

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 371374228/2  
UBA-FB-00 [trägt die UBA-Bibliothek ein]

# **Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil II: Modellierung der Stoffmigration und Erarbeitung eines DV-gestützten Leitfadens Stofffreisetzungverhalten mineralischer Abfälle**

## **Abschlussbericht**

von

Michael Finkel, Bernd Susset, Peter Grathwohl, Zentrum für Angewandte  
Geowissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Eberhard Karls  
Universität Tübingen Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Hölderlinstr. 12,  
72074 Tübingen

März 2019

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Kurzbeschreibung

Auf Basis der Ergebnisse aus dem Verbundprojekt "Sickerwasserprognose" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (2005 bis 2011) wurde durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) und das Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG) der Universität Tübingen in den vergangenen Jahren ein Fachkonzept zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten (ME) für den Einsatz von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) in technischen Bauweisen entwickelt. Die Ableitungssystematik basiert auf einer antizipierenden Sickerwasserprognose, in der die Stofffreisetzung (Quellterm) und die Stoffmigration im Sickerwasser (Transportterm) betrachtet werden. Die Ableitungssystematik bildet die fachliche Grundlage für die Kabinettsfassung der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) als Artikel 2 der Mantelverordnung (MantelV) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) vom 03.05.2017.

Mit dem neu entwickelten Excel-basierten anwenderfreundlichen Softwarewerkzeug BEMEB (Bewertung des Einbaus mineralischer Ersatzbaustoffe) (i) werden alle Berechnungs- und Bewertungsschritte zur Ableitung medienschutzbasierter Einbauwerte, einschließlich der erforderlichen Eingangsdaten und der Ausgabe der Tabellen zur Anwendung der EBV bereitgestellt, (ii) erhalten alle an der Wiederverwertung mineralischer Ersatzbaustoffe beteiligten Akteure einen einfachen Zugang zur Ableitungssystematik und (iii) wird die Möglichkeit geschaffen, über das bisherige Maß hinausgehende Verwertungsmöglichkeiten für mineralische Einbaumaterialien zu realisieren und Untergrundkonstellationen zu bewerten, die von den Standardfällen und -szenarien der EBV abweichen.

## Abstract

On the basis of the results of the joint project "Sickerwasserprognose" of the Federal Ministry of Education and Research (2005 to 2011), the State Agency for Nature, Environment and Consumers North Rhine-Westphalia (LANUV NRW) and the Center for Applied Geosciences (ZAG) of the University of Tübingen developed a technical concept for the derivation of media-related application values (ME) for the use of recycled mineral waste materials (MEB) in technical constructions. The derivation method is based on an anticipating groundwater risk assessment, in which the compounds' release/leaching (source term) and their subsequent vertical migration (transport term) are considered. The derivation method forms the technical basis for the cabinet version of the German Recycling Regulation (EBV) as Article 2 of the Comprehensive Regulation (MantelV) of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) of 03.05.2017.

The newly developed Excel-based user-friendly software tool BEMEB provides (i) all the calculation and evaluation steps needed to derive media-protected application values, including all required input data and the output tables with application values and recycling material's applicability in line with the EBV, (ii) an easy access to the derivation method for all actors involved in the reuse of recycled mineral waste materials, and (iii) the opportunity to examine further application opportunities for recycled mineral waste materials and to assess reuse options also for situations that differ from standard cases and scenarios defined in the EBV.

## Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildungsverzeichnis .....  | 13 |
| Tabellenverzeichnis .....  | 21 |
| Abkürzungsverzeichnis .....  | 23 |
| Zusammenfassung .....  | 27 |
| Summary .....  | 35 |
| 1 Einleitung .....   | 43 |
| 1.1 Hintergrund und Veranlassung .....   | 43 |
| 1.2 Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte .....  | 44 |
| 1.2.1 Allgemeine Zielsetzung .....   | 44 |
| 1.2.2 Aufgabenstellung .....   | 44 |
| 1.3 Struktur des Berichtes .....   | 45 |
| 2 Fachliche Grundlagen .....   | 47 |
| 2.1 Fachkonzept zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von mineralischen<br>Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien .....                        | 47 |
| 2.1.1 Einführende Hinweise .....   | 47 |
| 2.1.2 Antizipierende Sickerwasserprognose .....  | 51 |
| 2.1.3 Materialqualitäten und Materialklassen .....   | 52 |
| 2.1.4 Einbauweisen .....   | 53 |
| 2.1.5 Stofffreisetzungsprozesse und -muster .....  | 53 |
| 2.1.6 Klassifizierung der Untergrundverhältnisse .....   | 56 |
| 2.1.6.1 Untergrundkonstellation: Günstige vs. ungünstige Verhältnisse: .....   | 56 |
| 2.1.6.2 Bodenarten .....   | 56 |
| 2.1.7 Systematik zur Ableitung von medianschutzbasierten Einbauwerten .....  | 56 |
| 2.1.7.1 Standardbewertung vs. individuelle Bewertung .....   | 56 |
| 2.1.7.2 Allgemeine Festlegungen und Konventionen der Standardbewertung .....   | 57 |
| 2.1.7.3 Schritte der Standardbewertung .....   | 58 |
| 2.1.7.4 Ausnahmen von den allgemeinen Konventionen für einzelne<br>Stoffkomponenten und Ersatzbaustoffe .....                                  | 64 |
| 2.2 Modellierung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und<br>Bodenmaterialien in den Einbauweisen der EBV – Quellterm ..... | 64 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.2.1   | Einführende Hinweise .....  | 64 |
| 2.2.2   | Infiltrationsraten als Funktion von Niederschlag, Abflussbeiwert,<br>Bauwerkgeometrie und empirischen Kenntnissen .....   | 65 |
| 2.2.2.1 | Berechnungsverfahren .....  | 65 |
| 2.2.2.2 | Straßendämme (Einbauweisen 7, 8a bis 8c, 10, 16a und 16b) .....   | 66 |
| 2.2.2.3 | Verfüllungen, Bodenverbesserungen und -verfestigungen (Einbauweisen 11,<br>12, 13a bis 13c) .....   | 67 |
| 2.2.2.4 | Pflasterdecken und Plattenbeläge (Einbauweisen 14a bis 14c und 15a bis<br>15c) .....  | 67 |
| 2.2.2.5 | Schutzwälle (Einbauweisen 17a und 17b) .....  | 68 |
| 2.2.2.6 | Bahnbauweise „Schotteroberbau“ (Einbauweisen B1 bis B15 und B20 bis<br>B26) .....   | 68 |
| 2.2.2.7 | Bahnbauweise „Feste Fahrbahn“ (Einbauweisen B16 bis B19) .....  | 68 |
| 2.2.3   | Verdünnungs- und Mittelungseffekte bei teildurchströmten Einbauweisen in technischen<br>Bauwerken und mittlere Sickerwasserrate an der<br>Bauwerkunterkante ..... | 68 |
| 2.2.4   | Beschreibung der zeitlich abklingenden Freisetzung mittels Typkurven .....  | 71 |
| 2.3     | Berechnung der Stoffanreicherung im Unterboden .....  | 73 |
| 2.3.1   | Berechnungsverfahren .....  | 73 |
| 2.3.2   | Berechnungsparameter: Eingangsgrößen der Bewertung .....  | 76 |
| 2.3.2.1 | Bodenkennwerte .....  | 76 |
| 2.3.2.2 | Filterkapazität .....   | 76 |
| 2.3.2.3 | Mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerk-UK .....   | 76 |
| 2.4     | Modellierung des Transports der im Sickerwasser gelösten Stoffe – Transportterm .....   | 76 |
| 2.4.1   | Analytische Modelle für die Beschreibung des Stofftransport .....   | 76 |
| 2.4.2   | Iterative Suche nach der maximal zulässigen Konzentration im Sickerwasser an<br>der Unterkante (UK) des Bauwerks .....  | 78 |
| 2.4.3   | Ableitung konzentrationsabhängiger Verteilungskoeffizienten aus<br>substratübergreifenden Isothermen .....  | 80 |
| 2.4.4   | Linearisierung der nicht-linearen Isotherme .....   | 80 |
| 2.4.5   | Berechnungsparameter: Eingangsgrößen der Bewertung .....  | 81 |
| 2.4.5.1 | Kritischer Wert am Ort der Beurteilung (OdB) .....  | 81 |
| 2.4.5.2 | Bodenkennwerte .....  | 82 |
| 2.4.5.3 | Sorptionsparameter .....  | 82 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 2.4.5.4  | Abbauparameter .....   | 82  |
| 2.4.5.5  | Mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerk-UK .....  | 82  |
| 3        | Software-Tool BEMEB .....  | 83  |
| 3.1      | Grundgedanken, Eckpunkte des Entwicklungskonzepts .....  | 83  |
| 3.2      | Daten-Modell .....   | 83  |
| 3.3      | Tabellenblätter.....   | 84  |
| 3.3.1    | Übersicht .....  | 84  |
| 3.3.2    | Tabellenblätter für die Datenhaltung .....   | 87  |
| 3.3.3    | Tabellenblätter für die Berechnung .....   | 88  |
| 3.3.3.1  | Bestimmung der Sickerwasserraten-Szenarien (Blatt<br>"Sickerwasserraten_cal") .....  | 88  |
| 3.3.3.2  | Berechnung des konzentrationsabhängigen Sorptionskoeffizienten für<br>Metalle mit Hilfe einer multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt<br>"Sorption_cal") .....   | 89  |
| 3.3.3.3  | Prüfung der Einbaufähigkeit einer Materialklasse eines mineralischen<br>Ersatzbaustoffs (Blatt "Material_cal") .....   | 93  |
| 3.3.3.4  | Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser am OdB am Ende des<br>Bewertungszeitraums für Quellterme mit einer langfristig konstanten<br>Stofffreisetzungsrate (Blatt "Wert_cal") .....  | 93  |
| 3.3.3.5  | Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration im Sickerwasser am OdB<br>innerhalb des Bewertungszeitraums für einen unendlichen oder endlichen Quellterm<br>mit konstanter Stofffreisetzungsrate (Blatt "BTC_cal") .....   | 95  |
| 3.3.3.6  | Berechnung des Konzentrationsprofils zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu<br>einem gegebenen Zeitpunkt für einen unendlichen oder endlichen<br>Quellterm mit konstanter Freisetzungsrate (Blatt "Prof_cal").....   | 98  |
| 3.3.3.7  | Berechnung der maximal zulässigen Quellterm-Anfangskonzentration und<br>des medienschutzbasierten Einbauwerts von Salzen und anderen Stoffen<br>mit exponentiell abklingender Freisetzungsrate zur Einhaltung vorgegebener<br>Grenzwerte an der Bauwerk-UK (Blatt "Salze_cal") ..... | 100 |
| 3.3.3.8  | Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration von Salzen im<br>Sickerwasser an der Bauwerk-UK bei exponentiell abklingender<br>Freisetzungsrate (Blatt "QTabkl_cal") .....   | 102 |
| 3.3.3.9  | Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration am OdB<br>innerhalb des Bewertungszeitraums für einen exponentiell abklingenden<br>Quellterm (Blatt "BTCabkl_cal") .....   | 103 |
| 3.3.3.10 | Berechnung der Stoffkonzentration von Stoffen im Sickerwasser an der Bauwerk-UK<br>zum bewertungsrelevanten Zeitpunkt bei einer nach dem   |     |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
|          | Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Freisetzungsrates (Blatt "QTabkl_Wert_cal(ADE)") .....  | 106 |
| 3.3.3.11 | Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration von Stoffen im Sickerwasser an der Bauwerk-UK bei einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Freisetzungsrates (Blatt "QTabkl_cal(ADE)") .....  | 107 |
| 3.3.3.12 | Berechnung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu einem gegebenen Zeitpunkt für einen exponentiell abklingenden Quellterm (Blatt "Profabkl_cal").....   | 108 |
| 3.3.4    | Tabellenblätter für die Visualisierung .....  | 110 |
| 3.3.4.1  | Darstellung des Konzentrationsverlaufs über die Zeit am OdB für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzungsrates (Blatt "BTC_plot") .....   | 110 |
| 3.3.4.2  | Darstellung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser entlang der Sickerstrecke zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB für einen ausgewählten Zeitpunkt für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzungsrates (Blatt "Prof_plot") ..... | 112 |
| 3.3.4.3  | Darstellung des Konzentrationsverlaufs über die Zeit am OdB und innerhalb des Quellterm für einen Quellterm mit abklingender Stofffreisetzungsrates (Blatt "BTCabkl_plot") .....  | 113 |
| 3.3.4.4  | Darstellung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser entlang der Sickerstrecke zwischen der UK des Bauwerks und dem OdB für einen Quellterm mit abklingender Freisetzungsrates (Blatt "Profabkl_plot") .....   | 115 |
| 3.3.4.5  | Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Stofffreisetzung für einen Quellterm mit einer exponentiell abklingenden Stofffreisetzungsrates (Blatt "QTabkl_plot") .....   | 116 |
| 3.3.4.6  | Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Stofffreisetzung für einen Quellterm mit einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Stofffreisetzungsrates (Blatt "QTabkl_plot(ADE)") .....   | 117 |
| 3.3.5    | Tabellenblätter für die Speicherung der Bewertungsergebnisse .....  | 118 |
| 3.3.5.1  | Maximal zulässige Quelltermkonzentrationen (Blätter "maxQTK_*").....  | 118 |
| 3.3.5.2  | Medienschutzbasierte Einbauwerte (Blätter "ME_*") .....   | 120 |
| 3.3.5.3  | Einsatztabellen (Blätter "Einsatz_*") .....   | 121 |
| 3.4      | Graphische Benutzeroberfläche .....   | 123 |
| 3.4.1    | Menüleiste .....  | 123 |
| 3.4.2    | Daten laden oder sichern .....  | 124 |
| 3.4.3    | Bewertungsmöglichkeiten (intern) .....  | 124 |
| 3.4.3.1  | Express-Bewertung .....   | 125 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 3.4.3.2 | Individuelle Bewertung .....   | 129 |
| 3.4.3.3 | Suche geeigneter Einbauweisen .....  | 131 |
| 3.4.4   | Ergebnisausgabe, Berichte .....  | 132 |
| 3.4.5   | Hilfe, Einstellungen, etc. ....  | 133 |
| 3.4.5.1 | Hilfe.....   | 133 |
| 3.4.5.2 | Sichtbarkeit .....   | 133 |
| 3.4.5.3 | Einstellungen .....  | 134 |
| 3.5     | Dateien und Formate .....  | 135 |
| 3.5.1   | Eingabedaten .....   | 135 |
| 3.5.2   | Ergebnisausgabe .....  | 136 |
| 3.5.2.1 | Ergebnistabellen für die Standardbewertung .....                                 | 136 |
| 3.5.2.2 | Ergebnisberichte für die individuelle Bewertung .....                            | 136 |
| 3.6     | Anbindung und Verwendung von WinSMART für die Einzelfallbewertung (extern) ..... | 137 |
| 3.6.1   | Einführende Hinweise .....   | 137 |
| 3.6.2   | Funktionsweise der Schnittstelle zwischen BEMEB und WinSMART .....               | 137 |
| 3.7     | Systemvoraussetzungen für BEMEB .....  | 140 |
| 3.8     | Hinweise zur Installation von BEMEB .....  | 141 |
| 3.9     | Bekannte Probleme .....  | 142 |
| 4       | BEMEB-Anwendung anhand von Beispielen .....                                      | 145 |
| 4.1     | Express-Bewertung .....  | 145 |
| 4.1.1   | Komplette Neubewertung .....   | 145 |
| 4.1.2   | Neubewertung als Aktualisierung .....  | 146 |
| 4.1.3   | Neubewertung der Einbaumöglichkeiten .....                                       | 147 |
| 4.2     | Individuelle Bewertung .....   | 147 |
| 4.2.1   | Bewertung der Einbaumöglichkeiten für Ersatzbaustoffe .....                      | 147 |
| 4.2.1.1 | EBV-Standardszenario .....   | 147 |
| 4.2.1.2 | Vom Standard abweichende Szenarien .....   | 153 |
| 4.2.2   | Suche geeigneter Einbauweisen .....  | 159 |
| 5       | Quellenverzeichnis .....   | 161 |
| 6       | Anhang .....   | 165 |
| 6.1     | Berechnungsparameter für die Ableitung von medianschutzbasierten                 |     |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
|       | Einbauwerten .....   | 165 |
| 6.2   | Ergänzende Informationen zu den Inhalten der BEMEB-Tabellenblätter ..... | 174 |
| 6.3   | BEMEB-Eingangsdaten: Inhalte der xml-Dateien .....                       | 183 |
| 6.3.1 | Boeden.xml .....   | 183 |
| 6.3.2 | Boeden.xml .....   | 184 |
| 6.3.3 | Einbauweisen.xml .....   | 185 |
| 6.3.4 | Materialwerte.xml .....  | 185 |



## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Unterteilung der antizipierenden Sickerwasserprognose in einen Quellterm und einen Transportterm und der Entwicklung der Stoffkonzentration im Sickerwasser. Unter Feldbedingungen werden i. d. R. maximale Stoffkonzentrationen im Sickerwasser an der UK des Quellterms erreicht (z.B. Grathwohl und Susset 2009). In der weiteren Sickerwasserpassage im Unterboden (Transportterm) kann mikrobiologischer Abbau zu einem dauerhaften Rückgang der Sickerwasserkonzentrationen (Grathwohl und Susset 2001; Susset 2004) und Sorption an die Bodenmatrix zu einer Verzögerung des Durchbruchs der Konzentrations-“Front“ am Ort der Beurteilung (OdB) führen. Zudem kommt es zu einer (i. d. R. vorübergehenden) Stoffanreicherung im Boden. .... | 52 |
| Abbildung 2-2: Teilschritte der Ableitungssystematik für Metalle und Organika, die kein deutliches und regelmäßig nachgewiesenes Abklingverhalten der Freisetzung aus dem betrachteten Material zeigen, bei günstigen Verhältnissen. ....   | 60 |
| Abbildung 2-3: Teilschritte der Ableitungssystematik für Stoffkomponenten oder –gruppen und Materialien, für die ein deutliches Abklingverhalten der Freisetzung reproduzierbar nachgewiesen werden konnte bei günstigen Verhältnissen. ....  | 61 |
| Abbildung 2-4: Teilschritte der Ableitungssystematik für Metalle und Organika sowie Fluorid, die kein deutliches und regelmäßig nachgewiesenes Abklingverhalten der Freisetzung aus dem betrachteten Material zeigen, bei ungünstigen Verhältnissen. ....   | 62 |
| Abbildung 2-5: Teilschritte der Ableitungssystematik für Stoffkomponenten oder –gruppen und Materialien, für die ein deutliches Abklingverhalten der Freisetzung reproduzierbar nachgewiesen werden konnte bei ungünstigen Verhältnissen oder wenn die Verhältnisse nicht relevant  |    |

sind, weil kein nennenswerter Rückhalt oder Abbau gegeben ist und daher der Transportterm nicht berücksichtigt wird (bei Chlorid und Sulfat). ..... 63

Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der Bilanzierung von Niederschlag, Evapotranspiration und Fahrbahnabfluss am Beispiel des Szenarios „niedriger Straßendamm“. Infiltrationsraten können flächenbezogen (in mm/a) oder als volumetrische Rate je m Bauwerklänge (in L/a pro m) angegeben werden. .... 67

Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Bilanzierung von Niederschlag, Evapotranspiration und Oberflächenabfluss für Pflaster- und Plattenbeläge. .... 68

Abbildung 2-8: Strömungsvektoren und Potentiallinien der Sickerwasserströmung in einem Straßendamm. Die Strömungsvektoren sind mit Pfeilen dargestellt. Im vergrößerten Bereich wird der Kapillarsperreneffekt veranschaulicht. Die höhere Durchlässigkeit des nahezu wassergesättigten feinen Materials führt hier zu einem bevorzugten Fließen oberhalb des Übergangs zum grobkörnigen Material. Dadurch werden mineralische Ersatzbaustoffe in der Schottertagschicht (STS) und in der Frostschuttschicht (FSS) nur teilweise durchströmt (verändert nach Susset et al. 2013; S. 37). .... 70

Abbildung 2-9: Schematische Darstellung der für die Berücksichtigung von Verdünnungseffekten relevanten Teilsickerwasserraten am Beispiel des Szenarios „niedriger Straßendamm“. Dargestellt sind die Ergebnisse der hydraulischen Simulation. Hinweis: Die Infiltrationsraten im Modell sind geringfügig höher als die nominellen Werte; da mit den Sickerwasserratenverhältnissen relative Ergebniswerte berechnet werden, ist dies jedoch von untergeordneter Bedeutung. .... 71

Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Ermittlung eines Sorptionsverteilungskoeffizienten durch Linearisierung der nicht-linearen Sorptionsisotherme mit Hilfe des Verfahrens „K<sub>d</sub> Mitte“ am

Beispiel der substratübergreifenden Sorptionsisotherme für Chrom  
an sandigem Unterboden (EBV-Bodenkategorie „Sand“). ..... 81

Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Daten, welche in BEMEB verarbeitet  
werden ..... 84

Abbildung 3-2: Tabellenblatt zur Datenhaltung (Blatt "Verbindungen") ..... 88

Abbildung 3-3: Tabellenblatt zur Bestimmung der Sickerwasserratenszenarien (Blatt  
"Sickerwasserraten\_cal") ..... 89

Abbildung 3-4: Tabellenblatt zur Berechnung des konzentrationsabhängigen  
Sorptionskoeffizienten für Metalle mit Hilfe einer  
multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt "Sorption\_cal") – Teil  
1 ..... 90

Abbildung 3-5: Tabellenblatt zur Berechnung des konzentrationsabhängigen  
Sorptionskoeffizienten für Metalle mit Hilfe einer  
multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt "Sorption\_cal") – Teil  
2 ..... 91

Abbildung 3-6: Tabellenblatt zur Berechnung des konzentrationsabhängigen  
Sorptionskoeffizienten für Metalle mit Hilfe einer  
multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt "Sorption\_cal") – Teil  
3 ..... 91

Abbildung 3-7: Tabellenblatt zur Berechnung des konzentrationsabhängigen  
Sorptionskoeffizienten für Metalle mit Hilfe einer  
multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt "Sorption\_cal") – Teil  
4 ..... 92

Abbildung 3-8: Tabellenblatt zur Berechnung des konzentrationsabhängigen  
Sorptionskoeffizienten für Metalle mit Hilfe einer  
multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt "Sorption\_cal") – Teil  
5 ..... 92

Abbildung 3-9: Tabellenblatt zum Vergleich der Materialwerte (MW) mit den  
medienschutzbasierten Einbauwerten (ME) (Blatt "Material\_cal") ..... 93

Abbildung 3-10: Tabellenblatt zur Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser am OdB am Ende des Bewertungszeitraums für einen Quellterm mit langfristig konstanter Stofffreisetzungsrates (Blatt "Wert\_cal") – Teil 1 ..... 94

Abbildung 3-11: Tabellenblatt zur Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser am OdB am Ende des Bewertungszeitraums für einen Quellterm mit langfristig konstanter Stofffreisetzungsrates (Blatt "Wert\_cal") – Teil 2 ..... 95

Abbildung 3-12: Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrates (Blatt "BTC\_cal") – Teil 1 ..... 96

Abbildung 3-13: Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrates (Blatt "BTC\_cal") – Teil 2 ..... 97

Abbildung 3-14: Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrates (Blatt "BTC\_cal") – Teil 3 ..... 98

Abbildung 3-15: Tabellenblatt zur Berechnung des Konzentrationsprofils zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu einem gegebenen Zeitpunkt für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrates (Blatt "Prof\_cal") – Teil 1 ..... 99

Abbildung 3-16: Tabellenblatt zur Berechnung des Konzentrationsprofils zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu einem gegebenen Zeitpunkt für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrates (Blatt "Prof\_cal") – Teil 2 ..... 100

Abbildung 3-17: Tabellenblatt zur Berechnung der maximal zulässigen Quellterm-Anfangskonzentration und des medienschutzbasierten Einbauwerts

von Salzen bei abklingender Freisetzungsrates zur Einhaltung vorgegebener Grenzwerte an der Bauwerk-UK (Blatt "Salze\_cal") –

Teil 1 ..... 101

Abbildung 3-18: Tabellenblatt zur Berechnung der maximal zulässigen Quellterm-Anfangskonzentration und des medien-schutzbasierten Einbauwerts von Salzen bei abklingender Freisetzungsrates zur Einhaltung vorgegebener Grenzwerte an der Bauwerk-UK (Blatt "Salze\_cal") –

Teil 2 ..... 102

Abbildung 3-19: Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration von Salzen im Sickerwasser an der Bauwerk-UK bei abklingender Freisetzungsrates (Blatt "QTabkl\_cal") ..... 103

Abbildung 3-20: Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration im Sickerwasser am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen abklingenden Quellterm (Blatt "BTCabkl\_cal") – Teil 1 ..... 105

Abbildung 3-21: Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen abklingenden Quellterm (Blatt "BTCabkl\_cal") – Teil 2 ..... 106

Abbildung 3-22: Tabellenblatt zur Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser an der Bauwerk-UK zum bewertungsrelevanten Zeitpunkt bei einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Stofffreisetzung (Blatt "QTabkl\_Wert\_cal(ADE)") ..... 107

Abbildung 3-23: Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration im Sickerwasser an der Bauwerk-UK bei einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Stofffreisetzung (Blatt "QTabkl\_cal(ADE)") ..... 108

Abbildung 3-24: Tabellenblatt zur Berechnung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu einem

gegebenen Zeitpunkt für einen abklingenden Quellterm (Blatt "Profabkl\_cal") – Teil 1 ..... 109

Abbildung 3-25: Tabellenblatt zur Berechnung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu einem gegebenen Zeitpunkt für einen abklingenden Quellterm (Blatt "Profabkl\_cal") – Teil 2 ..... 110

Abbildung 3-26: Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs im Sickerwasser an der Bauwerk-UK und am OdB sowie der Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke als Grad der Ausschöpfung der maximalen Filterkapazität für einen Quellterm mit langfristig konstanter Freisetzungsrate (Blatt "BTC\_plot") – Teil 1 ..... 111

Abbildung 3-27: Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs im Sickerwasser an der Bauwerk-UK und am OdB sowie der Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke als Grad der Ausschöpfung der maximalen Filterkapazität für einen Quellterm mit langfristig konstanter Freisetzungsrate (Blatt "BTC\_plot") – Teil 2 ..... 112

Abbildung 3-28: Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser entlang der Sickerstrecke zwischen der UK des Bauwerks und dem OdB für einen Quellterm mit langfristig konstanter Freisetzungsrate (Blatt "Prof\_plot") ..... 113

Abbildung 3-29: Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht, an der Bauwerk-UK und am OdB sowie der Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke als Grad der Ausschöpfung der maximalen Filterkapazität für einen Quellterm mit abklingender Freisetzungsrate (Blatt "BTCabkl\_plot"): Beispiel einer individuellen Bewertung von Antimon in CUM für Einbauweise B1 unter Berücksichtigung des zeitlich abklingenden Quellterms mit dem Anreicherungskriterium als maßgebendes Kriterium) – Teil 1 ..... 114

Abbildung 3-30: Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht, an der Bauwerk-UK und am OdB sowie der Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke als Grad der Ausschöpfung der maximalen Filterkapazität für einen Quellterm mit abklingender Freisetzungsrate (Blatt "BTCabkl\_plot"): Beispiel einer individuellen Bewertung von Antimon in CUM für Einbauweise B1 unter Berücksichtigung des zeitlich abklingenden Quellterms mit dem Anreicherungskriterium als maßgebendes Kriterium) – Teil 2 ..... 115

Abbildung 3-31: Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser entlang der Sickerstrecke für einen Quellterm mit abklingender Freisetzungsrate (Blatt "Profabkl\_plot"): Beispiel einer individuellen Bewertung von Vanadium in SFA für Einbauweise B1 nach 40 Jahren. .... 116

Abbildung 3-32: Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht sowie der UK des Bauwerks bei einer exponentiell abklingenden Freisetzungsrate (Blatt "QTabkl\_plot"): Beispiel einer individuellen Bewertung von Sulfat in HOS für die Einbauweise B1 ..... 117

Abbildung 3-33: Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht sowie der UK des Bauwerks bei einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Freisetzungsrate (Blatt "QTabkl\_plot(ADE)": Beispiel einer individuellen Bewertung von Antimon in CUM für die Einbauweise B1 ..... 118

Abbildung 3-34: Tabellenblatt zur Speicherung der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen (hier Blatt "maxQTK\_StrWege\_Sand" für die Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für einen sandigen Unterboden). .... 119

Abbildung 3-35: Tabellenblatt zur Speicherung der medien-schutz-basierten Einbauwerte (ME) (hier Blatt "ME\_StrWege1" für die Einbauweisen

des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Stoffkomponenten Antimon,  
Arsen, Blei, Cadmium, Chrom (ges.) und Kupfer). ..... 121

Abbildung 3-36: Tabellenblatt zur Speicherung der Einsatztabelle des jeweils aktuell  
bewerteten MEB (hier Blatt "Einsatz\_StraWege" für die Einbauweisen  
des Straßen-, Wege- und Erdbaus für den MEB BG-3) ..... 123

Abbildung 3-37: Menüleiste des BEMEB-Werkzeugs in Excel ..... 124

Abbildung 3-38: Optionen zum Laden oder Speichern von Daten (hier bezüglich der  
chemischen Verbindungen) ..... 124

Abbildung 3-39: Interne Bewertungsmöglichkeiten in der BEMEB-Menüleiste ..... 125

Abbildung 3-40: Benutzerführung „Express-Bewertung“ ..... 127

Abbildung 3-41: Benutzerformular „Individuelle Bewertung“ mit Ergebnis einer  
individuellen Bewertung für alle relevanten Stoffkomponenten eines  
mineralischen Ersatzbaustoffs (hier für die Materialklasse RC-1) in  
einer bestimmten Einbauweise (hier: 10 - Damm oder Wall gemäß  
Bauweise E nach MTSE) ..... 131

Abbildung 3-42: Benutzerführung „Einsatzmöglichkeiten des Ersatzbaustoffs“ ..... 132

Abbildung 3-43: Ergebnisausgabemöglichkeiten in der BEMEB-Menüleiste ..... 132

Abbildung 3-44: Benutzerführung „Ergebnisausgabe“ ..... 133

Abbildung 3-45: Bereich „Hilfe, Einstellungen“ in der BEMEB-Menüleiste ..... 133

Abbildung 3-46: Benutzerformular „Sichtbarkeit“ der Tabellenblätter ..... 134

Abbildung 3-47: Benutzerführung „Einstellungen“ ..... 135

Abbildung 3-48: Benutzerformular „Individuelle Bewertung“ mit aktivierter  
Schnittstelle zum Simulationswerkzeug WinSMART nach erfolgter  
Bewertung eines Einzelstoffs (hier: Nickel aus Gießerei-  
Kupolofenschlacke (GKOS) in Einbauweise B8 bei sandigem  
Unterboden) ..... 138

Abbildung 3-49: Benutzerformular „Vor dem WinSMART-Aufruf – Prüfung und  
Ergänzung der Eingabeparameter“ ..... 139



|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 3-50: BEMEB-Meldung über die erfolgreiche Erstellung der WinSMART-Inputdatei im xml-Format .....   | 139 |
| Abbildung 3-51: WinSMART-Benutzeroberfläche nach erfolgter Simulation .....  | 140 |
| Abbildung 3-52: WinSMART-Benutzeroberfläche mit Simulationsergebnis .....  | 140 |
| Abbildung 3-53: MS Excel Einstellungen für Makros .....  | 141 |
| Abbildung 3-54: Inhalte des Arbeitsordners für BEMEB nach Entpacken der BEMEB-Archiv-Datei .....   | 141 |
| Abbildung 3-55: Erforderliche Verweise für MS Visual Basic for Applications (VBA) .....  | 142 |
| Abbildung 3-56: Anpassen der Excel-Optionen zur Anzeige der Entwicklertools .....  | 143 |
| Abbildung 4-1: Dialog nach Abschluss des ersten Arbeitsschritts der kompletten Neubewertung .....  | 145 |
| Abbildung 4-2: Tabellenblatt „Boeden“ nach den Änderungen zur Betrachtung eines von den Standardbodenarten der EBV abweichenden Bodens .....   | 146 |
| Abbildung 4-3: BEMEB-Formular „Ergebnisausgabe“: Angaben für die Ausgabe aller Ergebnisse der Bewertung als Excel-Tabellen .....   | 147 |
| Abbildung 4-4: Benutzerformular nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung aller materialrelevanter Stoffkomponenten und -gruppen eines MEB (hier für die Materialklasse RC-2 in der Einbauweise B5 bei sandigem Unterboden).....   | 148 |
| Abbildung 4-5: Benutzerformular nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung einer einzelnen materialrelevanten Stoffkomponente eines MEB (hier Vanadium in der Einbauweise B5) .....   | 149 |
| Abbildung 4-6: Ergebnisgrafiken nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung einer einzelnen materialrelevanten Stoffkomponente (Vanadium) eines MEB (RC-2): Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB (links oben), Konzentrationsprofil entlang der Sickerstrecke (rechts oben) sowie Entwicklung der Konzentration im Quellterm und der Stoffanreicherung (links unten), jeweils für die maximal zulässige |     |

|   |     |
|---|-----|
| Quelltermkonzentration in der Bauweise B5 bei sandigem Unterboden für das maßgebende Durchbruchskriterium. ....   | 150 |
| Abbildung 4-7:    Ergebnisgrafiken nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung einer einzelnen materialrelevanten Stoffkomponente (Vanadium) eines MEB (RC-2): Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB (links oben), Konzentrationsprofil entlang der Sickerstrecke (rechts oben) sowie Entwicklung der Konzentration im Quellterm und der Stoffanreicherung (links unten), jeweils für die maximal zulässige Quelltermkonzentration in der Bauweise B5 bei sandigem Unterboden für das nicht maßgebende Anreicherungskriterium. .... | 151 |
| Abbildung 4-8:    Benutzerformular nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung einer einzelnen materialrelevanten Stoffkomponente eines MEB, für die nur der Quellterm maßgebend ist (hier Sulfat in der Einbauweise B5). ....  | 152 |
| Abbildung 4-9:    Ergebnisgrafiken nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung einer einzelnen materialrelevanten Stoffkomponente eines MEB: Entwicklung der mittleren aktuellen und der kumulativen Konzentration an der UK des Bauwerks sowie an der UK des MEB für die von BEMEB ermittelte maximal zulässige Quelltermkonzentration (hier Sulfat in der Einbauweise B5). ....   | 153 |
| Abbildung 4-10:    Schematische Darstellung der Einflussgrößen bei der Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten. ....   | 154 |
| Abbildung 4-11:    Benutzerformular nach der individuellen Bewertung für Antimon in CUM-1 in der Einbauweise 14a für einen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzung. ....  | 156 |
| Abbildung 4-12:    Ergebnisplots der individuellen Bewertung für Antimon in CUM-1 in der Einbauweise 14a für einen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzung: Entwicklung der Konzentration im Quellterm und der Stoffanreicherung (links) und Konzentrationsdurchbruchskurve   |     |

am OdB (rechts). ..... 156

Abbildung 4-13: Benutzerformular zur Ausgabe der Ergebnisse nach der individuellen Bewertung für Antimon in CUM-1 in der Einbauweise 14a. .... 157

Abbildung 4-14: Benutzerformular für die individuelle Bewertung nach Abschluss der Bewertung für Antimon in CUM-1 in der Einbauweise 14a für einen Quellterm mit abklingender Stofffreisetzung ..... 158

Abbildung 4-15: Ergebnisplots der individuellen Bewertung für Antimon in CUM-1 in der Einbauweise 14a für einen Quellterm mit abklingender Stofffreisetzung: Entwicklung der Konzentration im Quellterm und der Stoffanreicherung (links) und Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB (rechts). ..... 158

Abbildung 4-16: Benutzerformular zur Suche von Einsatzmöglichkeiten für eine ausgewählte Materialklasse (hier: HMVA-1) ..... 159

Abbildung 4-17: Tabellenblatt „Einsatz\_StraWege“ nach der Suche der Einsatzmöglichkeiten für eine Materialklasse (hier: HMVA-1). ..... 160

## Tabellenverzeichnis

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Tabelle 2-1:  | Zusammenstellung der Begriffe und Definitionen des Fachkonzepts<br>der geplanten ErsatzbaustoffV .....   | 48  |
| Tabelle 2-2:  | Übersicht der Quelltermtypen, die in der Bewertungssystematik der<br>EBV unterschieden werden .....  | 55  |
| Tabelle 2-3:  | Übersicht der möglichen Bewertungsfälle .....  | 58  |
| Tabelle 3-1:  | Übersicht der Tabellenblätter des BEMEB-Tools .....  | 84  |
| Tabelle 3-2:  | Übersicht der Berechnungsoptionen zur Bestimmung des<br>Retardationsfaktors .....  | 90  |
| Tabelle 3-3:  | Diskretisierung der Berechnung des Konzentrationsverlaufs am OdB<br>bei einer exponentiell abklingenden Freisetzungsrates .....  | 104 |
| Tabelle 3-4:  | Diskretisierung der Berechnung des Konzentrationsverlaufs an der UK<br>der MEB-Schicht und an der Bauwerk-UK nach dem Advektions-<br>Dispersionsmodell .....                         | 107 |
| Tabelle 3-5:  | Übersicht der internen Bewertungsmöglichkeiten der BEMEB-<br>Software .....  | 125 |
| Tabelle 3-6:  | Übersicht der verschiedenen Modi der Express-Bewertung .....   | 126 |
| Tabelle 3-7:  | Übersicht der Ergebnisdateien der Bewertung .....  | 127 |
| Tabelle 3-8:  | Übersicht der Ergebnisdateien der individuellen Bewertung für<br>Einzelkomponenten .....   | 130 |
| Tabelle 3-9:  | Übersicht der Dateien der BEMEB-Eingangsdaten .....  | 135 |
| Tabelle 3-10: | Übersicht der Ergebnisausgabedateien der Standardbewertung .....   | 136 |
| Tabelle 3-11: | Übersicht der Ergebnisausgabedateien der individuellen Bewertung .....   | 136 |
| Tabelle 6-1:  | Kritischer Wert am OdB ( $KW_{\text{OdB}}$ : GFS bzw. BM) und maximale<br>Filterkapazitäten der Böden für die in der EBV berücksichtigten<br>Stoffkomponenten und Stoffgruppen ..... | 165 |
| Tabelle 6-2:  | Kennwerte der beiden Bodenkategorien Sand und Lehm/Schluff/Ton,<br>die in der EBV unterschieden werden .....   | 166 |
| Tabelle 6-3:  | Sorptionsparameter für die in der EBV berücksichtigten organischen   |     |

|   |     |
|---|-----|
| Stoffkomponenten und Stoffgruppen .....   | 166 |
| Tabelle 6-4: Regressionskoeffizienten der multiparametrischen<br>substratübergreifenden Sorptionsisotherme für die in der EBV<br>berücksichtigten Schwermetalle .....   | 167 |
| Tabelle 6-5: Abbauparameter für die in der EBV berücksichtigten organischen<br>Stoffkomponenten und Stoffgruppen .....  | 167 |
| Tabelle 6-6: Berechnungsparameter für die in der EBV berücksichtigten<br>Einbauweisen im Schienenverkehrswege- sowie Straßen- und<br>Wegebau .....  | 168 |
| Tabelle 6-7: Materialeigenschaften der in der EBV geregelten Ersatzbaustoffe<br>(erforderlich für die Bewertung der Einsatzmöglichkeiten in Bezug auf<br>die Einhaltung der Materialwerte für die Salze .....   | 172 |
| Tabelle 6-8: Materialwerte für die in der EBV geregelten Materialklassen für<br>Hochofenschlacke (HOS), Hüttensand (HS) und Stahlwerkschlacke<br>(SWS) .....  | 172 |
| Tabelle 6-9: Materialwerte für die in der EBV geregelten Materialklassen für<br>Kupferhüttenmaterial (CUM), Gießerei-Kupolofenschlacke (GKOS)<br>und Gießereirestsand (GRS) .....   | 172 |
| Tabelle 6-10: Materialwerte für die in der EBV geregelten Materialklassen für<br>Hausmüllverbrennungsasche (EDS), Steinkohle-<br>Schmelzkammergranulat (SKG) und Steinkohlenkesselasche (SKA),<br>Steinkohlenflugasche (SFA) und Braunkohlenflugasche (BFA) ..... | 173 |
| Tabelle 6-11: Materialwerte für die in der EBV geregelten Materialklassen für<br>Hausmüllverbrennungsasche (HMVA),<br>Sonderabfallverbrennungsasche (SAVA) und Recyclingbaustoffe (RC) .....  | 173 |
| Tabelle 6-12: Materialwerte für die in der EBV geregelten Materialklassen für<br>Gleisschotter (GS) und Baggergut (BG).....   | 174 |
| Tabelle 6-13: Liste und Erläuterung der Eingangsparameter der Stoffkomponenten .....  | 174 |

Tabelle 6-14: Liste und Erläuterung der Eingangsparameter der Bodentypen ..... 177

Tabelle 6-15: Liste und Erläuterung der Eingangsparameter der Einbauweisen ..... 177

Tabelle 6-16: Liste und Erläuterung der Eingangsparameter der Ersatzbaustoffe  
(Materialwerte) ..... 178

### Abkürzungsverzeichnis

|                 |  |
|-----------------|--|
| AMPA            | Aminomethylphosphonsäure   |
| AP              | Arbeitspaket   |
| BEMEB           | Bewertung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe  |
| BBodSchV        | Bundes Bodenschutzverordnung   |
| BFA             | Braunkohlenflugasche   |
| BM              | Bezugsmaßstab  |
| BMBF            | Bundesministeriums für Bildung und Forschung   |
| BMUB/BMU        | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (bis 2017) /<br>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (ab 2018) |
| BTC             | (Konzentrations-)Durchbruchskurve (engl.: breakthrough curve)  |
| BTEX            | Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol   |
| CEN             | Europäisches Normungskomitee, Comité Européen de Normalisation   |
| CUM             | Kupferhüttenmaterial   |
| DepV            | Deponieverordnung  |
| DIN             | Deutsches Institut für Normung   |
| DK              | Deponiezuordnungsklasse  |
| DOC             | Gelöster organischer Kohlenstoff (engl.: dissolved organic carbon)   |
| DZ              | Dachziegel   |
| EBV             | Ersatzbaustoffverordnung   |
| EDS             | Edelstahlschlacke  |
| ErsatzbaustoffV | Ersatzbaustoffverordnung   |
| ET              | Evapotranspiration   |

|      |   |
|------|---|
| FK   | Filterkapazität (der relevanten Bodenschicht)                                   |
| FSS  | Frostschuttschicht  |
| GFS  | Geringfügigkeitsschwellenwert   |
| GKOS | Gießerei-Kupolofenschlacke  |
| GRS  | Gießereirestsand  |
| HLZ  | Hochlochziegel  |
| HMVA | Hausmüllverbrennungsasche   |
| HOS  | Hochofenstückschlacke   |
| HS   | Hüttensand  |
| I    | Infiltrationsrate   |
| ISO  | Internationales Normungskomitee: International Organization for Standardization |

|           |   |
|-----------|---|
| KG        | Korngemisch   |
| Kow       | Oktanol-Wasserverteilungskoeffizient  |
| LANUV NRW | Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen   |
| LST       | Lehm/Schluff/Ton  |
| MantelV   | Mantelverordnung  |
| ME        | Medienschutzbasierter Einbauwert  |
| MEB       | Mineralischer Ersatzbaustoff  |
| MKW       | Mineralölkohlenwasserstoffe   |
| MS        | Microsoft   |
| MTSE      | Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau |
| MW        | Materialwert (Materialqualität)   |
| N         | Niederschlag  |
| OdB       | Ort der Beurteilung   |
| QT        | Quellterm   |

|          |  |
|----------|--|
| QTK      | Quelltermkonzentration   |
| PAK      | Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe   |
| PCB      | Polychlorierte Biphenyle   |
| PSS      | Planumsschutzschicht   |
| QRB      | Qualitätssicherungssystem Recycling-Baustoffe Baden-Württemberg e.V.   |
| RC       | Recycling und Recycling-Baustoff   |
| SAVA     | Sonderabfallverbrennungsasche  |
| SFA      | Steinkohlenflugasche   |
| SIWAP    | Sickerwasserprognose   |
| SKA      | Steinkohlenkesselasche   |
| SKG      | Schmelzkammergranulat  |
| STS      | Schottertragschicht  |
| SWR      | Sickerwasserrate   |
| SWS      | Stahlwerkschlacke  |
| ToB, TOB | Tragschicht ohne Bindemittel   |
| UBA      | Umweltbundesamt  |
| UK       | Unterkante   |
| UFOPLAN  | Umweltforschungsplan   |
| VMZ      | Vormauerziegel   |
| WF       | Wasser- zu Feststoffverhältnis   |
| ZAG      | Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen |





## Zusammenfassung

### Hintergrund und Veranlassung

Im Zuge der geplanten Neueinführung einer Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV, kurz: EBV) wurde in den zurückliegenden Jahren ein Verfahren für die Ableitung so genannter medienenschutzbasierter (bzgl. der Umweltmedien Boden und Grundwasser) Einbauwerte als materieller Maßstab für eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB), (Abfälle, industrielle Nebenprodukte, etc.) und Bodenmaterialien in technischen Bauweisen entwickelt.

Das zugrundeliegende Fachkonzept zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) und Bodenmaterialien basiert auf den Ergebnissen des vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) im Jahr 2008 abgeschlossenen UBA UFOPLAN-Vorhaben "Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Forschungsverbundes „Sickerwasserprognose“ in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden" (Susset und Leuchs 2011) sowie dem am ZAG Tübingen von 2007 bis 2011 durchgeführten UBA UFOPLAN-Vorhaben "Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Sekundärrohstoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge" (Abschlussbericht: Susset et al. 2018). Das wissenschaftliche Fundament bilden die Erkenntnisse aus zahlreichen Projekten des BMBF-Forschungsverbundvorhabens „Sickerwasserprognose“ in den Jahren 1998 bis 2007 und aus weiteren nationalen und internationalen Forschungsprojekten.

Nach diesem Fachkonzept kann ein MEB wiederverwendet werden, wenn die in regelmäßigen Eluatuntersuchungen (Säulen- oder Schüttelversuche) bestimmten Materialwerte (= mittlere Stoffkonzentrationen im Eluat bei einem Wasser-Feststoffverhältnis (WF) von 2 L kg<sup>-1</sup>) für alle bewertungsrelevanten Stoffe nicht größer sind als die medienenschutzbasierten Einbauwerte (ME). Zusätzlich hat das BMU – unabhängig vom Fachkonzept – für einige MEB auch Materialwerte im Feststoff festgelegt.

Die Ermittlung der ME zur Bewertung der Zulässigkeit einer Verwertung von MEB basiert auf einer vorgezogenen bzw. antizipierenden Sickerwasserprognose nach Maßstäben des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes. Diese Sickerwasserprognose beinhaltet die Beschreibung der Stofffreisetzung aus dem mineralischen Ersatzbaustoff (Quellterm) und die modellgestützte Prognose des Stofftransports im Sickerwasser für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser (Transportterm) und berücksichtigt unterschiedliche Prozesse und Einflussfaktoren.

Die ME sind stoffspezifisch und in Abhängigkeit von der geplanten Einbauweise bzw. der geplanten Verwendung des Ersatzbaustoffs sowie von den Eigenschaften der Grundwasserdeckschicht zu ermitteln. Aufgrund der großen Zahl an bewertungsrelevanten Stoffen (Organika, Metalle, Salze, etc., insgesamt 29 Stoffkomponenten), der zahlreichen Verwertungsalternativen (Einbauweisen des Straßen- und Wegebau und im Schienenverkehrswegebau, insgesamt ca. 50 Einbauweisen) sowie unterschiedlicher Bewertungsszenarien für die Verhältnisse bezgl. der Grundwasserdeckschicht müssen eine Vielzahl von medienenschutzbasierten Einbauwerten berechnet werden, um eine umfassende Bewertung der Einbaumöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien vornehmen zu können.

Die Berechnungen der medienenschutzbasierten Einbauwerte (ME), wie auch deren Vergleich mit den Materialwerten der mineralischen Ersatzbaustoffe (von der Stahlwerkschlacke (SWS) über die

Hausmüllverbrennungsasche (HMVA) bis zu den RC-Baustoffen (RC), insgesamt 19 mineralische Ersatzbaustoffe in 38 Materialklassen), wurden in verschiedenen FuE-Projekten, v.a. in vom UBA/BMU geförderten Projekten, in Einzelrechnungen ermittelt, händisch zusammengeführt, und sind in entsprechenden Zwischen- und Abschlussberichten dokumentiert (siehe u.a. Susset et al. 2018). Ein Programmwerkzeug, das alle für die Bewertung erforderlichen Daten zur Charakterisierung der mineralischen Ersatzbaustoffe, der EBV-relevanten Schadstoffe und technischen Bauwerke bzw. Einbauweisen verwaltet, die verschiedenen Elemente der Bewertungssystematik programmtechnisch kohärent verbindet und die Bewertung automatisch durchführt, existierte jedoch bis heute nicht.

Die für das Standardbewertungsverfahren der EBV-Einbauweisen eingeführten Vereinfachungen und Annahmen erlauben eine konservative Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe und Bodenmaterialien. Eine Einzelfallbeurteilung für vom Standardfall abweichende Verhältnisse war mit dem Bewertungsverfahren bzw. dem bislang zur Bewertung verwendeten analytischen Modell nur in sehr eingeschränkter Weise möglich.

### **Zielsetzung**

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) und das Umweltbundesamt (UBA) als fachlich beratende Bundesoberbehörde sehen die Umsetzung der Bewertungssystematik der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) innerhalb eines Softwarewerkzeugs als wichtigen Baustein für ein besseres Verständnis der Bewertungssystematik und deren Akzeptanz und Vollzugstauglichkeit. Die anwenderfreundliche Aufbereitung und Bereitstellung aller Berechnungs- und Bewertungsschritte zur Ableitung medienschutzbasierter Einbauwerte, einschließlich der erforderlichen Eingangsdaten und der Erstellung von Ergebnistabellen zur Anwendung der EBV, soll die Implementierung und künftige Weiterentwicklung einer MantelV ermöglichen bzw. erleichtern.

Durch die Entwicklung des Softwarewerkzeugs auch für die Einzelfallbewertung soll zudem die Möglichkeit geschaffen werden, über das bisherige Maß hinausgehende Verwertungsmöglichkeiten für mineralische Einbaumaterialien zu prüfen oder Untergrundbedingungen zu bewerten, die vom Standardfall der EBV abweichen. Damit sollte ein innovativer Beitrag geleistet werden im Hinblick auf neue Einsatzmöglichkeiten und höhere Verwertungsquoten von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) unter einer nachvollziehbaren, quantifizierbaren Sicherung des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes. (Hinweis: Für die Zulassung des Einsatzes von MEB in von der EBV abweichenden Einbauweisen und Untergrundkonstellationen ist eine Genehmigungen im Einzelfall durch die zuständigen Behörden erforderlich).

### **Umsetzung des Fachkonzepts zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von MEB und der Systematik zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten (ME)**

#### Antizipierende Sickerwasserprognose

Für eine fachgerechte Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) in der Umwelt müssen die Freisetzung der in den in Frage stehenden mineralischen Ersatzbaustoffen enthaltenen Schadstoffen in das Sickerwasser sowie der Transport der freigesetzten Stoffe im Sickerwasser beurteilt werden. Die Quantifizierung dieser Prozesse im Rahmen einer antizipierenden Sickerwasserprognose für die aus den MEB freigesetzten Stoffen und Stoffgruppen ist deshalb der Kern der Systematik für die Ableitung von Einbauwerten für die Ersatzbaustoffe und Bodenmaterialien (Susset und Leuchs 2011).

