Dichte der mineralischen Substanz, im Mittel 2,65 [kg/L]

$\rho_{\text{org}}$  = Dichte der organischen Substanz (Humus), im Mittel 1,3 [kg/L]

$c_{\text{mineral}}$  = Masseanteil der mineralischen Substanz [-]

$c_{\text{org}}$  = Masseanteil der organischen Substanz (Humus) [-]

Abb. 15: Abschätzformel für die Trockenraumdichte

#### b) kd-Werte

Die Hinweise zu den Parametereingaben für die Ermittlung der kd-Werte im Arbeitsblatt „Transport“ können der Tab. 7 entnommen werden.

|                                                                       | Einheit    | Einfluss       | Bandbreite<br>(ungefähr)  | Unsicherheit<br>Ermittlung | Herkunft                            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|----------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| pH-Wert<br>*)                                                         | -          | hoch           | 3 - 8                     | gering                     | Standortuntersuchung /<br>Literatur |
| Tongehalt<br>*)                                                       | Masse<br>% | mittel         | 0 - 80                    | gering                     | Standortuntersuchung /<br>Literatur |
| <u>Corg</u><br>*)                                                     | Masse<br>% | mittel         | 0 - 20                    | gering                     | Standortuntersuchung /<br>Literatur |
| Referenz-Konzentration<br>Linearisierung<br>*)                        | µg/L       | mittel         | 5 – 5000                  | gering                     | Initiale<br>Quellkonzentration      |
| <u>kd</u> -Wert<br>organischer Schadstoff<br>anorganischer Schadstoff | L/kg       | mittel<br>hoch | 0,003 - 5000<br>10 - 3000 | mittel<br>Mittel           | Labor<br>Literatur/                 |

Tab. 7: Hinweise zu den Parameterwerten zur Ermittlung der  $k_d$ -Werte im Arbeitsblatt „Transport“ (\* Angaben nur zur Berechnung des  $k_d$ -Wertes für anorganische Schadstoffe)

## B6 Literatur

- [1] LABO (2008): Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen. Stand 12/2008 Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) Altlastenausschuss Unterausschuss Sickerwasserprognose; 170 S.
- [2] BEIMS, U., GUTT, B. (2002): Entwicklung eines rationellen Verfahrens zur Bewertung von Bodenkontaminationen und deren Exposition (EXPOSI), Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben
- [3] MÜLLER, U. (2004): Auswertungsmethoden im Bodenschutz, Arbeitshefte Boden, Heft 2004/2, Nägele u. Obermiller, Stuttgart
- [4] ENGESER, B. (2008): Vorschlag für eine weiterentwickelte Anwendungsregel zur Berücksichtigung des Einmischprozesses von Sickerwasser in das Grundwasser bei der Bewertung von Ergebnissen aus der Sickerwasserprognose nach BBodSchV, im Auftrag des Altlastenausschusses (ALA) erstelltes Papier, Protokoll der 37. LABO-Sitzung am 11./12.3.2010 in Gelsenkirchen
- [5] LABO (2010): Harmonisierung der wasser- und bodenschutzrechtlichen Bewertungsmaßstäbe , TOP 11 Protokoll der 37. LABO-Sitzung am 11.12.3.2010
- [6] BMU (2017): Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, Artikel 2/§ 12 und 13
- [7] LAWÄ (2016): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016, Kulturbuch-Verlag, Berlin
- [8] UTERMANN, J. (2005): Entwicklung eines Verfahrens zur Quantifizierung von Stoffkonzentrationen im Sickerwasser auf der Grundlage chemisch-physikalischer Pedotransferfunktionen, BMBF-Forschungsvorhaben 02WP0206
- [9] VAN DEN BERGH, R., ROELS, J. M. (1991): Beurteilung der Gefährdung des Menschen und der Umwelt durch Exposition gegenüber Bodenverunreinigungen , Bericht-Nr. 725201007 VROM, Niederlande
- [10] DIN 19740-2, Bodenbeschaffenheit – Umweltrelevante Anforderungen an den Bau und Betrieb von zivilen Schießstätten, Teil 2: Untersuchungen
- [11] ] VAN GENUCHTEN, 1981. Analytical solutions for chemical transport with simultaneous adsorption, zero-order production and first order decay.- J. of Hydrology. 49: 213-233 .
- [12] ] SCHNEIDER, W. (2008): Erweiterung des Modells „Altex-1D“ für Sickerwasserprognosen für flüchtige Schadstoffe im geschichteten Bodenprofil.- Altlastenspektrum; 5(2008); S. 206-213.
- [13] ZHANG, R., YANG, J. & YE, Z. (1996): Solute transport through the vadose zone: A field study and stochastic analyses.- Soil Science 161(5), pp 270-277.
- [14] SEUNTJENS, P. (2002): Field-scale cadmium transport in a heterogeneous layered soil.- Water, Air, and Soil Pollution 140, pp 401-423.
- [15] TWARAKAWI, N.K.C., SAKAI, M. & SIMUNEK, J. 2009): An objective analysis of the dynamic nature of field capacity.- Water Resources Research 5: 206-213
- [16] VANDERBORGHT, J & VERECKEN, H. (2007): Review of dispersivities for transport modeling in soils.- Vadose Zone 6: 29-52.