### Quellterm vs. Transportterm

Bei der Ableitung von Grenzwerten für Salze, Metalle und organische Verbindungen (Organika) für die Verwertung von Bodenmaterial und MEB werden die Freisetzung der Schadstoffe in das Sickerwasser und der Transport der Schadstoffe im Sickerwasser der ungesättigten Bodenzone bis zum Ort der Beurteilung (OdB) getrennt betrachtet. Man spricht entsprechend von einem Quellterm und einem Transportterm.

### Stofffreisetzungsverhalten

Die Freisetzung von Stoffen aus den MEB, und damit die Stoffkonzentration im Sickerwasser (oder näherungsweise im Eluat der Laborsäule), sind abhängig von der Kontaktzeit zwischen Sickerwasser und MEB und von der Dynamik des Massentransfers von der Festphase in die wässrige Phase. Je nachdem welche Prozesse die Stofffreisetzung aus einem MEB dominieren, ergeben sich unterschiedliche Freisetzungsmuster in Bezug auf den zeitlichen Verlauf der Freisetzung. In zahlreichen Experimenten zur Stofffreisetzung aus unterschiedlichen MEB in Feldlysimetern, Laborsäulen und in Batchtests identifizierten Susset und Leuchs (2008) drei unterschiedliche generelle Freisetzungsmuster: I – Schnelles Abklingen auf eine geringe Freisetzungsrate (Salze), II – Teilweises Abklingen der Freisetzung mit anschließendem langem Tailing (Schwermetalle), III – Lang anhaltende, relativ konstante Freisetzung (organische Verbindungen). In der EBV wird – aus Gründen der Vereinfachung und im Sinne einer konservativen Beurteilung – das zeitliche Abklingen der Stofffreisetzung nur dann berücksichtigt, wenn ein deutliches Abklingverhalten der Freisetzung regelmäßig und reproduzierbar nachgewiesen wurde. Für die Umsetzung der Systematik zur Ableitung von ME in der EBV sind dementsprechend nur die Freisetzungsmuster I und III relevant.

### Zwei Bewertungskriterien – Anreicherungskriterium und Durchbruchskriterium

Zwei Kriterien sind für die Ableitung der ME generell relevant: (i) das Anreicherungskriterium (AK), d.h. die Beschränkung der vorübergehenden Stoffanreicherung im Unterboden auf ein akzeptables Maß sowie (ii) das Durchbruchskriterium (DK), d.h. die Beschränkung der Konzentrationen im Sickerwasser am OdB auf Werte unter dem Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) oder einem alternativ festgelegten Bezugsmaßstab (BM) innerhalb eines vorgegeben Bewertungszeitraums.

### MEB-Charakterisierung – Materialwerte:

Zur Charakterisierung des Stofffreisetzungspotentials der in Frage stehenden MEB wurden allgemein einsetzbare, genormte und geeignete Referenzmethoden zur Abschätzung des Freisetzungsverhaltens der in den MEB enthaltenen Stoffe eingeführt. Per Konvention wird die im Säulenversuch bis zu einem Wasser-Feststoffverhältnis von  $2 \text{ L kg}^{-1}$  (kurz: WF2) im Eluat gemessene mittlere kumulative Konzentration der mittelfristig zu erwartenden mittleren Konzentration im Sickerwasser unterhalb der MEB-Schicht gleichgesetzt. Für jeden MEB wurde eine Vielzahl von Proben untersucht, um die bewertungs- und regelungsrelevanten Stoffe und deren Freisetzungspotential materialspezifisch zu ermitteln. Für jeden MEB wurde so die Materialqualität bestimmt, welche den MEB durch einen Katalog von so genannten "Materialwerten (MW)" für die MEB-spezifisch relevanten Stoffe charakterisieren. Im Falle einer hohen Variabilität der Materialqualitäten eines MEB (verursacht durch

eine hohe Variabilität der stofflichen Zusammensetzung eines Massenstroms, wie z.B. Abbruchmaterial bzw. Bauschutt) wurden verschiedene Materialklassen mit verschiedenen MW eingeführt (z.B. Materialklassen 1 bis 3 für Recyclingbaustoffe, vgl. Susset et al. 2018).

#### Unterscheidung von Einbauweisen:

Die Einsatzmöglichkeiten von MEB und Bodenmaterialien werden für verschiedene wasserdurchlässige oder teilweise wasserdurchlässige Einbauweisen geprüft und bewertet. Dabei wird zwischen Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus und Einbauweisen des Schienenverkehrswegebbaus unterschieden. Bewertet wird, ob die Verwendung eines MEB und eines Bodenmaterials in einem technischen Bauwerk in einer bestimmten Funktion zulässig ist oder nicht. Eine Einbauweise definiert dementsprechend Bauwerk und Funktion der MEB-Verwendung (z.B. „Einbauweise 7: Schottertragschicht als Tragschicht ohne Bindemittel unter gebundener Deckschicht in einem Straßendamm“). Jedes technische Bauwerk und die für eine Verwendung von MEB in Frage kommenden Einbauschichten sind in den einschlägigen Technischen Regelwerken und Normen eindeutig definiert.

#### Spezifische Bewertung für Einbauweise, Bodenart und Untergrundverhältnisse:

Die Wiederverwertungsmöglichkeiten eines MEB oder Bodenmaterials werden beurteilt, indem die Materialqualität bzw. die Materialwerte (MW) des MEB mit den medienschutzbasierten Einbauwerten verglichen werden. Ein MEB darf für eine bestimmte Einbauweise und Einbaubedingungen verwendet werden, wenn alle MW des MEB unter den für die betrachtete Einbauweise und Einbaubedingungen ermittelten ME liegen. Hinsichtlich der Untergrundverhältnisse gibt es drei bewertungsrelevante Szenarien: (i) ungünstige Verhältnisse, d.h. eine grundwasserfreie Sickerstrecke > 1m ist nicht vorhanden, (ii) günstige Verhältnisse und sandiger Boden sowie (iii) günstige Verhältnisse und lehmiger, schluffiger oder toniger Boden. Unabhängig davon welcher der drei Fälle jeweils zutrifft, führt die Bewertung abschließend zu einem Vergleich der MW des gewählten MEB oder Materialklasse eines MEB mit den ME für die betrachtete Einbauweise.

#### Systematische Bewertung:

Wird die Bewertung für alle Einbauweisen und Untergrundszenerarien (siehe Abschnitt 2.1.7.2) durchgeführt, erhält man für den gewählten MEB oder die gewählte MEB-Klasse eine Einbautabelle, welche die Einbaumöglichkeiten des gewählten MEB im Überblick zeigt. („+“- oder „-“-Werte zeigen, ob eine Verwertung für die betreffende Einbauweise und die gegebene Untergrundkonstellation zulässig ist oder nicht). In Abhängigkeit der Höhe der MW ergeben sich vielfältige Einbaumöglichkeiten für die günstigsten Materialklassen (z.B. RC-1 mit vielen zulässigen offenen und teildurchströmten Bauweisen) und entsprechend limitierte Einbaumöglichkeiten für ungünstige Materialklassen wie z.B. RC-3, die oft begrenzt sind auf teildurchströmte Bauweisen wie Straßendämme mit gebundener Deckschicht oder ggf. ausschließlich auf geschlossene Bauweisen.

#### Standardisierte Bewertung und Festlegungen:

Die standardisierte Bewertung der Einbaumöglichkeiten der MEB wird in der EBV anhand von Standardszenarien durchgeführt, d.h. für bei der Ausarbeitung des Fachkonzepts getroffene Festlegungen in Bezug auf die stoff-, boden- und einbauweisespezifischen Eingangsparameter der Bewertung sowie hinsichtlich der Definition von Quellterm und Transportterm:

- ▶ Der Transportterm wird für eine Sickerstrecke von 1 Meter nur bei günstigen Untergrundverhältnissen und bei nennenswertem Abbau oder Rückhalt berücksichtigt; ▶ Der Bewertungszeitraum ist vorgegeben:
  - Für alle Stoffkomponenten, mineralischen Ersatzbaustoffe und Untergrundverhältnisse für die der Transportterm zu berücksichtigen ist, gilt ein Bewertungszeitraum von 200 Jahren. Innerhalb dieses Zeitraums dürfen die Konzentrationen im Sickerwasser am Ende der Sickerstrecke den Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) bzw. den Bezugsmaßstab (BM) nicht überschreiten.
  - Für Salze mit einem abklingenden Freisetzungsverhalten muss die Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks innerhalb eines Zeitraums von 4 Jahren mindestens auf den GFS bzw. den BM abgeklungen sein.
- ▶ In der Regel ist der Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) der maßgebliche kritische Wert am OdB für die Bewertung der Einbaumöglichkeiten der MEB. Bei einigen auch natürlich vorkommenden Elementen wird der GFS jedoch bereits in Sickerwässern von unbelasteten Böden überschritten (Duijnsveld et al. 2008 und 2010). In diesen Fällen werden höhere Werte als der GFS als Bezugsmaßstab (BM) verwendet (Utermann 2011).
- ▶ Bei der Anwendung des Anreicherungskriteriums werden Abbauprozesse nicht berücksichtigt.
- ▶ Die Anreicherung der freigesetzten Stoffe in der relevanten Sickerstrecke von 1 m Länge darf nicht größer sein als 50% der Filterkapazität (FK) des Bodens; eine Stoffanreicherung, die sich aus einer konstanten Stoffkonzentration im Sickerwasser gleich der GFS (bzw. dem BM) ergibt, ist jedoch immer zulässig. Bei abklingenden Stofffreisetzungsraten ist der mittlere Konzentrationswert innerhalb des Bewertungszeitraums relevant.
- ▶ Kommt der MEB in einem Bauwerk zum Einsatz, in dem nur ein Teil des Sickerwassers den MEB durchsickert, darf ein einbauweisespezifischer Verdünnungs- bzw. Mittelungsfaktor bei der Ermittlung der medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) berücksichtigt werden.
- ▶ Zur unspezifischen Berücksichtigung von Unsicherheiten wurde durch das BMU ein sogenannter Verhältnismäßigkeitsfaktor von 1,5 festgelegt, der bei der Ermittlung der ME eingerechnet wird.

Im BEMEB -Tool ist die Ableitungssystematik für die standardisierte Bewertung nach EBV einschließlich der darin festgelegten Konventionen (s.o.) implementiert.

### Individuelle Bewertung

Die Systematik kann in gleicher Weise jedoch auch für eine individuelle Bewertung angewendet werden, d.h. für Annahmen, die von den Standardszenarien abweichen (z.B. andere Materialwerte, andere Bodenparameter, etc.).

## **Modellierung von Stofffreisetzung und Stofftransport im Sickerwasser**

### Stofffreisetzung

Die Freisetzung von Stoffen nach dem Freisetzungsmuster I wird durch eine Abklingkurve 1. Ordnung beschrieben. Die Abklingratenkonstante wird aus dem Verteilungskoeffizienten zwischen Festphase und wässriger Phase in dem jeweiligen MEB abgeleitet.

Für die Freisetzung von Stoffen nach dem Freisetzungsmuster III ist keine besondere Berechnung der Freisetzung erforderlich, es wird stets konservativ eine konstante Sickerwasserkonzentration innerhalb des Bewertungszeitraums angenommen.

Stoffe, die ein teilweises Abklingen der Freisetzung mit anschließendem langem Tailing zeigen (Freisetzungsmuster II) werden – im Sinne eines konservativen Ansatzes – dem Freisetzungsmuster III zugeordnet. Im Rahmen einer Einzelfallbetrachtung kann auch ein teilweises Abklingen nach Freisetzungsmuster II berücksichtigt werden.

Bezieht man die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht auf das gesamte Bauwerk bzw. auf die gesamte infiltrierende Wassermenge, ergibt sich bei den teildurchströmten Bauweisen eine kleinräumige Mittelung über die Bauwerksbreite. In der Ableitungssystematik der EBV wird diese Mittelung gemeinsam mit dem Verdünnungseffekt durch einen für jede Einbauweise spezifischen Quelltermfaktor  $F_{QT}$  berücksichtigt. In allen offenen Bauweisen des Erd- und Straßenbaus (Bettungssande, Tragschichten, Bodenverbesserungs- oder Verfüllungsmaßnahmen) unterscheiden sich Infiltrationsrate, Teilsickerwasserrate der MEB-Schicht und die mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerk-UK nicht, es gibt keine Verdünnungs- oder Mittelungseffekte.

Die Beschreibung des über die Zeit abklingenden Freisetzungsverhaltens, v.a. von Salzen aber auch von einigen anderen Stoffen, basiert auf der Anpassung eines analytischen Beschreibungsmodells (Advektions-Dispensionsgleichung) an die Messdaten von entsprechenden Säulenversuchsreihen (Susset und Leuchs 2008; S. 25; Susset et al. 2018; S. 201ff; Susset et al. 2017; S. 244ff). Angepasst wird der Verteilungskoeffizienten zwischen Festphase und wässriger Phase,  $K_{d,MEB}$ . Auf diese Weise wird das Abklingverhalten der Freisetzung eines Stoffes in einem MEB typisiert.

Die Emissionsraten der einzelnen MEB-relevanten organischen Stoffkomponenten und Metalle können über die berechneten Quelltermkonzentrationen und die mittlere Sickerwasserrate an der Unterkante des Bauwerks der Stoffe bestimmt werden.

### Stoffanreicherung

Die Stoffanreicherung in der ungesättigten Bodenzone unterhalb des Bauwerks innerhalb des Bewertungszeitraums wird für die MEB-relevanten Stoffe als mittlere Konzentration in der betrachteten (im Standardfall der EBV ein Meter mächtigen) Bodenzone als Stoffmasse pro Masse Boden anhand der

Gesamtemission aus dem MEB innerhalb des Bewertungszeitraums berechnet. Die maximal zulässige Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks (= maximal zulässige Quelltermkonzentration) aufgrund des Anreicherungskriteriums kann direkt berechnet werden.

### Stofftransport

Der Transport der im Sickerwasser gelösten Stoffe in der ungesättigten Bodenzone unterhalb des Bauwerks wird für die baustoffrelevanten organischen Stoffkomponenten und Metalle durch analytische Lösungen der Advektions-Dispensions-Gleichung für den Stofftransport berechnet, wobei Schadstoffrückhalt und -abbau (Ansatz 1. Ordnung) berücksichtigt werden. Es werden drei mögliche

Quellterm-Szenarien unterschieden: (i) unendliche konstante Quelle (Standardfall der EBV), (ii) endliche konstante Quelle und (iii) abklingende Quelle. Jedes dieser drei Szenarien stellt eine andere „obere“ Modellrandbedingung dar. Fall (i) kann als Sonderfall von Fall (ii) angesehen werden, weshalb für diese beiden Fälle dieselbe analytische Lösung verwendet wird. Die verwendeten Lösungen sind von Genuchten und Alves (1982) entnommen.

Zu beachten ist, dass die verfügbaren analytischen Modelle den Stoffrückhalt durch Sorption an die Bodenmatrix durch einen Retardationsfaktor berücksichtigen, entsprechend einer linearen Sorptionsisotherme. Da für die in der EBV berücksichtigten Metalle nichtlineare, sogenannte substratübergreifende, konzentrationsabhängige Sorptionsisothermen gelten (Utermann et al. 2005), ist eine Linearisierung erforderlich, die im BEMEB-Tool automatisch durchgeführt wird.

Die maximal zulässige Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks aufgrund des Durchbruchkriteriums wird im BEMEB-Tool iterativ berechnet, d.h. der Stofftransport bis zum OdB wird mehrmals mit unterschiedlichen Quelltermkonzentrationswerten berechnet bis der Konzentrationswert gefunden ist, für den das Durchbruchkriterium erfüllt ist.

### **Software-Tool BEMEB**

Entsprechend der Eckpunkte des Entwicklungskonzepts, bietet das BEMEB-Werkzeug folgende Funktionalitäten:

- ▶ Vollständige Umsetzung der Methodik zur Ableitung medienschutzbasierter Einbauwerte in ein Software-Werkzeug.
- ▶ Implementierung auf Basis einer Microsoft Excel-Arbeitsmappe, welche durch Makros und eine grafische Benutzeroberfläche gesteuert wird. Über diese Benutzeroberfläche werden dem Anwender die gewünschten Bewertungsfunktionen bereitgestellt.
- ▶ Alle Eingabedaten werden in unterschiedlichen Tabellenblättern organisiert und sind jederzeit aktualisierbar.
- ▶ Eine Standardbewertung nach EBV ist ebenso möglich wie die Betrachtung von Einzelfällen für Szenarien die von den Standardszenarien und Bewertungsfällen der EBV abweichen.
- ▶ Eingaben und Ergebnisse der Bewertung können abgespeichert und zwischen Nutzern (z.B. zwischen Verwerter und Behörde) ausgetauscht bzw. übertragen werden.
- ▶ Durch eine Verknüpfung mit dem Sickerwasserprognosetool WinSMART kann das BEMEBWerkzeug auch als Ausgangspunkt für eine erweiterte Einzelfallbewertung dienen.

Die Excel-Arbeitsmappe setzt sich zusammen aus rd. 60 Tabellenblättern, die zur Datenhaltung, zur Berechnung, zur Ergebnisdarstellung oder anderen Funktionen dienen.

Die für die Bewertung erforderlichen Eingangsdaten werden in vier Gruppen organisiert: (i) Verbindungen (gleichbedeutend mit: chemische Verbindungen bzw. Stoffkomponenten), (ii) Böden, (iii) Einbauweisen und (iv) Materialwerte.

Für die automatisierte Bewertung der Einsatzmöglichkeiten der MEB nach der oben beschriebenen Methodik sind verschiedene Berechnungsaufgaben bzw. -schritte erforderlich, die im BEMEB-Tool automatisch durchgeführt werden. Die Berechnungsaufgaben übernehmen größtenteils Tabellenblätter, die bei Bedarf auch „für sich“, also unabhängig verwendet werden können, um die gewünschte Berechnungsaufgabe durchzuführen. Verschiedene Berechnungsschritte werden auch durch Funktionen des VISUAL BASIC Programmcodes übernommen.



Die Bewertungsergebnisse werden in verschiedenen Tabellen und graphischen Darstellungen ausgegeben. Visualisiert werden die Ergebnisse als (i) Konzentrationsverlauf über die Zeit am OdB und innerhalb des Quellterms, als (ii) Konzentrationsprofil entlang der Sickerstrecke zwischen der BauwerkUK und dem OdB für einen ausgewählten Zeitpunkt sowie als (iii) zeitlicher Verlauf der Stofffreisetzung. Tabellen werden erstellt für (i) die maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen, (ii) die medienschutzbasierten Einbauwerte und (iii) die Einbaumöglichkeiten eines MEB.

Alle Funktionalitäten des BEMEB-Werkzeugs, welche durch eine graphische Benutzeroberfläche und entsprechende Dialoge geführt werden, sind in einer eigenen Menüleiste „BEmEb“ gruppiert. Je nachdem, welche Funktion vom Anwender gewählt wird, werden spezifische Benutzerformulare aufgerufen, die den Anwender durch die Bewertung führen.

Das BEMEB-Werkzeug bietet drei Bewertungsmöglichkeiten:

- ▶ Express-Bewertung (Standardbewertung leicht gemacht): In einem Vorgang werden zunächst automatisch für alle Einbauweisen, Verbindungen, Böden und Materialien der EBV die maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen und medienschutzbasierte Einbauwerte berechnet und diese Ergebnisse in entsprechende Tabellenblätter eingetragen. Anschließend wird für alle Materialklassen der mineralischen Ersatzbaustoffe eine Tabelle der Einbaumöglichkeiten entsprechend der Bewertungen in der EBV erstellt.
- ▶ Individuelle Bewertung (Bewertung einzelner Materialklassen eines Ersatzbaustoffs im Detail): Einzelne Materialklassen eines Ersatzbaustoffs werden für bestimmte Fälle (Einbauweise, Bodentyp) bewertet und die Ergebnisse im Detail dargestellt. Die Parameter für Quellterm und Transportterm können hier auch abweichend vom Standardfall festgelegt werden, um deren Bedeutung einzeln zu analysieren.
- ▶ Suche Einsatzmöglichkeiten einer Materialklasse eines Ersatzbaustoffs: Für eine einzelne Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs werden für alle Einbauweisen der EBV die Einbaumöglichkeiten gemäß EBV geprüft und das Ergebnis dieser Prüfung in entsprechende Tabellenblätter eingetragen.

Die in BEMEB implementierten Bewertungsmöglichkeiten decken ein großes Spektrum an Anwendungsfällen ab, sind aber limitiert auf Berechnungen auf Basis analytischer Modelle. Obgleich solche analytischen Modelle für viele Anfangs- und Randbedingungen verfügbar sind, setzen sie verschiedene vereinfachende Annahmen voraus: (i) der Untergrund im Bereich der Sickerstrecke ist homogen, (ii) Desorption und Sorption sind schnelle Prozesse und können über Gleichgewichtsbeziehungen beschrieben werden, (iii) die Verteilung der Stoffe zwischen Festphase und wässriger Phase ist konzentrationsunabhängig bzw. die konzentrationsabhängige Verteilung kann näherungsweise durch eine linearisierte Isotherme beschrieben werden). Um auch solche Fälle bewerten zu können, in welchen die genannten Annahmen erwartungsgemäß nicht erfüllt werden, enthält BEMEB eine Schnittstelle zum Simulationswerkzeug WinSMART, welches auf einer numerischen Beschreibung von Stofffreisetzung und Stofftransport basiert und das deshalb nicht den oben genannten Beschränkungen unterliegt.

WinSMART wird ebenfalls durch eine graphische Benutzeroberfläche unterstützt und wurde bereits erfolgreich zur Prognose von zeitabhängigen Freisetzungsraten (Quellterm) und für die Berechnung der Schadstofftransports im Sickerwasser eingesetzt (z.B. Madlener 2003; Madlener et al. 2004; Susset 2004; Henzler 2004; Henzler et al. 2006; Beyer et al. 2007 und 2009; Finkel und Grathwohl 2017).

Die Ergebnisse der Standardbewertung können im MS WORD- oder MS EXCEL-Format abgespeichert werden. Für MS WORD stehen Dateivorlagen zur Verfügung. Der Anwender kann diese Vorlagen nach

Wunsch ändern und überarbeiten oder durch andere Vorlagen ersetzen, in die dann ebenfalls Ergebnisinhalte über die Verwendung von Textmarken eingetragen werden können.

## Summary

### Background

In the course of the preparation of a new German Recycling Regulation (EBV) in recent years a concept for the derivation of so-called media-related (regarding the environmental media soil and groundwater) application values has been developed. These application values shall serve as a material standard for a proper and harmless reuse of mineral waste materials (MEB) and soil materials in technical constructions.

The underlying technical concept for the evaluation of the application options of MEB and soil materials is based on the results of the UBA UFOPLAN project completed in 2008 by the State Office for Nature, Environment and Consumer Protection of North Rhine-Westphalia (LANUV NRW) "Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes „Sickerwasserprognose" in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden" (Susset und Leuchs 2011) and the UBA UFOPLAN project carried out at the ZAG Tübingen from 2007 to 2011 "Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Sekundärrohstoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge" (final report: Susset et al. 2018). The scientific basis of the concept refers to the findings of the BMBF research consortium project "Sickerwasserprognose" (1998 to 2007) and of other national and international research projects.

According to the evaluation concept a MEB can be reused if the material values determined in regular material tests (column tests) (= mean compound concentrations in the column eluate/leachate at a water-to-solid ratio (WF) of 2 L kg<sup>-1</sup>) are no greater than the media-related application values (ME) for all relevant compounds.

The calculation of the ME for the assessment of the recycling material's applicability is based on an anticipating groundwater risk assessment according to standards of precautionary soil and groundwater protection. The assessment comprises the quantification of the compounds' release/leaching from the mineral waste material (source term) and the model-based prediction of solute mass transport along the soil-groundwater pathway (transport term) and takes into account different processes and influencing factors.

The ME are compound-specific and must be determined depending on the planned technical application as well as on the properties of the groundwater cover layer. Because of the large number of relevant compounds (organics, heavy metals, salts, etc., a total of 29 chemical compounds), the numerous application options (a total of about 50 options in road and railway construction), and several scenarios for the groundwater cover, a large number of ME must be calculated to obtain a comprehensive assessment of the application options of mineral waste and soil materials.

The calculations of the ME, as well as their comparison with the material values of the mineral waste materials (from steel mill slag (SWS) to household waste incineration ash (HMVA) to recycled building materials (RC), a total of 18 building materials in 38 material classes) have been evaluated in various R&D projects, in particular in projects funded by the UBA/BMU, and are collected and documented in corresponding interim and final reports. However, a software tool that (i) manages all the data required for the assessment (i.e., properties of mineral waste materials, of the compounds, and of the

technical applications), (ii) coherently combines the diverse elements of the assessment method, and that (iii) performs the required calculations automatically, has not existed until today.

The simplifications and assumptions introduced for the standard assessment offer a conservative evaluation of the applicability of mineral waste and soil materials. An individual case-specific assessment for conditions deviating from the standard case was so far only possible to a very limited extent.

### **Objectives**

The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMU) and the Federal Environmental Agency (UBA) consider the implementation of the assessment method of the German Recycling Regulation (EBV) within a software tool a key element for a better understanding of the assessment method, its acceptance and implementability. The user-friendly preparation and provision of all calculation and evaluation steps for the derivation of media-related application values, including the required input data and the generation of result tables to apply the EBV, is intended to facilitate the implementation and future development of a Mantel-V.

The development of the software tool also for the individual assessment of specific cases shall give the opportunity to recycling companies to identify further application opportunities for recycled mineral waste materials and to assess reuse options also for situations that differ from standard cases and scenarios defined in the EBV. In this way, the project shall make an innovative contribution to the identification of new fields of application and higher recycling rates for mineral waste materials in consideration of a comprehensible and quantifiable precautionary soil and groundwater protection.

### **Implementation of the technical concept for evaluating the applicability of MEB and the methods for the derivation of media-related applicability values (ME) Anticipating groundwater risk assessment:**

A proper assessment of the applicability of mineral waste materials (MEB) in the environment requires a thorough understanding of the release of pollutants contained in the mineral waste materials into the leachate (i.e. water percolating through the technical construction under assessment) and the transport of the released compounds as solutes in the unsaturated zone below the technical construction. The quantification of these processes as part of an Anticipating groundwater risk assessment for all chemical compounds and compound groups released from the MEB is therefore the core of the methodology for the derivation of precautionary application values (ME) for mineral waste and soil materials (Susset and Leuchs 2011).

#### Source term vs. transport term:

In the calculation of application values for salts, heavy metals and organic compounds (organics) for the reuse of soil material and MEB the release of pollutants into the leachate and the subsequent transport of pollutants in the unsaturated zone to the point of compliance (OdB) are considered separately. Accordingly, we distinguish the “source term” and the “transport term”.

#### Mass release behaviour:

The release of chemical compounds from the MEB, and thus the compounds' concentration in the leachate (or in the eluate of the laboratory column), depends on the contact time of the percolating water with the MEB and on the dynamics of mass transfer from the solid to the aqueous phase. Depending on which processes dominate the release of compounds from a MEB, different release patterns can be observed. Susset and Leuchs (2008) identified three different general release patterns in numerous experiments on mass release from different MEBs in field lysimeters, laboratory columns, and batch tests: I - rapid decline to (very) low release rate (salts), II - declining release with long-term tailing (heavy metals), III - long-lasting, relatively constant release (organic compounds). For reasons of simplification and in the sense of a conservative assessment, the EBV considers the temporal decline of mass release only if a declining behaviour of the release has been clearly observed in a regular and reproducible manner. Accordingly, only the release patterns I and III are relevant for the derivation of ME in the EBV.

#### Two evaluation criteria - accumulation criterion and breakthrough criterion:

Two criteria are generally relevant to the derivation of the ME: (i) the accumulation criterion (AK), i.e. the limitation of the accumulation of the chemical compounds in the unsaturated zone below the technical construction to an acceptable level and (ii) the breakthrough criterion (DK), i.e. the limitation of compounds' concentrations in the seepage water at the OdB to levels below the target concentration within the given evaluation period.

#### MEB characterization - material values:

In order to characterize the MEB with respect to its potential to release chemical compounds, generally applicable, standardised reference methods were developed for estimating the release behaviour of each of the chemical compounds contained in the MEB. By convention, the average cumulative concentration measured in the eluate of the column percolation test up to a water-to-solid ratio of 2 L kg<sup>-1</sup> (WF2 for short) is set as constant mean concentration in the leachate below the MEB layer. For each MEB, a large number of samples were examined in order to determine the chemical compounds relevant to the MEB, and to evaluate compound-specific release potentials. This way, the material quality of each MEB was determined, which comprises a catalogue of so-called "material values (MW)" for the relevant chemical compounds. In case of a high variability of material qualities different material classes with different MW were introduced (e.g., material classes 1 to 3 for recycled demolition waste).

#### Differentiation of application options:

The application options of MEB and soil materials are evaluated for a list of water-permeable and partially water-permeable technical constructions (road and earthworks, railway dams, noise protection walls, etc.). It is assessed whether or not the use of a MEB or a soil material in a technical construction is permissible in a certain function. An application option accordingly defines the technical construction as well as the function of the MEB within this construction (e.g., „Einbauweise 7: Schottertragschicht als Tragschicht ohne Bindemittel unter gebundener Deckschicht in einem Straßendamm“). The structure of each technical construction and the possible parts that may be built with MEB are defined in the relevant technical regulations and standards.

### Specific assessment for method of installation, soil type and subsurface conditions:

The reuse options of a MEB or soil material are assessed by comparing the material quality or material values (MW) of the MEB with the media-related application values. A MEB may be used for a particular application option and prevailing conditions if all MW of the MEB are below the ME determined for the given type of application and conditions. With regard to the latter, there is a differentiation between (i) unfavourable conditions, i.e., if the distance between the bottom of the technical construction and the groundwater table is only 1m or less, (ii) favourable conditions and sandy soil as well as (iii) favourable conditions and loamy, silty or clay soil. Regardless of which of the three cases applies, in each case

the evaluation finally leads to a comparison of the MW of the selected MEB or MEB class with the ME for the type of application considered.

### Systematic assessment:

If the assessment is carried out for all types of applications and conditions, an application table is obtained for the selected MEB or MEB class, which shows an overview of the application options for the selected MEB. ("+" or "-" values indicate whether or not the reuse of MEB is allowed for the given subsurface conditions). Depending on the level of the MW, there are a variety of application options for the most favourable material classes with low emission potential (for example RC-1 with a wide spectrum of applicabilities) and correspondingly limited application options for unfavourable material classes such as, for example, RC-3, the reuse of which is typically limited to only a few partially waterpermeable technical constructions such as road embankments with bound top layer or closed (impermeable) constructions.

### Standardised assessment and definitions:

The standardised assessment of the installation options of the MEB is carried out in the EBV on the basis of standard scenarios with a set of assumptions with regard to the values of input parameters to characterise chemical compounds, soil types and application options as well as with regard to the definition of source term and transport term:

- ▶ The transport term is only taken into account for a zone of 1 meter thickness if the subsurface conditions are favourable and if solute transport of the chemical compound is significantly subject to degradation and/or retardation;
- ▶ The time period for the assessment is given:
  - For all chemical compounds, MEB and subsurface conditions that are evaluated by means of the transport term, an evaluation period of 200 years applies. Within this period, the leachate concentrations at the bottom of the relevant 1 m-zone must not exceed target concentration.
  - For salts with declining release behaviour, the concentration in the leachate at the bottom of the technical construction must be declined to the target concentration within a period of 4 years.
- ▶ In general, the "insignificance threshold" concentration (GFS) is the target concentration at the OdB for assessing the application options of the MEB. However, for some also naturally occurring compounds, the GFS is already exceeded in seepage waters from uncontaminated soils (Duijnisveld et al. 2008 and 2010). For these compounds higher values than the GFS are used as reference.

- ▶ When applying the accumulation criterion, degradation processes are not taken into account.
- ▶ The accumulation of the released compounds in the relevant 1 m-zone must not exceed 50% of the filter capacity (FK) of the soil; however, an accumulation, which would result from a constant compound concentration in the leachate equal to the target concentration, is always permissible. For release rates declining over time, the mean concentration value within the evaluation period is relevant.
- ▶ If the MEB is applied to technical construction only partially percolated by water, then a specific application-specific dilution or averaging factor is taken into account when determining the media-related installation values (ME).
- ▶ For a non-specific consideration of uncertainties, the BMU defined a so-called proportionality factor of 1.5, which is included in the calculation of ME.

The BEMEB tool fully implements the evaluation method for the standardised assessment according to the EBV including the conventions defined therein (see above).

#### Individual assessment:

The tool can also be applied to carry out an individual assessment, i.e. for input parameter values that deviate from the standard EBV setting (for example: other material values, other soil parameters, etc.).

### **Modelling of mass release and solute mass transport**

#### Mass release

The release of compounds according to the release pattern I is described by a 1st order decay curve. The decay rate constant is derived from the partition coefficient between solid phase and aqueous phase in the respective MEB.

For the release of compounds according to release pattern III constant leachate concentration within the entire assessment period no specific calculation of release is required.

Compounds, which show a partial decay of the release followed by a long tailing (release pattern II) are - in the sense of a conservative approach - assigned to the release pattern III in the standard EBV assessment. A partial decay after release pattern II can be considered in an individual assessment.

If infiltrating water passes through a technical construction only partially the compounds' concentrations in the percolating water at the bottom of the MEB layer are higher than average concentrations at the bottom of the technical construction. This dilution and averaging is taken into account in the evaluation method of the EBV by a source term factor  $F_{QT}$ , which is specific to each type of technical construction. In technical constructions that are uniformly percolated (e.g., in road constructions such as bedding sands, base layers, soil improvement) no dilution or averaging effects are considered.

The description of compounds' mass release declining over time, particularly for salts but also for some other compounds, is based on the fitting of an analytical description model (advection dispersion equation) to the measurement data in column tests (Susset und Leuchs 2008; S. 25; Susset et al. 2018; S. 201ff; Susset et al. 2017; S. 244ff). Through calibration of the distribution coefficient between solid phase and aqueous phase,  $K_{d,MEB}$ , the declining release behaviour of a particular compound in a particular MEB is typified.

The emission rates of the individual MEB-relevant organic components and heavy metals can be determined from the calculated source term concentrations and the average percolation rate at the bottom of the technical construction.

#### Accumulation of chemical compounds in soil zone

The accumulation of chemical compounds in the unsaturated soil zone below the technical construction within the assessment period is calculated as mean concentration in the considered soil zone, which is in the standard EBV case 1 meter thick. The calculation is based on the compounds' total emission from the MEB during the assessment period. The maximum allowable source term concentration in the leachate at the bottom of the technical construction according to the accumulation criterion can be calculated directly.

#### Solute mass transport along soil-groundwater pathway

The transport of the solutes in the leachate in the unsaturated soil zone below the technical construction is calculated for the organic compounds and heavy metals relevant to the MEB under assessment by analytical solutions of the advection-dispersion equation. Retardation and degradation (1st order approach) are taken into account. Three possible source-term scenarios are distinguished: (i) infinite constant source (EBV standard case), (ii) finite constant source, and (iii) declining source. Each of these three scenarios represents a particular "upper" model boundary condition. Case (i) may be considered a special case of case (ii), so the same analytical solution is used for these two cases. The solutions used are taken from Van Genuchten and Alves (1982).

It should be noted that the available analytical models consider the compounds' retardation through sorption to the soil matrix by means of a retardation factor, corresponding to a linear sorption isotherm. For the nonlinear, i.e. concentration-dependent sorption isotherms of heavy metals, which were determined by Utermann et al. (2005), linearization is required, which is automatically performed in the BEMEB tool.

The maximum allowable source term concentration in the leachate at the UK of the technical construction according to the breakthrough criterion is calculated iteratively in the BEMEB tool, i.e. the solute mass transport along soil-groundwater pathway to the OdB is calculated several times with different source term concentration values until the particular concentration value is found for which the breakthrough criterion is just met.

#### **Software tool BEMEB**

The BEMEB tool offers the following functionalities:

- ▶ Full implementation of the methodology for deriving media-related application values of mineral waste and soil materials and materials' applicability assessment within a single software tool.
- ▶ Implementation by means of a Microsoft Excel workbook, which is controlled by macros and a graphical user interface. This user interface provides the user with the desired evaluation functions.
- ▶ All input data is organized in different spreadsheets and can be updated at any time.

- ▶ Both a standard assessment according to the EBV and the individual assessment of specific cases (for scenarios that deviate from the standard scenarios of EBV) are possible.
- ▶ Inputs and results of the assessment can be stored and exchanged between the users.
- ▶ By linking to the groundwater risk assessment tool WinSMART, the BEMEB tool can also serve as a starting point for an extended individual assessment.

The Excel workbook consists of a total of 46 worksheets that are used to hold data, to calculate, to display results or to provide other functions.

The input data required for the assessment are organized into four groups: (i) chemical compounds, (ii) soil types, (iii) application options (technical constructions), and (iv) material values.

For the automated assessment of the application option of the MEB according to the methodology described above, various calculation tasks or steps are required, which are carried out automatically in the BEMEB tool. For the most part, the calculation tasks are based on spreadsheets, which – if requested – can also be used "on their own", i.e. independently from other sheets to perform the required calculation task. Various calculation steps are also taken over by functions of the VISUAL BASIC program code.

The assessment results are output in various tables and graphs. The results are visualized as (i) concentration over time at the OdB and within the source term, as (ii) concentration profile along the pathway between the bottom of the construction and the OdB for a selected point in time, and as (iii) mass release/emission curve over time. Result tables are created for (i) the maximum allowable source term concentrations, (ii) the media-related application values, and (iii) the application options of a MEB.

All functions of the BEMEB tool, which are guided by a graphical user interface and corresponding dialogues, are grouped in a separate menu bar "BEMEB". Depending on which function is chosen by the user, specific user forms are called up which guide the user through the evaluation.

The BEMEB tool offers three evaluation options:

- ▶ Express evaluation ("standard evaluation made easy"): In one operation, the maximum allowable source term concentrations and media-related application values are automatically calculated for all technical constructions, chemical compounds, soils and materials, and these results are filled in output worksheets. Subsequently, a table of application options is created for each of the mineral waste and soil material classes.
- ▶ Individual evaluation (evaluation of individual materials in detail): materials are evaluated individually for specific cases (type of technical construction, soil type) and the evaluation results are presented in detail. Furthermore, the parameters for the characterisation of the source term and the transport term can be defined here differently compared to the EBV standard case, e.g. to analyse their role individually.
- ▶ Search possible applications of a given material: the applicability of individual mineral waste or soil materials is checked for all types of technical constructions.

The valuation options implemented in BEMEB cover a wide range of applications, but are limited to calculations based on analytical models. Although such analytical models are available for many initial and boundary conditions, they presuppose various simplifying assumptions (the properties of modelled pathway is homogeneous, desorption and sorption are fast processes and can be described by equilibrium relationships, the distribution of chemical compounds between solid and aqueous phase is independent of the compound's concentration or can be approximately described by a linearized isotherm, respectively. In order to be able to evaluate cases in which these assumptions are not met, BEMEB includes an interface to the WinSMART simulation tool, which is based on a numerical



description of compounds' mass release and mass transfer, and therefore is not subject to the above limitations.

WinSMART is also supported by a graphical user interface and has been successfully used to predict time-dependent release rates (source term) and to calculate pollutant transport in leachate (e.g., Madlener 2003; Madlener et al. 2004; Susset 2004; Henzler 2004; Henzler et al. 2006; Beyer et al. 2007 and 2009; Finkel and Grathwohl 2017).

The results of the assessment can be saved in MS WORD or MS EXCEL format. For MS WORD file templates are available. The user can modify and rework these templates as required or replace them with other templates in which results can also be entered via the use of bookmarks.

## 1 Einleitung

### 1.1 Hintergrund und Veranlassung

Im Zuge der geplanten Neueinführung einer Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV, kurz: EBV) wurde in den zurückliegenden Jahren ein Verfahren für die Ableitung so genannter medienschutzbasierter (bzgl. der Umweltmedien Boden und Grundwasser) Einbauwerte als materieller Maßstab für eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen (Abfälle, industrielle Nebenprodukte und Produkte mit Ende der Abfalleigenschaft) entwickelt.

Nach diesem Fachkonzept kann ein MEB wiederverwendet werden, wenn die in regelmäßigen Eluatuntersuchungen (Säulen- oder Schüttelversuche) bestimmten Materialwerte (= mittlere Stoffkonzentrationen im Eluat bei einem Wasser-Feststoffverhältnis (WF) von 2 L kg<sup>-1</sup>) für alle bewertungsrelevanten Stoffe nicht größer sind als die medienschutzbasierten Einbauwerte (ME). Zusätzlich hat das BMU – unabhängig vom Fachkonzept – für einige MEB auch Materialwerte im Feststoff festgelegt.

Die Ermittlung der medienschutzbasierten Einbauwerte zur Bewertung der Zulässigkeit einer Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen basiert auf einer vorgezogenen bzw. antizipierenden Sickerwasserprognose nach Maßstäben des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes. Diese Sickerwasserprognose beinhaltet die Beschreibung der Stofffreisetzung aus dem mineralischen Ersatzbaustoff (Quellterm) und die modellgestützte Prognose des Stofftransports im Sickerwasser für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser (Transportterm) und berücksichtigt unterschiedliche Prozesse und Einflussfaktoren.

Die medienschutzbasierten Einbauwerte sind stoffspezifisch und in Abhängigkeit von der geplanten Einbauweise bzw. der geplanten Verwendung des mineralischen Ersatzbaustoffs sowie von den Eigenschaften der Grundwasserdeckschicht zu ermitteln. Angesichts einer großen Zahl an bewertungsrelevanten Stoffen (Organika, Metalle, Salze, etc., insgesamt 29 Stoffkomponenten), der zahlreichen Verwertungsalternativen (Einbauweisen des Straßen- und Wegebau und im Schienenverkehrswegebau, insgesamt ca. 50 Einbauweisen) sowie unterschiedlicher Bewertungsszenarien für die Verhältnisse bezgl. der Grundwasserdeckschicht müssen eine Vielzahl von medienschutzbasierten Einbauwerten berechnet werden, um eine umfassende Bewertung der Einbaumöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen vornehmen zu können.

Die Berechnungen der medienschutzbasierten Einbauwerte, wie auch deren Vergleich mit den Materialwerten der mineralischen Ersatzbaustoffe (von der Stahlwerkschlacke (SWS) über die Hausmüllverbrennungsgasche (HMVA) bis zu den RC-Baustoffen (RC), insgesamt 19 mineralische Ersatzbaustoffe in 38 Materialklassen), wurden in verschiedenen FuE-Projekten, v.a. in vom UBA/BMU geförderten Projekten, in Einzel-rechnungen ermittelt, händisch zusammengeführt, und sind in entsprechenden Zwischen- und Abschlussberichten dokumentiert (vgl. Susset et al. 2018). Ein Programmwerkzeug, das alle für die Bewertung erforderlichen Daten zur Charakterisierung der mineralischen Ersatzbaustoffe, der prioritären Schadstoffe und der EBV-relevanten technischen Bauwerke bzw. Einbauweisen verwaltet, die verschiedenen Elemente der Bewertungssystematik programmtechnisch kohärent verbindet und die Bewertung automatisch durchführt, existierte jedoch bislang nicht.

Die für das Standardbewertungsverfahren eingeführten Vereinfachungen und Annahmen erlauben eine konservative Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe an. Eine

Einzelfallbeurteilung für vom Standardfall abweichende Verhältnisse war mit dem Bewertungsverfahren bzw. dem bislang verwendeten analytischen Modell nur in eingeschränkter Weise möglich.

## **1.2 Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte**

### **1.2.1 Allgemeine Zielsetzung**

Vor dem oben beschriebenen Hintergrund hatte das Umweltbundesamt (UBA) im Umweltforschungsplan (UFOPLAN) 2013 das Vorhaben für die „Modellierung der Stoffmigration und Erarbeitung eines DV-gestützten Leitfadens“ ausgeschrieben. Für das BMU und das UBA als fachlich beratende Bundesoberbehörde als auch für den Vollzug in den Ländern ist die Umsetzung der Ableitungssystematik der geplanten Ersatzbaustoffverordnung (EBV) innerhalb eines Softwarewerkzeugs von großer Bedeutung. Die Anwender-orientierte Aufbereitung und Bereitstellung aller Berechnungs- und Bewertungsschritte zur Ableitung medianschutzbasierter Einbauwerte, einschließlich der erforderlichen Eingangsdaten und der Ausgabe der Tabellen zur Anwendung der EBV, soll die Implementierung und künftige Weiterentwicklung einer MantelV ermöglichen bzw. erleichtern.

Das zu entwickelnde Softwarewerkzeug Tool soll somit allen Akteuren aus Verwaltung und Wirtschaft einen einfachen Zugang zur Ableitungssystematik der medianschutzbasierten Einbauwerte der EBV und zur Bewertung der Einbaumöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen bieten. Darüber hinaus ist mit der Zurverfügungstellung eines anwenderfreundlichen Softwarewerkzeugs das Ziel verbunden, bei den Nutzern und relevanten Akteuren ein besseres Verständnis der Systematik und Transparenz herzustellen und die Akzeptanz und Vollzugstauglichkeit maßgeblich zu verbessern.

Über die Weiterentwicklung des Anwendungstools in ein Werkzeug für die Einzelfallbewertung soll zudem die Möglichkeit geschaffen werden, über das bisherige Maß hinausgehende Verwertungsmöglichkeiten für mineralische Einbaumaterialien zu prüfen oder Untergrundkonstellationen zu bewerten, die vom Standardfall der ErsatzbaustoffV abweichen. Damit wird ein innovativer Beitrag geleistet im Hinblick auf neue Einsatzmöglichkeiten und höhere Verwertungsquoten von Ersatzbaustoffen unter nachvollziehbarer, quantifizierbarer Sicherung des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes. (Hinweis: Für die Zulassung des Einsatzes von MEB in von der EBV abweichenden Einbauweisen und Untergrundkonstellationen sind Genehmigungen im Einzelfall durch die zuständigen Behörden erforderlich).

### **1.2.2 Aufgabenstellung**

Der allgemeinen Zielsetzung entsprechend wurden zwei Arbeitspakete (AP) definiert mit folgenden zentralen Aufgaben:

AP 1: Entwicklung eines Softwarewerkzeugs zur Ableitung medianschutzbasierter Einbauwerte (ME) für mineralische Ersatzbaustoffe (MEB) gemäß der in der EBV verwendeten Methodik, das für die Vollzugspraxis konzipiert ist, einfach und in transparenter Weise genutzt werden kann, alle erforderlichen Eingangsdaten verwaltet und eine regelmäßige Aktualisierung dieser Daten erlaubt.

AP2: Flexibilisierung der vorgezogenen Sickerwasserprognose als Grundlage für die Ableitung der ME durch die Weiterentwicklung des Berechnungsverfahrens mit dem Ziel, auch solche Fälle bewerten zu können, die von den Standardszenarien abweichen. Schwerpunkte der Weiterentwicklung sollte eine

realistischere Beschreibung sowohl des Quellterms, d.h. der Stofffreisetzung (transiente, d.h. mit der Zeit abklingende Freisetzungsraten) als auch des Transportterms, d.h. des Stofftransports im Unterboden (z.B. für spezifische Standort- bzw. Bodenverhältnisse) erreicht werden.

### **1.3 Struktur des Berichtes**

Dieser Bericht zum Abschluss des Forschungsvorhabens gliedert sich einschließlich dieser Einführung in vier Kapitel zuzüglich einer Auflistung der relevanten Quellen. In einem Anhang werden alle wesentlichen Daten und Informationen zum neu entwickelten Tool BEMEB (Bewertung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe) im Detail beschrieben bzw. aufgelistet.

In Kapitel 2 werden zunächst die fachlichen Grundlagen dargestellt, die zum Verständnis des Fachkonzepts zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen und der dieser Bewertung zugrundeliegenden Berechnungsverfahren erforderlich sind.

In Kapitel 3 wird das neu entwickelte BEMEB-Tool ausführlich und im Detail beschrieben, einschließlich der Anbindung an das bestehende Tool WinSMART, welches im Rahmen der BMBF-Initiative TASK (Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum Leipzig) entwickelt wurde und für eine erweiterte Einzelfallbewertung verwendet werden kann.

Kapitel 4 beschreibt typische Anwendungsfälle, sowohl für die Standardszenarien der EBV als auch für individuelle Einzelfallbewertungsfälle mit dem BEMEB-Tool sowie die erweiterte Einzelfallbewertung mit Hilfe des BEMEB-Tools und WinSMART.



## 2 Fachliche Grundlagen

### 2.1 Fachkonzept zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien

#### 2.1.1 Einführende Hinweise

Das Fachkonzept zur Bewertung der Materialqualitäten und der Einsatzmöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) und Bodenmaterialien im Rahmen der geplanten Mantelverordnung basiert auf den Ergebnissen des vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) im Jahr 2008 abgeschlossenen UBA UFOPLAN-Vorhaben "Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes „Sickerwasserprognose“ in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden" (Susset und Leuchs 2011) sowie dem am ZAG Tübingen von 2007 bis 2011 durchgeführten UBA UFOPLAN-Vorhaben "Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Sekundärrohstoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge" (Abschlussbericht in Susset et al. 2018). Das wissenschaftliche Fundament bilden die Erkenntnisse aus zahlreichen Vorhaben des BMBF-Forschungsverbundvorhabens SIWAP in den Jahren 1998 bis 2007 und aus weiteren nationalen und internationalen Forschungsprojekten.

Mit der Ausgestaltung des Fachkonzepts und dessen Umsetzung soll sichergestellt werden, dass zwei Ziele erreicht werden:

- ▶ einerseits sollen vor dem Hintergrund ökonomischer Aspekte und einer nachhaltigen Entwicklung des Recyclings mineralische Ersatzbaustoffe im Sinne der Kreislaufwirtschaft und der Ressourceneffizienz gleichwertig wie Primärrohstoffe eingesetzt werden, um natürliche Ressourcen zu schonen;
- ▶ andererseits muss der Einsatz mineralischer Ersatzbaustoffe so erfolgen, dass schädliche Veränderungen des Bodens und des Grundwassers unbedingt vermieden werden. Schließlich ist die Umweltkompatibilität ein elementarer Bestandteil der Nachhaltigkeitsstrategien und des Life Cycle Assessments.

Die Prüfung und Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von MEB und Bodenmaterialien basiert auf sogenannten *medienschutzbasierten Einbauwerten (ME)*, die für die in der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) geregelten Stoffkomponenten und -gruppen für die in der EBV berücksichtigten Einbauweisen und Untergrundkonstellationen ermittelt werden. Die Verwertung eines MEB in einer bestimmten Einbauweise und Untergrundkonstellation ist nur dann zulässig, wenn alle ME im Sickerwasser eingehalten werden.

Die derzeit realisierte Umsetzung des Fachkonzepts, d.h. die Systematik zur Ableitung der ME, welche die wesentliche Grundlage der EBV als Artikel 1 der Kabinettsfassung<sup>1</sup> der MantelV (BMUB 2017) ist, basiert auf verschiedenen Festlegungen, Konventionen und Annahmen, die in zahlreichen

---

<sup>1</sup> Verordnung der Bundesregierung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, kurz: MantelV. Die Kabinettsfassung der Mantelverordnung wurde durch die Bundesregierung am 3. Mai 2017 verabschiedet und durch den Bundestag (Bundestagsdrucksache 18/12213 vom 05. Mai 2017) zustimmend an den Bundesrat weitergeleitet. Das EU-Notifizierungsverfahren (EU-Not. 2017-176-D) startete am 05. Mai 2017, die Stillhaltefrist endete am 07. August 2017 ohne Einwände. Das Abstimmungsverfahren im Bundesrat (Bundesrats Drucksache 566/17) startete am 07. September 2017. Verschiedene Ausschüsse sprachen sich dafür aus, das Bundesratsabstimmungsverfahren bis zum Antritt einer neuen Bundesregierung zu vertagen, um mehr Zeit für die konstruktive Beratung der komplexen Fachverordnung zu gewinnen.

Fachsitzungen bundesweit abgestimmt wurden (siehe Susset et al. 2013) und eine standardisierte Bewertung der Einbaumöglichkeiten von MEB ermöglichen.

Alle wesentlichen Elemente des Fachkonzepts werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Wichtige Begriffe und Definitionen sind in Tabelle 2-1 zusammengestellt.

Tabelle 2-1: Zusammenstellung der Begriffe und Definitionen des Fachkonzepts der geplanten ErsatzbaustoffV

| Bezeichnung                          | Definition   |
|--------------------------------------|--|
| "Einbauweisen"                       | <p>Potenzieller Verwendungszweck eines mineralischen Ersatzbaustoffes, z.B. Einsatz in Bauwerken mit begrenzter Lebensdauer wie Straßendämme und Bahnkörper, Lärmschutzwälle, Parkplätze, ländliche Wege oder in spezifischen technischen Schichten in technischen Bauwerken wie Schottertragschichten, Frostschuttschichten, Unterbau (Damm).</p> <p>Jede Einbauweise ist durch spezifische mittlere Sickerwasserraten, ggf. Verdünnungsfaktoren sowie Mächtigkeiten und Einbaudichten der mineralischen Ersatzbaustoffe charakterisiert, die sich mehr oder weniger günstig auf das Freisetzungs- und Transportverhalten der Stoffe auswirken.</p> |
| "Mineralische Ersatzbaustoffe (MEB)" | <p>Mineralischer Baustoff, der als Abfall oder als Nebenprodukt in Aufbereitungsanlagen hergestellt wird oder bei Baumaßnahmen anfällt, unmittelbar oder nach Aufbereitung für den Einbau in technische Bauwerke geeignet und bestimmt ist sowie unmittelbar oder nach Aufbereitung unter die in der EBV bezeichneten MEB Stoffe fällt wie</p> <p>z.B. Recyclingbaustoffe, Bodenmaterial, Schlacken, Aschen, Gleisschotter.</p>  |
| "technische Bauwerke"                | <p>Jede mit dem Boden verbundene Anlage oder Einrichtung, die unter Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen hergestellt wird und technische Funktionen erfüllt, wie z.B. Straßen, Eisenbahngleise, Wege und Parkplatzflächen sowie der Ober- und Unterbau von Industrie- und Gewerbeflächen, Leitungsgräben, Baugruben sowie Erdbaumaßnahmen wie Lärm- und Sichtschutzwälle und Deiche. Weiter gehören hierzu auch Aufschüttungen zur Stabilisierung von Böschungen und Bermen sowie Baustraßen bei Abgrabungs- und Verfüllungsmaßnahmen.</p>  |

| <p>“Wasser- zu Feststoffverhältnis (WF)“</p>   | <p>Definition nach DIN 19528 (2009): Verhältnis des bis zur Probenahme insgesamt durch den Feststoff geströmten Flüssigkeitsvolumens (hier: Wasser in Liter) zur eingebauten Trockenmasse des zu untersuchenden Feststoffs in der Säule (hier: Feststoff in kg Trockenmasse). Im Falle von technischen Bauwerken der EBV: Verhältnis des innerhalb eines Zeitraums insgesamt durch den Ersatzbaustoff geströmten Sickerwassers (in Liter) zur Masse des Ersatzbaustoffes in einer bestimmten Bauweise (in kg).</p>   |
|--|--|
| <p>“Medienschutzbasierte Einbauwerte (ME)“</p> | <p>Der Begriff “medienschutzbasiert“ bezieht sich hier auf den Boden- und Grundwasserschutz. In Abhängigkeit vom Einsatzbereich (hydraulische Eigenschaften der technischen Schicht) den Stoffeigenschaften und den Sorptionseigenschaften der darunterliegenden Bodenzone</p>   |
| <p>Bezeichnung</p>                             | <p>Definition</p>  |
|  | <p>(ungünstiger Fall: GW-Abstand &gt; 0, 1 m – 1 m keine Rückhaltung; günstiger Fall Sand oder Lehm/Schluff/Ton mit mehr oder weniger hohen Rückhaltepotentialen) sind für die verschiedenen Einsatzbereiche spezifische maximale Konzentrationen eines Stoffes im Sickerwasser an der Unterkante eines technischen Bauwerks mit Ersatzbaustoffen akzeptabel. Ziel ist der Schutz der Umweltmedien Boden und Grundwasser unter Berücksichtigung phys.-chem. Randbedingungen (Verdünnung, Rückhaltung etc.) und der Konventionen bzgl. Beurteilungszeitraum, Beurteilungsmeter, usw..</p>   |
| <p>“Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5“</p>        | <p>Faktor, der durch das BMU zur Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit festgelegt wurde, indem die ME mit 1,5 multipliziert wurden. Aus fachlicher Sicht stellt der Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5 einen Kompromiss aus Nachhaltigkeit, Unsicherheit von Modelleingangsparametern, Modellzuverlässigkeit und der Lebensdauer von Bauwerken dar. Die Unsicherheiten und der Verhältnismäßigkeitsfaktor wurden im Rahmen dieses Ergänzungsvorhabens nicht quantitativ abgeleitet. Sie können erfahrungsgemäß jedoch relativ hoch sein, d.h. der Faktor ist eher konservativ. Der Faktor 1,5 war bereits Grundlage des ersten Arbeitsentwurfs der ErsatzbaustoffV und wurde mit den beteiligten Kreisen intensiv diskutiert.</p> |



| <p>„Bodenszenarien“ bzw. „Bodenart“ oder „Bodentyp“</p> | <p>Für die Berechnung der medien-schutz-basierten Einbauwerte von retardierbaren/abbaubaren Stoffen in den günstigen Szenarien wurden zwei Boden-kategorien unterschieden: Sandböden mit moderatem Rückhalte-/Abbauvermögen und lehmig/schluffig/tonige Böden mit i.d.R. höherem Rückhalte-/Abbauvermögen. Beide Boden-kategorien wurden auf der Grundlage einer statistischen Auswertung der charakteristischen Leitbodeneinheiten in Deutschland ermittelt (BÜK, BGR, 2006). Daraus resultieren Abschätzungen der typischen Mächtigkeit der Bodeneinheiten, Tongehalte, pH-Werte, organische Kohlenstoffgehalte und der hydraulischen Eigenschaften der Böden. Für die Modellierung des Rückhalte- und Abbauvermögens der beiden StandardBodenszenarien wurden die 90. Perzentile der Parameterwerte ausgewählt. Dies bedeutet, dass mindestens 90 % der sandigen/schluffigen Böden in Deutschland die abgeschätzten typischen Eigenschaften der beiden Bodenszenarien mindestens einhalten oder günstigere Eigenschaften besitzen.</p> |
|---|---|
| <p>„Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS)“</p>            | <p>Konzentration eines Stoffes, die nicht dazu geeignet ist, eine signifikante Änderung des chemischen Zustandes des Grundwassers hervorzurufen (Geringfügigkeitsschwelle, GFS; LAWA, 2004). Diese wurden durch die LAWA für relevante Substanzen auf der Grundlage von öko- und / oder humantoxikologischen Untersuchungen abgeleitet.</p>   |
| <p>„Bezugsmaßstab (BM)“</p>                             | <p>Zielwerte der Konzentrationen im Sickerwasser am Ort der Beurteilung (OdB) sind grundsätzlich die Geringfügigkeitsschwellen. Für einige Schwermetalle (Blei, Cadmium, Nickel, Vanadium und Zink) übersteigen die Konzentrationen in WF 2-Eluaten natürlicher (nicht kontaminierter) Böden die GFS (Utermann 2011). Dies wird auf hintergrund- und/oder methodenspezifische Artefakte zurückgeführt (z.B. DOC-Mobilisierung und DOC-gekoppelte Stofffreisetzung in gestörten Pro-</p>   |
| <p>Bezeichnung</p>                                      | <p>Definition</p>   |
|   | <p>ben). Für diese Stoffe werden die von Utermann (2011) abgeleiteten Bezugsmaßstäbe als Zielwerte für die Berechnung der ME verwendet, da davon ausgegangen werden kann, dass die Konzentrationen in natürlichen Bodenlösungen keine Grundwassergefährdung hervorzurufen. Grundlage für die Ableitung der Bezugsmaßstäbe sind umfassende Untersuchungen und statistische Auswertungen aus Forschungsvorhaben der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zu gelösten und desorbierbaren Spurenelementgehalten in der ungesättigten Bodenzone von ca. 300 Standorten der Boden-Dauerbeobachtung sowie der Bodenzustandserhebung unter forst- und landwirtschaftlicher Bodennutzung (detaillierte Beschreibung in Utermann 2011).</p>  |

|  |   |
|--|---|
| <p>“Ort der Beurteilung (OdB)”</p>                     | <p>Ort an dem der Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) bzw. der Bezugsmaßstab (BM) im Sickerwasser eingehalten werden muss. Der Ort der Beurteilung für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser ist der Übergangsbereich von der wasserungesättigten zur wassergesättigten Zone gemäß Grundwasserverordnung</p>   |
| <p>“Filterkapazität (FK)”</p>                          | <p>Die Filterkapazität FK ist der maßgebende Parameter zur Bewertung des sogenannten Anreicherungskriteriums. Die boden- und stoffspezifischen FK-Werte ergeben sich aus dem Bodenvorsorgewert (nach BBodSchV bzw. Hilfswerte nach Untersuchungen der BGR) abzüglich des Hintergrundwertes eines Stoffes im Boden (90. Perzentile in Sand bzw. in schluffigen Böden nach BGR).</p>  |
| <p>“Materialqualität” und<br/>“Materialwerte (MW)”</p> | <p>„Eluat-Qualität“ eines mineralischen Ersatzbaustoffes, definiert durch die im WF 2-Säulenkurzeluat nach DIN 19528 für die relevanten Substanzen ermittelten Konzentrationen. Diese sogenannten Materialwerte müssen im Rahmen der rechtsverbindlichen Güteüberwachung nach DIN 19528 (z.T. auch gleichwertig DIN 19529 und DIN 19527 zugelassen) untersucht werden, um die Probe einer bestimmten Materialqualität bzw. Materialklasse zuordnen zu können.</p> |
| <p>“Materialklasse”</p>                                | <p>Klassen von Materialqualitäten eines mineralischen Ersatzbaustoffes. Im Falle einer hohen Variabilität der Materialqualitäten (i.d.R. verursacht durch die Heterogenität eines Materialstroms) werden verschiedene Materialklassen unterschieden (z.B. RC-1 bis RC-3 mit verschiedenen Materialwerten).</p>  |
| <p>“Materialwertetabelle”</p>                          | <p>In der ErsatzbaustoffV sind für jeden mineralischen Ersatzbaustoff und ggf. für die unterschiedlichen Materialklassen eines mineralischen Ersatzbaustoffes die Grenzkonzentrationen in WF 2-Eluaten in so genannten Materialwertetabellen aufgelistet.</p>   |
| <p>“Einbautabelle”</p>                                 | <p>In der ErsatzbaustoffV werden für jeden mineralischen Ersatzbaustoff und ggf. für die verschiedenen Materialklassen die potenziellen und aus Sicht des Medienschutzes zulässigen Einbauweisen in so genannten Einbautabellen aufgelistet (+/--Bewertung).</p>  |

### 2.1.2 Antizipierende Sickerwasserprognose

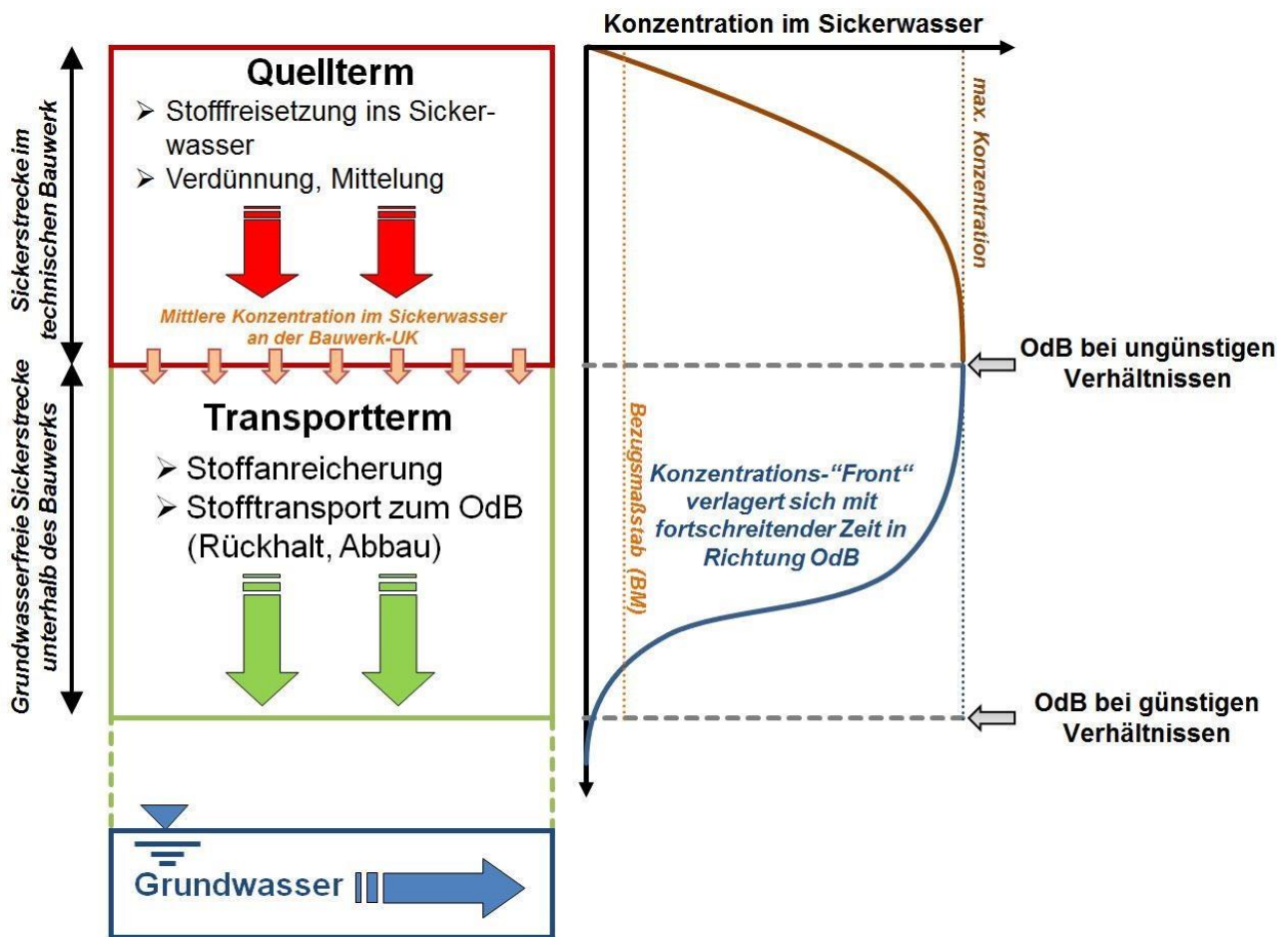
Für eine fachgerechte Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) in der Umwelt müssen die Freisetzung der in den in Frage stehenden mineralischen Ersatzbaustoffen enthaltenen Schadstoffen in das Sickerwasser sowie der Transport der freigesetzten Stoffe im Sickerwasser beurteilt werden. Die Quantifizierung dieser Prozesse im Rahmen einer *antizipierenden Sickerwasserprognose* für die aus den MEB freigesetzten Stoffen und Stoffgruppen ist deshalb der Kern der Systematik für die Ableitung von Einbauwerten für die Ersatzbaustoffe und Bodenmaterialien (Susset und Leuchs 2011).

Bei der Ableitung von Grenzwerten für Salze, Metalle und organische Verbindungen (Organika) für die Verwertung von Bodenmaterial und MEB werden die Freisetzung der Schadstoffe in das Sickerwasser und der Transport der Schadstoffe im Sickerwasser der ungesättigten Bodenzone bis zum Ort der

Beurteilung (OdB) getrennt betrachtet. Man spricht entsprechend von einem *Quellterm* und einem *Transportterm* (Abbildung 2-1).

Zwei Kriterien sind für die Ableitung der medienschutzbasierten Einbauwerte generell relevant: (i) das *Anreicherungskriterium* (AK), d.h. die Beschränkung der (i. d. R. vorübergehenden) Stoffanreicherung im Unterboden auf ein akzeptables Maß sowie (ii) das *Durchbruchskriterium* (DK), d.h. die Beschränkung der Konzentrationen im Sickerwasser am OdB auf Werte unter dem Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) oder einem alternativ festgelegten Bezugsmaßstab (BM) innerhalb eines bestimmten Zeitraums.

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Unterteilung der antizipierenden Sickerwasserprognose in einen Quellterm und einen Transportterm und der Entwicklung der Stoffkonzentration im Sickerwasser. Unter Feldbedingungen werden i. d. R. maximale Stoffkonzentrationen im Sickerwasser an der UK des Quellterms erreicht (z.B. Grathwohl und Susset 2009). In der weiteren Sickerwasserpassage im Unterboden (Transportterm) kann mikrobiologischer Abbau zu einem dauerhaften Rückgang der Sickerwasserkonzentrationen (Grathwohl und Susset 2001; Susset 2004) und Sorption an die Bodenmatrix zu einer Verzögerung des Durchbruchs der Konzentrations-“Front“ am Ort der Beurteilung (OdB) führen. Zudem kommt es zu einer (i. d. R. vorübergehenden) Stoffanreicherung im Boden.



### 2.1.3 Materialqualitäten und Materialklassen

In der Praxis kann nicht jeder MEB für jede spezifische Einbauweise im Einzelnen untersucht werden. Deshalb wurden allgemein einsetzbare, genormte und geeignete Referenzmethoden zur Abschätzung des Freisetzungsverhaltens der in den MEB enthaltenen Stoffe eingeführt. Basierend auf Ergebnissen des Forschungsverbundprojekts SIWAP des BMBF, internationalen Forschungsergebnissen sowie nationalen und internationalen Normungsarbeiten wird der Säulenversuch als DIN genormtes Verfahren empfohlen (DIN 19528 2009). Per Konvention wird die im Säulenversuch bis zu einem Wasserfeststoffverhältnis von 2 L kg<sup>-1</sup> im Eluat gemessene mittlere kumulative Konzentration der

mittelfristig zu erwartenden mittleren Konzentration im Sickerwasser unterhalb der MEB-Schicht gleichgesetzt.

Für jeden einzelnen der in Frage stehenden mineralischen Ersatzbaustoffe wurden eine Vielzahl von Proben in Säulenversuchen nach DIN 19528 untersucht, um sowohl die bewertungs- und regelungsrelevanten Stoffe als auch deren Freisetzungspotential materialspezifisch zu ermitteln.

Für jeden MEB wurde so die *Materialqualität* bestimmt, welche den MEB durch einen Katalog von so genannten "Materialwerten (MW)" für die MEB-spezifisch relevanten Stoffe charakterisieren. Diese MW entsprechen jeweils dem 90. Perzentil der in den Säulenversuchsreihen ermittelten kumulativen Konzentrationen bis WF2. MW, die nach aktuellstem Kenntnisstand geringer sind als der ME der für eine bestimmte Materialklasse noch zulässigen empfindlichsten Einbauweise bleiben unbeachtet bzw. sind per Definition nicht regelungsrelevant und müssen nicht in die regelmäßige Güteüberwachung übernommen werden.

Im Falle einer hohen Variabilität der Materialqualitäten eines MEB (verursacht durch eine hohe Variabilität der stofflichen Zusammensetzung eines Massenstroms, wie z.B. Bau- und Abbruchabfälle sowie Bodenmaterialien) wurden verschiedene Materialklassen mit verschiedenen MW eingeführt (z.B. Materialklassen 1 bis 3 für Recyclingbaustoffe). Die MW aller Materialklassen für das WF2-Eluat gemäß der Kabinettsfassung der EBV (BMU 2017) wurden von Susset et al. (2018) abgeleitet und sind im Anhang aufgelistet (Tabelle 6-8 bis Tabelle 6-12).

#### **2.1.4 Einbauweisen**

Nach dem Fachkonzept werden die Einsatzmöglichkeiten von MEB und Bodenmaterialien für verschiedene wasserdurchlässige oder teilweise wasserdurchlässige Einbauweisen geprüft und bewertet. Dabei wird zwischen Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus und Einbauweisen des Schienenverkehrswegebbaus unterschieden. Bewertet wird, ob die Verwendung eines MEB oder eines Bodenmaterials in einem technischen Bauwerk in einer bestimmten Funktion zulässig ist oder nicht. Eine Einbauweise definiert dementsprechend Bauwerk und Funktion der MEB-Verwendung (z.B. „Einbauweise 7: Schottertragschicht als Tragschicht ohne Bindemittel unter gebundener Deckschicht in einem Straßendamm“). Jedes technische Bauwerk und die für eine Verwendung von MEB in Frage kommenden Einbausichten sind in den einschlägigen Technischen Regelwerken und Normen eindeutig definiert.

#### **2.1.5 Stofffreisetzungsprozesse und -muster**

Die Freisetzung von Stoffen aus den mineralischen Ersatzbaustoffen, und damit die Stoffkonzentration im Sickerwasser (oder näherungsweise im Eluat der Laborsäule), ist abhängig von der Kontaktzeit zwischen Sickerwasser und MEB und von der Dynamik des Massentransfers von der Festphase in die wässrige Phase. Das Sickerwasser wird sukzessive aufgesättigt und nach einer ausreichenden Kontaktzeit stellen sich Gleichgewichtsbedingungen ein, d.h. die Konzentrationen im Wasser und im Feststoff sind im Gleichgewicht, und es findet kein Massentransfer zwischen Feststoff und Wasser statt (Abbildung 2-1). Die sich einstellenden Gleichgewichtskonzentrationen repräsentieren das höchste Level der Konzentrationen im Sickerwasser, die über einen gewissen Zeitraum der Stofffreisetzung auf diesem Level bleiben, bis sich Nichtgleichgewichtsbedingungen einstellen und die Konzentrationen zurückgehen.

Die Gleichgewichtskonzentration kann durch sekundäre Wasserinhaltsstoffe beeinflusst werden. Im Fall von nichtionischen organischen Stoffen spielen hier insbesondere der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) und Kolloide eine wichtige Rolle. Bei Schwermetallen sind die pH- und Redoxbedingungen (siehe unten) von Bedeutung.

Der Zeitpunkt des Übergangs von Gleichgewichts- zu Nichtgleichgewichtsbedingungen hängt einerseits von der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit zwischen Sickerwasser und MEB ab, und andererseits von der Dynamik des Desorptions- bzw. Freisetzungsprozesses. Die an der Stofffreisetzung beteiligten bzw. die Freisetzung steuernden Prozesse sind je nach betrachteter Stoffgruppe unterschiedlich.

Bei Schwermetallen sind in der Regel mehrere Prozesse zu beachten, die sich häufig auch gegenseitig beeinflussen. Die Zahl möglicher Einflussfaktoren auf die Stofffreisetzung ist entsprechend groß. Zu den wichtigsten Prozessen und Einflussfaktoren zählen:

- ▶ Komplexierung: metallische Verbindungen, v.a. Kupfer und Nickel können in Böden und mineralischen Abfällen organisch komplex gebunden sein, was zu einer höheren Mobilität und einer höheren gelösten Konzentrationen des betreffenden Stoffes führen kann als es bei Gleichgewichtsbedingungen und den hydrogeochemischen Randbedingungen zu erwarten wäre (z.B. Schachtschabel et al. 1992; Dijkstra et al. 2004).
- ▶ pH-Wert: kann sich während der bzw. durch die Freisetzung ändern; beeinflusst sowohl die Sorption (z.B. bei Arsen und Vanadium, siehe Stange und Rückkamp 2016) als auch die Löslichkeit von Stoffen in unterschiedlicher stoffspezifischer Weise (z.B. Bourg 1995); beeinflusst die Freisetzung von Sekundärschubstanzen wie Trübe und DOC (vgl. Susset et al. 2017).
- ▶ Redoxpotential: beeinflusst die Spezierung (Oxidationsstufe) und damit die Bindungsformen und die Mobilität von Schwermetallen; der Einfluss der Redox-Prozesse ist dabei in der Regel eng an den pH-Wert gebunden (z.B. Calmano et al. 1992, Schachtschabel et al. 1992).
- ▶ Boden- bzw. MEB-Bestandteile: die Bindungsstärke der Metalle hängt von den Boden- bzw. Materialeigenschaften ab, v.a. von den Gehalten an Huminstoffen, Tonmineralen und Sesquioxiden (z.B. Utermann et al. 2005).

Bei organischen Verbindungen sind für die Freisetzung bzw. Desorption in der Regel folgende Faktoren von vorrangiger Bedeutung:

- ▶ Sorptionsneigung der Verbindung: bestimmt – zusammen mit dem Gehalt an organischem Kohlenstoff – die freisetzbare Stoffmenge; ist in der Regel in etwa umgekehrt proportional zur Löslichkeit der Verbindung (Kleineidam et al. 1992).
- ▶ Gehalt an organischem Kohlenstoff des betrachteten Bodens oder MEB: bestimmt im Wesentlichen die Sorptionskapazität und damit – zusammen mit der Sorptionsneigung der Verbindung – die freisetzbare Stoffmenge; auch die Art des organischen Kohlenstoffs kann eine Rolle spielen (Kleineidam et al. 1999)
- ▶ Korngröße bzw. Korngrößenverteilung des betrachteten Bodens oder MEB: die Größenverteilung der Boden- oder MEB-Körnung bestimmt die bei der Freisetzung zurückzulegenden Diffusionstrecken und damit die Dynamik des Freisetzungsprozesses; je kleiner die Korngröße ist desto schneller ist der Desorptionsprozess (z.B. Finkel und Grathwohl 2016).

Bei Salzen erfolgt die Freisetzung vergleichsweise schnell und ist gekennzeichnet von hohen Austragsraten aufgrund der hohen Löslichkeiten und einem raschen und deutlichen Abklingverhalten. Entscheidend sind hier die Anteile des zu bewertenden mineralischen Ersatzbaustoffs an salzhaltigen Materialien (z.B. Gipsanteile in RC-Baustoffen) → Sulfat) sowie dessen Vorbehandlung (z.B. Auswaschung leicht löslicher Salze aus gewaschenen Hausmüllverbrennungaschen).

Je nachdem welche der oben beschriebenen Prozesse die Stofffreisetzung aus einem MEB dominieren, ergeben sich unterschiedliche Freisetzungsmuster in Bezug auf den zeitlichen Verlauf der Freisetzung. In der EBV werden für die Freisetzung von organischen Verbindungen, Schwermetallen und Salzen drei Freisetzungsmuster bzw. Quelltermtypen unterschieden (Tabelle 2-2). Diese gehen auf Experimente von Susset und Leuchs (2008) zur Stofffreisetzung aus unterschiedlichen MEB in Feldlysimetern, Laborsäulen und in Batchtests zurück.

Nicht für alle Materialien folgt die Freisetzung eindeutig und reproduzierbar einem dieser drei Freisetzungsmuster. Material- und stoffabhängig gibt es Abweichungen (Susset und Leuchs 2008) und eine Zuordnung ist nicht in allen Fällen eindeutig möglich. In diesen Fällen wird für die Bewertung – vereinfachend und im Sinne eines konservativen Ansatzes – der Quelltermtyp III, d.h. eine langfristig anhaltende Freisetzung auf einem konstanten Konzentrationslevel angenommen, wobei die kumulative Konzentration bis WF2 maßgebend ist. Dass Letztere auch hier geeignet ist, die Materialien sicher zu beurteilen, zeigen Susset und Leuchs (2008) und Grathwohl und Susset (2009).

Tabelle 2-2: Übersicht der Quelltermtypen, die in der Bewertungssystematik der EBV unterschieden werden

| Quelltermtyp  | Zuzuordnende Stoffe  | Beschreibung und Erläuterung   |
|---|--|--|
| I – Schnelles Abklingen auf eine geringe Freisetzungsrate                   | gut wasserlösliche Substanzen, insbesondere Salze (Sulfat, Chlorid und Fluorid)                  | Freisetzung der Stoffe erschöpft sich in der Regel schnell und Freisetzungsrate klingt über die Zeit deutlich ab; gut reproduzierbares Abklingverhalten innerhalb einer Materialart (z.B. HMVA oder RC-Baustoffe), das durch Typkurven beschrieben werden kann.  |
| II – Teilweises Abklingen der Freisetzung mit anschließendem langem Tailing | Schwermetalle  | Anfänglich schnelle Auswaschung mobiler bzw. leicht gebundener Stoffanteile mit anschließend diffusionslimitiertem Austrag mit einem mittel- bis langfristigen Tailing der Eluatkonzentrationen; Freisetzungsrate variiert für die meisten MEB stark von Probe zu Probe und kann nur für einzelne MEB mit einer generalisierten Typkurve beschrieben werden. |
| III – Lang anhaltende, relativ konstante Freisetzung                        | Stark sorbierende organische Stoffe und Schwermetalle mit überwiegend starker Bindung an den MEB | Über lange Zeiträume relativ konstante Freisetzungsrate durch Verhältnisse im oder nahe am Gleichgewicht zwischen wässriger und Festphase. Später Rückgang der Eluatkonzentrationen, wenn sich Nichtgleichgewichtsbedingungen einstellen (abhängig Sorptionsneigung des Stoffes sowie Gehalt und Art des organisch gebunden Kohlenstoffes im MEB).           |

## 2.1.6 Klassifizierung der Untergrundverhältnisse

### 2.1.6.1 Untergrundkonstellation: Günstige vs. ungünstige Verhältnisse:

Hinsichtlich der gegebenen Untergrundkonstellation werden zwei Fälle unterschieden:

- (i) *günstige Verhältnisse* liegen vor, wenn unterhalb des Bauwerks, in dem ein MEB verwendet wird, dauerhaft eine grundwasserfreie Sickerstrecke von mindestens einem Meter nicht unterschritten wird;
- (ii) *ungünstige Verhältnisse* liegen vor, wenn eine solche Sickerstrecke nicht dauerhaft gegeben ist (höchster gemessener Grundwasserstand zzgl. 0,3 Meter Sicherheitsabstand < 1 m unterhalb des Bauwerks oder bei Untergründen mit bekanntermaßen sehr geringen Rückhalteeigenschaften, z.B. Karst oder Kiesterrassen).

### 2.1.6.2 Bodenarten

Für die Systematik zur Ableitung von medianschutzbasierten Einbauwerten (ME) wurden zwei Bodenkategorien unterschieden: Sandböden mit moderatem Rückhalte-/Abbauvermögen und lehmig/schluffig/tonige Böden mit i.d.R. höherem Rückhalte-/Abbauvermögen. Beide Bodenkategorien wurden auf der Grundlage einer statistischen Auswertung der charakteristischen Leitbodeneinheiten in Deutschland ermittelt (BGR 2006). Daraus resultieren Abschätzungen der typischen Mächtigkeit der Bodeneinheiten, Tongehalte, pH-Werte, organische Kohlenstoffgehalte und der hydraulischen Eigenschaften der Böden.

Die Klassifizierung wurde von Susset und Leuchs (2011) in enger Abstimmung mit BMUB/UBA und den Länderarbeitsgemeinschaften vorgenommen. Im Sinne einer konservativen Parameterwahl wurden die beiden Bodenarten so charakterisiert, dass mindestens 90% der ausgewerteten Sand- bzw. Schluffprofile höhere Rückhalte- und Abbaupotentiale bezüglich der EBV-relevanten Stoffkomponenten und -gruppen aufweisen, als bei der Ableitung der ME angenommen wird. Einen Überblick über die Perzentilverteilungen der Bodenkennwerte geben Susset et al. (2018; Tabelle 25, S. 222).

Diese Klassifizierung ist die Voraussetzung für eine generalisierte Bewertung in der EBV bei günstigen Verhältnissen. Ohne Einzelfallprüfung kann so mit einfachen Mitteln eine Entscheidung über die Zulässigkeit einer Verwertungsmaßnahme getroffen werden. Im Vollzug ist deshalb eine (u.U. sehr aufwändige) Bestimmung der Transportparameter im Boden nicht erforderlich. Es muss lediglich festgestellt werden, ob ungünstige oder günstige Verhältnisse vorliegen und in letzterem Fall, ob die gegebenen Bodenverhältnisse der Bodenart „Sand“ oder eher der Bodenart „Lehm/Schluff/Ton“ entsprechen.

## 2.1.7 Systematik zur Ableitung von medianschutzbasierten Einbauwerten

### 2.1.7.1 Standardbewertung vs. individuelle Bewertung

Die standardisierte Bewertung der Einbaumöglichkeiten der MEB wird in der EBV anhand von *Standardszenarien* durchgeführt, in welchen die bei der Ausarbeitung des Fachkonzepts getroffenen Festlegungen in Bezug auf die stoff-, boden- und einbauweisespezifischen Eingangsparameter der



Bewertung sowie hinsichtlich der Definition von Quellterm und Transportterm zusammengeführt werden.

Die Ableitungssystematik wird nachfolgend für diese Bewertung für *Standardszenarien* und die darin festgelegten Konventionen erläutert. Die Systematik kann in gleicher Weise jedoch auch für eine individuelle Bewertung angewendet werden, d.h. für von den Standardszenarien abweichende Annahmen.

#### 2.1.7.2 Allgemeine Festlegungen und Konventionen der Standardbewertung

**Transportterm nur bei günstigen Untergrundverhältnissen:** Der Transportterm wird nur berücksichtigt, wenn hinsichtlich der Untergrundkonstellation günstige Verhältnisse (s.o.) vorliegen. D.h., es gibt drei bewertungsrelevante Szenarien der Untergrundverhältnisse:

- (i) ungünstige Verhältnisse
- (ii) günstige Verhältnisse und sandiger Boden
- (iii) günstige Verhältnisse und lehmiger, schluffiger oder toniger Boden

**Transportterm für eine Sickerstrecke von 1 Meter:** Für den Transportterm wird im günstigen Fall per Konvention eine 1 Meter mächtige Schicht der Bodenzone unterhalb der MEB-Schicht betrachtet, unabhängig davon, wie groß der Flurabstand und wie lang die vorhandene grundwasserfreie Sickerstrecke tatsächlich ist.

**Transportterm nur bei nennenswertem Abbau oder Rückhalt:** Durch die Berücksichtigung des Transportterms werden Prozesse berücksichtigt, die zum Rückhalt des Stofftransports oder zum mikrobiologischen Abbau von Stoffen führen und etwaige Umweltbelastungen am OdB verzögern oder reduzieren. Bei Stoffen, für die nach dem aktuellen Kenntnisstand weder von einem nennenswerten Abbau noch von einem relevanten Rückhalt durch Sorption ausgegangen werden kann, wird der Transportterm nicht berücksichtigt. Dies ist der Fall für alle regelungsrelevanten Salze (Chlorid, Sulfat, Fluorid). Für diese ist dementsprechend – unabhängig davon, ob günstige oder ungünstige Verhältnisse vorliegen (siehe oben) – nur der Quellterm relevant.

**Abklingende Freisetzungsrates wird berücksichtigt bei Stoffen mit einem deutlichem und reproduzierbar nachgewiesenem Abklingverhalten der Freisetzung:** Neben Chlorid und Sulfat wurde für einige weitere Stoffkomponenten ein Abklingverhalten in bestimmten MEB nachgewiesen: (vgl. Susset et al., 2018) : Antimon und Molybdän aus CUM, Chrom (ges.) und Kupfer aus RC, Chrom (ges.), Kupfer, Molybdän und Antimon aus HMVA sowie relevante Schwermetalle aus Ziegelmaterialien (ZM). Die medienschutzbasierte Beurteilung unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens und der Materialqualitäten der MEB ergab, dass das Abklingverhalten für Antimon und Molybdän von CUM in den offenen Bauweisen bis 1 Meter Mächtigkeit und für Ziegelmaterialien in den Bauweisen bis 12 cm Mächtigkeit für die Bewertung des Einsatzes im Rahmen der EBV relevant ist.

**Lage des Ortes der Beurteilung (OdB):** Der OdB liegt bei günstigen Verhältnissen für Schwermetalle und organische Stoffkomponenten oder –gruppen mit nennenswertem Abbau oder Rückhalt 1 m unterhalb der UK des Bauwerks. Bei ungünstigen Verhältnissen oder für Salze und andere Stoffe und MEB mit einem deutlichem und reproduzierbar nachgewiesenem Abklingverhalten der Stofffreisetzung liegt der OdB an der Bauwerk-UK.

**Bewertungszeitraum:** Für alle Stoffkomponenten und mineralische Ersatzbaustoffe für die der Transportterm maßgebend ist, gilt ein Bewertungszeitraum von 200 Jahren. Innerhalb dieses Zeitraums dürfen die Konzentrationen im Sickerwasser am OdB den Geringfügigkeitsschwellenwert

(GFS) bzw. den Bezugsmaßstab (BM) nicht überschreiten. Für die Salze mit einem abklingenden Freisetzungsverhalten wurde festgelegt, dass die Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks innerhalb eines Zeitraums von 4 Jahren mindestens auf den GFS bzw. den BM abgeklungen sein muss.

**Bezugsmaßstab (BM):** In der Regel ist der Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) der maßgebliche kritische Wert am OdB für die Bewertung der Einbaumöglichkeiten der MEB. Bei einigen auch natürlich vorkommenden Elementen wird der GFS jedoch bereits in Sickerwässern von unbelasteten Böden überschritten (Duijnsveld et al. 2008 und 2010). In diesen Fällen wurden höhere Werte als der GFS als Bezugsmaßstab für WF 2-Eluate abgeleitet (Utermann 2011), um natürliche unbelastete Böden weiterhin uneingeschränkt verwenden zu können.

**Keine Berücksichtigung von Abbauprozessen bei der Anwendung des**

**Anreicherungskriteriums:** Für die Bewertung der Anreicherung der freigesetzten Stoffe in der Bodenzone unterhalb des Bauwerks werden ggf. ablaufende Abbauprozesse im Sinne einer konservativen Annahme nicht berücksichtigt.

**Ausschöpfungsgrad der Filterkapazität der Bodenzone:** Die Anreicherung der freigesetzten Stoffe in der relevanten Sickerstrecke von 1 m Länge darf nicht größer sein als 50% der Filterkapazität (FK) des Bodens; diese Maßgabe ist nicht relevant, wenn hierbei das Anreicherungskriterium zu Werten kleiner der GFS (bzw. des BM) führt (siehe nächster Punkt).

**Stoffanreicherung entsprechend der GFS (bzw. des BM) in jedem Fall zulässig:** Eine Stoffanreicherung, die sich aus einer konstanten Stoffkonzentration im Sickerwasser gleich der GFS (bzw. dem BM) ergibt, ist zulässig. Bei abklingenden Stofffreisetzungsraten ist der mittlere Konzentrationswert innerhalb des Bewertungszeitraums (= kumulative Quelltermkonzentration am Ende des Bewertungszeitraums) relevant.

**Verdünnung und kleinräumige Mittelung:** Kommt der MEB in einem Bauwerk zum Einsatz, in dem nur ein Teil des Sickerwassers den MEB durchsickert, so dass die an der UK des Bauwerks (= UK Quellterm) gemittelte Konzentration im Sickerwasser geringer ist als die Konzentration an der UK der MEBSchicht, dann darf diese Verdünnung bzw. kleinräumige Mittelung bei der Ermittlung der medienenschutzbasierten Einbauwerte (ME) berücksichtigt werden.

**Verhältnismäßigkeitsfaktor:** Zur unspezifischen Berücksichtigung von Unsicherheiten wurde durch das BMU ein sogenannter Verhältnismäßigkeitsfaktor von 1,5 festgelegt, der bei der Ermittlung der ME eingerechnet wird.

### 2.1.7.3 Schritte der Standardbewertung

Aus den oben beschriebenen Festlegungen und Konventionen lassen sich für die Methodik der MEAbleitung in Abhängigkeit der gegebenen Verhältnisse und dem Freisetzungsverhalten der betrachteten Stoffkomponente prinzipiell vier Bewertungsfälle unterscheiden (Tabelle 2-3):

Tabelle 2-3: Übersicht der möglichen Bewertungsfälle

|   | unregelmäßig, eher schwach oder nicht nachgewiesen | deutlich und regelmäßig reproduzierbar nachgewiesen |
|---|--|---|
| <b>Günstige Verhältnisse<sup>*)</sup></b>   | Einzelschritte siehe Abbildung 2-2                 | Einzelschritte siehe Abbildung 2-3                  |
| <b>Ungünstige Verhältnisse / Verhältnisse nicht relevant<sup>**)</sup></b>  | Einzelschritte siehe Abbildung 2-4                 | Einzelschritte siehe Abbildung 2-5                  |
| <p><sup>*)</sup> grundwasserfreie Sickerstrecke &gt; 1m ist vorhanden</p> <p><sup>**)</sup> erforderlich Sickerstrecke ist nicht vorhanden oder ist nicht relevant, da kein nennenswerter Rückhalt oder Abbau gegeben ist (Salze)</p> |  |   |

Unabhängig davon welcher der vier Fälle jeweils zutrifft, führt die Bewertung abschließend zu einem Vergleich der MW des gewählten MEB oder Materialklasse eines MEB mit den ME für die betrachtete wasserdurchlässige und teildurchlässige Einbauweise.

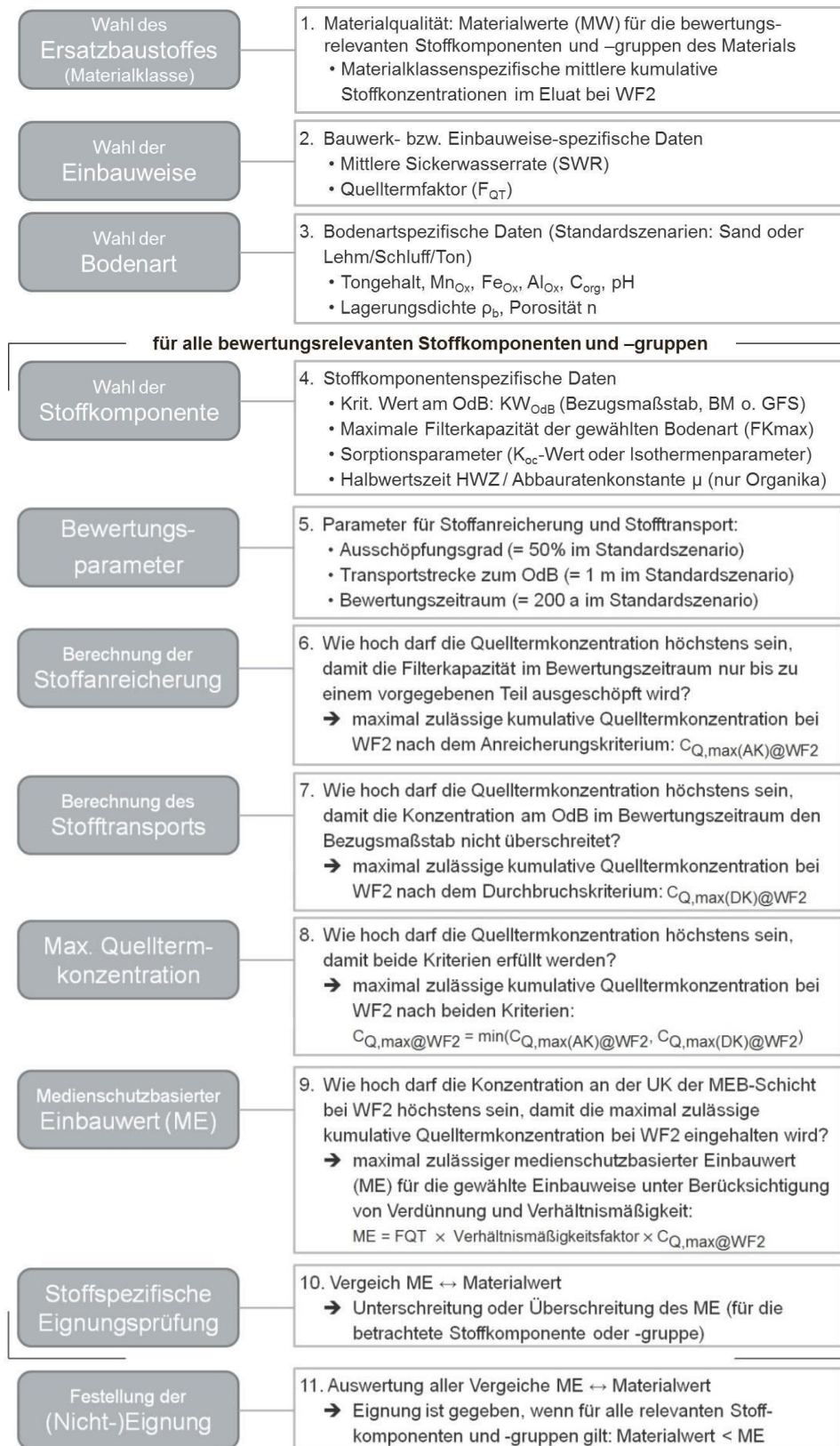
Wird die Bewertung für alle Einbauweisen und Untergrundszszenarien (siehe Abschnitt 2.1.7.2) durchgeführt, erhält man für den gewählten MEB oder die gewählte MEB-Klasse eine Einbautabelle, welche die Einbaumöglichkeiten des gewählten MEB im Überblick zeigt. („+“- oder „-“-Werte zeigen, ob eine Verwertung für die betreffende Einbauweise und die gegebene Untergrundkonstellation zulässig ist oder nicht).

In Abhängigkeit der Höhe der MW ergeben sich vielfältige Einbaumöglichkeiten für die günstigsten Materialklassen (z.B. RC-1 mit vielen zulässigen offenen und teildurchströmten Bauweisen) und entsprechend limitierte Einbaumöglichkeiten für ungünstige Materialklassen wie z.B. RC-3, die oft begrenzt sind auf teildurchströmte Bauweisen wie Straßendämme mit gebundener Deckschicht oder ggf. ausschließlich auf geschlossene Bauweisen.

Abbildung

- 2-2: Teilschritte der Ableitungssystematik für Metalle und Organika, die kein deutliches und regelmäßig nachgewiesenes Abklingverhalten der Freisetzung aus dem betrachteten Material zeigen, bei günstigen Verhältnissen.

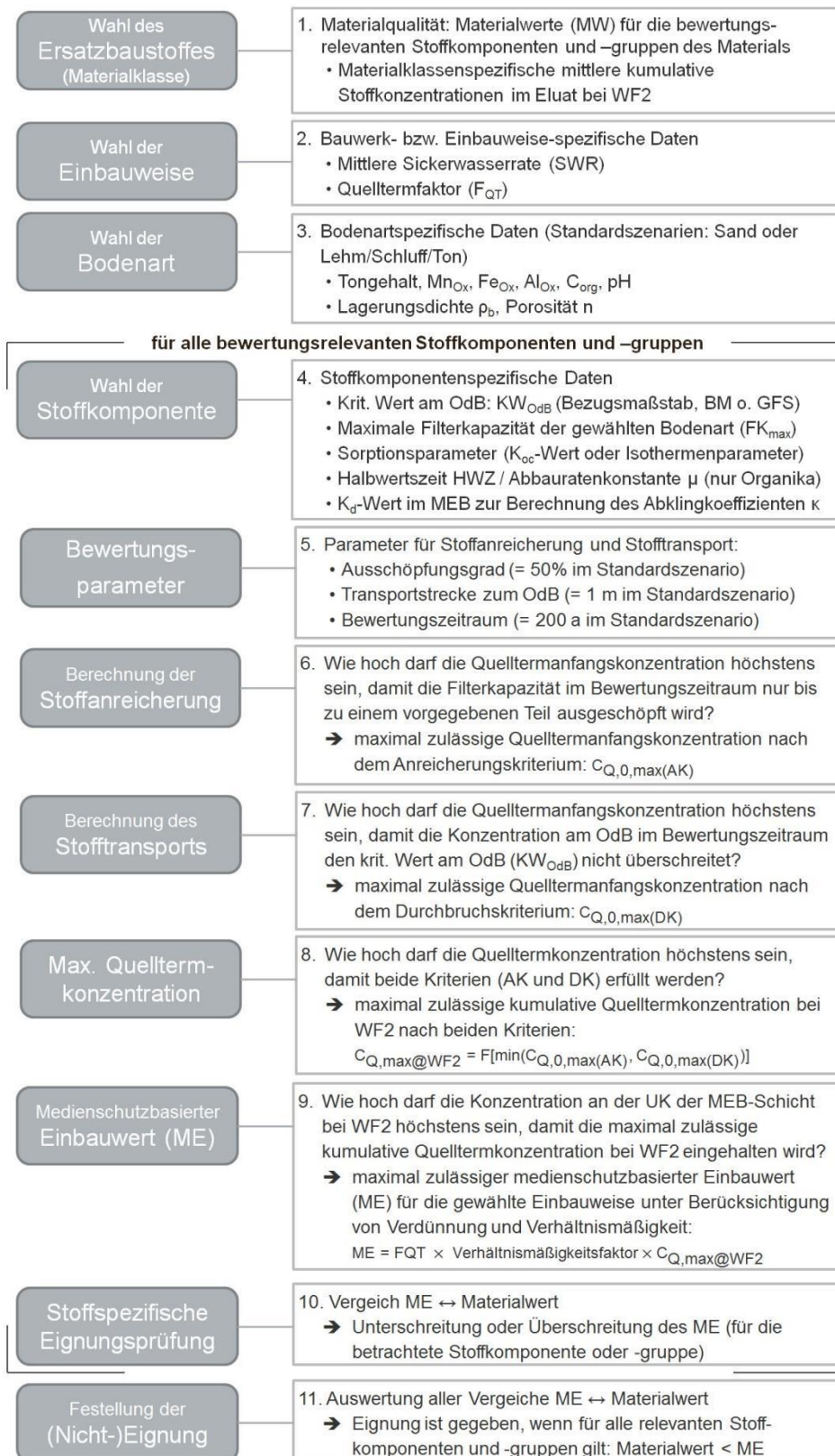
Abbildung



Abbildung

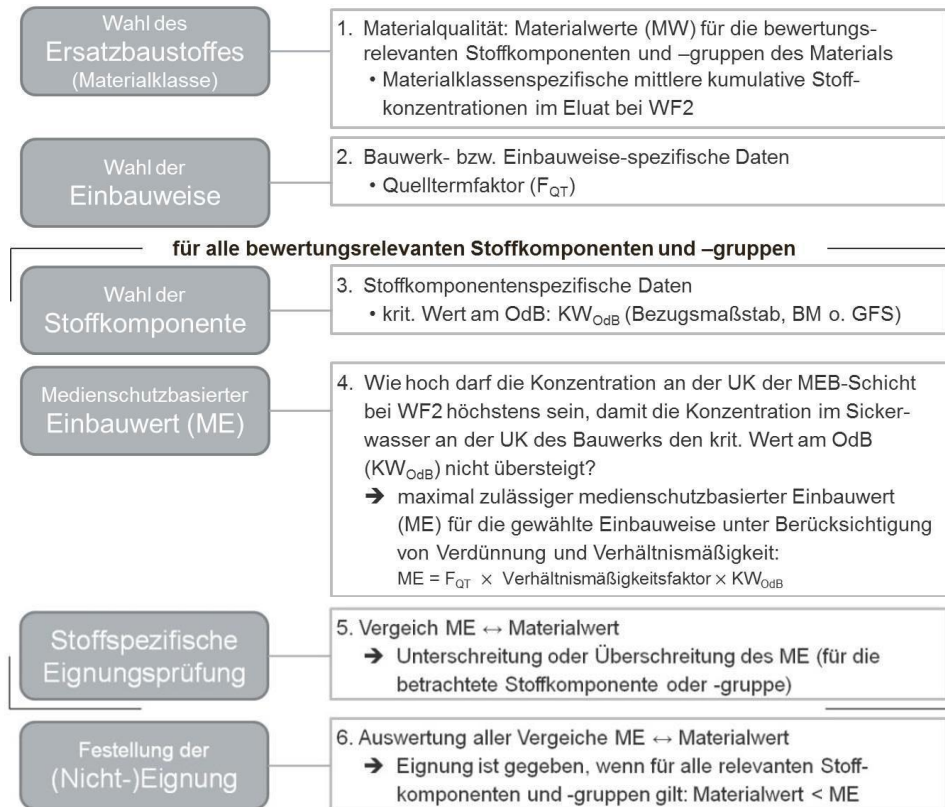
- 2-3: Teilschritte der Ableitungssystematik für Stoffkomponenten oder –gruppen und Materialien, für die ein deutliches Abklingverhalten der Freisetzung reproduzierbar nachgewiesen werden konnte bei günstigen Verhältnissen.

Abbildung



Abbildung

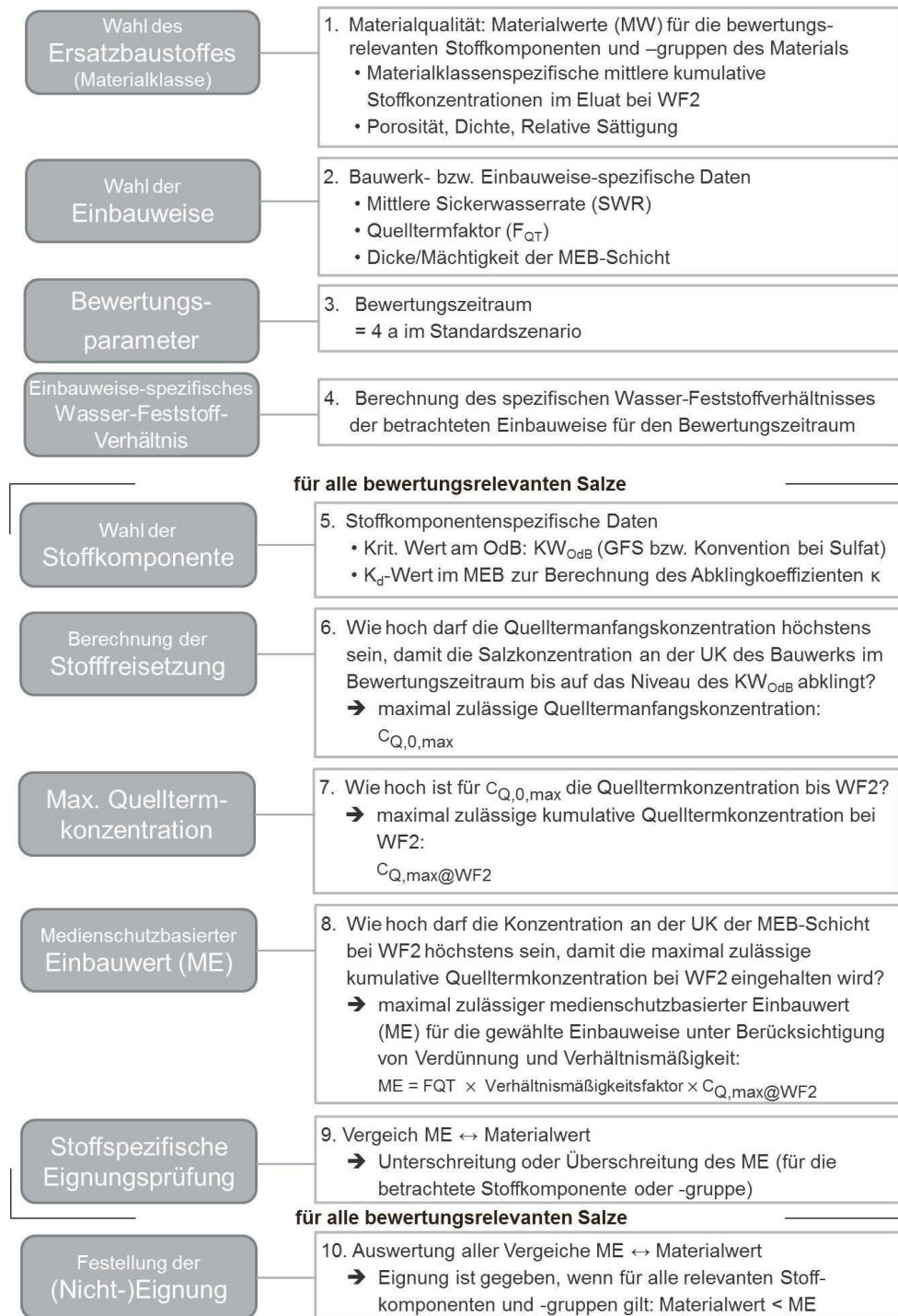
2-4: Teilschritte der Ableitungssystematik für Metalle und Organika sowie Fluorid, die kein deutliches und regelmäßig nachgewiesenes Abklingverhalten der Freisetzung aus dem betrachteten Material zeigen, bei ungünstigen Verhältnissen.



2-5: Teilschritte der Ableitungssystematik für Stoffkomponenten oder –gruppen und Materialien, für die ein deutliches Abklingverhalten der Freisetzung reproduzierbar nachgewiesen werden konnte bei ungünstigen Verhältnissen oder wenn die Verhältnisse nicht relevant sind, weil kein nennenswerter Rückhalt oder Abbau gegeben ist und daher der Transportterm nicht berücksichtigt wird (bei Chlorid und Sulfat).



Abbildung



#### 2.1.7.4 Ausnahmen von den allgemeinen Konventionen für einzelne Stoffkomponenten und Ersatzbaustoffe

Im Laufe des Entwurfsprozesses der EBV als Teil der MantelV wurden aus unterschiedlichen Gründen einige Ausnahmen von den allgemeinen Konventionen eingeführt (vgl. Susset et al. 2018 und Susset und Leuchs 2011):

- ▶ Für AMPA wurde im günstigen Fall das Durchbruchskriterium ausgesetzt, hier gelten daher die aufgrund des Anreicherungskriteriums berechneten ME. Im ungünstigen Fall gilt per Konvention für den ME ein Wert von  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$  für alle Einbauweisen, für welche keine relevanten Verdünnungseffekte zu berücksichtigen sind. In allen anderen Einbauweisen gilt:  $\text{ME} = 2,5 \mu\text{g L}^{-1} \times \text{Quelltermfaktor}$  (siehe dazu Abschnitt 2.2.3).
- ▶ Für Phenol bzw. den Phenolindex wurde in Abstimmung mit dem BMU das Anreicherungskriterium ausgesetzt und die maximal mögliche Quelltermkonzentration für alle Einbauweisen per Konvention auf einen konstanten Wert von  $2000 \mu\text{g/L}$  gedeckelt. Aufgrund der sehr geringen Halbwertszeiten ( $\leq 4$  Tage lt. Fraunhofer Institut Schmallenberg 2007) findet eine nennenswerte Stoffanreicherung im Unterboden nicht statt und das Durchbruchskriterium würde auch bei extrem hohen Quelltermkonzentrationen eingehalten werden.
- ▶ Für Sulfat wurde die maximal zulässige kumulative Konzentration bei WF2 für RC-Baustoffe in der „empfindlichsten Bauweise“ (15c) durch das BMU auf  $600 \text{ mg/L}$  festgelegt. Dies entspricht zugleich dem ME, da hier der Verhältnismäßigkeitsfaktor von 1,5 bereits berücksichtigt ist. Daraus errechnet sich eine kritische Konzentration am OdB für Sulfat von  $1038 \text{ mg/L}$ . Auch für die Bewertung aller anderen Einbauweisen und MEB wird dieser Wert angesetzt.
- ▶ In Teilprojekt 1 (Susset et al. 2017) wurden zahlreiche Langzeitsäulenversuche durchgeführt, um den Kenntnisstand zu den Stofffreisetzungspotentialen aus Bau- und Abbruchabfällen (inkl. Hintermauerziegelbruch, Hausmüllverbrennungaschen und Kupferhüttenmaterialien) zu verbessern. In diesem Zusammenhang konnte für Ziegelbruch ein Abklingverhalten von Sulfat, Arsen, Chrom (ges.), Molybdän und Vanadium und für Kupferhüttenmaterialien ein Abklingverhalten von Antimon und Molybdän nachgewiesen und Verteilungskoeffizienten zur Berechnung von Abklingkoeffizienten abgeleitet werden. (Susset et al. 2017; Tabellen 27 und 28). Für RC-Baustoffe wurde ein signifikantes Abklingverhalten von Chrom (ges.) und Kupfer und für Hausmüllverbrennungaschen zusätzlich von Molybdän und Antimon nachgewiesen und sehr gut belegte generische Abklingfunktionen abgeleitet (Susset et al. 2017; Tabellen 33 und 35). Das Abklingverhalten ist allerdings für die medienenschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von RC-Baustoffen und Hausmüllverbrennungaschen in technischen Einbauweisen nach Kabinettsfassung der EBV nicht relevant, weil die ME entweder durch das Anreicherungskriterium oder die GFS (bzw. BM)  $\times 1,5$  (für den ungünstigen Fall) limitiert sind oder nach aktueller Datenlage alle zu erwartenden Materialqualitäten ohnehin die bestehenden Materialwerte nach Kabinettsfassung der EBV einhalten. Für Ziegel- und Kupferhüttenmaterialien wirken sich die neuen Erkenntnisse zum Abklingverhalten auf die medienenschutzbasierte Beurteilung aus und wurden entsprechend in der Kabinettsfassung der EBV berücksichtigt.

## 2.2 Modellierung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien in den Einbauweisen der EBV – Quellterm

### 2.2.1 Einführende Hinweise

Die Freisetzung von Stoffen aus dem mineralischen Ersatzbaustoff in das Sickerwasser und die zu erwartende mittlere Stoffkonzentration an der UK der aus dem mineralischen Ersatzbaustoff oder Bodenmaterial gefertigten Schicht (MEB-Schicht) des Bauwerks hängen – wie oben beschrieben - von zahlreichen Faktoren und Einflussgrößen ab und führt je nach Stoffkomponente und mineralischen Ersatzbaustoff zu unterschiedlichen Freisetzungsmustern (siehe Abschnitt 2.1.5). Die Quantifizierung der Stofffreisetzung im Rahmen der Bewertungssystematik der EBV erfolgt in Entsprechung dieser drei Freisetzungsmuster.

Für die Umsetzung der Systematik zur Ableitung von ME in der EBV sind nur zwei Freisetzungsmuster relevant:

- ▶ Freisetzungsmuster I – Schnelles Abklingen auf eine geringe Freisetzungsrate (nachgewiesenes reproduzierbares Abklingverhalten)
- ▶ Freisetzungsmuster III – Lang anhaltende, relativ konstante Freisetzung

Die Freisetzung von Stoffen nach dem Freisetzungsmuster I wird durch eine Abklingkurve 1. Ordnung beschrieben (d.h., die Geschwindigkeit des Abklingens ist proportional zur Sickerwasserkonzentration), die im Wesentlichen durch einen Parameter, den Verteilungskoeffizienten zwischen Festphase und wässriger Phase in dem jeweiligen MEB gesteuert wird.

Für die Freisetzung von Stoffen nach dem Freisetzungsmuster III ist keine besondere Berechnung der Freisetzung erforderlich, es wird eine konstante Sickerwasserkonzentration innerhalb des Bewertungszeitraums angenommen.

Stoffe, die ein teilweises Abklingen der Freisetzung mit anschließendem langem Tailing zeigen (Freisetzungsmuster II) werden – im Sinne eines konservativen Ansatzes – dem Freisetzungsmuster III zugeordnet. Im Rahmen einer Einzelfallbetrachtung ist auch die Berücksichtigung eines teilweisen Abklingens denkbar.

Weiter hängt die Stofffreisetzung aus dem Bauwerk von der mittleren Sickerwasserrate durch die MEB-Schicht ab. So ist mit Ausnahme der offenen Bauweisen des Erd- und Straßenbaus die mittlere Sickerwasserrate durch die MEB-Schicht geringer als die Infiltrationsrate in das Bauwerk. Dadurch ergeben sich Verdünnungs- und kleinräumige Mittelungseffekte, die dazu führen, dass die zu erwartende mittlere Stoffkonzentration an der UK des Bauwerks geringer ist als die mittlere Stoffkonzentration an der UK der MEB-Schicht. Diese Effekte sind abhängig von den gegebenen hydrologischen Verhältnissen, der effektiven Infiltrationsrate in das Bauwerk, dem Aufbau und der Lage der Einbauschicht des mineralischen Ersatzbaustoffs innerhalb des Bauwerks und der daraus resultierenden Hydraulik (Durchströmungskonstellation) des Bauwerks.

Das Berechnungsverfahren wird in den folgenden Abschnitten des Berichts erläutert.

## **2.2.2 Infiltrationsraten als Funktion von Niederschlag, Abflussbeiwert, Bauwerkgeometrie und empirischen Kenntnissen**

### **2.2.2.1 Berechnungsverfahren**

Der Modellierung der verschiedenen Bauwerke bzw. Bauwerkskonstellationen (Beyer 2007) liegen als

Mittelwerte für die Bundesrepublik Deutschland abgeschätzte Infiltrationsraten zugrunde. Für die Abschätzung dieser Infiltrationsrate wurde das Wasserhaushaltsverfahren BAGLUVA (Glugla 2003) angewendet. Als mittlerer Niederschlag wurde dabei einheitlich ein Wert von  $859 \text{ mm a}^{-1}$  angenommen (BMU 2000). Die jährliche mittlere Infiltrationsrate ergibt sich als Differenz des Jahresniederschlags und der Jahressumme der Evapotranspiration ET. Diese wird mit dem BAGLUVA-Verfahren als Funktion der Energieverfügbarkeit in Form der maximalen Verdunstung und standortspezifischer Parameter wie der Art des Oberbodens, der Oberflächenausprägung (Pflanzenbewuchs, Pflasterbedeckung, etc.) bestimmt. Für einige Bauweisen wird zusätzlich auch ein Oberflächenabfluss-Anteil berücksichtigt.

Die bauwerksspezifischen Geometrieparameter der Einbauweisen im Straßen-, Wege, Erd- und im Schienenverkehrswegebau basieren auf den Angaben der vorliegenden technischen Regelwerke und den Ergebnissen verschiedener Fachgremien des Umwelt- und Verkehrsministeriums zur Festlegung weiterer Randbedingungen (z. B. durch die „Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgruppe Ersatzbaustoffe“ (UVAGE)). Detaillierte Beschreibungen und Erläuterungen inkl. technische Zeichnungen sind in den Regelwerken zu finden (z.B. RuA-StB, E 2004 und MTSE, vgl. MantelV, BMU 2017) sowie in Susset et al. 2018).

#### 2.2.2.2 Straßendämme (Einbauweisen 7, 8a bis 8c, 10, 16a und 16b)

Die Berechnung der Infiltrationsrate für Straßendämme berücksichtigt insbesondere die Umverteilung des Niederschlags von der versiegelten (asphaltierten) Fahrbahn auf den Bankett- und Böschungsbereich (Abbildung 2-6). Die Infiltrationsrate  $Q_{BB}$  [ $\text{L a}^{-1}$  pro m Bauwerkklänge] in den Bankett- und Böschungsbereich wird berechnet nach

$$\begin{aligned} Q_{BB,gesamt} &= Q_{BB,direkt} + Q_{FB} \\ &= w_{BB} (N - ET_{BB}) + w_{FB} N (1 - \Psi) \end{aligned} \quad (1)$$

wobei  $N$  [ $\text{mm a}^{-1}$ ] die Jahresniederschlagssumme,  $w_{FB}$  [m] die Breite der Fahrbahn,  $w_{BB}$  [m] die Breite des Bankett- und Böschungsbereichs,  $\Psi$  der Abflussbeiwert der Fahrbahn (= 0.7 nach BAST; siehe Bürger et al. 2008 und Susset et al. 2018, Abschnitte 3.2.2 und 7.2.7) und  $ET_{BB}$  [ $\text{mm a}^{-1}$ ] die Jahressumme der Evapotranspiration für den Bankett- und Böschungsbereich ist.

Entsprechend ergibt sich eine flächenbezogene mittlere Infiltrationsrate für den Bankett- und Böschungsbereich  $I_{BB,gesamt}$  [ $\text{mm a}^{-1}$ ] von

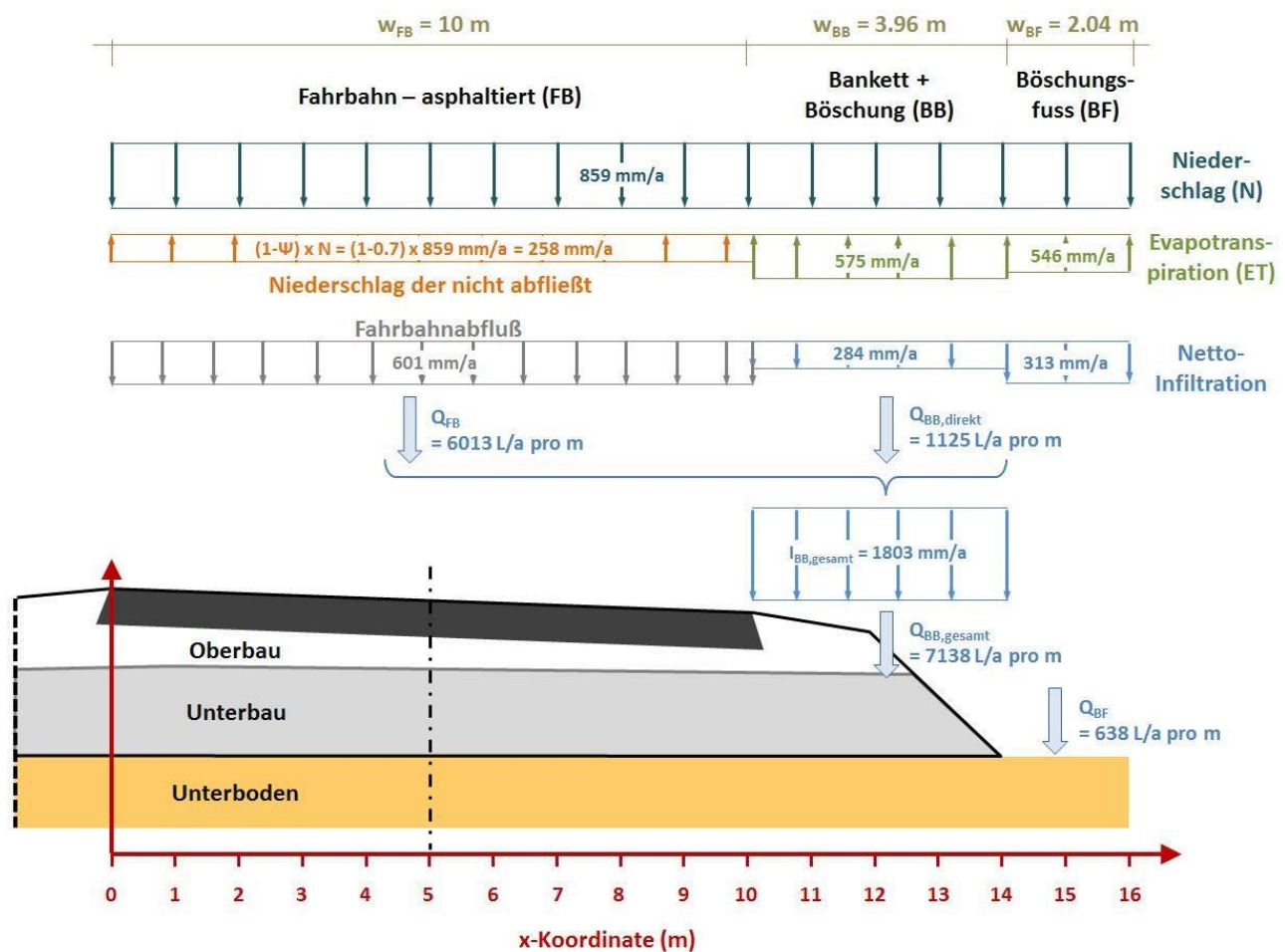
$$I_{BB,gesamt} = \frac{Q_{BB,gesamt}}{w_{BB}} \quad (2)$$

Für das Szenario „niedriger Straßendamm“ ( $w_{FB} = 10 \text{ m}$ ,  $w_{BB} = 3.96 \text{ m}$ ), das für die Einbauweisen 7, 8a bis 8c relevant ist, ergibt sich  $I_{BB,gesamt} = 1803 \text{ mm a}^{-1}$ , für die Szenarien „hoher Straßendamm“ ( $w_S = 10 \text{ m}$ ,  $w_{BB} = 7.70 \text{ m}$ ) ( $\rightarrow$  Einbauweise 10) und „MTSE E“ ( $\rightarrow$  Einbauweisen 16a und 16b) ergibt sich ein Wert von  $I_{BB,gesamt} = 1065 \text{ mm a}^{-1}$ .

Die Infiltrationsrate in den Bankett- und Böschungsbereich,  $I_{BB}$ , ist auch für die Berechnung des bauwerkspezifischen Wasser-Feststoffverhältnisses bei der Ableitung der medienenschutzbasierten Einbauwerte (ME) von Salzen relevant (vgl. Abschnitt 2.2.4).

Die Infiltration in den Böschungsfuß,  $I_{BF}$  bzw.  $Q_{BF}$ , ist für die kleinräumige Mittelung relevant (siehe Abschnitt 2.2.3).

Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der Bilanzierung von Niederschlag, Evapotranspiration und Fahrbahnabfluss am Beispiel des Szenarios „niedriger Straßendamm“. Infiltrationsraten können flächenbezogen (in mm/a) oder als volumetrische Rate je m Bauwerklänge (in L/a pro m) angegeben werden.



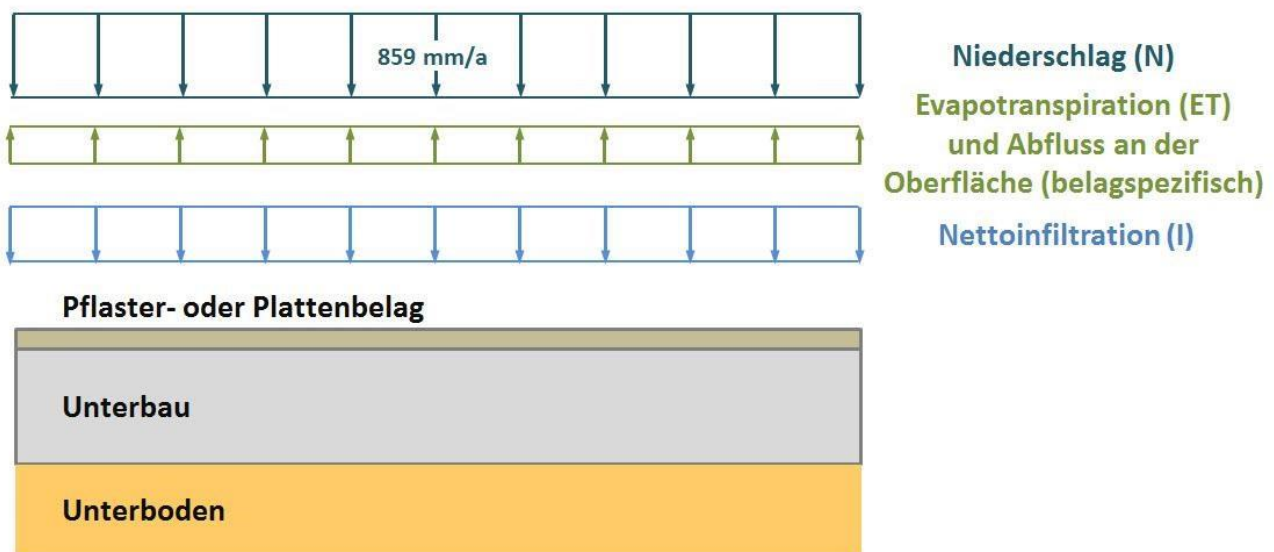
### 2.2.2.3 Verfüllungen, Bodenverbesserungen und -verfestigungen (Einbauweisen 11, 12, 13a bis 13c)

Für offene Deckschichten wurde in Beyer et al. (2007) und Grathwohl et al. (2006) eine vergleichsweise geringe Evapotranspirationsrate und eine entsprechend hohe Infiltrationsrate von  $583 \text{ mm a}^{-1}$  abgeschätzt.

#### 2.2.2.4 Pflasterdecken und Plattenbeläge (Einbauweisen 14a bis 14c und 15a bis 15c)

Die Ableitung von Infiltrationsraten für Pflasterdecken und Plattenbeläge beruhen auf den Studien von Susset und Leuchs (2008; S. 42 ff.) zur Sickerfähigkeit von Pflaster- und Plattenbelägen in Abhängigkeit von Liegezeit und Verkehrsbelastung sowie der Ergebnisse einer weiteren Laborstudie zur Pflaster- und Plattenversickerung (KM GmbH 2011). Aus den Ergebnissen dieser Studien wurden mittlere Werte abgeleitet (für Erläuterungen hierzu: siehe Susset et al. 2018; Kapitel 3.2.2.2). Für Pflasterdecken (Einbauweisen 15a bis 15c) kommt ein Wert von 242 mm a<sup>-1</sup>, für Plattenbeläge (Einbauweisen 14a bis 14c) ein Wert von 377 mm a<sup>-1</sup> als Netto-Infiltrationsrate zum Ansatz (siehe auch Abbildung 2-7).

Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Bilanzierung von Niederschlag, Evapotranspiration und Oberflächenabfluss für Pflaster- und Plattenbeläge.



#### 2.2.2.5 Schutzwälle (Einbauweisen 17a und 17b)

Für durchwurzelbare Bodenschichten wurde eine Grundwasserneubildungsrate von 313 mm a<sup>-1</sup> abgeschätzt (Beyer et al. 2007, Grathwohl et al. 2006).

#### 2.2.2.6 Bahnbauweise „Schotteroberbau“ (Einbauweisen B1 bis B15 und B20 bis B26)

Für die Bahnbauweise mit geschottertem Oberbau wird angenommen, dass effektiv 60 % des Niederschlags durch das Bauwerk sickert. In dieser Annahme sind sämtliche Effekte (Umströmung, Abflüsse, Evapotranspiration) berücksichtigt (nähere Angaben hierzu in Susset et al. 2018). Es ergibt sich eine Infiltrationsrate von 515 mm a<sup>-1</sup> für die entsprechenden Einbauweisen B1 bis B15 und B20 bis B26.

### 2.2.2.7 Bahnbauweise „Feste Fahrbahn“ (Einbauweisen B16 bis B19)

Für die Bahnbauweise „Feste Fahrbahn“ berechnet sich die Infiltrationsrate nach Formel (1). Mit  $w_{FB} = 4,66$  m und  $w_{BB} = 6,59$  m ergibt sich ein Wert von  $709 \text{ mm a}^{-1}$ .

### 2.2.3 Verdünnungs- und Mittelungseffekte bei teildurchströmten Einbauweisen in technischen Bauwerken und mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerkunterkante

Maßgebend für die medienenschutzbasierte Bewertung des Einbaus von MEB ist nicht die Infiltrationsrate in das Bauwerk, sondern die mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerkunterkante mit der die Stoffe durch die ungesättigte Zone transportiert werden, sowie die sogenannte Teilsickerwasserrate an der UK der Bauwerkschicht, in welcher der MEB eingesetzt wird (nachfolgend kurz: MEB-Schicht). Ist die Teilsickerwasserrate der MEB-Schicht geringer als die Infiltrationsrate, das ist in allen sogenannten teildurchströmten Bauweisen der Fall, dann ergeben sich Verdünnungs- und Mittelungseffekte, die aus dem Verhältnis der verschiedenen Sickerwasserraten berechnet werden können.

Der Aufbau des technischen Bauwerks und die Kapillarsperreneffekte oberhalb grobkörniger Materialien, z.B. im Bankett- und Böschungsbereich bei Straßendämmen (siehe Abbildung 2-8), bestimmen die räumliche Verteilung der Sickerwasserrate (Beyer et al. 2007). Neigung und Durchlässigkeitskontrast der Schichten sind hier maßgeblich. Letzterer hängt wiederum stark vom Sättigungsgrad der Poren ab (Susset et al. 2018).

Mit einem numerischen Strömungsmodell wurden für jede in der EBV behandelten Einbauweise die Teilsickerwasserraten der einzelnen Schichten berechnet (als gemittelte Sickerwasserraten entlang der Schichtunterkante) (siehe Susset et al. 2018). Das Modell berechnet dabei die Versickerung des Niederschlags unter Berücksichtigung der material-, orts- und zeitabhängigen Durchlässigkeiten, die sich entsprechend dem van Genuchten- Modell in Abhängigkeit der verwendeten WassergehaltsSaugspannungs- sowie Wassergehalts-Leitfähigkeits-Beziehungen ergeben.

Die bauwerksspezifischen Eingangsgrößen der Modellierung wie Geometrie, Trockenraumdicke und Wasserdurchlässigkeiten der Materialien basiert auf Auswertungen der vorliegenden technischen Regelwerke. Die Eingangsparameter wurden durch die „Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgruppe Ersatzbaustoffe“ (UVAGE) im Laufe des Ordnungsprozesses abgestimmt.

Das Modell rechnet bis ein "stationärer" Zustand erreicht wird. Dies entspricht quasi einem „Mittelwert“. Dabei ergibt sich eine räumlich variable Durchströmung des Bauwerks in Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeiten (für die Wassergehalte im stationären Zustand), der Porosität und der Dichte der verschiedenen Materialschichten.

Abbildung 2-8 zeigt das Ergebnis einer solchen Modellsimulation der Strömungsverhältnisse im Bauwerk. Die für die Ableitungssystematik relevanten Teilsickerwasserraten werden aus den Detailergebnissen berechnet. Abbildung 2-9 veranschaulicht diese Raten für das Szenario „niedriger Straßendamm“. Der Verdünnungseffekt wird aus dem Verhältnis der jeweiligen Teilsickerwasserrate zur Gesamtinfiltrationsrate berechnet:

$$VF_{\text{Schicht X}} = \frac{\text{Teilsickerwasserrate der Schicht X}}{\text{Gesamtinfiltrationsrate in das Bauwerk}} = \frac{Q_{\text{Schicht X}}}{Q_{\text{infiltration, tot}}} \quad (3)$$

Bezieht man die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht auf das gesamte

Bauwerk bzw. auf die gesamte infiltrierende Wassermenge, ergibt sich eine kleinräumige Mittelung (Mittelung über die gesamte Bauwerksbreite,  $w_{FB} + w_{BB}$ ). In der Ableitungssystematik der EBV wird diese Mittelung gemeinsam mit dem Verdünnungseffekt durch einen für jede Einbauweise spezifischen Quelltermfaktor  $F_{QT}$  berücksichtigt.  $F_{QT}$  wird aus dem Verdünnungsfaktor berechnet durch:

$$F_{QT} = \frac{1}{VF} \quad (4)$$

bzw. wenn ein Teil der Bauwerksbreite,  $w_{FB}$ , durch eine undurchlässige Deckschicht (Asphalt) abgedeckt wird:

$$F_{QT} = \frac{1}{VF} \frac{w_{FB} + w_{BB}}{w_{BB}} \quad (5)$$

Des Weiteren resultiert aus der Teilumströmung von Bauwerksbereichen, dass die mittlere Sickerwasserrate, SWR, entlang der Bauwerkunterkante (UK des Unterbaus) geringer ist als die Infiltrationsrate:

$$SWR = \frac{Q_{UB}}{w_{UB,eff}} \quad (6)$$

wobei  $w_{UB,eff}$  [m] die Breite der Bauwerksunterkante und  $Q_{UB}$  [ $L a^{-1}$  pro m Bauwerkklänge] die mittlere Infiltrationsrate an der Bauwerksunterkante ist.

Mit dieser mittleren Sickerwasserrate an der Bauwerk-UK wird die Bewertung der Stoffanreicherung und des Stofftransports in der unterlagernden ungesättigten Zone vorgenommen.

Die Werte für  $I_{BB,gesamt}$ , SWR und  $F_{QT}$  für alle in der EBV geregelten Einbauweisen wurden – wie oben erläutert – in früheren Forschungsprojekten berechnet und sind Eingabeparameter für das BEMEBTool (siehe Abschnitt 3.3.2). Eine Zusammenstellung der Werte findet sich in Tabelle 6-6.

In allen offenen Bauweisen des Erd- und Straßenbaus (Bettungssande, Tragschichten, Bodenverbesserungs- oder Verfüllungsmaßnahmen: Bauweisen B11 bis B15 und B16a und B17a) unterscheiden sich Infiltrationsrate, Teilsickerwasserrate der MEB-Schicht und die mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerk-UK nicht, es gibt keine Verdünnungs- oder Mittelungseffekte.

Abbildung 2-8: Strömungsvektoren und Potentiallinien der Sickerwasserströmung in einem Straßendamm. Die Strömungsvektoren sind mit Pfeilen dargestellt. Im vergrößerten Bereich wird der Kapillarsperreneffekt veranschaulicht. Die höhere Durchlässigkeit des nahezu wassergesättigten feinen Materials führt hier zu einem bevorzugten Fließen oberhalb des Übergangs zum grobkörnigen Material. Dadurch werden mineralische Ersatzbaustoffe in der Schottertagschicht (STS) und in der Frostschutzschicht (FSS) nur teilweise durchströmt (verändert nach Susset et al. 2013; S. 37).



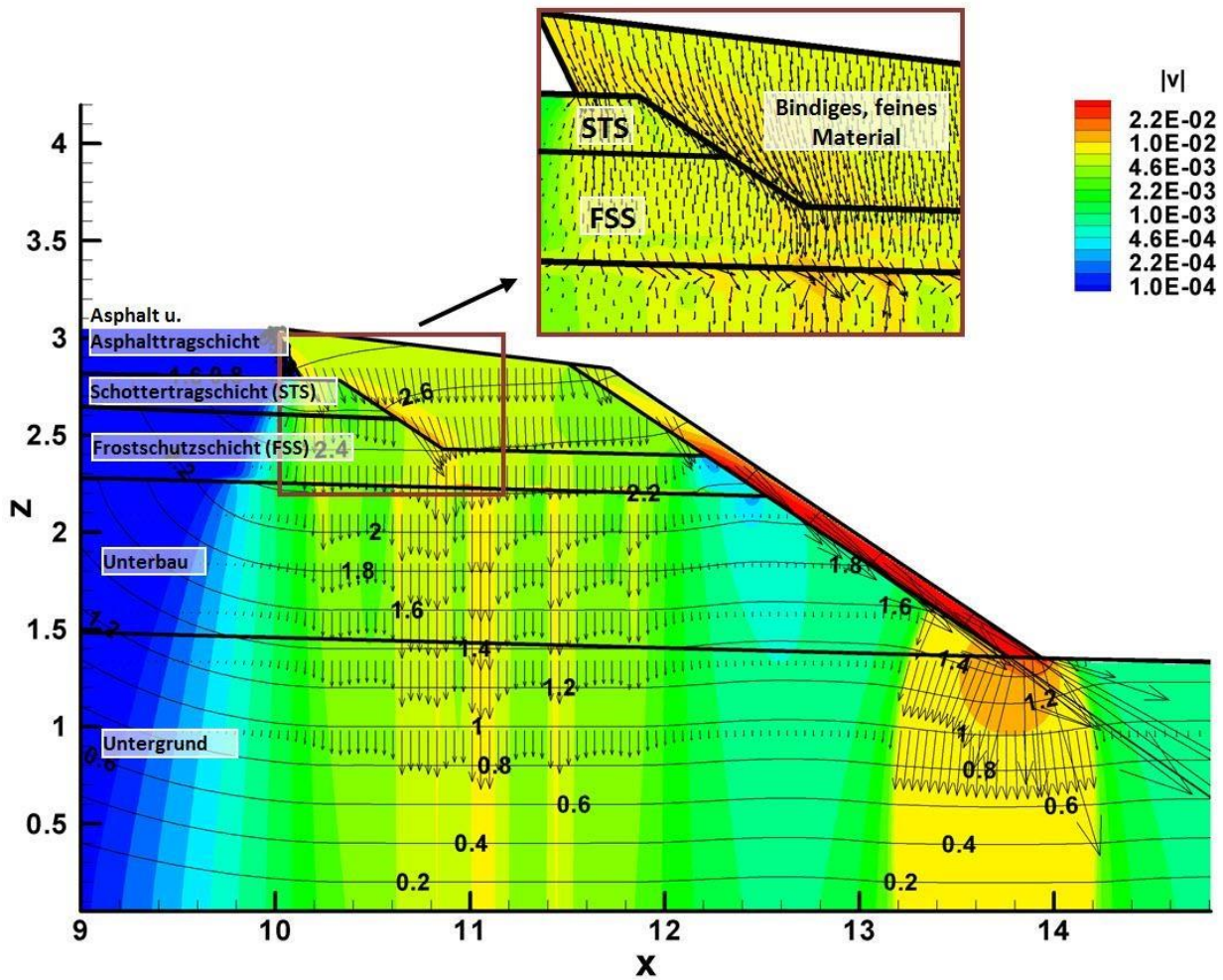
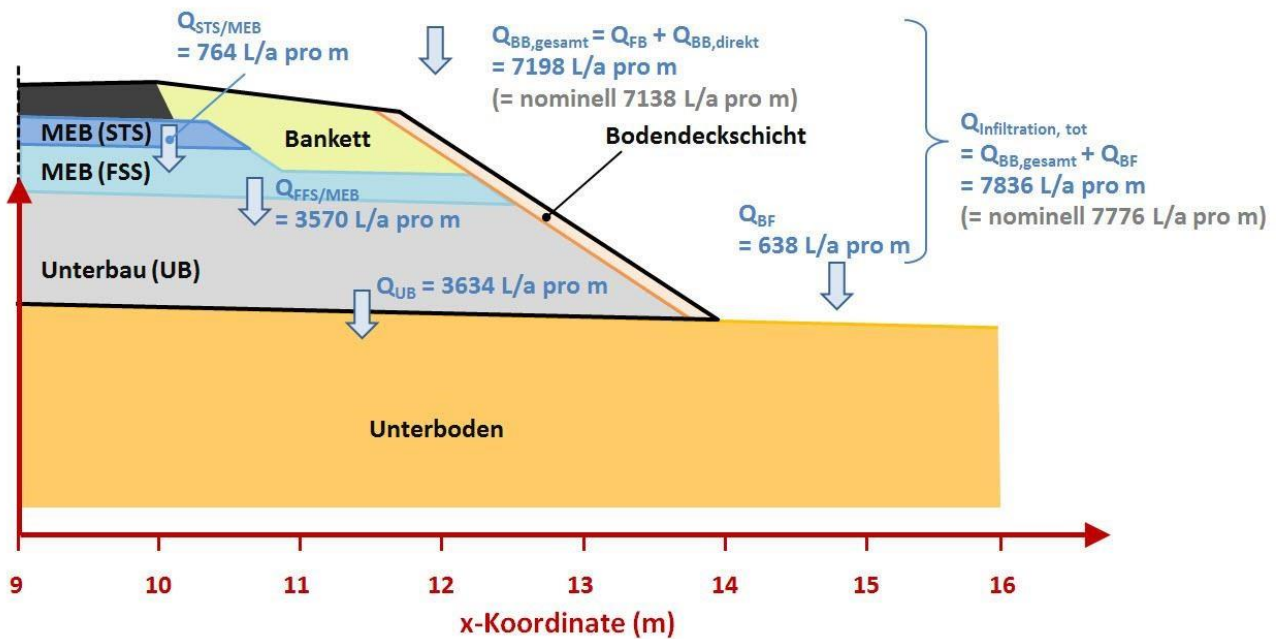


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung der für die Berücksichtigung von Verdünnungseffekten relevanten Teilsickerwasserraten am Beispiel des Szenarios „niedriger Straßendamm“. Dargestellt sind die Ergebnisse der hydraulischen Simulation. Hinweis: Die Infiltrationsraten im Modell sind geringfügig höher als die nominellen Werte; da mit den Sickerwasserratenverhältnissen relative Ergebniswerte berechnet werden, ist dies jedoch von untergeordneter Bedeutung.



### 2.2.4 Beschreibung der zeitlich abklingenden Freisetzung mittels Typkurven

Die Beschreibung des über die Zeit abklingenden Freisetzungsverhaltens, v.a. von Salzen aber auch von einigen anderen Stoffen, basiert auf der Anpassung eines analytischen Beschreibungsmodells (Advektions-Dispensionsgleichung) an die Messdaten von entsprechenden Säulenversuchsreihen (Grathwohl und Susset 2009; Susset und Leuchs 2008; S. 25). Angepasst wird der Verteilungskoeffizient zwischen Festphase und wässriger Phase,  $K_{d,MEB}$ . Auf diese Weise wird das Abklingverhalten der Freisetzung eines Stoffes in einem MEB typisiert. Der Verteilungskoeffizient kann in einen Abklingkoeffizienten  $\kappa$  umgerechnet werden, der für die Beschreibung der abklingenden Stoffkonzentrationen im Sickerwasser durch ein Modell 1. Ordnung verwendet wird (Box 1).

#### Box 1 (Methodik): Beschreibung einer zeitlich abklingenden Stofffreisetzung

Eine über die Zeit  $t$  vollständig abklingende Konzentration im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht,  $C(t)$ , entsprechend dem Freisetzungsmuster I, wird berechnet durch eine Funktion 1. Ordnung:

$$C(t) = C_0 e^{-\lambda t}$$

mit:

|                              |                                  |
|------------------------------|----------------------------------|
| $C_0$ [M L <sup>-3</sup> ]   | Anfangssickerwasserkonzentration |
| $\lambda$ [T <sup>-1</sup> ] | Abklingratenkonstante            |

Wird die Zeit  $t$  als Wasser-Feststoffverhältnis  $WF$  ausgedrückt, ergibt sich entsprechend:

$$C(WF) = C_0 e^{-\kappa WF} \quad (8)$$

mit:

$\kappa$  [M L<sup>-3</sup>]                      Abklingkoeffizient

Für den Abklingkoeffizienten gilt:

$$\kappa = \frac{1}{K_{d,MEB} + n_w/\rho_{MEB}} \quad (9)$$

mit:

$K_{d,MEB}$  [L<sup>3</sup> M<sup>-1</sup>]              Verteilungskoeffizient zwischen Festphase und wässriger Phase im MEB  
 $n_w$  [-]                              wassergesättigte Porosität  
 $\rho_{MEB}$  [M L<sup>-3</sup>]                      Lagerungsdichte des betrachteten MEB

Eine teilweise abklingende Konzentration, entsprechend dem Freisetzungsmuster II, mit einer Restkonzentration („Tailing“),  $C_{tail}$ , wird berechnet durch:

$$C(t) = C_{tail} + (C_0 - C_{tail}) e^{-\lambda t} \quad (10)$$

mit:

$C_{tail}$  [M L<sup>-3</sup>]                      „Tailing“-Konzentration

In der Standardbewertung der EBV bleibt der Transportterm für Salze unberücksichtigt, da keine für die medienschutzbasierte Beurteilung relevante Rückhaltung nachgewiesen werden konnte. Daher kann die maximal zulässige kumulative Quelltermkonzentration bis WF2 und der ME für Chlorid, Sulfat und Fluorid direkt aus obigen Beziehungen abgeleitet werden. Dazu wird zunächst das bauwerkspezifische bzw. einbauweisespezifische Wasser-Feststoffverhältnis,  $WF_{EW}$ , für den vorgegebenen Bewertungszeitraum ausgerechnet:

$$WF_{EW} = \frac{T_{Bew} I_{BW}}{M_{MEB} \rho_{MEB}} \quad (11)$$

mit:

$T_{Bew}$  [T]                              Bewertungszeitraum  
 $I_{BW}$  [L T<sup>-1</sup>]                              Infiltrationsrate in das Bauwerk  
 $M_{MEB}$  [L]                              Mächtigkeit (Dicke) der betrachteten MEB-Schicht im Bauwerk  
 $\rho_{MEB}$  [M L<sup>-3</sup>]                              Lagerungsdichte des MEB

Anschließend wird die maximal zulässige Anfangskonzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks,  $C_{Q,0,max}$ , zu Beginn der Freisetzung bestimmt, die für das gegebene Abklingverhalten gewährleistet, dass zum Ende des Bewertungszeitraums die mittlere Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks mindestens auf den kritischen Wert am OdB,  $KW_{OdB}$ , abgeklungen ist:

$$C_{Q,0,max} = \frac{KW_{OdB}}{e^{-\kappa WF_{EW}}} \quad (12)$$

Die maximal zulässige Konzentration bis  $WF = 2$  L kg<sup>-1</sup> an der Bauwerk-UK wird berechnet durch:

$$C_{Q,max@WF2} = \frac{C_{Q,0,max}(1 - e^{-\kappa WF2})}{\kappa WF2} \quad (13)$$

## 2.3 Berechnung der Stoffanreicherung im Unterboden

### 2.3.1 Berechnungsverfahren

Die Stoffanreicherung in der ungesättigten Bodenzone unterhalb des mineralischen Ersatzbaustoffes innerhalb des Bewertungszeitraums wird für die baustoffrelevanten organischen Stoffkomponenten und Metalle als mittlere Konzentration in der betrachteten (im Standardfall der EBV ein Meter mächtigen) Bodenzone als Stoffmasse pro Masse Boden berechnet - üblicherweise in der Einheit mg pro kg. Die Berechnung der Stoffanreicherung erfolgt dabei anhand der Gesamtemission aus dem MEB innerhalb des Bewertungszeitraums.

Gemäß der EBV darf die Anreicherung innerhalb des Bewertungszeitraums (im Standardfall der EBV = 200 Jahre) für keine der zu betrachtenden organischen Stoffkomponenten oder Metalle mehr als 50 % der maximalen Filterkapazität (FK) betragen (→ *Anreicherungskriterium*).

Berechnet wird ein Grenzwert, d.h. die maximal zulässige Quelltermkonzentration bei WF2,  $C_{Q,max@WF2}$ , für welche das Anreicherungskriterium erfüllt wird. Dieser Wert ist jedoch nur maßgebend, wenn er größer ist als der GFS bzw. der BM. Andernfalls kommt der BM als Grenzwert zur Anwendung.

Die Berechnungsmethodik ist für drei mögliche Quellterm-Szenarien, *unendliche konstante Quelle* (Standardfall der EBV), *endliche konstante Quelle* und *abklingende Quelle* in Box 2 im Einzelnen erläutert.

Zur Verdeutlichung der Berechnung für den Standardfall der EBV zeigt Box 3 ein Berechnungsbeispiel.

**Box 2 (Methodik): Anreicherungskriterium – Stoffanreicherung für verschiedene Quellterm-Typen**

Die Stoffmenge, die maximal im Unterboden bzw. in der ungesättigten Zone unterhalb des Bauwerks im günstigen Fall über eine Mächtigkeit von einem Meter angereichert werden darf, wird stoffspezifisch berechnet:

$$m_{AK} = a \cdot FK \cdot L_{Bew} \cdot A_e \cdot \rho_{Boden} \quad (14)$$

|   |   |   |          |
|---|---|---|----------|
| <p>[ - ]<br/>                 [ mg kg<sup>-1</sup> ]<br/>                 Bew [ m ]</p> | <p>Ausschöpfungsgradmit:<br/>                 Filter<br/>                 Mächtigkeit</p>   | <p>a<br/>                 FK<br/>                 L</p>                                   | <p>□</p> |
| <p>A<sub>e</sub> [ m<sup>2</sup> ]</p>  | <p>Boden [ kg m<sup>-3</sup> ]<br/>                 Kapazität des betrachteten Stoffes<br/>                 der Bodenzone / bewertungsrelevante Strecke</p> | <p>Querschnittsfläche<br/>                 Lagerungsdichte des betrachteten Bodentyps</p> |          |

(Einheitsfläche: 1 m<sup>2</sup>)

Die Gesamt-Emission der Quelle E<sub>Q</sub> im Bewertungszeitraum T<sub>Bew</sub> darf diesen Wert nicht überschreiten:

$$E_Q \leq m_{AK} \quad (15)$$

Für eine unendliche Quelle mit einer (innerhalb des Bewertungszeitraums) konstanten Emissionsrate (Standardfall der EBV) gilt:

$$e_Q(t) = C_Q \cdot SWR \cdot A_e = \text{const.} \quad (16)$$

$$E_Q = \int_0^{T_{Bew}} e_Q(t) dt = C_Q \cdot SWR \cdot A_e \cdot T_{Bew} \quad (17)$$

mit:

|                           |   |
|---------------------------|---|
| SWR [ m a <sup>-1</sup> ] | Mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerk-UK |
| T <sub>Bew</sub> [ a ]    | Bewertungszeitraum                          |

Die maximal zulässige Konzentration im Sickerwasser,  $C_{Q,max(AK)}$ , und die maximal zulässige kumulative Konzentration bei  $WF = 2 \text{ L kg}^{-1}$ ,  $C_{Q,max(AK)@WF2}$ , können berechnet werden durch:

$$C_{Q,max(AK)} = C_{Q,max(AK)@WF2} = \frac{m_{AK}}{SWR A_e T_{Bew}} \quad (18)$$

Für eine endliche Quelle mit einer (innerhalb des Zeitraums  $T_Q$ ) konstanten Emissionsrate gilt:

$$E_Q = \int_0^{T_Q} e_Q(t) dt = C_Q SWR T_Q \quad (19)$$

mit:

$T_Q$  [a] Zeitraum in dem die Quelle emittiert

Die maximal zulässige Konzentration im Sickerwasser berechnet sich dementsprechend zu:

$$C_{Q,max(AK)} = \frac{m_{AK}}{SWR A_e T_Q} \quad (20)$$

Sofern die bauwerkspezifische Zeit bis  $WF = 2 \text{ L kg}^{-1}$  kleiner ist als die Emissionsdauer, gilt für die maximal zulässige kumulative Konzentration bei  $WF = 2 \text{ L kg}^{-1}$  wie im Fall einer unendlichen Quelle (s. o.):

$$C_{Q,max(AK)@WF2} = C_{Q,max(AK)} \quad (21)$$

Ist die Emissionsdauer der Quelle kürzer als die bauwerkspezifische Zeit bis  $WF = 2 \text{ L kg}^{-1}$ , dann gilt:

$$C_{Q,max(AK)@WF2} = C_{Q,max(AK)} \frac{T_Q}{T_{WF2}} = \frac{m_{AK}}{2 \text{ L kg}^{-1} A_e M_{MEB} \rho_{MEB}} \quad (22)$$

mit:

$M_{MEB}$  [m] Mächtigkeit des betrachteten MEB im Bauwerk  
 $\rho_{MEB}$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ] Lagerungsdichte des betrachteten MEB im Bauwerk

Für eine Quelle mit einer über die Zeit exponentiell abklingenden Emissionsrate gilt:

$$C_Q(t) = C_{0,Q} e^{-\lambda t} \quad (23)$$

$$E_Q = \int_0^{T_{Bew}} e_Q(t) dt = SWR A_e C_{0,Q} \frac{1 - e^{-\lambda T_{Bew}}}{\lambda} \quad (24)$$

mit:

$\lambda$  [ $\text{a}^{-1}$ ] Abklingratenkonstante des betrachteten Stoffes

Hier gilt:

$$\lambda = \kappa \frac{SWR}{M_{MEB} \rho_{MEB}} \quad (25)$$

Die maximal zulässige Konzentration zu Beginn der Stofffreisetzung ist für diesen Quellterm-Typ:

$$C_{Q,0,max(AK)} = \frac{m_{AK}}{SWR A_e \frac{1 - e^{-\lambda T_{Bew}}}{\lambda}} \quad (26)$$

Und die maximal zulässige kumulative Konzentration bei  $WF = 2 \text{ L kg}^{-1}$ :

$$C_{Q,\max(\text{AK})@\text{WF2}} = C_{Q,0,\max(\text{AK})} \frac{1 - e^{-\lambda T_{\text{WF2}}}}{\lambda T_{\text{WF2}}} \quad (27)$$

Weiterhin wurde festgelegt, dass – unabhängig von der gegebenen Konstellation – die maximal zulässige Quelltermkonzentration bei WF2 mindestens gleich der kritischen Konzentration am OdB,  $KW_{\text{OdB}}$  (= GFS bzw. BM) ist. Ergibt die Berechnung nach den oben beschriebenen Gleichungen Werte für  $C_{Q,\max(\text{AK})@\text{WF2}}$ , die kleiner sind als  $KW_{\text{OdB}}$ , dann gilt:

$$C_{Q,\max(\text{AK})@\text{WF2}} = KW_{\text{OdB}} \quad (28)$$

### Box 3 (Beispiel): Anreicherungskriterium - „Stoffanreicherung für eine unendliche Quelle“

Für dieses Beispiel betrachten wir die Anreicherung von Vanadium in einem sandigen Unterboden als mögliche Folge der Verwendung von RC-1 Material in der Bahnbauweise B1 (Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Damm).

Im günstigen Fall darf über eine Strecke  $L_{\text{Bew}}$  von einem Meter die Filterkapazität  $FK$  maximal zu 50% ausgeschöpft werden. Nach folgender Rechnung darf maximal eine Vanadium-Menge  $m_{\text{AK, Vanadium}}$  von insgesamt 7.81 g angereichert werden:

$$\begin{aligned} &FK_{\text{Vanadium}} = 11 \text{ mg kg}^{-1} \\ &L_{\text{Bew}} = 1 \text{ m} \\ &e = 1 \text{ m}^2 \\ &\quad \quad \quad \cdot^{-1} \\ &\quad \quad \quad \text{Filterkapazität:} \\ &\quad \quad \quad \text{Bewertungsrelevante Strecke:} \\ &\quad \quad \quad \text{Ausschöpfungsgrad:} \quad \quad \quad a = 0.5 \\ &\quad \quad \quad \text{Querschnittsfläche:} \quad \quad \quad A \\ &\quad \quad \quad \text{Mittlere Sickerwasserrate (SWR):} \quad 395 \text{ mm a} \\ &\text{Lagerungsdichte:} \quad \quad \quad \rho_{\text{Sand}} = 1.42 \text{ kg L}^{-1} \\ &m_{\text{AK, Vanadium}} = a FK_{\text{Vanadium}} L_{\text{Bew}} A_e \rho_{\text{Sand}} \\ &\quad \quad \quad = 0.5 \cdot 11 \text{ mg kg}^{-1} \cdot 1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 1.42 \text{ kg L}^{-1} \cdot 1000 \text{ L m}^{-3} \\ &\quad \quad \quad = 7810 \text{ mg} \end{aligned}$$

Die Gesamt-Emission der unendlichen Quelle mit einer (innerhalb des Bewertungszeitraums) konstanten Emissionsrate im Bewertungszeitraum  $T_{\text{Bew}}$  darf diesen Wert nicht überschreiten:

$$E_{Q,\text{Vanadium}} = C_{Q,\max(\text{AK}),\text{Vanadium,AK}} \text{ SWR } A_e T_{\text{Bew}}$$

Die maximal zulässige Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks (= maximal zulässige Quelltermkonzentration) aufgrund des Anreicherungskriteriums,  $C_{Q,\max(\text{AK}),\text{Vanadium}}$ , kann damit berechnet werden durch:

$$\begin{aligned} C_{Q,\max(\text{AK}),\text{Vanadium}@WF2} &= C_{Q,\max(\text{AK}),\text{Vanadium}} = \frac{m_{\text{AK, Vanadium}}}{\text{SWR } A_e T_{\text{Bew}}} \\ &= 7810 \text{ mg} / (395 \text{ mm a}^{-1} \cdot 0.001 \text{ m mm}^{-1} \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 200 \text{ a}) \\ &= 98,86 \text{ mg m}^{-3} \\ &= 98,86 \text{ } \mu\text{g L}^{-1} \end{aligned}$$

## 2.3.2 Berechnungsparameter: Eingangsgrößen der Bewertung

### 2.3.2.1 Bodenkennwerte

In der EBV werden zwei Bodenkategorien unterschieden (siehe Abschnitt 2.1.6.2). Für die Bewertung der Stoffanreicherung ist nur die Lagerungsdichte des jeweiligen Bodens relevant. Hier unterscheiden sich die Bodentypen nur geringfügig (Sand:  $1.42 \text{ kg L}^{-1}$ , Lehm/Schluff/Ton:  $1.45 \text{ kg L}^{-1}$ ). Alle Bodenkennwerte sind in Tabelle 6-2 zusammengestellt.

### 2.3.2.2 Filterkapazität

Die maximale Filterkapazität (FK) wird aus dem jeweiligen Bodenvorsorgewert abzüglich des Hintergrundwerts bestimmt (Susset und Leuchs 2011; S. 65 ff). Im Laufe des Verordnungsprozesses wurden durch das UBA neue Hintergrundwerte abgeleitet oder bestehende weiterentwickelt (vgl. Susset et al.

2018; Tabelle 22, S. 216). Alle Werte sind in Tabelle 6-1 aufgelistet.

### 2.3.2.3 Mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerk-UK

Die mittlere Sickerwasserrate (SWR) an der Bauwerk-UK variiert mit der betrachteten Einbauweise (siehe Abschnitt 2.2.3). Eine Zusammenstellung der Werte für alle in der EBV geregelten Einbauweisen findet sich in Tabelle 6-6.

## 2.4 Modellierung des Transports der im Sickerwasser gelösten Stoffe – Transportterm

### 2.4.1 Analytische Modelle für die Beschreibung des Stofftransport

Der Transport der im Sickerwasser gelösten Stoffe in der ungesättigten Bodenzone unterhalb des Bauwerks wird für die baustoffrelevanten organischen Stoffkomponenten und Metalle durch analytische Lösungen der Advektions-Dispensions-Gleichung für den Stofftransport berechnet. Wie bei der Berechnung der Stoffanreicherung, werden hier drei mögliche Quellterm-Szenarien unterschieden: (i) *unendliche konstante Quelle* (Standardfall der EBV), (ii) *endliche konstante Quelle* und (iii) *abklingende Quelle*. Jedes dieser drei Szenarien stellt eine andere „obere“ Modellrandbedingung dar. Fall (i) kann als Sonderfall von Fall (ii) angesehen werden, weshalb für diese beiden Fälle dieselbe analytische Lösung verwendet wird. Die verwendeten Lösungen sind von Genuchten und Alves (1982) entnommen und werden in Box 4 beschrieben.

Zu beachten ist, dass die verfügbaren analytischen Modelle den Stoffrückhalt durch Sorption an die Bodenmatrix durch einen Retardationsfaktor berücksichtigen, entsprechend einer linearen Sorptionsisotherme. Da für die in der EBV berücksichtigten Metalle nichtlineare, also konzentrationsabhängige Sorptionsisothermen gelten, ist eine Linearisierung erforderlich, die in Abschnitt 2.4.4 beschrieben ist.

**Box 4 (Methodik): Durchbruchkriterium – Stofftransport für verschiedene Quellterm-Typen**



Die Modellgleichung für den Transport eines gelösten Stoffes im Sickerwasser für das Szenario *konstanter Quellterm* ist (siehe van Genuchten und Alves 1982; S. 60):

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} - \mu c \quad (29)$$

mit:

$c$  [M L<sup>-3</sup>]      Konzentration des betrachteten Stoffes im Sickerwasser  
[T] Zeit

|                         |  |
|-------------------------|--|
| R [-]                   | Retardationsfaktor (= $1 + K_d \rho_b / n_e$ )                   |
| D [ $L^2 T^{-1}$ ]      | Dispersionskoeffizient   |
| v [ $L T^{-1}$ ]        | mittlere Fließgeschwindigkeit des Sickerwassers (= SWR / $n_e$ ) |
| x [L]                   | Distanz  |
| $\mu$ [ $T^{-1}$ ]      | Abbauratenkonstante des betrachteten Stoffes                     |
| $K_d$ [ $L^3 M^{-1}$ ]  | Sorptionsverteilungskoeffizient                                  |
| $\rho_b$ [ $M L^{-3}$ ] | Lagerungsdichte des Unterbodens                                  |
| SWR [ $L T^{-1}$ ]      | Sickerwasserrate   |
| $n_e$ [-]               | effektive Porosität  |

und folgenden Randbedingungen:

$$c(x,0) = C_i$$

$$c(0,t) = \begin{cases} C_0 & 0 < t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad (30)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} c(\infty,t) = 0$$

mit:

|                      |  |
|----------------------|--|
| $C_0$ [ $M L^{-3}$ ] | Konzentration des betrachteten Stoffes im Sickerwasser an Bauwerk-UK |
| $C_i$ [ $M L^{-3}$ ] | Anfangskonzentration des betrachteten Stoffes                        |
| $t_0$ [T]            | Dauer der Quelle (für eine unendliche Quelle ist $t_0 = \infty$ )    |

Die analytische Lösung zur Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser im Abstand x zur UK des Bauwerks zum Zeitpunkt t lautet:

$$c(x,t) = \begin{cases} C_i A(x,t) + C_0 B(x,t) & 0 < t \leq t_0 \\ C_i A(x,t) + C_0 B(x,t) - C_0 B(x,t-t_0) & t > t_0 \end{cases} \quad (31)$$

wobei

$$A(x,t) = \exp\left(\frac{-\mu t}{R}\right) \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{R x - v t}{\sqrt{4DRt}}\right] - \frac{1}{2} \exp\left(\frac{v x}{D}\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{R x + v t}{\sqrt{4DRt}}\right] \right\}$$

$$B(x,t) = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{(v-u)x}{2D}\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{R x - u t}{\sqrt{4DRt}}\right] + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{(v+u)x}{2D}\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{R x + u t}{\sqrt{4DRt}}\right]$$

$$u = v \sqrt{1 + \frac{4\mu D}{v^2}}$$

Der Retardationsfaktor wird aus dem (32)

$$R = 1 + K_d \frac{\rho_b}{n_e}$$

mit:

$$K_d = \begin{cases} f_{oc} K_{oc} & \text{für organische Verbindungen} \\ I(C_{mitte}) / C_{mitte} & \text{für Schwermetalle nach substr.übergreifender Sorptionsisotherme} \end{cases}$$

mit:

|                            |   |
|----------------------------|---|
| $C_{mitte}$ [ $M L^{-3}$ ] | Mittlere Konzentration (= $0.5 (1/10 \text{ GFS} + C_0)$ ) gemäß Linearisierung der substratübergreifenden Sorptionsisotherme (siehe Abschnitt 2.4.3) |
|----------------------------|---|

Im EBV-Standardszenario ist  $C_i = 0$  wodurch sich die analytische Lösung vereinfacht. Für Stoffe, die nicht

mikrobiologisch abgebaut werden, gilt  $\mu=0$ . Die analytische Lösung vereinfacht sich dann weiter.

Für den Transport eines gelösten Stoffes im Sickerwasser für das Szenario *abklingender Quellterm* gilt eine andere Randbedingung (siehe van Genuchten und Alves 1982; S. 77):

$$\begin{aligned}
 c(x,0) &= C_i \\
 c(0,t) &= C_{\text{tail}} + C_{\text{abkl}} e^{-\lambda t} \\
 \frac{\partial c}{\partial x} c(\infty,t) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

mit:

|  |   |
|--|---|
| $\lambda$ [T <sup>-1</sup> ]           | Quelltermabklingratenkonstante des betrachteten Stoffes |
| $C_{\text{tail}}$ [M L <sup>-3</sup> ] | „Tailing“-Konzentration                                 |
| $C_{\text{abkl}}$ [M L <sup>-3</sup> ] | Abklingender Konzentrationsbereich bzw. -betrag         |

Die analytische Lösung zur Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser im Abstand x zur UK des Bauwerks zum Zeitpunkt t lautet für dieses Quellterm-Szenario:

$$c(x,t) = C_i A(x,t) + C_{\text{tail}} B(x,t) + C_{\text{abkl}} E(x,t) \tag{34}$$

wobei

$$\begin{aligned}
 E(x,t) &= e^{-\lambda t} \left\{ \frac{1}{2} \exp\left(\frac{(v-w)x}{2D}\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{Rx-wt}{\sqrt{4DRt}}\right] + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{(v+w)x}{2D}\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{Rx+wt}{\sqrt{4DRt}}\right] \right\} \\
 w &= v \sqrt{1 + \frac{4D}{v^2} (\mu - \lambda R)}
 \end{aligned}$$

Für die Berechnung von  $C_{\text{mitte}}$  gilt in diesem Fall:

$$C_{\text{mitte}} = 0.5 (1/10 \text{ GFS} + C_{\text{tail}} + C_{\text{abkl}})$$

Für den Fall, dass die Quelltermkonzentration komplett abklingt, ist  $C_{\text{tail}} = 0$  und die oben beschriebene analytische Lösung vereinfacht sich entsprechend.

## 2.4.2 Iterative Suche nach der maximal zulässigen Konzentration im Sickerwasser an der Unterkante (UK) des Bauwerks

Gemäß der EBV darf innerhalb des Bewertungszeitraums (200 Jahre im Standardfall der EBV) die Konzentration am OdB (1 Meter unter UK Bauwerk im Standardfall der EBV) für keine der zu betrachtenden organischen Stoffkomponenten und Metalle den GFS bzw. den BM übersteigen. Die aufgrund dieses *Durchbruchskriteriums* maximal zulässige Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks muss iterativ bestimmt werden, d.h. der Stofftransport bis zum OdB wird mehrmals mit unterschiedlichen Quelltermkonzentrationswerten berechnet bis der Konzentrationswert gefunden ist, für den das *Durchbruchskriterium* gerade noch erfüllt ist (siehe Box 5).

Zur iterativen Suche wird die sogenannte Ridder's Methode verwendet (Ridder 1979, zitiert in Press et al. 1992).

**Box 5 (Methodik): Durchbruchskriterium – Iterative Ermittlung der maximal zulässigen Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks**

Für eine konstante unendliche Quelle steigt die Konzentration am OdB monoton über die Zeit an, d.h. der Zeitpunkt zum Ende des Bewertungszeitraums ist maßgebend für die Bewertung:

$$c(x=x_{\text{odB}}, T_{\text{Bew}}) \leq KW_{\text{odB}}$$

mit:

|  |  |
|--|--|
| $c$ [M L <sup>-3</sup> ]               | Konzentration des betrachteten Stoffes im Sickerwasser |
| $t$ [T]                                | Zeit   |
| $x$ [L]                                | Distanz  |
| $KW_{\text{odB}}$ [M L <sup>-3</sup> ] | Krit. Wert am OdB (Bezugsmaßstab bzw. GFS)             |
| $T_{\text{Bew}}$ [T]                   | Bewertungszeitraum                                     |

(35)

Ist die Quelle endlich oder abklingend, ist der Zeitpunkt der maximalen Konzentration am OdB nicht bekannt. Das Durchbruchkriterium bedeutet in diesen Fällen:

$$\max_{0 \leq t \leq T_{\text{Bew}}} c(x=x_{\text{odB}}, t) \leq KW_{\text{odB}} \quad (36)$$

Bei der iterativen Suche nach der aufgrund des Durchbruchkriteriums maximal zulässigen Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks wird der Stofftransport je nach betrachtetem Quellterm Szenario nach Formel (31) oder (34) berechnet, wobei die Werte für  $C_0$  oder  $C_{\text{abkl}}$  solange systematisch verändert werden, bis ein Wert  $C_{0,\text{max(DK)}}$  (oder  $C_{\text{abkl,max(DK)}}$ ) gefunden wurde, für den das Durchbruchkriterium gerade noch erfüllt wird:

$$(c(x=x_{\text{odB}}, T_{\text{Bew}}, C_{0,\text{max(DK)}}) - KW_{\text{odB}}) < \varepsilon \quad (37)$$

bzw.

$$\left( \max_{0 \leq t \leq T_{\text{Bew}}} c(x=x_{\text{odB}}, t, C_{*,\text{max(DK)}}) - KW_{\text{odB}} \right) < \varepsilon$$

mit:

$$\varepsilon \text{ [M L}^{-3}\text{]} \quad \text{Abbruchkriterium bzw. Genauigkeitsziel} \quad (38)$$

Für eine unendliche konstante Quelle und eine endliche konstante Quelle mit einer Emissionsdauer, die länger als die bauwerkspezifische Zeit bis WF = 2 L kg<sup>-1</sup> ist, gilt:

$$C_{Q,\text{max(DK)@WF2}} = C_{0,\text{max(DK)}} \quad (39)$$

Für eine endliche konstante Quelle mit einer Emissionsdauer, die kürzer ist als die bauwerkspezifische Zeit bis WF = 2 L kg<sup>-1</sup>, gilt:

$$C_{Q,\text{max(DK)@WF2}} = C_{Q,\text{max(DK)}} \frac{T_Q}{T_{\text{WF2}}} \quad (40)$$

mit:

|                      |   |
|----------------------|---|
| $T_Q$ [T]            | Zeitraum in dem die Quelle emittiert                  |
| $T_{\text{WF2}}$ [T] | Bauwerkspezifische Zeit bis WF = 2 L kg <sup>-1</sup> |

Für eine Quelle mit einer über die Zeit exponentiell abklingenden Emissionsrate gilt:

$$C_{Q,\text{max(DK)@WF2}} = C_{\text{abkl,max(DK)}} \frac{1 - e^{-\lambda T_{\text{WF2}}}}{\lambda T_{\text{WF2}}} \quad (41)$$

mit:

$\lambda [T^{-1}]$  Abklingratenkonstante des betrachteten Stoffes

### 2.4.3 Ableitung konzentrationsabhängiger Verteilungskoeffizienten aus substratübergreifenden Isothermen

Die Sorption der Schwermetalle wird in der EBV durch eine sogenannte substratübergreifende Isotherme berücksichtigt (Box 6). Diese Isothermen sind das Ergebnis linearer Regressionsanalysen von experimentell gewonnenen Daten aus Sorptionsversuchen und beschreiben die stoffspezifische Abhängigkeit der Sorption von verschiedenen unabhängigen Bodenparametern wie Karbonatgehalt, Gehalt an organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ), Tongehalt,  $pH(CaCl_2)$ , etc. und beinhalten auch einen intrinsischen Teil mit einem Sorptionskoeffizienten ( $K_f^*$ ) und einem Konzentrationsexponenten ( $n$ ). Dieser sogenannte S-Ansatz geht auf die Arbeiten von Utermann et al. (2005) zurück und wurde zuletzt von Stange und Rückkamp (2016) verwendet, um die Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen zur Sorption von Vanadium und Arsen für deren Berücksichtigung in der EBV auszuwerten.

Für Einzelheiten zu Auswahl und Eignung der substratübergreifenden Sorptionsisothermen für Unterbodenproben sei an dieser Stelle auf Utermann et al. (2005), Susset und Leuchs (2011) und Susset et al. (2018) verwiesen. Eine eingehende Diskussion findet sich auch in Gäbler et al. (2009).

$$\log c_s = \log K_f^* + p_{C_{org}} \log C_{org} + p_{CaCO_3} \log CaCO_3 + p_{Mn_{Ox}} \log Mn_{Ox} + p_{Ton} \log Ton + p_{pH} pH + p_{Fe_{Ox}} \log Fe_{Ox} + p_{Al_{Ox}} \log Al_{Ox} + n \log c_w \quad (42)$$

mit:

|   |  |
|---|--|
| $C_{org}$ [%]   | Gehalt an organischem Kohlenstoff                      |
| $CaCO_3$ [mg kg <sup>-1</sup> ]   | Karbonatgehalt   |
| $Mn_{Ox}$ [mg kg <sup>-1</sup> ]  | oxalatlöslicher Mangangehalt                           |
| Ton [%]   | Tongehalt  |
| pH [-]  | pH(CaCl <sub>2</sub> )                                 |
| $Fe_{Ox}$ [mg kg <sup>-1</sup> ]  | oxalatlöslicher Eisengehalt                            |
| $Al_{Ox}$ [mg kg <sup>-1</sup> ]  | oxalatlöslicher Aluminiumgehalt                        |
| $c_w$ [M L <sup>-3</sup> ]  | Konzentration des betrachteten Stoffes im Sickerwasser |
| $K_f^*$ [-]   | empirischer Sorptionsverteilungskoeffizient            |
| $n$ [-]   | empirischer (Freundlich-)Exponent                      |
| und weiteren empirischen Regressionskoeffizienten:<br>$p_{C_{org}}$ , $p_{CaCO_3}$ , $p_{Ton}$ , $p_{pH}$ , $p_{Fe_{Ox}}$ und $p_{Al_{Ox}}$ |  |

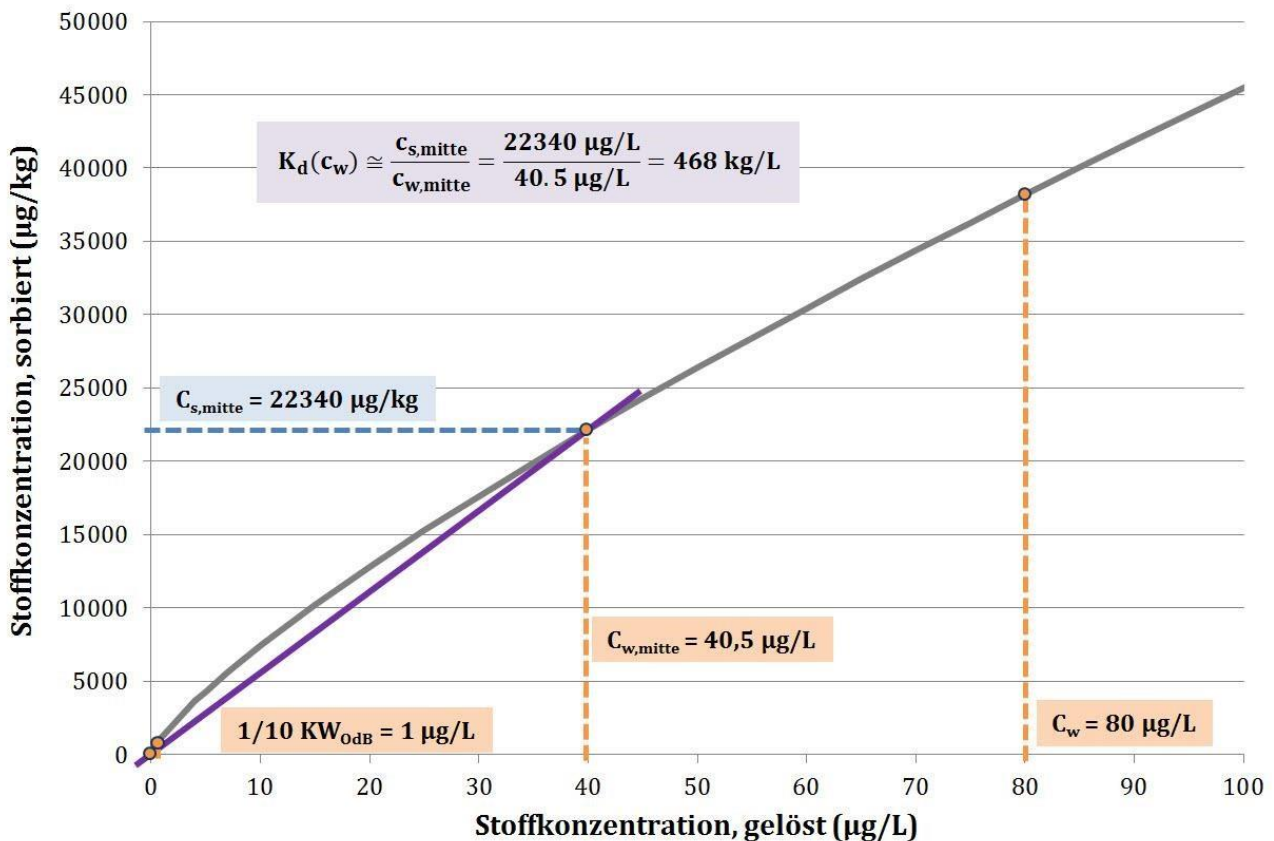
Die Regressionsgleichung zur Berechnung der substratübergreifenden Sorptionsisotherme nach Utermann et al. (2005) und Stange und Rückkamp (2016) hat die Form:

#### 2.4.4 Linearisierung der nicht-linearen Isotherme

Für alle Stoffe, deren Sorption auf Basis einer nichtlinearen oder multiparametrischen Sorptionsisotherme beschrieben wird, muss für die Beschreibung des Stofftransports mittels einer der oben beschriebenen analytischen Lösungen (siehe Box 4) ein Sorptionsverteilungskoeffizient  $K_d$  als Linearisierung der nichtlinearen oder multiparametrischen Sorptionsisotherme berechnet werden. In der Ableitungssystematik der EBV wird dazu nach Susset und Leuchs (2011) die Steigung zwischen 1/10 des krit. Konzentrationswerts  $KW_{0dB}$  (GFS bzw. BM) und der Mitte des Konzentrationsbereichs zwischen  $KW_{0dB}$  und der aktuellen Konzentration bestimmt (auch als Verfahren „ $K_d$  Mitte“ bezeichnet). Das Verfahren ist in Abbildung 2-10 anhand eines Beispiels dargestellt.

*Anmerkung:* Für einige organische Verbindungen ist bekannt, dass die Sorption bzw. das Stoffverteilungsgleichgewicht zwischen wässriger und Festphase konzentrationsabhängig ist. Die Heranziehung von Sorptionsverteilungskoeffizienten gemäß des sogenannten  $K_{oc}$ -Konzepts in der Bewertungssystematik der EBV ist eine Vereinfachung zu Gunsten einer klaren Ableitungssystematik im Rahmen weiterer Vereinfachungen (z.B. die Unterscheidung von nur zwei Standardböden). Wird im Einzelfall ein Szenario betrachtet, für das für die relevanten Stoffe und den vorliegenden Boden die Parameter der nichtlinearen Sorptionsisotherme (z.B. Freundlich-Isotherme) bekannt sind, dann kann ebenfalls auf die hier beschriebene Linearisierung zurückgegriffen werden.

Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Ermittlung eines Sorptionsverteilungskoeffizienten durch Linearisierung der nicht-linearen Sorptionsisotherme mit Hilfe des Verfahrens „ $K_d$  Mitte“ am Beispiel der substratübergreifenden Sorptionsisotherme für Chrom an sandigem Unterboden (EBV-Bodenkategorie „Sand“).



## 2.4.5 Berechnungsparameter: Eingangsgrößen der Bewertung

### 2.4.5.1 Kritischer Wert am Ort der Beurteilung (OdB)

Der kritische Wert am OdB für die Bewertung ist in der Regel gleich der GFS der jeweiligen Stoffkomponente oder -gruppe. Für Stoffe, deren Konzentration bereits in den Sickerwässern unbelasteter Böden die GFS überschreiten, werden höhere Werte als Bezugsmaßstab (BM) verwendet (siehe auch Abschnitt 2.1.7.2). Die Werte aller in der EBV geregelten Stoffkomponente und -gruppen sind in Tabelle 6-1 zusammengestellt.

### 2.4.5.2 Bodenkennwerte

In der EBV werden zwei Bodenkategorien unterschieden: Sand und Lehm/Schluff/Ton. Die Parametrisierung dieser beiden Bodenkategorien ist in Susset und Leuchs (2011) detailliert beschrieben. Weitere Erläuterungen und einen Überblick zu den Perzentilverteilungen der Bodenkennwerte zeigen Susset et al. (2018; Tabelle 25,S. 222). Die Kennwerte der in der EBV unterschiedenen zwei Bodenkategorien „Sand“ und „Lehm/Schluff/Ton“ sind in Tabelle 6-2 zusammengestellt.

### 2.4.5.3 Sorptionsparameter

Susset et al. (2018) beschreiben den Abstimmungsprozess zur Festlegung der Sorptionsparameter im Rahmen des Ordnungsverfahrens. Für die meisten der in der EBV berücksichtigten organischen Stoffkomponenten wird auf  $K_{oc}$ -Werte zurückgegriffen. Mit Hilfe dieser  $K_{oc}$ -Werte und dem Gehalt an



organischem Kohlenstoff ( $f_{oc}$ ) der jeweiligen Bodenkategorie können stoff- und bodenspezifische Sorptionskoeffizienten ( $K_d$ ) und Retardationsfaktoren ( $R$ ) berechnet werden. Für die Mehrzahl der Einzelstoffe wurde der  $K_{oc}$ -Wert bestehenden Datenbanken oder der Literatur entnommen. Für Naphthalin und die Stoffgruppen PAK, MKW, PCB, BTEX wurde der  $K_{oc}$ -Wert mit empirischen Korrelationen aus der Wasserlöslichkeit ( $S_{eff}$ ) oder dem Oktanol-Wasserverteilungskoeffizienten ( $K_{ow}$ ) berechnet, wobei bei den Stoffgruppen jeweils eine stellvertretende Verbindung betrachtet wurde (Fluoranthen/Pyren für PAK, Oktan für MKW, PCB-52 für PCB sowie Toluol für BTEX).

Für Glyphosat, AMPA und die sonstigen Herbizide werden im Fraunhofer-Institut Schmallenberg ermittelte  $K_d$ -Werte verwendet (Fraunhofer Institut Schmallenberg, 2007 und 2009). Eine Auflistung der für die Berechnung maßgebenden Parameter gibt Tabelle 6-3.

Für die in der EBV geregelten Schwermetallverbindungen liegen die Koeffizienten der multiparametrischen Sorptionsisotherme nach Utermann et al. (2005) vor (siehe auch Box 6 in 2.4.3). Dabei sind jedoch nicht alle Koeffizienten für alle Schwermetalle relevant. Beispielsweise sind  $p_{CaCO_3}$ ,  $p_{Ton}$ ,  $p_{pH}$ ,  $p_{FeO_x}$ ,  $p_{AlO_x}$  für alle Komponenten außer Arsen und Vanadium gleich Null. Für Chrom sind nur die beiden intrinsischen Parameter ( $K_f^*$  und  $n$ ) relevant. Eine vollständige Auflistung der Regressionskoeffizienten findet sich in Tabelle 6-4.

#### 2.4.5.4 Abbauparameter

Die meisten der für die EBV relevanten organischen Verbindungen sind in der ungesättigten Bodenzone nachweislich mikrobiologisch abbaubar. Die stoffspezifischen Werte für die Abbauratenkonstante  $\mu$  werden aus den bekannten Werten für die Halbwertszeit (HWZ) ermittelt:  $\mu = \ln 2 / HWZ$ . Die Werte wurden verschiedenen Quellen entnommen (Tabelle 6-5).

Die relevanten Schwermetalle und Salze gelten als nicht abbaubar.

#### 2.4.5.5 Mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerk-UK

Die mittlere Sickerwasserrate (SWR) an der Bauwerk-UK variiert mit der betrachteten Einbauweise. Eine Zusammenstellung der Werte für alle in der EBV geregelten Einbauweisen findet sich in Tabelle 6-6.

## 3 Software-Tool BEMEB

### 3.1 Grundgedanken, Eckpunkte des Entwicklungskonzepts

Es sollte ein Softwarewerkzeug zur Ableitung medienschutzbasierter Einbauwerte für mineralische Ersatzbaustoffe gemäß der in der EBV verwendeten Methodik entwickelt werden, das für die Vollzugs- und Anwendungspraxis konzipiert ist, und das einfach, benutzerfreundlich und in transparenter Weise genutzt werden kann. Eine auf Microsoft Excel basierte Anwendung erschien auch im Hinblick auf die Akzeptanz des Tools eine gute Wahl, da voraussichtlich nahezu alle potentiellen Nutzer mit Excel vertraut sind, Excel-basierte Tools gerade im praktischen Kontext häufig zum Einsatz kommen, und daher grundsätzliche Vorbehalte gegenüber dem zu entwickelnden Werkzeug ausgeschlossen werden konnten.

Das Softwarewerkzeug firmiert unter dem Namen BEMEB-Tool (BEMEB = Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe) und wird nachfolgend so bezeichnet.

Eckpunkte des Entwicklungskonzepts des BEMEB-Tools sind:

- ▶ Der Kern des BEMEB-Tools zur Ableitung medianschutzbasierter Einbauwerte sollte auf Basis einer Microsoft Excel Arbeitsmappe realisiert werden, welche durch Makros und eine grafische Benutzeroberfläche gesteuert wird. Über diese Benutzeroberfläche werden dem Anwender die gewünschten Funktionen bereitgestellt. Die Benutzeroberfläche stellt einerseits eine leichte, intuitive Handhabung des Tools sicher. Sie übernimmt andererseits wichtige Kontrollaufgaben und verhindert eine „falsche“ Verwendung der Daten und der Bewertungsfunktionen. Die Eingabedaten werden in unterschiedlichen Tabellenblättern organisiert und sind jederzeit aktualisierbar.
- ▶ Eine *Standardbewertung* nach EBV sollte ebenso möglich sein wie die Betrachtung von Einzelfällen für Szenarien die von den Standardszenarien und Bewertungsfällen der EBV abweichen. Das Tool sollte auch flexibilisierte Bewertungsfunktionalitäten für eine *Einzelfallbewertung* bieten.
- ▶ Eingaben und Ergebnisse der Einzelfallbewertung sollten abgespeichert und zwischen Nutzern (z.B. zwischen Verwerter und Behörde) ausgetauscht bzw. übertragen werden können.
- ▶ Durch eine Verknüpfung mit dem Sickerwasserprognosetool WinSMART sollte das Tool auch Ausgangspunkt für eine *erweiterte Einzelfallbewertung* werden.

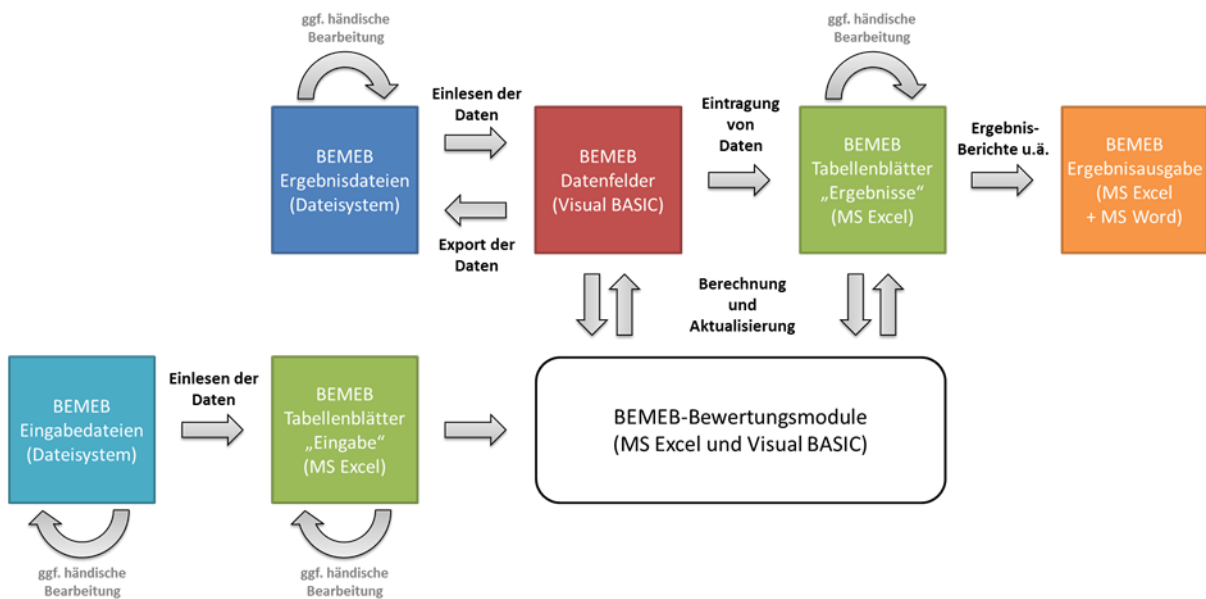
### 3.2 Daten-Modell

BEMEB verarbeitet und speichert im Laufe der Bewertung der Einsatzmöglichkeiten mineralischer Ersatzbaustoffe Daten in verschiedenen Formaten und Formen:

- ▶ Daten im ASCII- und xml-Format im Dateisystem in vorgegebenen Unterordnern des Arbeitsverzeichnisses:
  - Unterordner „inputdata“: Eingangsparameter für Stoffkomponenten (Verbindungen), Böden, Einbauweisen und mineralische Ersatzbaustoffe;
  - Unterordner „data“: Ergebnisdateien für maximal zulässige Quelltermkonzentrationen der bewertungsrelevanten Organika, Salze und Metalle, Sorptionsverteilungskoeffizienten der linearisierten Isotherme sowie ME, jeweils im ASCII-Format;
  - Unterordner „ergebnisse“: Bewertungsergebnisse, d.h. einzelne Tabellen oder Tabellenzusammenstellungen der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen und ME sowie der Einsatzmöglichkeiten, im MS Word (\*.docx) und MS Excel (\*.xlsx) Format.
- ▶ Daten in Datenfeldern, die mit Hilfe der in BEMEB integrierten Visual BASIC Programmmodule verarbeitet werden.
- ▶ Daten in Tabellenblättern der BEMEB-Excel-Tabelle.

Abbildung 3-1 zeigt eine schematische Darstellung der Datenbereiche und ihrer Verknüpfungen. Nähere Erläuterungen zu einzelnen Datenverarbeitungsschritten werden an anderen Stellen des Berichts, im Rahmen der Beschreibung der BEMEB-Elemente und -Funktionalitäten gegeben.

Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Daten, welche in BEMEB verarbeitet werden



### 3.3 Tabellenblätter

#### 3.3.1 Übersicht

Die Excel-Tabelle setzt sich zusammen aus insgesamt rd. 60 Tabellenblättern, die zur Datenhaltung, zur Berechnung, zur Ergebnisdarstellung oder anderen Funktionen dienen. Eine Übersicht der Tabellenblätter gibt Tabelle 3-1. Eine detaillierte Beschreibung folgt in den anschließenden Abschnitten des Berichts.

Tabelle 3-1: Übersicht der Tabellenblätter des BEMEB-Tools

| Bezeichnung des Blatts | Funktion      | Beschreibung   |
|------------------------|---------------|--|
| Verbindungen           | Datenhaltung: | Eingangsparameter der für die EBV relevanten Stoffkomponenten (Organika, Metalle und Salze)            |
| Boeden                 | Datenhaltung  | Eingangsparameter der zwei Bodentypen (Sand und Lehm/Schluff/Ton), die in der EBV unterschieden werden |
| Einbauweisen           | Datenhaltung  | Eingangsparameter der Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus sowie des Schienenverkehrswegebau   |

|                       |              |   |
|-----------------------|--------------|---|
| Materialwerte         | Datenhaltung | Eingangsparameter (Materialwerte) der Ersatzbaustoff- und Bodenklassen  |
| Sickerwasserraten_cal | Berechnung   | Bestimmung der zu betrachtenden Sickerwasserratenszenarien auf Basis der Eingangsparameter zu den Einbauweisen  |
| Sorption_cal          | Berechnung   | Sorptionsverteilungskoeffizient ( $K_d$ -Wert) in Abhängigkeit von der Stoffkonzentration an der UK des Bauwerks  |
| Material_cal          | Berechnung   | Vergleich von Materialwert und medienschutzbasiertem Einbauwert aller Stoffkomponenten für ein spezifisches Szenario (Materialklasse, Verhältnisse, Einbauweise) und Berechnung von Materialwertüberschreitungsfaktoren |
| Wert_cal              | Berechnung   | Maßgebliche Konzentration am OdB nach einer bestimmten Bewertungszeitdauer (Standardfall: 200 Jahre)  |
| BTC_cal               | Berechnung   | Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB für einen zeitlich konstanten (ggf. aber endlichen) Quellterm   |
| Prof_cal              | Berechnung   | Konzentrationsprofil in der ungesättigten Bodenzone zwischen Bauwerk und dem OdB für einen zeitlich konstanten (ggf. aber endlichen) Quellterm  |
| Salze_cal             | Berechnung   | Maximal zulässige Quellterm-Konzentration mittels einer Abklingfunktion für ein spezifisches Szenario (Einbauweise, Stoffkomponente/Salz, mineralischer Ersatzbaustoff)   |
| QTabkl_cal            | Berechnung   | Konzentrationsdurchbruchskurve an der UK des Quellterms für einen zeitlich abklingenden Quellterm (exponentielles Abklingen)  |
| BTCabkl_cal           | Berechnung   | Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB für einen zeitlich abklingenden Quellterm (exponentielles Abklingen)  |
| QTabkl_Wert_cal(ADE)  | Berechnung   | Konzentrationsdurchbruchskurve an der UK des Quellterms für einen zeitlich abklingenden Quellterm (gemäß Advektions-Dispersionsmodell)  |
| QTabkl_cal(ADE)       | Berechnung   | Konzentrationsdurchbruchskurve an der UK des Quellterms für einen zeitlich abklingenden Quellterm (gemäß Advektions-Dispersionsmodell)  |
| Profabkl_cal          | Berechnung   | Konzentrationsprofil in der ungesättigten Bodenzone zwischen Bauwerk und dem OdB für einen zeitlich abklingenden Quellterm (exponentielles Abklingen)   |

|           |                 |  |
|-----------|-----------------|--|
| BTC_plot  | Ergebnisausgabe | Ergebnisausgabe: Darstellung der Durchbruchskurve am OdB für einen zeitlich konstanten (ggf. aber endlichen) Quellterm |
| Prof_plot | Ergebnisausgabe | Ergebnisausgabe: Darstellung des Konzentrationsprofils in der ungesättigten Bodenzone zwischen Bauwerk und             |

| Bezeichnung des Blatts | Funktion        | Beschreibung  |
|------------------------|-----------------|---|
|                        |                 | dem OdB für einen zeitlich konstanten (ggf. aber endlichen) Quellterm   |
| BTCabkl_plot           | Ergebnisausgabe | Ergebnisausgabe: Darstellung der Durchbruchskurve am OdB für einen zeitlich abklingenden Quellterm (exponentielles Abklingen)   |
| Profabkl_plot          | Ergebnisausgabe | Ergebnisausgabe: Darstellung des Konzentrationsprofils in der ungesättigten Bodenzone zwischen Bauwerk und dem OdB für einen zeitlich abklingenden Quellterm (exponentielles Abklingen) |
| QTabkl_plot            | Ergebnisausgabe | Darstellung der Durchbruchskurve an der UK des Quellterms für einen zeitlich abklingenden Quellterm (exponentielles Abklingen)  |
| QTabkl_plot(ADE)       | Ergebnisausgabe | Darstellung der Durchbruchskurve an der UK des Quellterms für einen zeitlich abklingenden Quellterm (gemäß Advektions-Dispersionsmodell)  |
| maxQTK_StraWege_Sand   | Ergebnisausgabe | EBV-Tabellen der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen (kriterienspezifisch) für Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus bei einer Unterlagerung mit Sand                    |
| maxQTK_StraWege_SLT    | Ergebnisausgabe | EBV-Tabellen der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen (kriterienspezifisch) für Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus bei einer Unterlagerung mit Schluff/Lehm/Ton        |
| maxQTK_Bahnbw_Sand     | Ergebnisausgabe | EBV-Tabellen der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen (kriterienspezifisch) für Einbauweisen des Schienenverkehrswegebbaus bei einer Unterlagerung mit Sand                      |
| maxQTK_Bahnbw_SLT      | Ergebnisausgabe | EBV-Tabellen der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen (kriterienspezifisch) für Einbauweisen des Schienenverkehrswegebbaus bei einer Unterlagerung mit Schluff/Lehm/Ton          |

|                                 |                 |  |
|---------------------------------|-----------------|--|
| ME_Strawege1 bis ME_Strawege5   | Ergebnisausgabe | EBV-Tabellen der medien-schutz-basierten Einbauwerte für Organika und Metalle für Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus |
| ME_Bahnbw1 bis ME_Bahnbw5       | Ergebnisausgabe | EBV-Tabellen der medien-schutz-basierten Einbauwerte für Organika und Metalle für Einbauweisen des Schienenverkehrswegebau     |
| ME_StrawegeS1 und ME_StrawegeS3 | Ergebnisausgabe | EBV-Standardtabellen der medien-schutz-basierten Einbauwerte für Salze für Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus        |
| ME_BahnbwS1 und ME_BahnbwS3     | Ergebnisausgabe | EBV-Standardtabellen der medien-schutz-basierten Einbauwerte für Salze für Einbauweisen des Schienenverkehrswegebau            |
| Einsatz_Bahnbw                  | Ergebnisausgabe | Einsatzmöglichkeiten für die ausgewählte Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs im Schienenver-                    |
| <b>Bezeichnung des Blatts</b>   | <b>Funktion</b> | <b>Beschreibung</b>  |
|                                 |                 | kehrswegebau   |
| Einsatz_Strawege                | Ergebnisausgabe | Einsatzmöglichkeiten für die ausgewählte Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs im Straßen-, Wege- und Erdbau      |
| Einstellungen_Tabellen          | Programmablauf  | Einstellungen zur Bestimmung der Zellpositionen für Stoffkomponenten und Materialklassen innerhalb der Ergebnistabellen        |
| Einstellungen                   | Programmablauf  | Einstellungen zur Bestimmung der Zellpositionen für Stoffkomponenten und Materialklassen innerhalb der Ergebnistabellen        |
| Log                             | Programmablauf  | Protokoll der Aktionen   |
| AktuelleBewertung               | Ergebnisausgabe | Temporäre Speicherung des aktuellen Bewertungsergebnisses für die Ergebnisausgabe  |
| *_Copy                          | Programmablauf  | Sicherungskopien der Inhalte der Tabellenblätter zur Datenhaltung der Eingangsparameter  |
| *_Temp                          | Programmablauf  | Interimsversionen der Inhalte der Tabellenblätter zur Datenhaltung der Eingangsparameter                                       |
| Empty                           | Programmablauf  | Leeres Tabellenblatt   |

### 3.3.2 Tabellenblätter für die Datenhaltung

Die für die Bewertung erforderlichen Daten werden in vier Gruppen organisiert (siehe auch Tabelle 3-1):

- ▶ Verbindungen (gleichbedeutend mit: chemische Verbindungen bzw. Stoffkomponenten)
- ▶ Böden
- ▶ Einbauweisen
- ▶ Materialwerte

Der Aufbau dieser vier Datentabellen unterscheidet sich nur unwesentlich (siehe Abbildung 3-2):

- ▶ Am oberen und linken Tabellenrand sind Bereiche für Berechnungen und Datenchecks abgegrenzt.
- ▶ Im eigentlichen Datenbereich erhält jedes Element (item) der jeweiligen Datengruppe eine Zeile. Die Anzahl der Spalten richtet sich nach der Anzahl der Parameter, die für die jeweilige Datengruppe relevant sind.

Abbildung 3-2: Tabellenblatt zur Datenhaltung (Blatt "Verbindungen")

| Verbindungen                           |           | Anzahl insgesamt: 32 |                      | Stand vom: 11.05.2016 |           | Organ. Verbindungen: 19 |           | Metalle: 10                                 |  | Salze: 3    |                          |    |     |     |     |     |     |
|--|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|-------------------------|-----------|---|--|-------------|--------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Verbindungen                           |           | Parametercode        |                      | V1                    | V2        | V3                      | V4        | V5  | V6   | V7          | V8                       | V9 | V10 | V11 | V12 | V13 | V14 |
| Soll Verbindung berücksichtigt werden? | Anderung? | Parameter            | Bezeichnung          | Verfasser             | Datum     | Gruppencode             | BM [ug/L] | Maximale Filterkapazität Fkmax Sand [mg/kg] | Maximale Filterkapazität Fkmax L/S/T [mg/kg] | log Kow [-] | Molekulargewicht [g/mol] |    |     |     |     |     |     |
| 1                                      |           | Verbindung #1        | 15 EPA PAKs          | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 0.2       | 2.7   | 2.7  |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 10                                     |           | Verbindung #2        | Naphthalin           | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 1         | 2.70  | 2.7  | 3.37        |                          |    |     |     |     |     |     |
| 11                                     |           | Verbindung #3        | MKW                  | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 100       | 90  | 90   |             | 114.23                   |    |     |     |     |     |     |
| 12                                     |           | Verbindung #4        | BTEX                 | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 20        | 0.9   | 0.9  |             | 92.14                    |    |     |     |     |     |     |
| 13                                     |           | Verbindung #5        | PCB, ges.            | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 0.01      | 0.045                                       | 0.045  |             | 291.99                   |    |     |     |     |     |     |
| 14                                     |           | Verbindung #6        | Phenol               | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 8         | 5.7   | 5.7  |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 15                                     |           | Verbindung #7        | Chlorphenole, gesamt | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 1         | 5.7   | 5.7  |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 16                                     |           | Verbindung #8        | Chlorbenzole, gesamt | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 1         | 0.45  | 0.45   |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 17                                     |           | Verbindung #9        | Hexachlorbenzol      | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 0.01      | 0.45  | 0.45   |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 18                                     |           | Verbindung #10       | Atrazin              | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 0.1       | 0.23  | 0.23   |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 19                                     |           | Verbindung #11       | Bromscil             | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 0.1       | 0.23  | 0.23   |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 20                                     |           | Verbindung #12       | Diuron               | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 0.05      | 0.23  | 0.23   |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 21                                     |           | Verbindung #13       | Glyphosat            | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 0.1       | 0.23  | 0.23   |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 22                                     |           | Verbindung #14       | Simazine             | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 0.1       | 0.23  | 0.23   |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 23                                     |           | Verbindung #15       | Sonstige Herbizide   | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 0.1       | 0.23  | 0.23   |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 24                                     |           | Verbindung #16       | AMPA                 | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 0.1       | 0.23  | 0.23   |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 25                                     | 0         | Verbindung #17       | TCE                  | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 20        | 0.9   | 0.9  |             | 131.39                   |    |     |     |     |     |     |
| 26                                     | 0         | Verbindung #18       | Nonylphenole         | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 0.3       | 5.7   | 5.7  |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 27                                     | 0         | Verbindung #19       | MTBE                 | Finkel                | 5/11/2016 | O                       | 15        | 100   | 100  |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 28                                     | 1         | Verbindung #20       | Antimon              | Finkel                | 5/11/2016 | M                       | 5         | 0.75  | 1.48   |             |                          |    |     |     |     |     |     |
| 29                                     | 1         | Verbindung #21       | Arsen                | Finkel                | 5/11/2016 | M                       | 10        | 2.4   | 10.3   |             |                          |    |     |     |     |     |     |

### 3.3.3 Tabellenblätter für die Berechnung

Für die automatisierte Bewertung der Einsatzmöglichkeiten der MEB nach der EBV sind verschiedene Berechnungsaufgaben bzw. -schritte erforderlich, die größtenteils in den Tabellenblättern des BEMEB-Tools durchgeführt werden. Diese Tabellenblätter können bei Bedarf auch „für sich“, also unabhängig verwendet werden, um die gewünschte Berechnungsaufgabe durchzuführen. Eine Übersicht der Berechnungstabellenblätter wurde bereits oben in Tabelle 3-1 gegeben. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Tabellenblätter findet sich in den nachfolgenden Abschnitten.

#### 3.3.3.1 Bestimmung der Sickerwasserraten-Szenarien (Blatt "Sickerwasserraten\_cal")

Für die Berücksichtigung des Transportterms zur Bewertung der Einbaumöglichkeiten eines MEB ist die mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerk-UK ein wichtiger Parameter. Jede der Einbauweisen hat – entsprechend ihrer hydraulischen Charakteristik – eine spezifische Sickerwasserrate (siehe dazu Abschnitt 2.2.3). Da einige Bauweisen die gleichen spezifischen Sickerwasserraten (SWR) haben, können sie für die Bewertung in sogenannten Sickerwasserratenszenarien zusammengefasst werden. Auf diese Weise werden Berechnungsaufwand und Rechenzeit minimiert. Die Bestimmung der

Sickerwasserratenszenarien erfolgt automatisch in dem VBA-Modul 'mod\_DetSPRScenarios'. Die Szenarien werden für die Einbauweisen des Straßen- und Wegebau und die Einbauweisen im Schienenverkehrswegebau getrennt ermittelt. Die Sickerwasserrate an der Bauwerksunterkante und die Anzahl der dem Szenario zugeordneten Einbauweisen werden im Tabellenblatt „Sickerwasserraten\_cal“ abgespeichert (Abbildung 3-3). In der zum Abschluss des hier dokumentierten Projekts vorliegenden BEMEBVersion werden insgesamt 54 Einbauweisen zu 16 Sickerwasserratenszenarien zusammengefasst, 9 Szenarien für die Einbauweisen im Schienenverkehrswegebau und 7 Szenarien für die Einbauweisen des Straßen- und Wegebau.

Abbildung 3-3: Tabellenblatt zur Bestimmung der Sickerwasserratenszenarien (Blatt "Sickerwasserraten\_cal")

| Parametercode        | S1  | S2                                       | S3                     |
|----------------------|---|--|------------------------|
| Parameterbezeichnung | Sickerwasserrate an der Bauwerksunterkante [mm/a] | Anzahl der zugeordneten Einbauweisen [-] | Sickerwasserrate [m/s] |
| Sickerwasserrate #1  | 395   | 3  | 1,25254E-08            |
| Sickerwasserrate #2  | 434   | 3  | 1,3762E-08             |
| Sickerwasserrate #3  | 221   | 5  | 7,00786E-09            |
| Sickerwasserrate #4  | 103   | 6  | 3,26611E-09            |
| Sickerwasserrate #5  | 171   | 2  | 5,42237E-09            |
| Sickerwasserrate #6  | 127   | 2  | 4,02714E-09            |
| Sickerwasserrate #7  | 38  | 2  | 1,20497E-09            |
| Sickerwasserrate #8  | 273   | 2  | 8,65677E-09            |
| Sickerwasserrate #9  | 179   | 2  | 5,67605E-09            |
| Sickerwasserrate #10 | 280   | 4  | 8,87874E-09            |
| Sickerwasserrate #11 | 67  | 1  | 2,12456E-09            |
| Sickerwasserrate #12 | 583   | 5  | 1,84868E-08            |
| Sickerwasserrate #13 | 377   | 3  | 1,19546E-08            |
| Sickerwasserrate #14 | 242   | 3  | 7,67377E-09            |
| Sickerwasserrate #15 | 170   | 2  | 5,39066E-09            |
| Sickerwasserrate #16 | 313   | 2  | 9,92516E-09            |

### 3.3.3.2 Berechnung des konzentrationsabhängigen Sorptionskoeffizienten für Metalle mit Hilfe einer multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt "Sorption\_cal")

Der Stoffrückhalt in der ungesättigten Zone zwischen Bauwerk-UK und OdB wird durch einen Retardationsfaktor berücksichtigt (siehe Formel 30). Dieser Retardationsfaktor wird im Tabellenblatt "Sorption\_cal" nach Formel (32) aus dem Sorptionskoeffizienten  $K_d$  berechnet (Abbildung 3-8: Zelle BM22). Der Sorptionskoeffizient wird dabei in jeder Bewertungsiteration für die jeweils betrachtete Stoffkonzentration an der Bauwerk-UK neu berechnet.

Die Berechnung des  $K_d$ -Werts ist dabei abhängig von den Daten/Parametern, welche für die jeweilige Kombination Bodentyp-Stoffkomponente verfügbar sind. Für verschiedene Schwermetalle und die beiden Standardbodentypen der EBV liegen Daten für die Anwendung der multiparametrischen Sorptionsisotherme nach Utermann et al. (2005) vor. Für Arsen und Vanadium liegen multiparametrische Sorptionsisothermen von Schug et al. (1999), Susset und Leuchs (2011) und Stange und Rückkamp (2016) vor. Die Sorption für die organischen Stoffkomponenten wird nach dem  $K_{oc}$ -Konzept abgeschätzt. Über den Gehalt an organischem Kohlenstoff ( $f_{oc}$ ) des jeweiligen Bodens und



dem  $K_{oc}$ -Wert der Stoffkomponenten werden spezifische Verteilungskoeffizienten bestimmt die einer linearen Sorptionsisotherme entsprechen. In diesen Fällen sind Sorptionsverteilungskoeffizient und Retardationsfaktor nicht konzentrationsabhängig und bleiben im Verlauf der iterativen Suche (siehe Abschnitt 2.4.2) der Bewertung konstant. Für einzelne Organika und Böden sind gegebenenfalls konzentrationsabhängige Isothermen verfügbar.

Dementsprechend werden für die Berechnung des Sorptionsverteilungskoeffizienten sechs unterschiedliche Berechnungsverfahren bereitgestellt (Tabelle 3-2). Allen Verfahren auf Basis einer nichtlinearen oder multiparametrischen Sorptionsisotherme ist gemeinsam, dass die Isotherme zur Bestimmung eines Sorptionsverteilungskoeffizienten  $K_d$  linearisiert werden muss (siehe Abschnitt 2.4.3).

Die Eingabewerte für das Tabellenblatt sind die Codes für Boden (Zelle E2) und Stoffkomponente (Zelle E4) sowie ein Multiplikator (Zelle E22) zur Berechnung der aktuellen Stoffkonzentration (= Multiplikator  $\times$  GFS bzw. BM). Für die aktuelle Stoffkomponente und den zu betrachtenden Boden werden die Eingabedaten aus den Tabellenblättern "Verbindungen" bzw. "Boeden" in das Tabellenblatt "Sorption\_cal" kopiert (Zeilen 7 bis 16). Diese Daten werden für die Berechnung verwendet, die in Zeile 22 durchgeführt wird.

Tabelle 3-2: Übersicht der Berechnungsoptionen zur Bestimmung des Retardationsfaktors

| Berechnungsart (Code) | Erläuterung   | Berechnung in Zelle von "Sorption_cal" |
|-----------------------|---|--|
| 1                     | Lineare Isotherme / $K_{oc}$ -Konzept: $K_d = K_{oc} \cdot f_{oc}$                  | AF                                     |
| 2                     | Nichtlineare (Freundlich-)Isotherme: $K_d = K_{fr} \cdot f_{Cw,mid}$                | AU                                     |
| 3                     | Multiparametrische Isotherme nach Utermann et al. (2005)                            | AO                                     |
| 4                     | Multiparametrische Isotherme für Arsen und Vanadium nach Schug (1999)               | BA                                     |
| 5                     | Multiparametrische Isotherme für Arsen nach Susset und Leuchs (2011)                | BB                                     |
| 6                     | Multiparametrische Isotherme für Arsen und Vanadium nach Stange und Rückkamp (2016) | BK                                     |

Abbildung 3-4: Tabellenblatt zur Berechnung des konzentrationsabhängigen Sorptionskoeffizienten für Metalle mit Hilfe einer multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt "Sorption\_cal") – Teil 1

|    | A                           | B                            | C         | D                           | E   | F                   | G   | H  | I           | J                        | K                                 | L                                  | M            | N                    |
|----|-----------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------------|---|---------------------|---|--|-------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------|----------------------|
| 1  | <b>Sorption_cal</b>         |                              |           |                             |   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 2  | Stand vom:                  | 08.06.2016                   |           | Gewählter Boden, Code:      | 1   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 3  |                             |                              |           | Gewählter Boden, Bezeichn.: | Sand  |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 4  |                             |                              |           | Gewählte Verbindung, Code:  | 28  |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 5  |                             |                              |           | Gewählte Verbindung, Bez.:  | Vanadium  |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 6  |                             |                              |           |                             |   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 7  | <b>Gewählter Boden:</b>     |                              |           |                             |   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 8  | Parametercode               | B1                           | B2        | B3                          | B4  | B5                  | B6  | B7   | B8          | B9                       | B10                               | B11                                | B12          | B13                  |
| 9  | Parameter                   | Bezeichnung                  | Verfasser | Datum                       | pH (CaCl2)  | Tongehalt [%]       | Mnox (Pb) [mg/kg]                           | Corg [%]                                     | Fed [g/kg]  | Effektive Porosität      | Lagerungsdichte [kg/L]            | CaCo3 [%]                          | Feox [mg/kg] | Alox [mg/kg]         |
| 10 | Boden #1                    | Sand                         | Finkel    | 06.09.2016                  | 4.8   | 2.46                | 231   | 0.1  | 10.2        | 0.17                     | 1.42                              | 0                                  | 73           | 421                  |
| 11 |                             |                              |           |                             |   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 12 |                             |                              |           |                             |   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 13 | <b>Gewählte Verbindung:</b> |                              |           |                             |   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 14 | Parametercode               | V1                           | V2        | V3                          | V4  | V5                  | V6  | V7   | V8          | V9                       | V10                               | V11                                | V12          | V13                  |
| 15 | Parameter                   | Bezeichnung                  | Verfasser | Datum                       | Gruppencode   | BM [µg/L]           | Maximale Filterkapazität Fkmax Sand [mg/kg] | Maximale Filterkapazität Fkmax L/S/T [mg/kg] | log Kow [-] | Molekulargewicht [g/mol] | Effektive Löslichkeit Seff [mg/l] | Effektive Löslichkeit Seff [mol/l] | log Koc [-]  | Erläuterung Sorption |
| 16 | Verbindung #28              | Vanadium                     | Finkel    | 42501                       | M   | 20                  | 11  | 48.5   | 0           | 0                        | 0                                 | 0                                  | 0            | 0                    |
| 17 |                             |                              |           |                             |   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 18 | <b>Berechnung:</b>          |                              |           |                             |   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 19 | Compound                    | Verbindung / Stoffkomponente | GFS       | Berechnungsart              | GFS-Multiplikator (aktueller Wert der Suche nach Maximalwert) | Konzentrationswerte |   |  |             |                          |                                   | Koeffizienten für multiparam       |              |                      |
| 20 |                             |                              |           |                             |   | Cw,min (=1/10*GFS)  | Cw,act (=Factor*GFS)                        | Cw,mid                                       | logCw,min   | logCw,act                | logCw,mid                         | log K*                             | K*           | pH (Ca               |
| 21 |                             |                              | [µg/L]    |                             |   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 22 | Vanadium                    | Vanadium                     | 20        | 6                           | 2.87  | 2                   | 57.4326801                                  | 29.7163401                                   | 0.30103     | 1.75915908               | 1.472995                          | -0.28                              | 0            |                      |
| 23 |                             |                              |           |                             |   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |
| 24 |                             |                              |           |                             |   |                     |   |  |             |                          |                                   |                                    |              |                      |

Abbildung 3-5: Tabellenblatt zur Berechnung des konzentrationsabhängigen Sorptionskoeffizienten für Metalle mit Hilfe einer multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt "Sorption\_cal") – Teil 2

|    | N  | O                 | P                   | Q                       | R                   | S                   | T                              | U  | V                         | W                     | X                         | Y                    | Z   | AA                  | AB                         | AC                    | AD                   |
|----|--|-------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------|--|---------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|---|---------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|
| 1  |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 2  |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 3  |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 4  |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 5  |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 6  |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 7  |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 8  | B13  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 9  | Alox [mg/kg]   |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 10 | 421  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 11 |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 12 |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 13 |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 14 | V13  | V14               | V15                 | V16                     | V17                 | V18                 | V19                            | V20  | V21                       | V22                   | V23                       | V24                  | V25   | V26                 | V27                        | V28                   | V29                  |
| 15 | Erläuterung - Sorption   | Halbwertszeit [d] | Erläuterung - Abbau | Isothermen koef. log K* | Isothermen koef. K* | Isothermen koef. pH | Isothermen koef. log Tongehalt | Isothermen koef. Tongehalt                           | Isothermen koef. log Conc | Isothermen koef. Corg | Isothermen koef. log MnOx | Isothermen koef. Fed | Exponenten koef. f. K*                                    | Exponenten koef. pH | Exponenten koef. Tongehalt | Exponenten koef. Corg | Exponenten koef. Fed |
| 16 | 0  | inf               | persistent          | -0.28                   | 0                   | 0                   | 0.17                           | 0  | 0.65                      | 0                     | 0                         | 0                    | 0   | 0                   | 0                          | 0                     | 0                    |
| 17 |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 18 |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 19 | ultraparametrische Isotherme (nach Utermann et al. (2005) bzw. nach Schug et al. (1999)) |                   |                     |                         |                     |                     |                                | Koeffizienten für Exponent (nach Schug et al., 1999) |                           |                       |                           |                      | Zusätzliche Koeffizienten nach Stange und Rückkamp (2016) |                     |                            |                       | Freundlich           |
| 20 | pH (CaCl2)   | log Tongehalt     | Tongehalt           | log Conc                | Corg                | log MnOx            | Fed                            | K*   | pH                        | Tongehalt             | Corg                      | Fed                  | log Corg  | log CaCO3           | log FeOx                   | log AlOx              | KFr                  |
| 21 |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 22 | 0  | 0.17              | 0                   | 0.65                    | 0                   | 0                   | 0                              | 0  | 0                         | 0                     | 0                         | 0                    | -0.71   | 0                   | 0.6                        | 0.29                  | [µg1-n kg-           |
| 23 |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |
| 24 |  |                   |                     |                         |                     |                     |                                |  |                           |                       |                           |                      |   |                     |                            |                       |                      |

Abbildung 3-6: Tabellenblatt zur Berechnung des konzentrationsabhängigen Sorptionskoeffizienten für Metalle mit Hilfe einer multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt "Sorption\_cal") – Teil 3

|    | AD                          | AE                                 | AF               | AG  | AH                    | AI                                | AJ                               | AK                               | AL                               | AM                             | AN                       | AO          | AP                           | AQ                | AR                  | AS                       |
|----|-----------------------------|------------------------------------|------------------|---|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| 1  |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 2  |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 3  |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 4  |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 5  |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 6  |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 7  |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 8  |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 9  |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 10 |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 11 |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 12 |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 13 |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 14 | V29<br>Exponentenkoeff. Fed | V30<br>Kfr-Sand<br>[µg1-n kg-1 Ln] | V31<br>nfr-Sand  | V32<br>Kfr-Lehm<br>[µg1-n kg-1 Ln]                      | V33<br>nfr-Lehm       | V34<br>Isothermenkoeff. log CaCO3 | V35<br>Isothermenkoeff. log FeOx | V36<br>Isothermenkoeff. log AlOx | V37<br>Isothermenkoeff. log Corg | V38<br>Berechnungsart Sorption |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 15 |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 16 | 0                           | 481                                | 0.477            | 2104  | 0.54                  | 0                                 | 0.6                              | 0.29                             | -0.71                            | 6                              |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 17 |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 18 |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 19 | Freundlich-Parameter        |                                    | Linear (Koc*foc) | Berechnung für MP-Isotherme (nach Utermann et al. 2005) |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             | Berechnung für nicht-lineare |                   |                     |                          |
| 20 | KFr                         | 1/n                                | Kd               | logC <sub>s,min</sub>                                   | logC <sub>s,max</sub> | logC <sub>s,Mitte</sub>           | Cs <sub>min</sub>                | Cs <sub>max</sub>                | Cs <sub>Mitte</sub>              | Kd <sub>linearised</sub>       | Kd <sub>linearised</sub> | Kd (Cw,mid) | Cs <sub>min</sub>            | Cs <sub>max</sub> | Cs <sub>Mitte</sub> | Kd <sub>linearised</sub> |
| 21 | [µg1-n kg-1 Ln]             | -                                  | [L/kg]           | [µg/kg]   | [µg/kg]               | [µg/kg]                           | [µg/kg]                          | [µg/kg]                          | [µg/kg]                          | [L/kg]                         | [m²/kg]                  | [L/kg]      | [µg/kg]                      | [µg/kg]           | [µg/kg]             | [L/kg]                   |
| 22 | 481                         | 0.477                              | 0.001            | -0.017872   | 0.929912              | 0.743906                          | 0.96                             | 8.51                             | 5.55                             | 0.1                            | 0.0001                   | 0.187       | 669.48                       | 3320.96           | 2425.29             |                          |
| 23 |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |
| 24 |                             |                                    |                  |   |                       |                                   |                                  |                                  |                                  |                                |                          |             |                              |                   |                     |                          |

Abbildung 3-7: Tabellenblatt zur Berechnung des konzentrationsabhängigen Sorptionskoeffizienten für Metalle mit Hilfe einer multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt "Sorption\_cal") – Teil 4

|    | AS                       | AT                       | AU          | AV   | AW                | AX                  | AY                       | AZ                       | BA          | BB     | BC                    | BD   | BE                      | BF                | BG                | BH                  |
|----|--------------------------|--------------------------|-------------|--|-------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|--------|-----------------------|--|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| 1  |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 2  |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 3  |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 4  |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 5  |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 6  |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 7  |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 8  |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 9  |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 10 |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 11 |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 12 |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 13 |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 14 |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 15 |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 16 |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 17 |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 18 |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 19 | nI-lineare-Isotherme     |                          |             | Berechnung für MP-Isotherme (nach Schug et al. 1999) |                   |                     |                          |                          |             |        | Arsen nach Susset     | Berechnung für MP-Isotherme (nach Stange und Rück) |                         |                   |                   |                     |
| 20 | Kd <sub>linearised</sub> | Kd <sub>linearised</sub> | Kd (Cw,mid) | Cs <sub>min</sub>                                    | Cs <sub>max</sub> | Cs <sub>Mitte</sub> | Kd <sub>linearised</sub> | Kd <sub>linearised</sub> | Kd (Cw,mid) | Kd     | logC <sub>s,min</sub> | logC <sub>s,max</sub>                              | logC <sub>s,Mitte</sub> | Cs <sub>min</sub> | Cs <sub>max</sub> | Cs <sub>Mitte</sub> |
| 21 | [L/kg]                   | [m²/kg]                  | [L/kg]      | [µg/kg]  | [µg/kg]           | [µg/kg]             | [L/kg]                   | [m²/kg]                  | [L/kg]      | [L/kg] | [µg/kg]               | [µg/kg]  | [µg/kg]                 | [µg/kg]           | [µg/kg]           | [µg/kg]             |
| 22 | 47.8                     | 0.0478                   | 81.615      | 2.00   | 57.43             | 29.72               | 1.0                      | 0.0010                   | 1.0         | 1.000  | 2.571164              | 3.518948   | 3.332941                | 372.53            | 3303.30           | 2152.49             |
| 23 |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |
| 24 |                          |                          |             |  |                   |                     |                          |                          |             |        |                       |  |                         |                   |                   |                     |

Abbildung 3-8: Tabellenblatt zur Berechnung des konzentrationsabhängigen Sorptionskoeffizienten für Metalle mit Hilfe einer multiparametrischen Sorptionsisotherme (Blatt "Sorption\_cal") – Teil 5

|    | BH                           | BI             | BJ             | BK          | BL | BM | BN         | BO            | BP | BQ | BR | BS | BT | BU | BV | BW |  |
|----|------------------------------|----------------|----------------|-------------|----|----|------------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| 1  |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 2  |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 3  |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 4  |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 5  |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 6  |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 7  |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 8  |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 9  |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 10 |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 11 |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 12 |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 13 |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 14 |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 15 |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 16 |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 17 |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 18 |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 19 | Ingenieur und Rückkamp 2016) |                |                |             |    |    | Relevanter | Retardations- |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 20 | Cs,Mitte                     | Kd, linearised | Kd, linearised | Kd (Cw,mid) |    |    | Kd-Wert    | faktor        |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 21 | [µg/kg]                      | [L/kg]         | [m³/kg]        | [L/kg]      |    |    | [L/kg]     | [-]           |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 22 | 2152.49                      | 52.9           | 0.0529         | 72.435      |    |    | 72.435     | 606.04        |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 23 |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 24 |                              |                |                |             |    |    |            |               |    |    |    |    |    |    |    |    |  |

### 3.3.3.3 Prüfung der Einbaufähigkeit einer Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs (Blatt "Material\_cal")

Ob eine ausgewählte Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffes oder Bodenmaterials in einer bestimmten Einbauweise bei bestimmten Untergrundverhältnissen verwendet werden darf oder nicht, wird im Tabellenblatt "Material\_cal" geprüft.

Die Eingabewerte für das Tabellenblatt sind die Indices bzw. internen Codes für Materialklasse (Zelle E2), Untergrundverhältnisse (Zelle E3) und Einbauweise (Zelle E4). Diese werden in einer regulären BEMEB-Anwendung über eine entsprechende Eingabe in der graphischen Benutzeroberfläche gesetzt. Sie können aber auch manuell gesetzt werden, um die Eignungsprüfung für eine gewünschte Konfiguration durchzuführen.

Im Ergebnis wird die Anzahl der Materialwertüberschreitungen berechnet (Zelle C5) und die Gesamtbeurteilung (Zelle E5): Wert = 1 sofern der Einsatz möglich ist, Wert = -1 falls nicht.

Das Tabellenblatt wird für die zu prüfende Konfiguration automatisch gefüllt. In Spalte V2cal werden die Materialwerte der gewählten Materialklasse aus dem Tabellenblatt „Materialwerte“ übertragen. In den Spalten V3cal bis V8cal werden die Bezeichnung des Tabellenblatts sowie die Zellenadresse bestimmt, in welcher der ME für die getroffene Auswahl von Einbauweise und Untergrundverhältnissen zu finden ist. In Spalte V9cal wird von dieser Adresse der ME übertragen. In V10cal wird der Vergleich zwischen Materialwert (V2cal) und ME (V9cal) durchgeführt. Überschreitet der ME den Materialwert, wird die Überschreitung in % in Spalte V11cal vermerkt.

Abbildung 3-9: Tabellenblatt zum Vergleich der Materialwerte (MW) mit den medienschutzbasierten Einbauwerten (ME) (Blatt "Material\_cal")

|    | A                            | B                           | C           | D  | E                        | F  | G                 | H                            | I                         | J                    | K                  | L         | M                   |
|----|------------------------------|-----------------------------|-------------|--|--------------------------|--|-------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------|-----------|---------------------|
| 1  | <b>Material_cal</b>          |                             |             |  |                          |  |                   |                              |                           |                      |                    |           |                     |
| 2  | Stand vom:                   | 9/29/2016                   |             | Gewählte Material-klasse (Index):        | 30                       | Gewählte Material-klasse (Kürzel):       | GS-2              |                              |                           |                      |                    |           |                     |
| 3  |                              |                             |             | Untergrund-verhältnisse (interner Code): | 2                        | Gewähltes Material:                      | GS                | Verhältnisse:                | günstig (LST)             |                      |                    |           |                     |
| 4  |                              |                             |             | Einbauweise (Index):                     | 54                       | Relevante Bauweise für Organika/Metalle: | 54                |                              |                           |                      |                    |           |                     |
| 5  | Anzahl der Überschreitungen: |                             | 7           | Ergebnis des Vergleichs:                 | -1                       | Einsatz ist nicht möglich                | -                 |                              |                           |                      |                    |           |                     |
| 6  |                              |                             |             |  |                          |  |                   |                              |                           |                      |                    |           |                     |
| 7  | Parametercode                | V1                          | V1cal       | V2cal                                    | V3cal                    | V4cal                                    | V5cal             | V6cal                        | V7cal                     | V8cal                | V9cal              | V10cal    | V11cal              |
| 8  | Parameter-bezeichnung        | Bezeichnung                 | Stoffgruppe | Werte für gewähltes Material             | ME-Tabelle StraWege (Nr) | ME-Tabelle Bahnw (Nr)                    | ME-Tabelle (Name) | Zeile in ME-Tabelle StraWege | Zeile in ME-Tabelle Bahnw | Spalte in ME-Tabelle | Relevanter ME-Wert | Vergleich | Überschreitung in % |
| 9  | M4                           | 15 EPA PAKs [ug/L]          | 0           | 42                                       | 2                        |  | 2 ME_Strawege2    | 45                           | 45                        | 14                   | 79.7               | 0         |                     |
| 10 | M5                           | Naphthalin [ug/L]           | 0           | 0  | -1                       |  | -1                | 44                           | 44                        | 12                   | 99999              | 0         |                     |
| 11 | M6                           | MKW [ug/L]                  | 0           | 310                                      | 2                        |  | 2 ME_Strawege2    | 45                           | 45                        | 15                   | 522                | 0         |                     |
| 12 | M7                           | BTEX [ug/L]                 | 0           | 0  | 3                        |  | 3 ME_Strawege3    | 44                           | 44                        | 15                   | 51                 | 0         |                     |
| 13 | M8                           | PCB, ges. [ug/L]            | 0           | 0  | 3                        |  | 3 ME_Strawege3    | 44                           | 44                        | 14                   | 0.03               | 0         |                     |
| 14 | M9                           | Phenol [ug/L]               | 0           | 0  | 3                        |  | 3 ME_Strawege3    | 44                           | 44                        | 13                   | 5100               | 0         |                     |
| 15 | M10                          | Chlorphenole, gesamt [ug/L] | 0           | 0  | 3                        |  | 3 ME_Strawege3    | 45                           | 45                        | 13                   | 168                | 0         |                     |
| 16 | M11                          | Chlorbenzole, gesamt [ug/L] | 0           | 0  | 3                        |  | 3 ME_Strawege3    | 45                           | 45                        | 14                   | 3.4                | 0         |                     |
| 17 | M12                          | Hexachlorbenzol [ug/L]      | 0           | 0  | 3                        |  | 3 ME_Strawege3    | 45                           | 45                        | 15                   | 0.07               | 0         |                     |
| 18 | M13                          | Atrazin [ug/L]              | 0           | 3.5                                      | 4                        |  | 4 ME_Strawege4    | 44                           | 44                        | 13                   | 2.21               | -1        | 58.4                |
| 19 | M14                          | Bromacil [ug/L]             | 0           | 1.2                                      | 4                        |  | 4 ME_Strawege4    | 44                           | 44                        | 14                   | 0.73               | -1        | 64.4                |
| 20 | M15                          | Diuron [ug/L]               | 0           | 0.8                                      | 4                        |  | 4 ME_Strawege4    | 44                           | 44                        | 15                   | 0.5                | -1        | 60.0                |
| 21 | M16                          | Glyphosat [ug/L]            | 0           | 17                                       | 4                        |  | 4 ME_Strawege4    | 45                           | 45                        | 13                   | 6.79               | -1        | 150.4               |
| 22 | M17                          | Simazin [ug/L]              | 0           | 12                                       | 4                        |  | 4 ME_Strawege4    | 45                           | 45                        | 14                   | 6.79               | -1        | 76.7                |
| 23 | M18                          | Sonstige Herbizide [ug/L]   | 0           | 17                                       | 4                        |  | 4 ME_Strawege4    | 45                           | 45                        | 15                   | 6.79               | -1        | 150.4               |
| 24 | M19                          | AMPA [ug/L]                 | 0           | 17                                       | 5                        |  | 5 ME_Strawege5    | 44                           | 44                        | 13                   | 6.79               | -1        | 150.4               |
| 25 | M20                          | TCE [ug/L]                  | 0           | 0  | -1                       |  | -1                | 44                           | 44                        | 12                   | 99999              | 0         |                     |
| 26 | M21                          | Nonylphenole [ug/L]         | 0           | 0  | -1                       |  | -1                | 44                           | 44                        | 12                   | 99999              | 0         |                     |
| 27 | M22                          | MTBE [ug/L]                 | 0           | 0  | -1                       |  | -1                | 44                           | 44                        | 12                   | 99999              | 0         |                     |

**3.3.3.4 Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser am OdB am Ende des Bewertungszeitraums für Quellterme mit einer langfristig konstanten Stofffreisetzungsrate (Blatt "Wert\_cal")**

Für einen unendlichen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzungsrate steigt die Konzentration am OdB monoton über die Zeit an, d.h. der Zeitpunkt zum Ende des Bewertungszeitraums ist maßgebend für die Bewertung. Zur Berücksichtigung des Transportterms muss also nicht die gesamte Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB berechnet werden, sondern nur ein Wert zum Zeitpunkt  $t = T_{Bew}$  (siehe oben: Box 5). Diese Berechnung wird im Tabellenblatt „Wert\_cal“ durchgeführt.

Gleiches gilt auch bei einem endlichen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzungsrate sofern die Freisetzungsdauer länger ist als der Bewertungszeitraum.

Die Eingabewerte für das Tabellenblatt sind verschiedene Parameterwerte im Eingabebereich (Zellen C9 bis C21 und C32). Diese werden in einer regulären BEMEB-Anwendung über eine entsprechende Eingabe in der graphischen Benutzeroberfläche bzw. im Rahmen der iterativen Suche nach der maximal zulässigen Quelltermkonzentration (siehe Box 5) automatisch bestimmt (→ Input-Konzentration, Zelle C16) und eingetragen. Sie können aber auch manuell gesetzt werden, um die Berechnung für eine gewünschte Parameterkonfiguration durchzuführen.

Die Indices bzw. internen Codes für Sickerwasserszenario (Zelle B4), Bodenart (Zelle E2) und Stoffkomponente (Zelle E4) sind keine notwendigen Eingaben, werden aber in einer regulären BEMEB-Anwendung zur besseren Information eingetragen.

Die Berechnung des Stofftransports nach dem in Box 4 dargestellten analytischen Modell findet in Zeile 34 statt. Der Ergebniswert, die für die angenommene Input-Konzentration zum Ende des Bewertungszeitraums am OdB zu erwartende Konzentration im Sickerwasser (in g/L), wird in Zelle C34 ausgegeben.

Das Anreicherungskriterium wird ebenfalls in diesem Tabellenblatt berechnet. Dazu wird die ausschöpfbare Filterkapazität vom Programm (oder manuell) in Zelle I1 eingetragen. Die maximal zulässige kumulative Quelltermkonzentration bis WF2 wird wie oben in Box 2 erläutert berechnet und in Zelle I3 eingetragen.

Abbildung 3-10: Tabellenblatt zur Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser am OdB am Ende des Bewertungszeitraums für einen Quellterm mit langfristig konstanter Stofffreisetzungsrate (Blatt "Wert\_cal") – Teil 1

|    | A                              | B                    | C           | D                              | E                             | F               | G          | H                           | I             | J               | K         | L          | M | N | O |
|----|--------------------------------|----------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------|-----------------------------|---------------|-----------------|-----------|------------|---|---|---|
| 1  | <b>Wert_cal</b>                |                      |             |                                |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 2  | Stand vom:                     | 6/20/2017            |             | Gewählter Boden, Code:         | 1                             |                 |            | FK-nutz:                    | 5.5 mg/kg     |                 |           |            |   |   |   |
| 3  |                                |                      |             | Gewählter Boden, Bezeichn.:    | Sand                          |                 |            | entspricht                  | 7.81E+03 g    |                 |           |            |   |   |   |
| 4  | Aktuelles SWR-Szenario:        | 1                    |             | Gewählte Verbindung, Code:     | 28                            |                 |            | C <sub>Q,max(AK)@WF2:</sub> | 9.89E+01 mg/L |                 |           |            |   |   |   |
| 5  |                                |                      |             | Gewählte Verbindung, Bez.:     | Vanadium                      |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 6  |                                |                      |             |                                |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 7  | <b>Modelleingabeparameter:</b> |                      |             |                                |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 8  | <b>Parameter</b>               | <b>Einheit</b>       | <b>Wert</b> | <b>Erläuterung</b>             |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 9  | Transportstrecke               | [m]                  | 1           | (wird automatisch eingetragen) |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 10 | Querschnittsfläche             | [m <sup>2</sup> ]    | 1           | (per Konvention)               |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 11 | Eff. Porosität                 | [-]                  | 0.17        | (wird automatisch eingetragen) |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 12 | Dispersivität                  | [m]                  | 0.1         | (wird automatisch eingetragen) |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 13 | Volumenstrom                   | [m <sup>3</sup> /a]  | 0.395       | (wird automatisch eingetragen) |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 14 | Anfangskonzentration           | [kg/m <sup>3</sup> ] | 0           | (wird automatisch eingetragen) |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 15 | Stoffmasse gesamt              | [kg]                 | inf         | (wird automatisch eingetragen) |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 16 | Input-Konzentration            | [kg/m <sup>3</sup> ] | 2.12E-04    | (wird automatisch eingetragen) |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 17 | Input-Dauer                    | [a]                  | inf         | (per Konvention)               |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 18 | Relative Input-Dauer           | [-]                  | inf         | (wird hier berechnet)          |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 19 | Lagerungsdichte                | [kg/L]               | 1.42E+00    | (wird automatisch eingetragen) |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 20 | Verteilungskoeffizient         | [L/kg]               | 4.63E+01    | (wird automatisch eingetragen) |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 21 | Halbwertszeit                  | [a]                  | -9999       | (wird automatisch eingetragen) |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 22 | Abbauratenkonstante            | [1/a]                | 0           | (wird hier berechnet)          |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 23 | Darcy-Geschwindigkeit          | [m/a]                | 0.395       | (wird hier berechnet)          |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 24 | Mittlere Fließgeschw.          | [m/a]                | 2.32E+00    | (wird hier berechnet)          |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 25 | Dispersionskoeff.              | [m <sup>2</sup> /a]  | 2.32E-01    | (wird hier berechnet)          |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 26 | Parameter u                    | [-]                  | 2.32E+00    | (wird hier berechnet)          |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 27 | Porenvolumen                   | [a]                  | 4.30E-01    | (wird hier berechnet)          |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 28 | Retardationsfaktor             | [-]                  | 3.87E+02    | (wird hier berechnet)          |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 29 | Damköhler #                    | [-]                  | 0.00E+00    | (wird hier berechnet)          |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 30 |                                |                      |             |                                |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 31 | <b>Modellberechnung:</b>       |                      |             |                                |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 32 | Zeit                           | [a]                  | 200         | (wird automatisch eingetragen) |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 33 | Relative Zeit                  | [-]                  | 1.20E+00    | (wird berechnet)               |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 34 | Konzentration am ODB           | [kg/m <sup>3</sup> ] | 1.56E-04    | (wird berechnet)               |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 35 |                                |                      |             | A(L,t)                         | B(L,t) - B(L,t <sub>0</sub> ) | Terms of A(L,t) |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |
| 36 |                                |                      |             | due to IC                      | due to BC                     | arg-            | erfc(arg-) | arg+                        | erfc(arg+)    | entire 2nd part | arg-      | erfc(arg-) |   |   |   |
| 37 |                                |                      |             | 2.64E-01                       | 7.36E-01                      | -2.88E-01       | 1.32E+00   | 3.18E+00                    | 7.10E-06      | 2.64E-01        | -2.88E-01 | 1.32E+00   |   |   |   |
| 38 |                                |                      |             |                                |                               |                 |            |                             |               |                 |           |            |   |   |   |

3-11 Tabellenblatt zur Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser am OdB am Ende des Bewertungszeitraums für einen Quellterm mit langfristig konstanter Stofffreisetzungsrate (Blatt "Wert\_cal") – Teil 2

| Terms of B(L,t) |            |          |            |          |            |             |  | Terms of B(L,t-t <sub>0</sub> ) |            |      |            |       |            |       |            |             |
|-----------------|------------|----------|------------|----------|------------|-------------|--|---------------------------------|------------|------|------------|-------|------------|-------|------------|-------------|
| arg+            | erfc(arg+) | arg2-    | exp(arg2-) | arg2+    | exp(arg2+) | entire term |  | arg-                            | erfc(arg-) | arg+ | erfc(arg+) | arg2- | exp(arg2-) | arg2+ | exp(arg2+) | entire term |
| 3.18E+00        | 7.10E-06   | 0.00E+00 | 1.00E+00   | 1.00E+01 | 2.20E+04   | 7.36E-01    |  |                                 |            |      |            |       |            |       |            |             |

**3.3.3.5 Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration im Sickerwasser am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzungsrate (Blatt "BTC\_cal")**

Für einen endlichen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzungsrate über einen Zeitraum der kürzer ist als der Bewertungszeitraum steigt die Konzentration im Sickerwasser am OdB zunächst an, und wird nach dem Ende der Freisetzungsphase wieder geringer. Für die Bewertung maßgebend ist in diesem Fall die maximale Konzentration innerhalb des Bewertungszeitraums. Zur Berücksichtigung des Transportterms muss daher die gesamte Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB berechnet und der Maximalwert bestimmt werden (siehe oben: Box 4). Diese Berechnung wird im Tabellenblatt „BTC\_cal“ durchgeführt.

Das Tabellenblatt „BTC\_cal“ wird darüber hinaus zur Werteberechnung im Rahmen der Visualisierung verwendet (siehe Abschnitt 3.3.4) und wird hier auch für Szenarien mit einem unendlich mit konstanter Rate freisetzenden Quellterm eingesetzt.

Die Eingabewerte für das Tabellenblatt sind weitestgehend identisch mit dem Tabellenblatt „Wert\_cal“ und umfassen den Bewertungszeitraum (Zelle E1) sowie verschiedene Parameterwerte im Eingabebereich (Zellen C9 bis C21). Diese werden in einer regulären BEMEB-Anwendung über eine entsprechende Eingabe in der graphischen Benutzeroberfläche bzw. im Rahmen der iterativen Suche nach der maximal zulässigen Quelltermkonzentration (siehe oben: Box 5) automatisch bestimmt (→ InputKonzentration, Zelle C16) und eingetragen. Sie können aber auch manuell gesetzt werden, um die Berechnung für eine gewünschte Parameterkonfiguration durchzuführen.

Abbildung :

Die Indices bzw. internen Codes für Bodenart (Zelle E2) und Stoffkomponente (Zelle E4) sind keine notwendigen Eingaben, werden aber in einer regulären BEMEB-Anwendung zur besseren Information eingetragen.

Die Berechnung des Stofftransports nach dem in Box 4 dargestellten analytischen Modell findet in den Zeilen 34 bis 1284 statt. Berechnet wird der Konzentrationsverlauf über die Zeit am OdB bis zum Ende des Bewertungszeitraums und – für die Visualisierung – 25% darüber hinaus. Die zeitliche Diskretisierung der Berechnung ist konstant  $\Delta t = 0.001 T_{\text{Bew}}$ , d.h. im Standardfall ( $T_{\text{Bew}} = 200$  Jahre) werden die Konzentrationswerte in Intervallen von 0.2 Jahren berechnet.

Neben der Berechnung des Maximalwerts der Sickerwasserkonzentration (Zelle D31) wird auch der zeitliche Verlauf verschiedener Variablen und Ergebnisgrößen berechnet (Spalten AG bis AL): die aktuelle Konzentration im Sickerwasser an der Bauwerk-UK (= Input-Konzentration), der WF-Wert, die aktuelle und die kumulierte Stoffemission, die kumulierte Konzentration im Sickerwasser am OdB sowie der aktuelle Ausschöpfungsgrad der Filterkapazität des Unterbodens im Bereich der Sickerstrecke.

Das Anreicherungskriterium wird ebenfalls in diesem Tabellenblatt berechnet. Dazu wird die ausschöpfbare Filterkapazität vom Programm (oder manuell) in Zelle I1 eingetragen. Die maximal zulässige kumulative Quelltermkonzentration bis WF2 wird wie oben in Box 2 erläutert berechnet und in Zelle I3 eingetragen.

Abbildung 3-12: Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrage (Blatt "BTC\_cal") – Teil 1



|      | A                              | B   | C                                  | D                              | E         | F                             | G               | H           | I             | J          | K               | L        | M |
|------|--------------------------------|---|------------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------------|-------------|---------------|------------|-----------------|----------|---|
| 1    | <b>BTC_cal</b>                 |   |                                    | Berechnungszeitraum (a):       | 200       |                               |                 | FK-nutz:    | 5.5 mg/kg     |            |                 |          |   |
| 2    | Stand vom:                     | 12/20/2016  |                                    | Gewählter Boden, Code:         | 1         |                               |                 | entspricht: | 7.81E+00 g    |            |                 |          |   |
| 3    |                                |   |                                    | Gewählter Boden, Bezeichn.:    | Sand      |                               |                 | AK:         | 9.89E-02 mg/L |            |                 |          |   |
| 4    |                                |   |                                    | Gewählte Verbindung, Code:     | 28        |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 5    |                                |   |                                    | Gewählte Verbindung, Bez.:     | Vanadium  |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 6    |                                |   |                                    |                                |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 7    | <b>Modelleingabeparameter:</b> |   |                                    |                                |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 8    | <b>Parameter</b>               | <b>Einheit</b>                                    | <b>Wert</b>                        | <b>Erläuterung</b>             |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 9    | Transportstrecke               | [m]   | 1                                  | (wird automatisch eingetragen) |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 10   | Querschnittsfläche             | [m <sup>2</sup> ]                                 | 1                                  | (per Konvention)               |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 11   | Eff. Porosität                 | [-]   | 0.17                               | (wird automatisch eingetragen) |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 12   | Dispersivität                  | [m]   | 0.1                                | (wird automatisch eingetragen) |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 13   | Volumenstrom                   | [m <sup>3</sup> /a]                               | 0.395                              | (wird automatisch eingetragen) |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 14   | Anfangskonzentration           | [kg/m <sup>3</sup> ]                              | 0                                  | (wird automatisch eingetragen) |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 15   | Stoffmasse gesamt              | [kg]  | inf                                | (wird automatisch eingetragen) |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 16   | Input-Konzentration            | [kg/m <sup>3</sup> ]                              | 9.89E-05                           | (wird automatisch eingetragen) |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 17   | Input-Dauer                    | [a]   | inf                                | (im Standardfall "inf")        |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 18   | Relative Input-Dauer           | [-]   | inf                                | (wird hier berechnet)          |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 19   | Lagerungsdichte                | [kg/L]  | 1.42E+00                           | (wird automatisch eingetragen) |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 20   | Verteilungskoeffizient         | [L/kg]  | 7.24E+01                           | (wird automatisch eingetragen) |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 21   | Halbwertszeit                  | [a]   | -9999                              | (wird automatisch eingetragen) |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 22   | Abbauratenkonstante            | [1/a]   | 0                                  | (wird hier berechnet)          |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 23   | Darcy-Geschwindigkeit          | [m/a]   | 0.395                              | (wird hier berechnet)          |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 24   | Mittlere Fließgeschw.          | [m/a]   | 2.32E+00                           | (wird hier berechnet)          |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 25   | Dispersionskoeff.              | [m <sup>2</sup> /a]                               | 2.32E-01                           | (wird hier berechnet)          |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 26   | Parameter u                    | [-]   | 2.32E+00                           | (wird hier berechnet)          |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 27   | Porenvolumen                   | [a]   | 4.30E-01                           | (wird hier berechnet)          |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 28   | Retardationsfaktor             | [-]   | 6.06E+02                           | (wird hier berechnet)          |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 29   | Damköhler #                    | [-]   | 0.00E+00                           | (wird hier berechnet)          |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 30   |                                |   |                                    |                                |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 31   | <b>Modellberechnung:</b>       | <b>Maximale Konzentration [kg/m<sup>3</sup>]:</b> |                                    | <b>3.43E-05</b>                |           |                               |                 |             |               |            |                 |          |   |
| 32   | Zeit                           | Input-Konz.                                       | Relative Zeit<br>(= t * v / R / L) | Konzentration am O.d.B.        | A(L,t)    | B(L,t) - B(L,t <sub>0</sub> ) | Terms of A(L,t) |             |               |            |                 |          |   |
| 33   | [a]                            | [ug/L]  | [-]                                | [ug/L]                         | due to IC | due to BC                     | arg-            | erfc(arg-)  | arg+          | erfc(arg+) | entire 2nd part |          |   |
| 34   |                                | 0.00  | 9.89E+01                           | 3.83E-13                       | 0.00E+00  | 1.00E+00                      | 0.00E+00        | 2.55E+06    | 0.00E+00      | 2.55E+06   | 0.00E+00        | 1.00E+00 |   |
| 35   |                                | 0.20  | 9.89E+01                           | 7.67E-04                       | 0.00E+00  | 1.00E+00                      | 0.00E+00        | 5.71E+01    | 0.00E+00      | 5.71E+01   | 0.00E+00        | 1.00E+00 |   |
| 36   |                                | 0.40  | 9.89E+01                           | 1.53E-03                       | 0.00E+00  | 1.00E+00                      | 0.00E+00        | 4.03E+01    | 0.00E+00      | 4.04E+01   | 0.00E+00        | 1.00E+00 |   |
| 37   |                                | 0.60  | 9.89E+01                           | 2.30E-03                       | 0.00E+00  | 1.00E+00                      | 0.00E+00        | 3.29E+01    | 0.00E+00      | 3.30E+01   | 0.00E+00        | 1.00E+00 |   |
| 1279 | 249.00                         | 9.89E+01  | 9.55E-01                           | 5.37E+01                       | 4.57E-01  | 5.43E-01                      | 7.34E-02        | 9.17E-01    | 3.16E+00      | 7.70E-06   | 4.57E-01        |          |   |
| 1280 | 249.20                         | 9.89E+01  | 9.55E-01                           | 5.38E+01                       | 4.56E-01  | 5.44E-01                      | 7.21E-02        | 9.19E-01    | 3.16E+00      | 7.70E-06   | 4.56E-01        |          |   |
| 1281 | 249.40                         | 9.89E+01  | 9.56E-01                           | 5.39E+01                       | 4.55E-01  | 5.45E-01                      | 7.08E-02        | 9.20E-01    | 3.16E+00      | 7.70E-06   | 4.55E-01        |          |   |
| 1282 | 249.60                         | 9.89E+01  | 9.57E-01                           | 5.39E+01                       | 4.54E-01  | 5.46E-01                      | 6.96E-02        | 9.22E-01    | 3.16E+00      | 7.71E-06   | 4.54E-01        |          |   |
| 1283 | 249.80                         | 9.89E+01  | 9.58E-01                           | 5.40E+01                       | 4.54E-01  | 5.46E-01                      | 6.83E-02        | 9.23E-01    | 3.16E+00      | 7.71E-06   | 4.54E-01        |          |   |
| 1284 | 250.00                         | 9.89E+01  | 9.58E-01                           | 5.41E+01                       | 4.53E-01  | 5.47E-01                      | 6.70E-02        | 9.24E-01    | 3.16E+00      | 7.71E-06   | 4.53E-01        |          |   |

3-13 Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrates (Blatt "BTC\_cal") – Teil 2

Abbildung :

|      | N               | O          | P        | Q          | R        | S          | T        | U          | V           | W    | X                             | Y    | Z          | AA    | AB |
|------|-----------------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|-------------|------|-------------------------------|------|------------|-------|----|
| 1    |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 2    |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 3    |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 4    |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 5    |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 6    |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 7    |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 8    |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 9    |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 10   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 11   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 12   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 13   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 14   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 15   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 16   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 17   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 18   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 19   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 20   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 21   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 22   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 23   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 24   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 25   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 26   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 27   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 28   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 29   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 30   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 31   |                 |            |          |            |          |            |          |            |             |      |                               |      |            |       |    |
| 32   | Terms of B(L,t) |            |          |            |          |            |          |            |             |      | Terms of B(L,t <sub>0</sub> ) |      |            |       |    |
| 33   | arg-            | erfc(arg-) | arg+     | erfc(arg+) | arg2-    | exp(arg2-) | arg2+    | exp(arg2+) | entire term | arg- | erfc(arg-)                    | arg+ | erfc(arg+) | arg2- |    |
| 34   | 2.55E+06        | 0.00E+00   | 2.55E+06 | 0.00E+00   | 0.00E+00 | 1.00E+00   | 1.00E+01 | 2.20E+04   | 0.00E+00    |      |                               |      |            |       |    |
| 35   | 5.71E+01        | 0.00E+00   | 5.71E+01 | 0.00E+00   | 0.00E+00 | 1.00E+00   | 1.00E+01 | 2.20E+04   | 0.00E+00    |      |                               |      |            |       |    |
| 36   | 4.03E+01        | 0.00E+00   | 4.04E+01 | 0.00E+00   | 0.00E+00 | 1.00E+00   | 1.00E+01 | 2.20E+04   | 0.00E+00    |      |                               |      |            |       |    |
| 37   | 3.29E+01        | 0.00E+00   | 3.30E+01 | 0.00E+00   | 0.00E+00 | 1.00E+00   | 1.00E+01 | 2.20E+04   | 0.00E+00    |      |                               |      |            |       |    |
| 1279 | 7.34E-02        | 9.17E-01   | 3.16E+00 | 7.70E-06   | 0.00E+00 | 1.00E+00   | 1.00E+01 | 2.20E+04   | 5.43E-01    |      |                               |      |            |       |    |
| 1280 | 7.21E-02        | 9.19E-01   | 3.16E+00 | 7.70E-06   | 0.00E+00 | 1.00E+00   | 1.00E+01 | 2.20E+04   | 5.44E-01    |      |                               |      |            |       |    |
| 1281 | 7.08E-02        | 9.20E-01   | 3.16E+00 | 7.70E-06   | 0.00E+00 | 1.00E+00   | 1.00E+01 | 2.20E+04   | 5.45E-01    |      |                               |      |            |       |    |
| 1282 | 6.96E-02        | 9.22E-01   | 3.16E+00 | 7.71E-06   | 0.00E+00 | 1.00E+00   | 1.00E+01 | 2.20E+04   | 5.46E-01    |      |                               |      |            |       |    |
| 1283 | 6.83E-02        | 9.23E-01   | 3.16E+00 | 7.71E-06   | 0.00E+00 | 1.00E+00   | 1.00E+01 | 2.20E+04   | 5.46E-01    |      |                               |      |            |       |    |
| 1284 | 6.70E-02        | 9.24E-01   | 3.16E+00 | 7.71E-06   | 0.00E+00 | 1.00E+00   | 1.00E+01 | 2.20E+04   | 5.47E-01    |      |                               |      |            |       |    |

Abbildung 3-14 : Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrates (Blatt "BTC\_cal") – Teil 3

|      | AC         | AD    | AE         | AF          | AG                              | AH       | AI       | AJ              | AK              | AL            | AM | AN | AO |
|------|------------|-------|------------|-------------|---------------------------------|----------|----------|-----------------|-----------------|---------------|----|----|----|
| 1    |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 2    |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 3    |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 4    |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 5    |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 6    |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 7    |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 8    |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 9    |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 10   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 11   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 12   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 13   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 14   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 15   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 16   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 17   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 18   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 19   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 20   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 21   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 22   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 23   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 24   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 25   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 26   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 27   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 28   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 29   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 30   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 31   |            |       |            |             |                                 |          |          |                 |                 |               |    |    |    |
| 32   | b)         |       |            |             | Konzentration an der Bauwerk-UK | WF       | Emission | Emission (ges.) | Konz.-kumuliert | Aus-schöpfung |    |    |    |
| 33   | exp(arg2-) | arg2+ | exp(arg2+) | entire term | [ug/L]                          | [L/kg]   | [ug/kg]  | [ug/kg]         | [ug/L]          | [%]           |    |    |    |
| 34   |            |       |            |             | 9.89E+01                        | 2.78E-11 | 2.75E-09 | 2.75E-09        | 9.89E+01        | 2.50E-11      |    |    |    |
| 35   |            |       |            |             | 9.89E+01                        | 5.58E-02 | 5.50E+00 | 5.50E+00        | 9.89E+01        | 5.00E-02      |    |    |    |
| 36   |            |       |            |             | 9.89E+01                        | 1.11E-01 | 5.50E+00 | 1.10E+01        | 9.89E+01        | 1.00E-01      |    |    |    |
| 37   |            |       |            |             | 9.89E+01                        | 1.67E-01 | 5.50E+00 | 1.85E+01        | 9.89E+01        | 1.50E-01      |    |    |    |
| 1279 |            |       |            |             | 9.89E+01                        | 6.93E+01 | 5.50E+00 | 6.85E+03        | 9.89E+01        | 6.23E+01      |    |    |    |
| 1280 |            |       |            |             | 9.89E+01                        | 6.93E+01 | 5.50E+00 | 6.85E+03        | 9.89E+01        | 6.23E+01      |    |    |    |
| 1281 |            |       |            |             | 9.89E+01                        | 6.94E+01 | 5.50E+00 | 6.86E+03        | 9.89E+01        | 6.24E+01      |    |    |    |
| 1282 |            |       |            |             | 9.89E+01                        | 6.94E+01 | 5.50E+00 | 6.86E+03        | 9.89E+01        | 6.24E+01      |    |    |    |
| 1283 |            |       |            |             | 9.89E+01                        | 6.95E+01 | 5.50E+00 | 6.87E+03        | 9.89E+01        | 6.25E+01      |    |    |    |
| 1284 |            |       |            |             | 9.89E+01                        | 6.95E+01 | 5.50E+00 | 6.88E+03        | 9.89E+01        | 6.25E+01      |    |    |    |

**3.3.3.6 Berechnung des Konzentrationsprofils zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu einem gegebenen Zeitpunkt für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrates (Blatt "Prof\_cal")**

Zu Visualisierungszwecken wird im Tabellenblatt „Prof\_cal“ das Profil der Konzentration im Sickerwasser zwischen Bauwerk-UK und dem OdB berechnet. Dazu werden die Eingabedaten aus dem Tabellenblatt „BTC\_cal“ übernommen. Der gewünschte Zeitpunkt für die Berechnung ist in Zelle E1 anzugeben.

Die räumliche Auflösung des berechneten Profils beträgt ein Promille der Sickerstrecke, im Standardfall bei einer Strecke von 1 m also 1 mm. Die Berechnung erfolgt in den Zeilen 34 bis 1034.

3-15 Tabellenblatt zur Berechnung des Konzentrationsprofils zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu einem gegebenen Zeitpunkt für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrates (Blatt "Prof\_cal") – Teil 1

Abbildung :

|      | A                              | B                    | C            | D                             | E                    | F                               | G             | H                 | I         | J        |     |
|------|--------------------------------|----------------------|--------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---------------|-------------------|-----------|----------|-----|
| 1    | <b>Prof_cal</b>                |                      |              | Berechnungszeitraum (a):      | 67                   |                                 |               |                   |           |          |     |
| 2    | Stand vom:                     | 5/2/2017             |              | Gewählter Boden, Code:        | 1                    |                                 |               |                   |           |          |     |
| 3    |                                |                      |              | Gewählter Boden, Bezeichn.:   | Sand                 |                                 |               |                   |           |          |     |
| 4    |                                |                      |              | Gewählte Verbindung, Code:    | 28                   |                                 |               |                   |           |          |     |
| 5    |                                |                      |              | Gewählte Verbindung,Bez.:     | Vanadium             |                                 |               |                   |           |          |     |
| 6    | <b>Modelleingabeparameter:</b> |                      |              |                               |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 8    | <b>Parameter</b>               | <b>Einheit</b>       | <b>Wert</b>  | <b>Erläuterung</b>            |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 9    | Transportstrecke               | [m]                  | 1.000        | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 10   | Querschnittsfläche             | [m <sup>2</sup> ]    | 1.000        | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 11   | Eff. Porosität                 | [-]                  | 0.170        | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 12   | Dispersivität                  | [m]                  | 0.100        | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 13   | Volumenstrom                   | [m <sup>3</sup> /a]  | 0.395        | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 14   | Anfangskonzentration           | [kg/m <sup>3</sup> ] | 0.000E+00    | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 15   | Stoffmasse gesamt              | [kg]                 | inf          | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 16   | Input-Konzentration            | [kg/m <sup>2</sup> ] | 9.888E-05    | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 17   | Input-Dauer                    | [a]                  | inf          | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 18   | Relative Input-Dauer           | [-]                  | inf          | (wird hier berechnet)         |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 19   | Lagerungsdichte                | [kg/L]               | 1.420        | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 20   | Verteilungskoeffizient         | [L/kg]               | 72.435       | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 21   | Halbwertszeit                  | [a]                  | -9999.000    | (wird aus BTC_cal übernommen) |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 22   | Abbauratenkonstante            | [1/a]                | 0.0000       | (wird hier berechnet)         |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 23   | Darcy-Geschwindigkeit          | [m/a]                | 0.3950       | (wird hier berechnet)         |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 24   | Mittlere Fließgeschw.          | [m/a]                | 2.3235       | (wird hier berechnet)         |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 25   | Dispersionskoeff.              | [m <sup>2</sup> /a]  | 0.2324       | (wird hier berechnet)         |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 26   | Peclet #                       | [-]                  | 10.000       | (wird hier berechnet)         |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 27   | Porenvolumen                   | [a]                  | 4.304E-01    | (wird hier berechnet)         |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 28   | Retardationsfaktor             | [-]                  | 6.060E+02    | (wird hier berechnet)         |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 29   | Damköhler #                    | [-]                  | 0.000E+00    | (wird hier berechnet)         |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 30   | <b>Modellberechnung:</b>       |                      |              |                               |                      |                                 |               |                   |           |          |     |
| 32   | Strecke                        | Peclet #             | Porenvolumen | Damköhler #                   | relative Input-Dauer | Relative Zeit (= t * v / R / L) | Konzentration | Relativer Beitrag |           |          |     |
| 33   | [m]                            | [-]                  | [a]          | [-]                           | [-]                  | [-]                             | [ug/L]        | due to IC         | due to BC | ε        |     |
| 34   | 1.00E-10                       | 0.0000               | 0.0000       |                               | 0.00E+00             | inf                             | 2568740602.5  | 9.89E+01          | 5.67E-11  | 1.00E+00 | -8. |
| 35   | 0.0010                         | 0.0100               | 0.0004       |                               | 0                    | inf                             | 256.9         | 9.88E+01          | 5.70E-04  | 9.99E-01 | -7. |
| 36   | 0.0020                         | 0.0200               | 0.0009       |                               | 0                    | inf                             | 128.4         | 9.87E+01          | 1.14E-03  | 9.99E-01 | -7. |
| 1029 | 0.9950                         | 9.9500               | 0.4282       |                               | 0                    | inf                             | 0.3           | 9.02E-02          | 9.99E-01  | 9.13E-04 | 2   |
| 1030 | 0.9960                         | 9.9600               | 0.4287       |                               | 0                    | inf                             | 0.3           | 8.89E-02          | 9.99E-01  | 8.99E-04 | 2   |
| 1031 | 0.9970                         | 9.9700               | 0.4291       |                               | 0                    | inf                             | 0.3           | 8.75E-02          | 9.99E-01  | 8.85E-04 | 2   |
| 1032 | 0.9980                         | 9.9800               | 0.4295       |                               | 0                    | inf                             | 0.3           | 8.62E-02          | 9.99E-01  | 8.72E-04 | 2   |
| 1033 | 0.9990                         | 9.9900               | 0.4299       |                               | 0                    | inf                             | 0.3           | 8.48E-02          | 9.99E-01  | 8.58E-04 | 2   |
| 1034 | 1.0000                         | 10.0000              | 0.4304       |                               | 0                    | inf                             | 0.3           | 8.35E-02          | 9.99E-01  | 8.45E-04 | 2   |

3-16 Tabellenblatt zur Berechnung des Konzentrationsprofils zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu einem gegebenen Zeitpunkt für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrage (Blatt "Prof\_cal") – Teil 2

Abbildung :

| Anfangsbedingung |            |          |            |             | Randbedingung (positiver Puls) |            |            |            |             | Randbedingung (negativer Puls) |            |      |            |             |
|------------------|------------|----------|------------|-------------|--------------------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------------------|------------|------|------------|-------------|
| arg-             | erfc(arg-) | arg+     | erfc(arg+) | entire term | arg-                           | erfc(arg-) | arg+       | erfc(arg+) | entire term | arg-                           | erfc(arg-) | arg+ | erfc(arg+) | entire term |
| -8.01E-01        | 1.74E+00   | 8.01E-01 | 2.57E-01   | 2           | -0.8013646                     | 1.74E+00   | 0.80136456 | 0.25708803 | 2.00E+00    |                                |            |      |            |             |
| -7.98E-01        | 1.74E+00   | 8.04E-01 | 2.55E-01   | 1.99886098  | -0.7982449                     | 1.74E+00   | 8.04E-01   | 0.25524055 | 2.00E+00    |                                |            |      |            |             |
| -7.95E-01        | 1.74E+00   | 8.08E-01 | 2.53E-01   | 1.99771059  | -0.7951252                     | 1.74E+00   | 8.08E-01   | 0.25340231 | 2.00E+00    |                                |            |      |            |             |

|      |          |          |          |          |            |            |          |          |            |          |
|------|----------|----------|----------|----------|------------|------------|----------|----------|------------|----------|
| 1029 | 2.30E+00 | 1.13E-03 | 3.91E+00 | 3.33E-08 | 0.00182555 | 2.30271583 | 1.13E-03 | 3.91E+00 | 3.3301E-08 | 1.83E-03 |
| 1030 | 2.31E+00 | 1.11E-03 | 3.91E+00 | 3.25E-08 | 0.00179767 | 2.30583551 | 1.11E-03 | 3.91E+00 | 3.2474E-08 | 1.80E-03 |
| 1031 | 2.31E+00 | 1.09E-03 | 3.91E+00 | 3.17E-08 | 0.00177018 | 2.30895519 | 1.09E-03 | 3.91E+00 | 3.1668E-08 | 1.77E-03 |
| 1032 | 2.31E+00 | 1.08E-03 | 3.91E+00 | 3.09E-08 | 0.00174308 | 2.31207487 | 1.08E-03 | 3.91E+00 | 3.0881E-08 | 1.74E-03 |
| 1033 | 2.32E+00 | 1.06E-03 | 3.92E+00 | 3.01E-08 | 0.00171637 | 2.31519455 | 1.06E-03 | 3.92E+00 | 3.0113E-08 | 1.72E-03 |
| 1034 | 2.32E+00 | 1.04E-03 | 3.92E+00 | 2.94E-08 | 0.00169003 | 2.31831423 | 1.04E-03 | 3.92E+00 | 2.9363E-08 | 1.69E-03 |

### 3.3.3.7 Berechnung der maximal zulässigen Quellterm-Anfangskonzentration und des medienschutzbasierten Einbauwerts von Salzen und anderen Stoffen mit exponentiell abklingender Freisetzungsrates zur Einhaltung vorgegebener Grenzwerte an der Bauwerk-UK (Blatt "Salze\_cal")

Die Eingabewerte für das Tabellenblatt sind die Codes für Einbauweise (Zelle E2), Stoffkomponente (Zelle E3) und MEB-Klasse (Zelle E4). Für diese Auswahl werden die Eingabedaten aus den Tabellenblättern „Einbauweisen“, „Verbindungen“ und „Materialwerte“ in das Tabellenblatt „Salze\_cal“ kopiert (Zeilen 7 bis 22). Diese Daten werden für die Berechnung verwendet, die im Standardfall in Zeile 32 und im Einzelfall in Zeile 35 durchgeführt wird.

Die Auswahl des zu bewertenden Szenarios wird in einer regulären BEMEB-Anwendung über entsprechende Eingaben in die graphische Benutzeroberfläche getroffen. Sie kann aber auch händisch im Tabellenblatt erfolgen.

Weitere Eingaben sind der Bewertungszeitraum (Zelle K2, wird aus Tabellenblatt „Einstellungen“ übernommen, per Konvention = 4 Jahre), das relevante WF-Verhältnis (Zelle K3, per Konvention = 2 L kg<sup>-1</sup>) und eine Angabe für die gewünschte Rundung der Ergebniswerte (Zelle K4).

Die Berechnungszeile enthält die aus den Eigenschaften von Einbauweise, Stoffkomponente und MEBKlasse übernommenen Berechnungsparameter (Spalten A bis G und I), die Berechnung des

Abbildung :  
Bauwerk bzw. Einbauweise-spezifischen WF-Verhältnisses (Spalte H) für den Bewertungszeitraum  
und des Ab-

klingskoeffizienten (Spalte J) sowie die Berechnung der Ergebnisgrößen, der maximal zulässigen Quellterm-Anfangskonzentration (inkl. Verdünnung) (Spalte K), der maximal zulässigen Konzentration bei WF2 (Spalte M), des exakten ME-Werts (Spalte N) und des gerundeten Eintrags in die ME-Tabelle (Spalte O). Das Ergebnis wird übertragen nach Zelle N2 worauf andere BEMEB-Programmteile bei Bedarf zurückgreifen.

Bei einer Bewertung im Einzelfall wird die Berechnung in Zeile 35 verwendet. Die Berechnungsschritte unterscheiden sich dabei nicht vom Standardfall, es können jedoch für die drei Parameter Infiltrationsrate in das Bauwerk, Schichtdicke und  $K_d$ -Wert vom Standardfall abweichende Werte angesetzt werden. Die Werte in den entsprechenden Eingabefeldern (Zellen F35, G35 und I35) werden in einer regulären BEMEB-Anwendung durch Eingaben in die graphische Benutzeroberfläche bestimmt, sie können aber auch direkt im Tabellenblatt händisch gesetzt werden. Das Ergebnis der Einzelfallbewertung wird übertragen nach Zelle N4 worauf andere BEMEB-Programmteile bei Bedarf zurückgreifen.

Hinweis: Bestimmte Funktionalitäten des Tabellenblatts „Salze\_cal“ werden auch zur Berechnung der zeitlichen abklingenden Freisetzungsrates nach dem Advektions-Dispersionsmodell verwendet, d.h. bestimmte Werte werden aus dem Tabellenblatt „Salze\_cal“ in die Tabellenblätter „QTabkl\_Wert\_cal(ADE)“ und „QTabkl\_cal(ADE)“ übernommen (siehe auch Abschnitte 3.3.3.10 und 3.3.3.11).

Abbildung 3-17: Tabellenblatt zur Berechnung der maximal zulässigen Quellterm-Anfangskonzentration und des medien-schutzbasierten Einbauwerts von Salzen bei abklingender Freisetzungsrates zur Einhaltung vorgegebener Grenzwerte an der Bauwerk-UK (Blatt "Salze\_cal") – Teil 1

|    | A                                 | B                   | C                                  | D                           | E                  | F                 | G   | H  | I                     | J                |
|----|-----------------------------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------|---|--|-----------------------|------------------|
| 1  | <b>Salze_cal</b>                  |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 2  | Stand vom:                        | 07.11.2016          |                                    | Gewählte Einbauweise, Code: | 3                  |                   |   | Einbauweise:   | B3                    | Beurteilungszeit |
| 3  |                                   |                     |                                    | Gewählte Verbindung, Code:  | 31                 |                   |   | Verbindung:  | Sulfat                | Relevantes WF    |
| 4  |                                   |                     |                                    | Gewählter MEB, Code:        | 25                 |                   |   | Ersatzbaustoff:  | RC                    | Runden auf ...   |
| 5  |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   | Klasse:  | 1                     |                  |
| 6  |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 7  | <b>Gewählte Einbauweise:</b>      |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 8  | Parametercode                     | E1                  | E2                                 | E3                          | E4                 | E5                | E6  | E7   | E8                    | E9               |
| 9  | Parameter                         | Code                | Bezeichnung                        | Verfasser                   | Datum              | Bauweisenklasse   | Infiltrationsrate [mm/a]                    | Sickerwasserrate an der Bauwerksunterkante [mm/a]            | Verdünnungsfaktor [-] | Verhältnismäßig  |
| 10 | Einbauweise #3                    | B3                  | Schotteroberbau der Bahnbauweise H | Finkel                      | 30.09.2014         | BaBw              | 515   | 221  | 2.6                   | 1.5              |
| 11 | <b>Gewählte Verbindung:</b>       |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 12 | Parametercode                     | V1                  | V2                                 | V3                          | V4                 | V5                | V6  | V7   | V8                    | V9               |
| 13 | Parameter                         | Bezeichnung         | Verfasser                          | Datum                       | Gruppencode        | BM [ug/L]         | Maximale Filterkapazität Fkmax Sand [mg/kg] | Maximale Filterkapazität Fkmax L/S/T [mg/kg]                 | log Kow [-]           | Molekulargewicht |
| 14 | Verbindung #31                    | Sulfat              | Finkel                             | 5/11/2016                   | S                  | 1038000           |   |  |                       |                  |
| 15 | <b>Gewählter Ersatzbaustoff:</b>  |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 16 | Parametercode                     | M1                  | M2                                 | M3                          | M4                 | M5                | M6  | M7   | M8                    | M9               |
| 17 | Parameter                         | Bezeichnung         | Verfasser                          | Datum                       | 15 EPA PAKs [ug/L] | Naphthalin [ug/L] | MKW [ug/L]                                  | BTEX [ug/L]  | PCB, ges. [ug/L]      | Phenol [ug/L]    |
| 18 |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 19 |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 20 |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 21 |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 22 | Materialklasse #25                | RC-1                | Finkel                             | 5/17/2016                   |                    | 6                 |   |  |                       |                  |
| 23 |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 24 | <b>Berechnung (Standardfall):</b> |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 25 | Verbindung / Stoffkomponente      | GFS / Bezugsmaßstab | Porosität                          | Gesättigte Porosität        | Dichte             | Infiltrationsrate | Schichtdicke                                | Bauwerkspezifisches WF-Verhältnis für den Bewertungszeitraum | $K_d$ -Wert           | Kap              |
| 26 |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 27 |                                   | [ug/L]              | [-]                                | [-]                         | [kg/L]             | [mm/Jahr]         | cm  | [L/kg]   | [L/kg]                | [kg/             |
| 28 | Sulfat                            | 1038000             | 0.270                              | 0.176                       | 1.94               | 515               | 60  | 1.770  | 1.200                 |                  |
| 29 | <b>Berechnung (Einzelfall):</b>   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 30 | Sulfat                            | 1038000             | 0.270                              | 0.176                       | 1.94               | 515               | 75  | 1.416  | 2.000                 |                  |
| 31 |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 32 |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 33 |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 34 |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |
| 35 |                                   |                     |                                    |                             |                    |                   |   |  |                       |                  |

Abbildung 3-18: Tabellenblatt zur Berechnung der maximal zulässigen Quellterm-Anfangskonzentration und des medien-schutzbasierten Einbauwerts von Salzen bei abklingender Freisetzungsrates zur Einhaltung vorgegebener Grenzwerte an der Bauwerk-UK (Blatt "Salze\_cal") – Teil 2

Abbildung :

|    | J                              | K   | L                                  | M                                    | N   | O                     | P                   | Q                       | R                   | S                         | T                              | U                          | V                         |
|----|--------------------------------|---|------------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1  |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 2  | Beurteilungszeitraum           |   | 4 a                                | ME-Wert (Standardfall):              | >MWmax  |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 3  | Relevantes WF-Verhältnis       |   | 2 L/kg                             |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 4  | Runden auf ...                 |   | 5 mg/L                             | ME-Wert (Einzelfall):                | 3420  |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 5  |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 6  |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 7  |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 8  | E9                             | E10   | E11                                | E12                                  |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 9  | Verhältnismäßigkeitsfaktor [-] | Schichtdicke [cm]   | Bewertungsrelevante Einbauweise    | Typ                                  |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 10 | 1.5                            | 60  | 3                                  | T                                    |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 11 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 12 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 13 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 14 | V9                             | V10   | V11                                | V12                                  | V13   | V14                   | V15                 | V16                     | V17                 | V18                       | V19                            | V20                        | V21                       |
| 15 | Molekulargewicht [g/mol]       | Effektive Löslichkeit Seff [mg/l]                                   | Effektive Löslichkeit Seff [mol/l] | log Koc [-]                          | Erläuterung - Sorption                                      | Halbwertszeit [d]     | Erläuterung - Abbau | Isothermen koef. log K* | Isothermen koef. K* | Isothermenkoeff. pH       | Isothermen koef. log Tongehalt | Isothermen koef. Tongehalt | Isothermen koef. log Conc |
| 16 |                                |   |                                    |                                      |   | inf                   | persistent          |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 17 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 18 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 19 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 20 | M9                             | M10   | M11                                | M12                                  | M13   | M14                   | M15                 | M16                     | M17                 | M18                       | M19                            | M20                        | M21                       |
| 21 | Phenol [ug/L]                  | Chlorphenole, gesamt [ug/L]   | Chlorbenzole, gesamt [ug/L]        | Hexachlorobenzol [ug/L]              | Atrazin [ug/L]  | Bromacil [ug/L]       | Diuron [ug/L]       | Glyphosat [ug/L]        | Simazin [ug/L]      | Sonstige Herbizide [ug/L] | AMPA [ug/L]                    | TCE [ug/L]                 | Nonylphenole [ug/L]       |
| 22 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 23 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 24 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 25 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 26 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 27 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 28 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 29 | Kappa                          | max. zulässige Quellterm-Anfangskonzentration $C_{0, Grenz}$ [mg/L] | WFx                                | max. zulässige Konzentration bei WFx | max. zulässige Konz. @ WFx inkl. Verhältnismäßigkeitsfaktor | Eintrag in ME-Tabelle | Maximalwert         | Kriterium erfüllt?      |                     |                           |                                |                            |                           |
| 30 | [kg/L]                         |   | [L/kg]                             | [mg/L]                               | [mg/L]  |                       | [mg/L]              |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 31 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 32 | 0.775                          | 1.064E+04   | 2                                  | 5.406E+03                            | 5.406E+03   | >MWmax                | 600                 | ja                      |                     |                           |                                |                            |                           |
| 33 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 34 |                                |   |                                    |                                      |   |                       |                     |                         |                     |                           |                                |                            |                           |
| 35 | 0.478                          | 5.313E+03   | 2                                  | 3.420E+03                            | 3.420E+03   | 3420                  | 600                 | ja                      |                     |                           |                                |                            |                           |

**3.3.3.8 Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration von Salzen im Sickerwasser an der Bauwerk-UK bei exponentiell abklingender Freisetzungsrates (Blatt "QTabkl\_cal")**

Zur Visualisierung der exponentiell abklingenden Quelltermkonzentration wird im Tabellenblatt „QTabkl\_cal“ der zeitliche Verlauf der Konzentration im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht und an der Bauwerk-UK berechnet. Die relevanten Eingabedaten werden aus dem Tabellenblatt „Salze\_cal“ übernommen.

Die Berechnung erfolgt in den Zeilen 21 bis 1271 für einen Zeitraum bis  $WF = 2,5 \text{ L/kg}$ . Berechnungsgrundlage ist die Abklingfunktion und deren Parameter (siehe Box 1). Die zeitliche Auflösung des berechneten Konzentrationsverlaufs beträgt ein Promille des Berechnungszeitraums.

Zusätzlich zum zeitlichen Verlauf der maximal zulässigen Konzentration im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht (Spalte D) unter Berücksichtigung der ggf. gegebenen Verdünnung im Bauwerk und des Verhältnismäßigkeitsfaktors und an der Bauwerk-UK (Spalte H) werden auch Emissionswerte und kumulierte Konzentrationen berechnet (spalten E bis G und I).

- 3-19 Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration von Salzen im Sickerwasser an der Bauwerk-UK bei abklingender Freisetzungsrates (Blatt "QTabkl\_cal")



|      |                                    |                |                                     |  |
|------|------------------------------------|----------------|-------------------------------------|--|
| 1    | <b>QTabkl_cal</b>                  |                | Berechnungszeitraum [a]:            | 4 (wird übertragen aus Blatt Salze_cal)      |
| 2    | Stand vom:                         | 12/20/2016     | Gewählte Verbindung, Code:          | 31 (wird übertragen aus Blatt Salze_cal)     |
| 3    |                                    |                | Gewählte Verbindung,Bez.:           | Sulfat (wird übertragen aus Blatt Salze_cal) |
| 4    |                                    |                | Bauwerkspezifischer WF-Wert [L/kg]: | 1.42 (wird übertragen aus Blatt Salze_cal)   |
| 5    |                                    |                | Zeit bis WF2:                       | 5.65 Jahre                                   |
| 6    |                                    |                |                                     | Berechnung bis 5.65 Jahre                    |
| 7    | <b>Modell Eingabeparameter:</b>    |                |                                     |  |
| 8    | <b>Parameter</b>                   | <b>Einheit</b> | <b>Wert</b>                         | <b>Erläuterung</b>                           |
| 9    | Mächtigkeit der Quellermächtigkeit | [m]            | 0.75                                | (wird übertragen aus Blatt Salze_cal)        |
| 10   | Querschnittsfläche                 | [m²]           | 1                                   | (per Konvention)                             |
| 11   | Volumenstrom                       | [m³/a]         | 0.515                               | (wird übertragen aus Blatt Salze_cal)        |
| 12   | Anfangskonzentration               | [kg/m³]        | 0                                   | (per Konvention)                             |
| 13   | Input-Anfangskonzentration         | [mg/L]         | 5312.6                              | (wird übertragen aus Blatt Salze_cal)        |
| 14   | Input-Restkonzentration (Tailing)  | [kg/m³]        | 0                                   | (wird automatisch eingetragen)               |
| 15   | Kappa-Wert                         | [kg/L]         | 4.78E-01                            | (wird übertragen aus Blatt Salze_cal)        |
| 16   | Lagerungsdichte                    | [kg/L]         | 1.940                               | (wird übertragen aus Blatt Salze_cal)        |
| 17   | <b>Modellberechnung:</b>           |                |                                     |  |
| 18   | Zeit [a]                           | intern         | WF (= t * q / rho_b / L)            | Konzentration UK Ersatzbaustoff [mg/L]       |
| 19   |                                    |                | [L/kg]                              |  |
| 20   |                                    |                |                                     | Emission [mg/kg]                             |
| 21   |                                    |                |                                     | Emission (ges.) [mg/kg]                      |
| 22   |                                    |                |                                     | Konz.-kumuliert [mg/L]                       |
| 23   |                                    |                |                                     | Konz. UK Bauwerk [mg/L]                      |
| 24   |                                    |                |                                     | Konz.-kumuliert [mg/L]                       |
| 25   |                                    |                |                                     |  |
| 26   |                                    |                |                                     |  |
| 27   |                                    |                |                                     |  |
| 28   |                                    |                |                                     |  |
| 29   |                                    |                |                                     |  |
| 30   |                                    |                |                                     |  |
| 31   |                                    |                |                                     |  |
| 32   |                                    |                |                                     |  |
| 33   |                                    |                |                                     |  |
| 34   |                                    |                |                                     |  |
| 1266 | 7.035                              |                | 2.4900E+00                          | 1.6144E+03                                   |
| 1267 | 7.041                              |                | 2.4920E+00                          | 1.6128E+03                                   |
| 1268 | 7.046                              |                | 2.4940E+00                          | 1.6113E+03                                   |
| 1269 | 7.052                              |                | 2.4960E+00                          | 1.6098E+03                                   |
| 1270 | 7.057                              |                | 2.4980E+00                          | 1.6082E+03                                   |
| 1271 | 7.063                              |                | 2.5000E+00                          | 1.6067E+03                                   |

**3.3.3.9 Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen exponentiell abklingenden Quellterm (Blatt “BTCabkl\_cal”)**

Für einen Quellterm mit abklingender Stofffreisetzungsrater steigt die Konzentration im Sickerwasser am OdB zunächst an, und nimmt nach einiger Zeit wieder ab. Für die Bewertung maßgebend ist in diesem Fall die höchste im Sickerwasser zu erwartende Konzentration innerhalb des Bewertungszeitraums. Zur Berücksichtigung des Transportterms wird daher die gesamte Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB berechnet und der Maximalwert bestimmt. Diese Berechnung wird – im Falle eines abklingenden Quellterms – im Tabellenblatt „BTCabkl\_cal“ durchgeführt.

Das Tabellenblatt „BTCabkl\_cal“ wird darüber hinaus zur Werteberechnung im Rahmen der Visualisierung verwendet (siehe Abschnitt 3.3.4).

Die Berechnungsweise entspricht dem Tabellenblatt „BTC\_cal“ und basiert auf den in Box 4 erläuterten Modellgleichungen. Die Eingabewerte sind gegenüber dem Tabellenblatt „BTC\_cal“ verändert: statt Input-Konzentration und Input-Dauer werden hier der Abklingkoeffizient Kappa (Zelle C18), die Input-Anfangskonzentration (Zelle C16) und die Input-Restkonzentration (Zelle C17) angegeben. Alle Eingabeparameter werden in einer regulären BEMEB-Anwendung über eine entsprechende Eingabe in der graphischen Benutzeroberfläche bzw. im Rahmen der iterativen Suche nach der maximal zulässigen Quellterm-Anfangskonzentration automatisch bestimmt (→ Input-Anfangskonzentration, Zelle C16) und eingetragen. Sie können aber auch manuell gesetzt werden, um die Berechnung für eine gewünschte Parameterkonfiguration durchzuführen.

Abbildung :

Die Indices bzw. internen Codes Bodenart (Zelle E2) und Stoffkomponente (Zelle E4) sind keine notwendigen Eingaben, werden aber in einer regulären BEMEB-Anwendung zur besseren Information eingetragen.

Die Berechnung des Stofftransports findet in den Zeilen 36 bis 1286 statt. Berechnet wird der Konzentrationsverlauf über die Zeit am OdB bis zum Ende des Bewertungszeitraums und – für die Visualisierung – 25% darüber hinaus. Die zeitliche Diskretisierung der Berechnung ist variabel um das Abklingen der Stofffreisetzung (= Input-Konzentration) bestmöglich zu erfassen. Länge und Anzahl der variierenden Diskretisierungsintervalle sind in Tabelle 3-3 aufgelistet.

Tabelle 3-3: Diskretisierung der Berechnung des Konzentrationsverlaufs am OdB bei einer exponentiell abklingenden Freisetzungsrates

| Zeitperiode Nr. | Anzahl der Zeitschritte | Länge der Zeitschritte |                             |
|-----------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
|                 |                         | generell               | im Standardfall (in Jahren) |
| 1               | 100                     | $0.0001 T_{Bew}$       | 0.02                        |
| 2               | 200                     | $0.0002 T_{Bew}$       | 0.04                        |
| 3               | 300                     | $0.0005 T_{Bew}$       | 0.10                        |
| 4               | 250                     | $0.0010 T_{Bew}$       | 0.20                        |
| 5               | 400                     | $0.0020 T_{Bew}$       | 0.40                        |

Neben der Berechnung des Maximalwerts der Sickerwasserkonzentration (Zelle C33) wird auch der zeitliche Verlauf verschiedener Variablen und Ergebnisgrößen berechnet (Spalten AB bis AG): die aktuelle Konzentration im Sickerwasser an der Bauwerk-UK (= Input-Konzentration), der WF-Wert, die aktuelle und die kumulierte Stoffemission, die kumulierte Konzentration im Sickerwasser am OdB sowie der aktuelle Ausschöpfungsgrad der Filterkapazität des Unterbodens im Bereich der Sickerstrecke.

Im Tabellenblattbereich AJ34:AM38 wird aus den berechneten Konzentrationsdaten die kumulierte Quelltermkonzentration bis WF2 berechnet. Dazu werden die zeitlich nächst gelegenen Werte der Datenreihe gesucht und für eine Interpolation verwendet.

Im Tabellenblattbereich AJ40:AM42 wird die Stoffanreicherung in der Sickerstrecke numerisch berechnet (als Summe der Emissionen der einzelnen Zeitschritte) und mit dem analytisch berechneten Wert verglichen.

- 3-20 Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration im Sickerwasser am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen abklingenden Quellterm (Blatt "BTCabkl\_cal") – Teil 1

|      | A                              | B                    | C                     | D                              | E                        | F         | G          | H           | I          | J                               | K        | L         | M         | N        | O        | P         | Q        | R        | S        | T | U |  |  |
|------|--------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------|------------|-------------|------------|---------------------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|---|---|--|--|
| 1    | <b>BTCabkl_cal</b>             |                      |                       |                                | Berechnungszeitraum (a): | 200       |            | FK-nutz:    | 0.375      | mg/kg                           |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 2    | Stand vom:                     | 23.11.2017           |                       | Gewählter Boden, Code:         | 1                        |           |            | entspricht: | 5.32E-01   | g                               |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 3    |                                |                      |                       | Gewählter Boden, Bez.:         | Sand                     |           |            | WF2(QT):    | 11.2405    | a                               |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 4    |                                |                      |                       | Gewählte Verbindung, Code:     | 20                       |           |            | Länge-AK:   | 1          | m                               |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 5    |                                |                      |                       | Gewählte Verbindung, Bez.:     | Antimon                  |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 6    | <b>Modelleingabeparameter:</b> |                      |                       |                                |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 7    | Parameter                      | Einheit              | Wert                  | Erläuterung                    |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 8    | Transportstrecke               | [m]                  | 1                     | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 9    | Querschnittsfläche             | [m²]                 | 1                     | (per Konvention)               |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 10   | Eff. Porosität                 | [-]                  | 0.170                 | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 11   | Dispersivität                  | [m]                  | 0.100                 | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 12   | Volumenstrom                   | [m³/a]               | 0.395                 | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 13   | Anfangskonzentration           | [kg/m³]              | 0                     | (per Konvention)               |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 14   | Stoffmasse gesamt              | [kg]                 | inf                   | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 15   | Input-Anfangskonzentration     | [kg/m³]              | 1.44E-04              | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 16   | Input-Restkonzentration        | [kg/m³]              | 0                     | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 17   | Kappa-Wert                     | [kg/L]               | 6.02E-01              | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 18   | Lagerungsdichte                | [kg/L]               | 1.42E+00              | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 19   | Verteilungskoeffizient         | [L/kg]               | 1.46E+01              | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 20   | Halbwertszeit                  | [a]                  | -9999                 | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 21   | Abbauratenkonstante $\mu$      | [1/a]                | 0.000                 | (wird hier berechnet)          |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 22   | Darcy-Geschwindigkeit          | [m/a]                | 0.39500001            | (wird hier berechnet)          |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 23   | Mittlere Fließgeschw.          | [m/a]                | 2.324                 | (wird hier berechnet)          |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 24   | Dispersionskoeff.              | [m²/a]               | 0.232                 | (wird hier berechnet)          |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 25   | Peclat #                       | [-]                  | 10.000                | (wird hier berechnet)          |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 26   | Retardationsfaktor             | [-]                  | 122.757               | (wird hier berechnet)          |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 27   | $\lambda_i$ (= Kappa*)         | [1/a]                | 1.07E-01              | (wird automatisch eingetragen) |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 28   | $\mu - \lambda_i R$            | [1/a]                | 0.000                 | (wird hier berechnet)          |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 29   | Variable u                     | [-]                  | 2.516                 | (wird hier berechnet)          |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 30   | Variable w                     | [-]                  | 2.324                 | (wird hier berechnet)          |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 31   |                                |                      |                       |                                |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 32   | <b>Modellberechnung:</b>       |                      |                       | 8.09E-07 (max. Konz. [kg/m³])  |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 33   | Zeit [a]                       | Konzentration am OdB | Relativer Beitrag der |                                | Anfangsbedingung         |           |            |             |            | Randbedingung (konstanter Teil) |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 34   |                                | intern:              |                       | Anfangsbed.                    | Randbed.                 | arg-      | erfc(arg-) | arg+        | erfc(arg+) | A(x,t)                          | exp-     | arg-      | erc(arg-) | exp+     | arg+     | erc(arg+) | B(x,t)   | exp-     |          |   |   |  |  |
| 35   |                                | [µg/L]               | 0                     | 0.00E+00                       | 0                        | 1.15E+06  | 0.00E+00   | 1.15E+06    | 0.00E+00   | 1.00E+00                        | 6.61E-01 | 1.15E+06  | 0.00E+00  | 3.33E+04 | 1.15E+06 | 0.00E+00  | 0.00E+00 | 1.00E+00 | 1.00E+00 |   |   |  |  |
| 36   | 0.000                          | 36                   | 0                     | 0.00E+00                       | 0                        | 1.15E+02  | 0.00E+00   | 1.15E+02    | 0.00E+00   | 1.00E+00                        | 6.61E-01 | 1.15E+02  | 0.00E+00  | 3.33E+04 | 1.15E+02 | 0.00E+00  | 0.00E+00 | 1.00E+00 | 1.00E+00 |   |   |  |  |
| 37   | 0.010                          |                      | 0.00E+00              | 0.00E+00                       | 0                        | 8.12E+01  | 0.00E+00   | 8.13E+01    | 0.00E+00   | 1.00E+00                        | 6.61E-01 | 8.12E+01  | 0.00E+00  | 3.33E+04 | 8.13E+01 | 0.00E+00  | 0.00E+00 | 1.00E+00 | 1.00E+00 |   |   |  |  |
| 38   | 0.020                          |                      | 0.00E+00              | 0.00E+00                       | 0                        | 6.63E+01  | 0.00E+00   | 6.64E+01    | 0.00E+00   | 1.00E+00                        | 6.61E-01 | 6.63E+01  | 0.00E+00  | 3.33E+04 | 6.64E+01 | 0.00E+00  | 0.00E+00 | 1.00E+00 | 1.00E+00 |   |   |  |  |
| 39   | 0.030                          |                      | 0.00E+00              | 0.00E+00                       | 0                        |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 1281 | 248.000                        |                      | 4.26E-10              | 0.00E+00                       | 4.26E-16                 | -2.70E+00 | 2.00E+00   | 4.16E+00    | 4.18E-09   | 2.27E-05                        | 6.61E-01 | -2.98E+00 | 2.00E+00  | 3.33E+04 | 4.44E+00 | 3.45E-10  | 6.61E-01 | 1.00E+00 | 1.00E+00 |   |   |  |  |
| 1282 | 248.400                        |                      | 4.09E-10              | 0.00E+00                       | 4.09E-16                 | -2.70E+00 | 2.00E+00   | 4.16E+00    | 4.11E-09   | 2.22E-05                        | 6.61E-01 | -2.98E+00 | 2.00E+00  | 3.33E+04 | 4.44E+00 | 3.37E-10  | 6.61E-01 | 1.00E+00 | 1.00E+00 |   |   |  |  |
| 1283 | 248.800                        |                      | 3.91E-10              | 0.00E+00                       | 3.91E-16                 | -2.70E+00 | 2.00E+00   | 4.16E+00    | 4.03E-09   | 2.18E-05                        | 6.61E-01 | -2.99E+00 | 2.00E+00  | 3.33E+04 | 4.44E+00 | 3.30E-10  | 6.61E-01 | 1.00E+00 | 1.00E+00 |   |   |  |  |
| 1284 | 249.200                        |                      | 3.75E-10              | 0.00E+00                       | 3.75E-16                 | -2.71E+00 | 2.00E+00   | 4.16E+00    | 3.96E-09   | 2.13E-05                        | 6.61E-01 | -2.99E+00 | 2.00E+00  | 3.33E+04 | 4.45E+00 | 3.23E-10  | 6.61E-01 | 1.00E+00 | 1.00E+00 |   |   |  |  |
| 1285 | 249.600                        |                      | 3.59E-10              | 0.00E+00                       | 3.59E-16                 | -2.71E+00 | 2.00E+00   | 4.16E+00    | 3.89E-09   | 2.09E-05                        | 6.61E-01 | -2.99E+00 | 2.00E+00  | 3.33E+04 | 4.45E+00 | 3.16E-10  | 6.61E-01 | 1.00E+00 | 1.00E+00 |   |   |  |  |
| 1286 | 250.000                        |                      | 3.44E-10              | 0.00E+00                       | 3.44E-16                 | -2.71E+00 | 2.00E+00   | 4.17E+00    | 3.81E-09   | 2.05E-05                        | 6.61E-01 | -3.00E+00 | 2.00E+00  | 3.33E+04 | 4.45E+00 | 3.09E-10  | 6.61E-01 | 1.00E+00 | 1.00E+00 |   |   |  |  |
| 1287 |                                |                      |                       |                                |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |
| 1288 |                                |                      |                       |                                |                          |           |            |             |            |                                 |          |           |           |          |          |           |          |          |          |   |   |  |  |

Abbildung 3-21: Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration am OdB innerhalb des Bewertungszeitraums für einen abklingenden Quellterm (Blatt "BTCabkl\_cal") – Teil 2

Abbildung :

| Randbedingung (abklingender Teil) |          |           |          |          |           |          |          |          |          | Konz. @ Bauwerk- | Emission | Emission (ges.) | WF Quelle | Emission (ges.) | Konz.-kumuliert | Ausschöpfung           | Berechnung Konzentration bei WF2 (Quellterm) |             |  |
|-----------------------------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|------------------|----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------------|------------------------|--|-------------|--|
| exp-                              | arg-     | erc(arg-) | exp+     | arg+     | erc(arg+) | E(x,t)   | [ug/L]   | [ug]     | [L/kg]   | [ug/kg]          | [ug/L]   | FKmax           | Index     | Zeit [a]        | WF [L/kg]       | Konz.-kumuliert [ug/L] |  |             |  |
| 1.00E+00                          | 1.15E+06 | 0.00E+00  | 2.20E+04 | 1.15E+06 | 0.00E+00  | 0.00E+00 | 1.44E+02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.78E-11         | 0.00E+00 | 1.44E+02        | 0.00E+00  | 313             | 1.12E+01        | 1.993E+00              | 84.073                                       |             |  |
| 1.00E+00                          | 1.15E+02 | 0.00E+00  | 2.20E+04 | 1.15E+02 | 0.00E+00  | 0.00E+00 | 1.44E+02 | 5.70E+02 | 5.70E+02 | 1.78E-03         | 4.01E-01 | 1.44E+02        | 5.35E-02  | 314             | 1.13E+01        | 2.011E+00              | 83.712                                       | Analytisch: |  |
| 1.00E+00                          | 8.12E+01 | 0.00E+00  | 2.20E+04 | 8.13E+01 | 0.00E+00  | 0.00E+00 | 1.44E+02 | 5.69E+02 | 1.14E+03 | 3.56E-03         | 8.02E-01 | 1.44E+02        | 1.07E-01  | bei WF2:        | 1.12E+01        | 2.000E+00              | 83.927                                       | 83.927      |  |
| 1.00E+00                          | 6.63E+01 | 0.00E+00  | 2.20E+04 | 6.64E+01 | 0.00E+00  | 0.00E+00 | 1.44E+02 | 5.68E+02 | 1.71E+03 | 5.34E-03         | 1.20E+00 | 1.44E+02        | 1.60E-01  |                 |                 |                        |  |             |  |

**3.3.3.10 Berechnung der Stoffkonzentration von Stoffen im Sickerwasser an der Bauwerk-UK zum bewertungsrelevanten Zeitpunkt bei einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Freisetzungsrate (Blatt "QTabkl\_Wert\_cal(ADE)")**

Die Konzentration im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht und an der Bauwerk-UK zum bewertungsrelevanten Zeitpunkt (per Konvention 4 Jahre im Standardfall nach EBV) für eine nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingende Stofffreisetzung wird im Tabellenblatt „QTabkl\_Wert\_cal(ADE)“ berechnet. Die relevanten Eingabedaten werden aus dem Tabellenblatt „Salze\_cal“ übernommen.

Die Berechnung erfolgt in Zeile 23. Für die iterative Ermittlung der maximal zulässigen Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks wird dieses Tabellenblatt mit variierenden Anfangskonzentrationen (Zelle C14) wiederholt verwendet.

- 3-22 Tabellenblatt zur Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser an der Bauwerk-UK zum bewertungsrelevanten Zeitpunkt bei einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Stofffreisetzung (Blatt "QTabkl\_Wert\_cal(ADE)")

|    | A                                    | B              | C           | D                               | E        | F                               | G        | H          | I                        |
|----|--------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------------|----------|---------------------------------|----------|------------|--------------------------|
| 1  | <b>QTabkl_Wert_cal(ADE)</b>          |                |             |                                 |          |                                 |          |            |                          |
| 2  | Stand vom:                           | 6.3.2018       |             | Gewählte Verbindung, Code:      | 20       | (wird aus Salze_cal übernommen) |          |            |                          |
| 3  |                                      |                |             | Gewählte Verbindung, Bez.:      | Antimon  | (wird aus Salze_cal übernommen) |          |            |                          |
| 4  |                                      |                |             | Gewählter MEB, Code:            | 11       | (wird aus Salze_cal übernommen) |          |            |                          |
| 5  |                                      |                |             | Gewählter MEB, Bez. e:          | CUM      | (wird aus Salze_cal übernommen) |          |            |                          |
| 6  |                                      |                |             |                                 |          |                                 |          |            |                          |
| 7  | <b>Modelleingabeparameter:</b>       |                |             |                                 |          |                                 |          |            |                          |
| 8  | <b>Parameter</b>                     | <b>Einheit</b> | <b>Wert</b> | <b>Erläuterung</b>              |          |                                 |          |            |                          |
| 9  | Mächtigkeit der Quelltermschicht MEB | [m]            | 0.600000024 | (wird automatisch eingetragen)  |          |                                 |          |            |                          |
| 10 | Querschnittsfläche                   | [m²]           | 1           | (per Konvention)                |          |                                 |          |            |                          |
| 11 | Wassergesättigte Porosität MEB       | [-]            | 0.230       | (wird aus Salze_cal übernommen) |          |                                 |          |            |                          |
| 12 | Dispersivität                        | [m]            | 0.060       | (wird automatisch eingetragen)  |          |                                 |          |            |                          |
| 13 | Volumenstrom                         | [m³/a]         | 0.515       | (wird aus Salze_cal übernommen) |          |                                 |          |            |                          |
| 14 | Input-Anfangskonzentration MEB       | [kg/m³]        | 2.04E-05    | (wird automatisch eingetragen)  |          |                                 |          |            |                          |
| 15 | Lagerungsdichte MEB                  | [kg/L]         | 3.700       | (wird aus Salze_cal übernommen) |          |                                 |          |            |                          |
| 16 | Kd-Wert MEB                          | [L/kg]         | 1.600       | (wird aus Salze_cal übernommen) |          |                                 |          |            |                          |
| 17 | Retardationsfaktor MEB               | [-]            | 26.739      | (wird hier berechnet)           |          |                                 |          |            |                          |
| 18 | Exponententerm                       | [-]            | 15153.946   | (wird hier berechnet)           |          |                                 |          |            |                          |
| 19 |                                      |                |             |                                 |          |                                 |          |            |                          |
| 20 | <b>Modellberechnung:</b>             |                |             |                                 |          |                                 |          |            |                          |
| 21 | Zeit [a]                             |                | WF [L/kg]   | Konzentration UK MEB            | Terme    |                                 |          |            | Konzentration UK Bauwerk |
| 22 |                                      | intern:        |             | [ug/L]                          | arg-     | erfc(arg-)                      | arg+     | erfc(arg+) | [ug/L]                   |
| 23 | 4.000                                | 23             | 9.279E-01   | 1.72E+01                        | 8.56E-01 | 2.26E-01                        | 3.22E+00 | 5.33E-06   | 5.00E+00                 |
| 24 |                                      |                |             |                                 |          |                                 |          |            |                          |

**3.3.3.11 Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration von Stoffen im Sickerwasser an der Bauwerk-UK bei einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Freisetzungsrate (Blatt "QTabkl\_cal(ADE)")**

Zur Visualisierung der nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Quelltermkonzentration wird im Tabellenblatt „QTabkl\_cal(ADE)“ der zeitliche Verlauf der Konzentration im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht und an der Bauwerk-UK berechnet. Die relevanten Eingabedaten werden aus den Tabellenblättern „Salze\_cal“ und „QTabkl\_Wert\_cal(ADE)“ übernommen.

Die Berechnung erfolgt in den Zeilen 21 bis 1273 für einen Zeitraum der 25% länger ist als der Zeitraum bis Erreichen von WF2 ( $T_{WF2}$ ). Die zeitliche Diskretisierung der Berechnung ist variabel um das Abklingen der Stofffreisetzung bestmöglich zu erfassen. Länge und Anzahl der variierenden Diskretisierungsintervalle sind in Tabelle 3-3 aufgelistet.

Tabelle 3-4: Diskretisierung der Berechnung des Konzentrationsverlaufs an der UK der MEB-Schicht und an der Bauwerk-UK nach dem Advektions-Dispersionsmodell

| Zeitperiode Nr. | Anzahl der Zeitschritte | Länge der Zeitschritte |
|-----------------|-------------------------|------------------------|
| 1               | 20                      | 0.00005 $T_{WF2}$      |
| 2               | 40                      | 0.0001 $T_{WF2}$       |
| 3               | 40                      | 0.000125 $T_{WF2}$     |
| 4               | 200                     | 0.0002 $T_{WF2}$       |

Abbildung :

|   |     |                         |
|---|-----|-------------------------|
| 5 | 300 | 0.0005 T <sub>WF2</sub> |
| 6 | 250 | 0.001 T <sub>WF2</sub>  |
| 5 | 400 | 0.002 T <sub>WF2</sub>  |

Der zeitliche Verlauf der maximal zulässigen Konzentration im Sickerwasser an der UK der MEBSchicht wird in Spalte D, die maximal zulässige Konzentration im Sickerwasser an der Bauwerk-UK (unter Berücksichtigung der ggf. gegebenen Verdünnung im Bauwerk und des Verhältnismäßigkeitsfaktors) in Spalte M berechnet. Des Weiteren werden Emissionswerte und kumulierte Konzentrationen berechnet.

Abbildung 3-23: Tabellenblatt zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Stoffkonzentration im Sickerwasser an der Bauwerk-UK bei einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Stofffreisetzung (Blatt "QTabkl\_cal(ADE)")

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following structure:

- Parameters (Rows 7-19):**
  - 7: Modellierungparameter: Parameter, Einheit, Wert, Erläuterung
  - 8: Mächtigkeit der Quelltermerschicht (MEB) [m]: 0.60000002
  - 10: Querschnittsfläche [m²]: 1
  - 11: Wassergesättigte Porosität (MEB) [-]: 0.230
  - 12: Dispersivität [m]: 0.060
  - 13: Volumenstrom [m³/a]: 0.515
  - 14: Input-Anfangskonzentration [kg/m³]: 2.04E-05
  - 15: Lagerungsdichte MEB [kg/m³]: 3.700
  - 16: Kd-Wert MEB [L/kg]: 1.600
  - 17: Retardationsfaktor [-]: 26.739
  - 18: Exponententerm [-]: 15153.946
- Model Calculation (Rows 20-21):**
  - 20: Modellberechnung: 2.04E-02 (max. Konz. [kg/m³])
  - 21: Zeit [a], WF [L/kg], Konzentration UK MEB [µg/L], Terme, Emission (ges.) [µg], Emission (ges.) [µg/L], Konz. UK MEB, kumuliert [µg/L], Konzentration UK Bauwerk [µg/L], Konzentration UK Bauwerk, kumuliert [µg/L]
- Results Table (Rows 22-37):**
  - Columns: Index, Zeit [a], WF [L/kg], Konz. kumuliert [µg/L], Konz. kumuliert [µg/L]
  - Row 22: 1128, 8.62E+00, 2.000E+00, 1.477E-02
  - Row 23: 1127, 8.64E+00, 2.004E+00, 1.475E-02
  - Row 24: bei WF2: 8.62E+00, 2.000E+00, 1.477E-02
- Bottom Table (Rows 1266-1275):**
  - Columns: Material\_cal, Wert\_cal, BTC\_cal, Prof\_cal, Salze\_cal, QTabkl\_cal, BTcabkl\_cal, QTabkl\_Wert\_cal(ADE), QTabkl\_cal(ADE), Profabkl\_cal, BTC\_plot, Prof\_plot, BTcabkl\_pli
  - Row 1266: 10.656, 2.472E+00, 2.33E+00, -8.80E-01, 1.66E+00, 3.18E+00, 7.06E-06, 2.08E+01, 6.92E+04, 3.12E+01, 1.26E+01, 6.77E-01, 3.65E+00

### 3.3.3.12 Berechnung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu einem gegebenen Zeitpunkt für einen exponentiell abklingenden Quellterm (Blatt "Profabkl\_cal")

Für die Visualisierung der Bewertung des Transportterms bei einem abklingenden Quellterm als obere Randbedingung (siehe Erläuterung in Box 4) wird im Tabellenblatt „Profabkl\_cal“ das Profil der Konzentration im Sickerwasser zwischen Bauwerk-UK und dem OdB berechnet. Dazu werden die Eingabedaten aus dem Tabellenblatt „BTCabkl\_cal“ übernommen. Der gewünschte Zeitpunkt für die

Berechnung ist in Zelle E1 anzugeben. Letzteres wird in einer regulären BEMEB-Anwendung durch die Eingabe in der graphischen Benutzeroberfläche bewirkt, ein Eintrag kann aber auch direkt im Tabellenblatt händisch gemacht werden

Die räumliche Auflösung des berechneten Profils beträgt ein Promille der Sickerstrecke, im Standardfall bei einer Strecke von 1 m also 1 mm. Die Berechnung erfolgt in den Zeilen 36 bis 1036.

3-24 Tabellenblatt zur Berechnung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu einem gegebenen Zeitpunkt für einen abklingenden Quellterm (Blatt "Profabkl\_cal") – Teil 1

| Parameter | Einheit              | Wert      | Erläuterung                       |
|-----------|----------------------|-----------|-----------------------------------|
| 8         |                      |           |                                   |
| 9         | [m]                  | 1         | (wird aus BTCabkl_cal übernommen) |
| 10        | [m <sup>2</sup> ]    | 1         | (per Konvention)                  |
| 11        | [-]                  | 0.1700    | (wird aus BTCabkl_cal übernommen) |
| 12        | [m]                  | 0.1000    | (wird aus BTCabkl_cal übernommen) |
| 13        | [m <sup>3</sup> /a]  | 0.3950    | (wird aus BTCabkl_cal übernommen) |
| 14        | [kg/m <sup>3</sup> ] | 0         | (per Konvention)                  |
| 15        | [kg]                 | inf       | (wird aus BTCabkl_cal übernommen) |
| 16        | [kg/m <sup>3</sup> ] | 1.212E-04 | (wird aus BTCabkl_cal übernommen) |
| 17        | [kg/m <sup>3</sup> ] | 0         | (wird aus BTCabkl_cal übernommen) |
| 18        | [kg/L]               | 0.4849    | (wird aus BTCabkl_cal übernommen) |
| 19        | [kg/L]               | 1.4200    | (wird aus BTCabkl_cal übernommen) |
| 20        | [L/kg]               | 13.2813   | (wird aus BTCabkl_cal übernommen) |
| 21        | [a]                  | -9999     | (wird aus BTCabkl_cal übernommen) |
| 22        | [1/a]                | 0.000     | (wird hier berechnet)             |
| 23        | [m/a]                | 0.3950    | (wird hier berechnet)             |
| 24        | [m/a]                | 2.324     | (wird hier berechnet)             |
| 25        | [m <sup>2</sup> /a]  | 0.232     | (wird hier berechnet)             |
| 26        | [a]                  | 0.430     | (wird hier berechnet)             |
| 27        | [-]                  | 111.938   | (wird hier berechnet)             |
| 28        | [1/a]                | 0.135     | (wird hier berechnet)             |
| 29        | [1/a]                | 0.000     | (wird hier berechnet)             |
| 30        | [-]                  | 2.516     | (wird hier berechnet)             |
| 31        | [-]                  | 2.324     | (wird hier berechnet)             |

| Strecke [m] | Pecllet # | Konzentration [ug/l] | rel.      |           | initial condition |            |          |            | A(x,t)   | exp-     |          |    |
|-------------|-----------|----------------------|-----------|-----------|-------------------|------------|----------|------------|----------|----------|----------|----|
|             |           |                      | due to IC | due to BC | arg-              | erfc(arg-) | arg+     | erfc(arg+) |          |          |          |    |
| 36          | 0.000     | 1.00E-09             | 8.17E+00  | 0.00E+00  | 8.1651E-06        | -1.02E+00  | 1.85E+00 | 1.02E+00   | 1.50E-01 | 2.33E-11 | 1.00E+00 | -1 |
| 37          | 0.001     | 1.00E-07             | 8.18E+00  | 0.00E+00  | 8.1632E-06        | -1.02E+00  | 1.85E+00 | 1.02E+00   | 1.49E-01 | 2.34E-11 | 1.00E+00 | -1 |
| 1032        | 0.996     | 9.96E+00             | 2.63E-01  | 0.00E+00  | 2.6284E-07        | 1.43E+00   | 4.38E-02 | 3.46E+00   | 9.72E-07 | 9.68E-01 | 6.63E-01 |    |
| 1033        | 0.997     | 9.97E+00             | 2.61E-01  | 0.00E+00  | 2.6072E-07        | 1.43E+00   | 4.35E-02 | 3.47E+00   | 9.55E-07 | 9.68E-01 | 6.62E-01 |    |
| 1034        | 0.998     | 9.98E+00             | 2.59E-01  | 0.00E+00  | 2.5862E-07        | 1.43E+00   | 4.31E-02 | 3.47E+00   | 9.38E-07 | 9.68E-01 | 6.62E-01 |    |
| 1035        | 0.999     | 9.99E+00             | 2.57E-01  | 0.00E+00  | 2.5653E-07        | 1.43E+00   | 4.27E-02 | 3.47E+00   | 9.21E-07 | 9.69E-01 | 6.62E-01 |    |
| 1036        | 1.000     | 1.00E+01             | 2.54E-01  | 0.00E+00  | 2.5445E-07        | 1.44E+00   | 4.24E-02 | 3.47E+00   | 9.05E-07 | 9.69E-01 | 6.61E-01 |    |

Abbildung 3-25 : Tabellenblatt zur Berechnung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB zu einem gegebenen Zeitpunkt für einen abklingenden Quellterm (Blatt "Profabkl\_cal") – Teil 2

|      | M                                  | N         | O         | P        | Q        | R         | S        | T                                   | U         | V         | W        | X        | Y         | Z        | AA | AB |
|------|------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----|----|
| 1    |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 2    |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 3    |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 4    |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 5    |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 6    |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 7    |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 8    |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 9    |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 10   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 11   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 12   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 13   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 14   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 15   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 16   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 17   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 18   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 19   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 20   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 21   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 22   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 23   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 24   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 25   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 26   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 27   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 28   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 29   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 30   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 31   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 32   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 33   |                                    |           |           |          |          |           |          |                                     |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 34   | boundary condition (constant part) |           |           |          |          |           |          | boundary condition (declining part) |           |           |          |          |           |          |    |    |
| 35   | exp-                               | arg-      | erc(arg-) | exp+     | arg+     | erc(arg+) | B(x,t)   | exp-                                | arg-      | erc(arg-) | exp+     | arg+     | erc(arg+) | E(x,t)   |    |    |
| 36   | 1.00E+00                           | -1.10E+00 | 1.88E+00  | 1.00E+00 | 1.10E+00 | 1.19E-01  | 1.00E+00 | 1.00E+00                            | -1.02E+00 | 1.85E+00  | 1.00E+00 | 1.02E+00 | 1.50E-01  | 6.74E-02 |    |    |
| 37   | 1.00E+00                           | -1.10E+00 | 1.88E+00  | 1.01E+00 | 1.11E+00 | 1.18E-01  | 9.99E-01 | 1.00E+00                            | -1.02E+00 | 1.85E+00  | 1.01E+00 | 1.02E+00 | 1.49E-01  | 6.73E-02 |    |    |
| 1032 | 6.63E-01                           | 1.34E+00  | 5.79E-02  | 3.19E+04 | 3.55E+00 | 5.27E-07  | 2.76E-02 | 1.00E+00                            | 1.43E+00  | 4.38E-02  | 2.12E+04 | 3.46E+00 | 9.72E-07  | 2.17E-03 |    |    |
| 1033 | 6.62E-01                           | 1.34E+00  | 5.74E-02  | 3.23E+04 | 3.55E+00 | 5.17E-07  | 2.74E-02 | 1.00E+00                            | 1.43E+00  | 4.35E-02  | 2.14E+04 | 3.47E+00 | 9.55E-07  | 2.15E-03 |    |    |
| 1034 | 6.62E-01                           | 1.35E+00  | 5.70E-02  | 3.26E+04 | 3.55E+00 | 5.08E-07  | 2.71E-02 | 1.00E+00                            | 1.43E+00  | 4.31E-02  | 2.16E+04 | 3.47E+00 | 9.38E-07  | 2.13E-03 |    |    |
| 1035 | 6.62E-01                           | 1.35E+00  | 5.65E-02  | 3.30E+04 | 3.55E+00 | 4.99E-07  | 2.69E-02 | 1.00E+00                            | 1.43E+00  | 4.27E-02  | 2.18E+04 | 3.47E+00 | 9.21E-07  | 2.12E-03 |    |    |
| 1036 | 6.61E-01                           | 1.35E+00  | 5.61E-02  | 3.33E+04 | 3.56E+00 | 4.90E-07  | 2.67E-02 | 1.00E+00                            | 1.44E+00  | 4.24E-02  | 2.20E+04 | 3.47E+00 | 9.05E-07  | 2.10E-03 |    |    |

### 3.3.4 Tabellenblätter für die Visualisierung

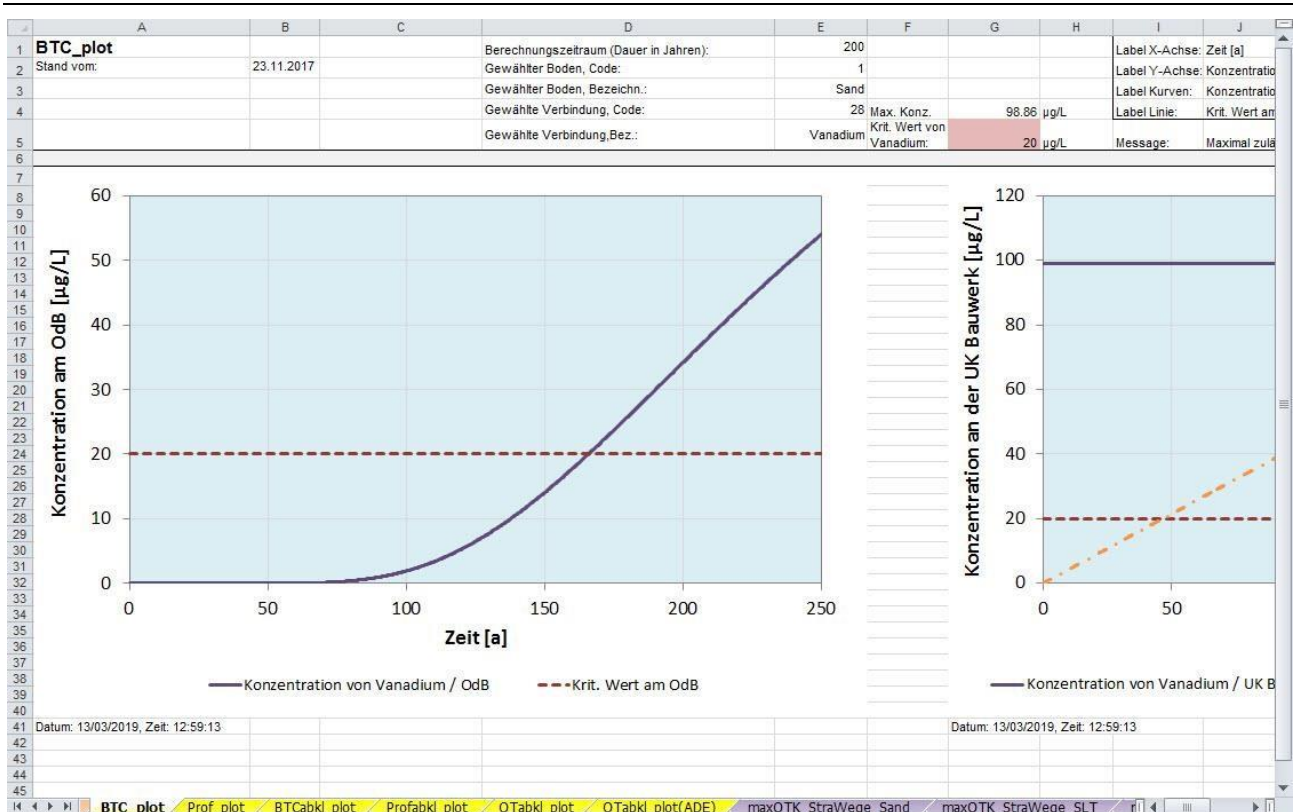
#### 3.3.4.1 Darstellung des Konzentrationsverlaufs über die Zeit am OdB für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzungsrage (Blatt "BTC\_plot")

Im Tabellenblatt „BTC\_plot“ wird die in Blatt „BTC\_cal“ berechnete Konzentrationsentwicklung am OdB visualisiert (linke Grafik). In einer zweiten Grafik werden der Konzentrationsverlauf am oberen Modellrand, d.h. an der UK des Bauwerks (Quellterm-Konzentration) und die Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke dargestellt. In beiden Grafiken wird als Referenz der kritische Wert am OdB (GFS bzw. BM) dargestellt. Die Eingabe des kritischen Werts am OdB erfolgt in Zelle G5.



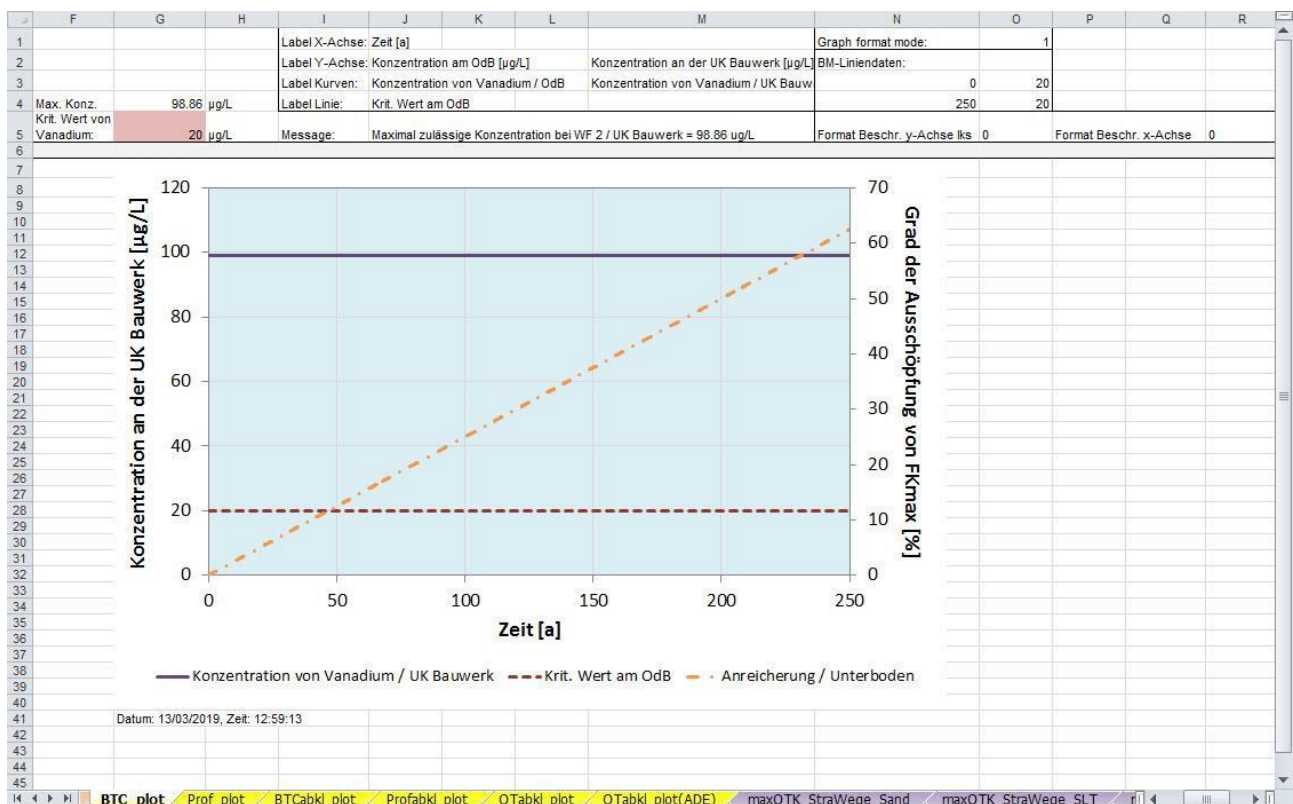
Abbildung : Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs im Sickerwasser an der Bauwerk-UK und am OdB sowie der Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke als Grad der Ausschöpfung der maximalen Filterkapazität für einen Quellterm mit langfristig konstanter Freisetzungsrates (Blatt "BTC\_plot") – Teil 1

3-26 Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs im Sickerwasser an der Bauwerk-UK und am OdB sowie der Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke als Grad der Ausschöpfung der maximalen Filterkapazität für einen Quellterm mit langfristig konstanter Freisetzungsrates (Blatt "BTC\_plot") – Teil 1



3-27 Konzentrationsverlaufs im Sickerwasser an der Bauwerk-UK und am OdB sowie der Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke als Grad der Ausschöpfung der maximalen Filterkapazität für einen Quellterm mit langfristig konstanter Freisetzungsrates (Blatt "BTC\_plot") – Teil 2

Abbildung : s Konzentrationen

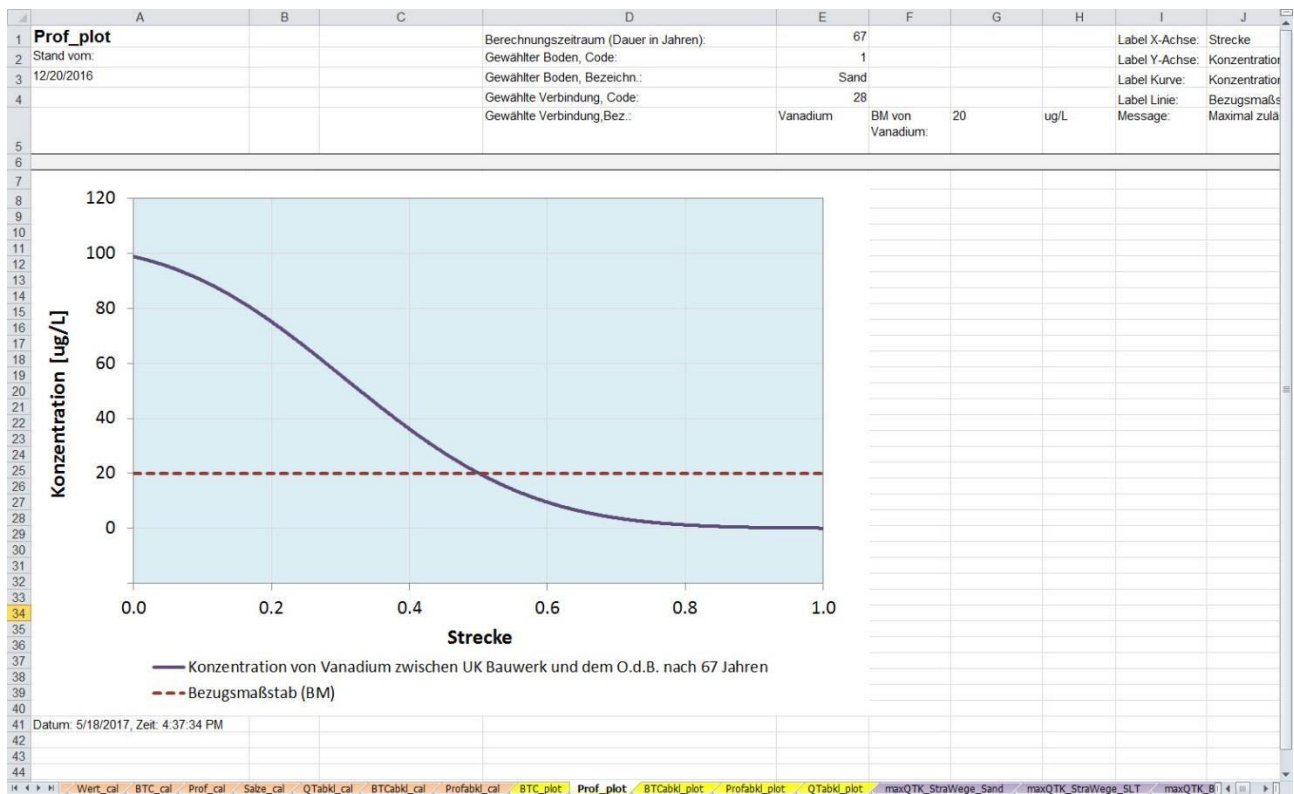


**3.3.4.2 Darstellung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser entlang der Sickerstrecke zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB für einen ausgewählten Zeitpunkt für einen unendlichen oder endlichen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzungsrage (Blatt "Prof\_plot")**

Im Tabellenblatt „Prof\_plot“ wird das in Blatt „Prof\_cal“ berechnete Konzentrationsprofil im Sickerwasser entlang der Sickerstrecke zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB visualisiert. Als Referenz wird der kritische Wert am OdB (GFS bzw. BM) dargestellt (Abbildung 3-28).

Die Formatierung der Grafiken inkl. der Legendeneinträge erfolgt automatisch. Dazu werden verschiedene Zellen im oberen Bereich des Tabellenblatts sowie diesem Tabellenblatt zugeordnete Makros (VisualBASIC) verwendet.

Abbildung 3-28 : Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser entlang der Sickerstrecke zwischen der UK des Bauwerks und dem OdB für einen Quellterm mit langfristig konstanter Freisetzungsrates (Blatt "Prof\_plot")



### 3.3.4.3 Darstellung des Konzentrationsverlaufs über die Zeit am OdB und innerhalb des Quellterm für einen Quellterm mit abklingender Stofffreisetzungsrates (Blatt "BTCabkl\_plot")

Im Tabellenblatt „BTCabkl\_plot“ wird die in Blatt „BTCabkl\_cal“ berechnete Konzentrationsentwicklung am OdB visualisiert (linke Grafik: Abbildung 3-29). Als Referenz wird der kritische Wert am OdB (GFS bzw. BM) dargestellt. Die Eingabe des kritischen Werts am OdB erfolgt in Zelle G5.

In einer zweiten Grafik (Abbildung 3-30) werden der Konzentrationsverlauf am oberen Modellrand (aktuell und kumuliert), d.h. an der UK des Bauwerks (Quellterm-Konzentration) und die Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke dargestellt. Zusätzlich wird die bewertungsrelevante kumulative Konzentration bis WF2 an Bauwerk-UK und UK der MEB-Schicht durch ein Symbol angezeigt und deren Wert im Legendentext angegeben.

Die Formatierung der Grafiken inkl. der Legendeneinträge erfolgt automatisch. Dazu werden verschiedene Zellen im oberen Bereich des Tabellenblatts sowie diesem Tabellenblatt zugeordnete Makros (VisualBASIC) verwendet.

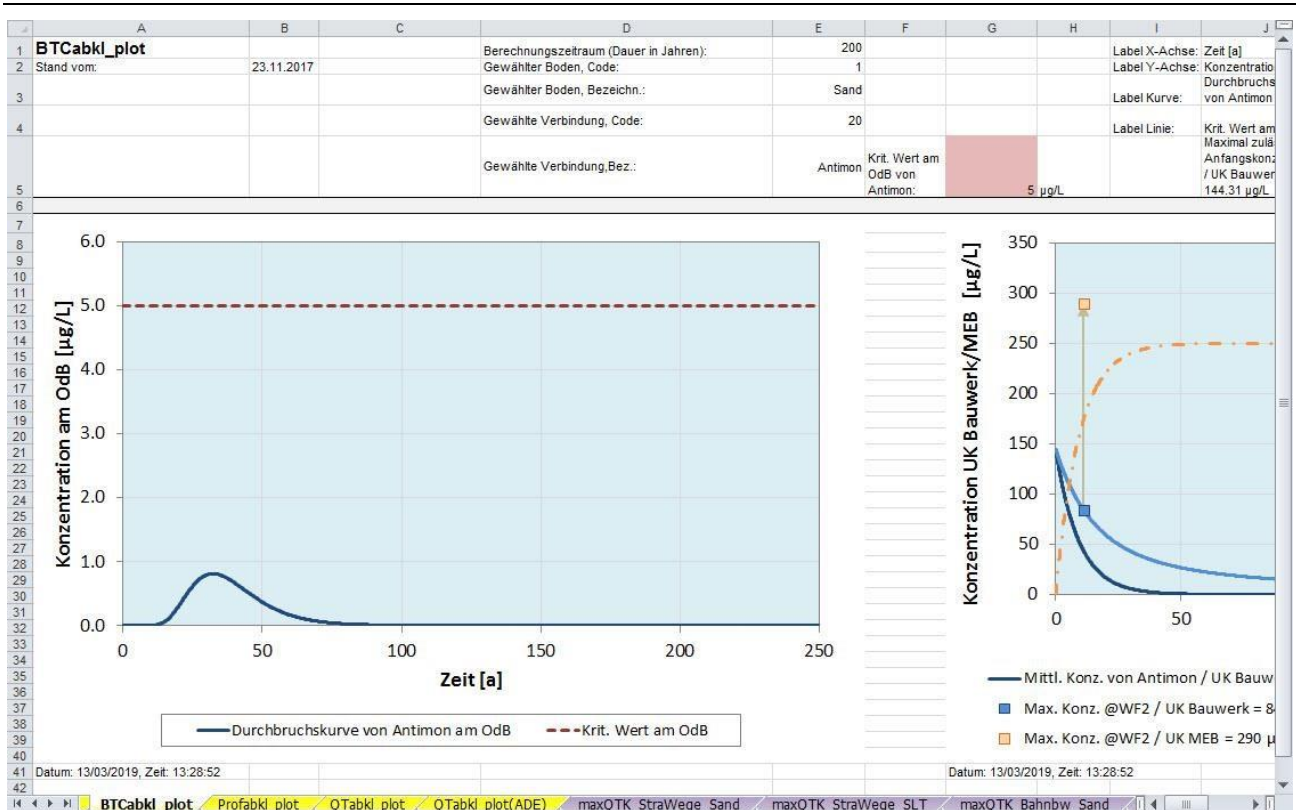
Abbildung 3-29 : Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrations

Für das dargestellte Beispiel ist zu sehen, wie der Ausschöpfungsgrad der Filterkapazität des Unterbodens innerhalb der Sickerstrecke den maximal zulässigen Wert von 50% erreicht und wie die Konzentrationen im Sickerwasser sich für diesen – in BEMEB automatisch bestimmten – Grenzfall entwickelt. Die maximal zulässige Quelltermkonzentration wird hier also durch die maximal zulässige Stoffanreicherung limitiert (Anreicherungskriterium), während die Konzentration im Sickerwasser am OdB deutlich unter dem kritischen Wert bleibt.

3-29

verlaufs im Sickerwasser an der UK der

MEB-Schicht, an der Bauwerk-UK und am OdB sowie der Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke als Grad der Ausschöpfung der maximalen Filterkapazität für einen Quellterm mit abklingender Freisetzungsrate (Blatt "BTCabkl\_plot"): Beispiel einer individuellen Bewertung von Antimon in CUM für Einbauweise B1 unter Berücksichtigung des zeitlich abklingenden Quellterms mit dem Anreicherungskriterium als maßgebendes Kriterium) – Teil 1

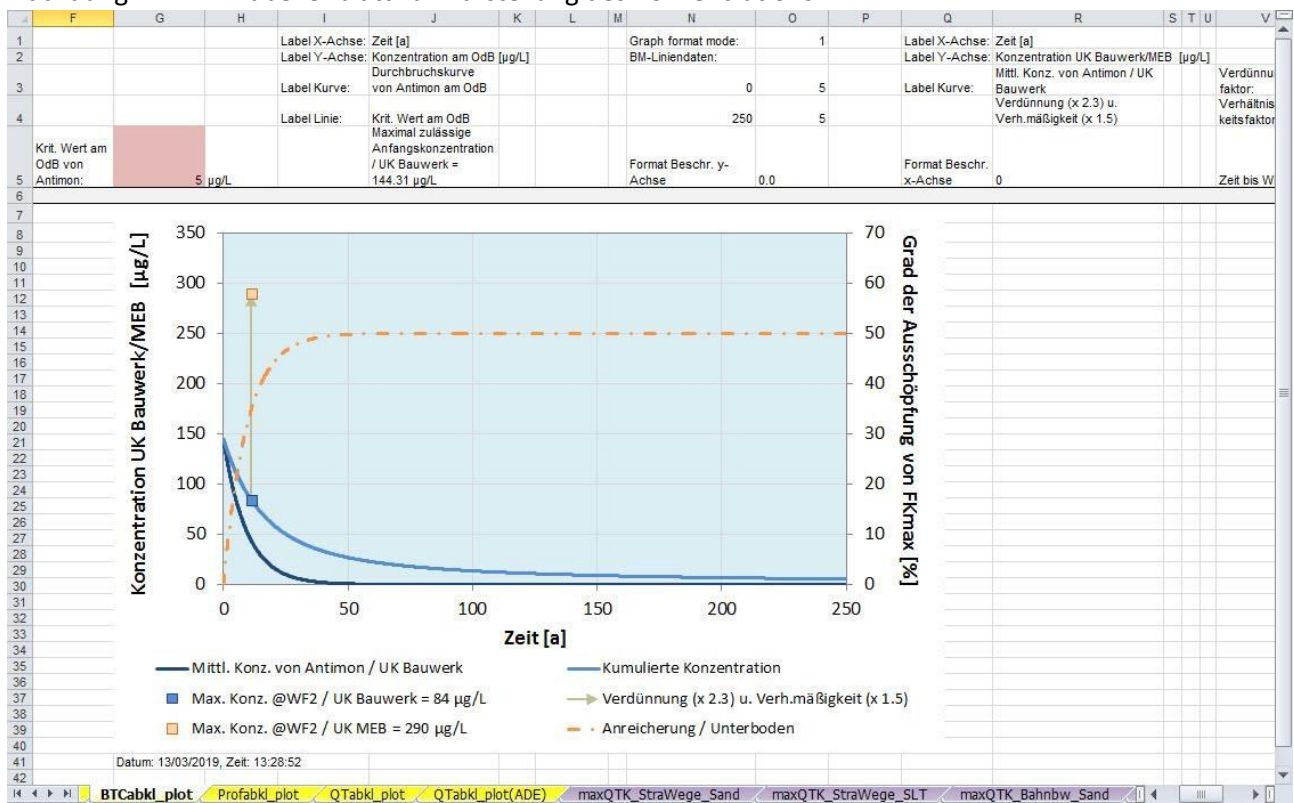


3-30

verlaufs im Sickerwasser an der UK der

MEB-Schicht, an der Bauwerk-UK und am OdB sowie der Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke als Grad der Ausschöpfung der maximalen Filterkapazität für einen Quellterm mit abklingender Freisetzungsrate (Blatt "BTCabkl\_plot"): Beispiel einer individuellen Bewertung von Antimon in CUM für Einbauweise B1 unter Berücksichtigung des zeitlich abklingenden Quellterms mit dem Anreicherungskriterium als maßgebendes Kriterium) – Teil 2

Abbildung : Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrations



### 3.3.4.4 Darstellung des Konzentrationsprofils im Sickerwasser entlang der Sickerstrecke zwischen der UK des Bauwerks und dem OdB für einen Quellterm mit abklingender Freisetzungsrate (Blatt "Profabkl\_plot")

Im Tabellenblatt „Profabkl\_plot“ wird das in Blatt „Profabkl\_cal“ berechnete Konzentrationsprofil im Sickerwasser entlang der Sickerstrecke zwischen der Bauwerk-UK und dem OdB visualisiert. Als Referenz wird der kritische Wert am OdB (GFS bzw. BM) dargestellt.

Der Zeitpunkt für das dargestellte Profil entspricht dem für die Berechnung gewählten Zeitpunkt und wird aus Blatt „Profabkl\_cal“ in Zelle E1 eingelesen.

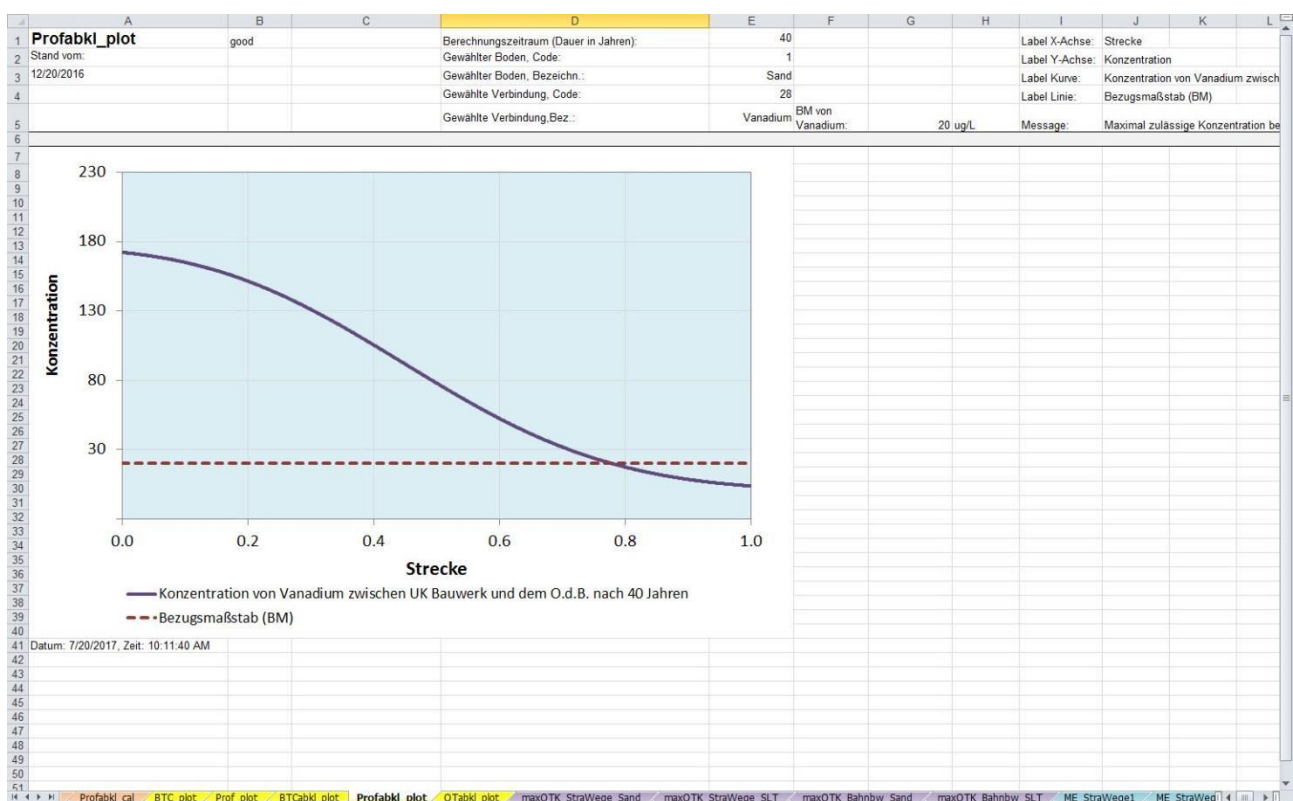
Das Tabellenblatt wird für die Generierung der Graphen für die Ergebnisdarstellung im Rahmen der individuellen Bewertung verwendet. Die Formatierung der Grafiken inkl. der Legendeneinträge erfolgt automatisch. Dazu werden verschiedene Zellen im oberen Bereich des Tabellenblatts sowie diesem Tabellenblatt zugeordnete Makros (VisualBASIC) verwendet.

3-31

profils im Sickerwasser entlang der

Sickerstrecke für einen Quellterm mit abklingender Freisetzungsrate (Blatt "Profabkl\_plot"): Beispiel einer individuellen Bewertung von Vanadium in SFA für Einbauweise B1 nach 40 Jahren.

Abbildung : Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrations



### 3.3.4.5 Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Stofffreisetzung für einen Quellterm mit einer exponentiell abklingenden Stofffreisetzungsrates (Blatt "QTabkl\_plot")

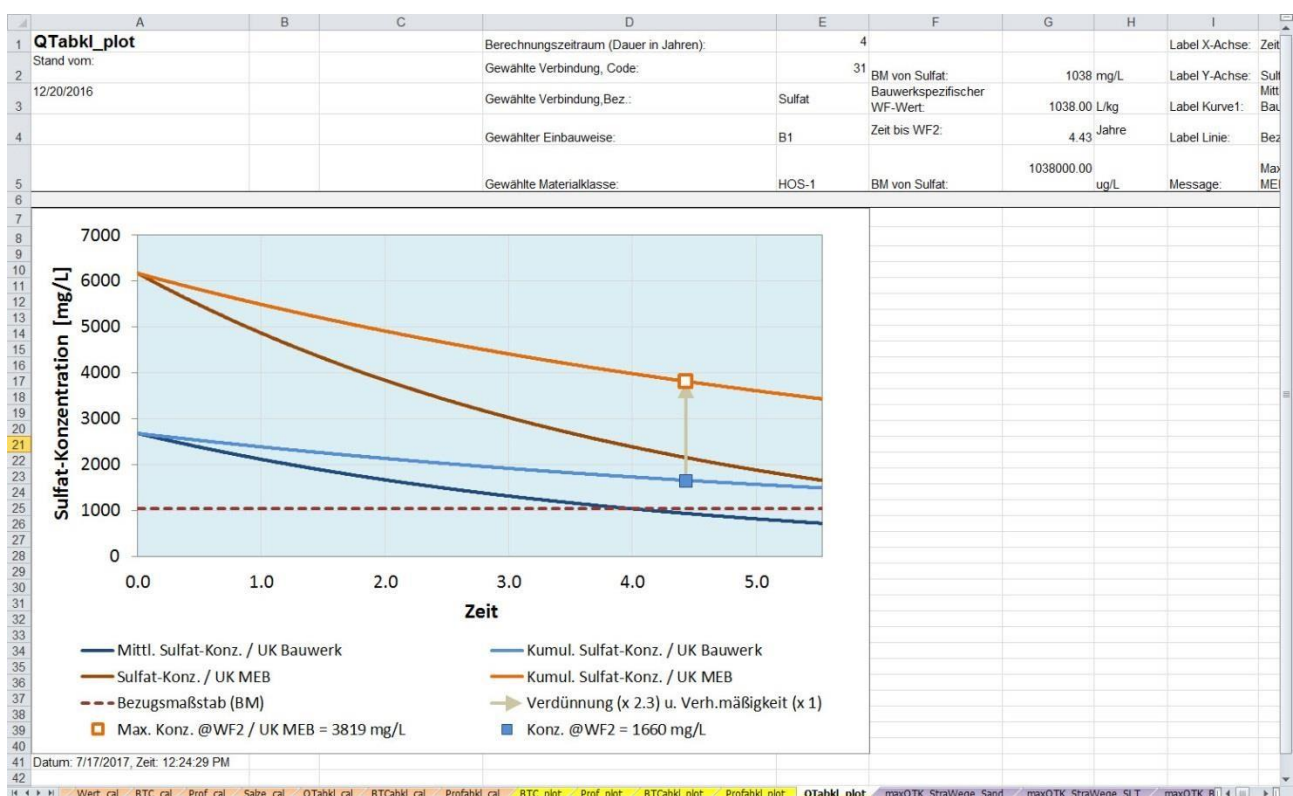
Im Tabellenblatt „QTabkl\_plot“ wird die in Blatt „QTabkl\_cal“ berechnete Entwicklung der Stofffreisetzung für einen Quellterm mit einer exponentiell abklingenden Stofffreisetzungsrates visualisiert. Dargestellt wird die über die Zeit – aufgrund der abklingenden Stofffreisetzung – abnehmende Stoffkonzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks, sowohl als aktuelle Konzentration als auch als kumulative Konzentration. Des Weiteren werden die Verlaufskurven der aktuellen und kumulativen Stoffkonzentration im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht dargestellt. Die maßgebenden Konzentrationswerte bei WF2 sind in der Legende vermerkt und werden in der Grafik als Symbol herausgehoben. Die relevanten Werte für Verdünnungs- und Verhältnismäßigkeitsfaktor werden ebenfalls in der Legende genannt.

Die Formatierung der Grafiken inkl. der Legendeneinträge erfolgt automatisch. Dazu werden verschiedene Zellen im oberen Bereich des Tabellenblatts sowie diesem Tabellenblatt zugeordnete Makros (VisualBASIC) verwendet.

3-32

verlaufs im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht sowie der UK des Bauwerks bei einer exponentiell abklingenden Freisetzungsrates (Blatt "QTabkl\_plot"): Beispiel einer individuellen Bewertung von Sulfat in HOS für die Einbauweise B1

Abbildung : Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrations

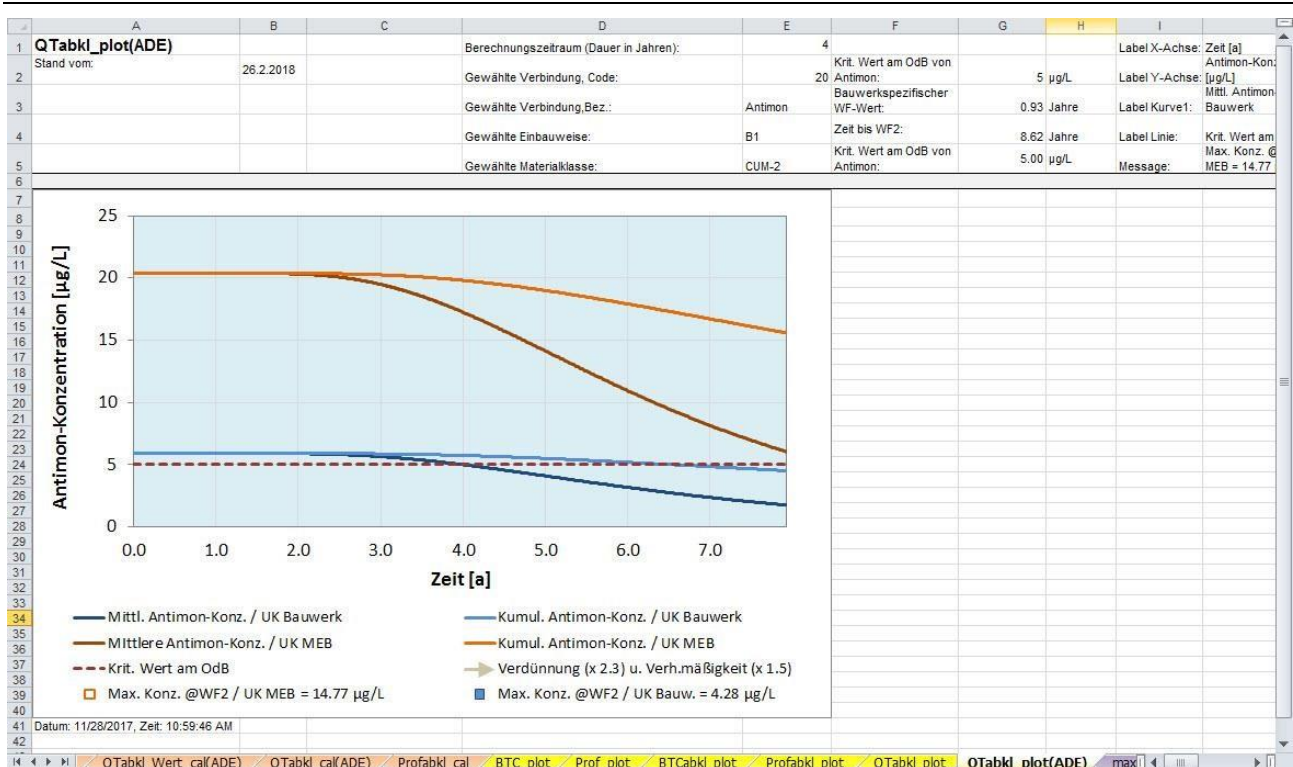


**3.3.4.6 Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Stofffreisetzung für einen Quellterm mit einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Stofffreisetzungsrate (Blatt "QTabkl\_plot(ADE)")**

Im Tabellenblatt „QTabkl\_plot(ADE)“ wird die in Blatt „QTabkl\_cal(ADE)“ berechnete Entwicklung der Stofffreisetzung für einen Quellterm mit einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Stofffreisetzungsrate visualisiert. Dargestellt wird die über die Zeit – aufgrund der abklingenden Stofffreisetzung – abnehmende Stoffkonzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks, sowohl als aktuelle Konzentration als auch als kumulative Konzentration. Des Weiteren werden die Verlaufskurven der aktuellen und kumulativen Stoffkonzentration im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht dargestellt. Die maßgebenden Konzentrationswerte bei WF2 sind in der Legende vermerkt und werden in der Grafik als Symbol herausgehoben. Die relevanten Werte für Verdünnungs- und Verhältnismäßigkeitsfaktor werden ebenfalls in der Legende genannt.

Die Formatierung der Grafiken inkl. der Legendeneinträge erfolgt automatisch. Dazu werden verschiedene Zellen im oberen Bereich des Tabellenblatts sowie diesem Tabellenblatt zugeordnete Makros (VisualBASIC) verwendet.

Abbildung 3-33 : Tabellenblatt zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht sowie der UK des Bauwerks bei einer nach dem Advektions-Dispersionsmodell abklingenden Freisetzungsrate (Blatt "QTabkl\_plot(ADE)"): Beispiel einer individuellen Bewertung von Antimon in CUM für die Einbauweise B1



### 3.3.5 Tabellenblätter für die Speicherung der Bewertungsergebnisse

#### 3.3.5.1 Maximal zulässige Quelltermkonzentrationen (Blätter "maxQTK\_\*")

Für alle Metalle und organischen Stoffkomponenten und -gruppen werden die maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen aus der Standardbewertung des Transportterms für einen Quellterm mit langfristig konstanter Freisetzungsrate gespeichert. Die Ergebnisdaten sind in insgesamt vier Tabellenblättern organisiert. Je Einbauweisen-Gruppe (Straßen-, Wege und Erdbau bzw. Bahnbauweisen) und Unterbodenszenario (Sand bzw. Schluff/Lehm/Tom, kurz: SLT) werden die Daten separat in einem Tabellenblatt gespeichert – mit den entsprechenden Bezeichnungen: maxQTK\_StraWege\_Sand, maxQTK\_StraWege\_SLT, maxQTK\_Bahnbw\_Sand, maxQTK\_Bahnbw\_SLT (als Beispiel in Abbildung 3-34 dargestellt).

Wie bereits oben in Abschnitt 3.3.3.1 erläutert ist, können für die Bewertung des Transportterms Einbauweisen mit der gleichen Sickerwasserraten zusammengefasst werden. Die Ergebnistabellen sind dementsprechend strukturiert.

Es werden jeweils zwei Werte gespeichert: die maximal zulässige Quelltermkonzentration bei Anwendung des Anreicherungskriteriums (AK) sowie die maximal zulässige Quelltermkonzentration



bei Anwendung des Durchbruchkriteriums (DK). Der maßgebende Wert wird durch eine fette Schrift gekennzeichnet. Der mit der maximal zulässigen Quelltermkonzentration nach dem DK korrespondierende  $K_d$ -Wert wird ebenfalls dargestellt. Kursive Werte zeigen an, dass die GFS bzw. der BM maßgebend ist. Dies ist der Fall, wenn die Bewertung nach dem AK geringere Werte als der GFS (bzw. BM) ergeben hat (siehe Box 2).

- 3-34 Tabellenblatt zur Speicherung der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen (hier Blatt "maxQTK\_StraWege\_Sand" für die Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für einen sandigen Unterboden).

Abbildung :

**Tabelle 1.1** Maximal zulässige Quelltermkonzentrationen [µg/L] in Einbauszenarien der EBV im Straßen- und Wegebau bei Unterlagerung mit 1 Meter Sand nach dem Durchbruchkriterium (DK) bzw. Anreicherungskriterium (AK). Fett markiert: Limitierender Wert, kursiv: GFS bzw. Bezugsmaßstab. Werte in Klammern: Mit dem DK korrespondierende teillinearisierte Kd-Werte [L/kg] der Schwermetalle.

|    | A  | B  | C   | D                                | E  | F   | G                                      | H  | I            | J |
|----|--|--|---|----------------------------------|--|---|--|--|--------------|---|
| 2  | Einbauweisen nach RE EBV, MantelIV, 2016 (lfd. Nr.)                    |  |   |                                  |  |   |  |  |              |   |
| 3  |  | Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE (10) | Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE (ggf. mit Kapillarsperre) (16a, 16b) | Bauweisen 13 unter Pflaster (15) | Schottertragschicht (ToB), Frostschuttschicht (ToB), Bodenverbesserung, Unterbau bis 1m Dicke ab Planum, jeweils unter gebundener Deckschicht (7, 8) | Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht (ggf. mit Kapillarsperre) (17a, 17b) | Bauweisen 13 unter Plattenbelägen (14) | ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum, Verfüllung von Baugruben, jeweils unter Deckschicht ohne Bindemittel (13) |              |   |
| 4  | Sickenwasserrate [mm/a]  | 67   | 170   | 242                              | 280  | 313   | 377                                    | 583  |              |   |
| 5  | Antimon  | AK   | 39.7  | 15.7                             | 11.0   | 9.51  | 8.51                                   | 7.06   | 5.00         |   |
| 6  | [µg/L]   | DK(Kd)   | 99.0 (20.7)   | 12.0 (28.7)                      | 7.46 (30.9)  | 6.51 (31.5)   | 6.02 (31.9)                            | 5.47 (32.3)  | 5.04 (32.7)  |   |
| 7  | Arsen  | AK   | 127   | 50.1                             | 35.2   | 30.4  | 27.2                                   | 22.6   | 14.6         |   |
| 8  | [µg/L]   | DK(Kd)   | 485 (25.1)  | 115 (49.3)                       | 69.2 (62.5)  | 56.5 (68.7)   | 48.5 (73.7)                            | 38.0 (82.5)  | 22.2 (105.5) |   |
| 9  | Blei   | AK   | 530   | 209                              | 147  | 127   | 113                                    | 94.2   | 60.9         |   |
| 10 | [µg/L]   | DK(Kd)   | > 23000   | > 23000                          | 13210 (122.6)  | 9958 (137.4)  | 8037 (149.7)                           | 5636 (172.7)   | 2494 (239.6) |   |
| 11 | Cadmium  | AK   | 9.54  | 3.76                             | 2.64   | 2.28  | 2.04                                   | 2.00   | 2.00         |   |
| 12 | [µg/L]   | DK(Kd)   | 33.2 (19.9)   | 4.42 (27.6)                      | 2.84 (29.6)  | 2.51 (30.2)   | 2.34 (30.5)                            | 2.15 (30.9)  | 2.01 (31.2)  |   |
| 13 | Chrom, ges.  | AK   | 874   | 345                              | 242  | 209   | 187                                    | 155  | 100          |   |
| 14 | [µg/L]   | DK(Kd)   | > 10000   | > 10000                          | > 10000  | > 10000   | > 10000                                | 9214 (201.2)   | 2443 (267.0) |   |
| 15 | Kupfer   | AK   | 609   | 240                              | 169  | 146   | 130                                    | 108  | 70.0         |   |
| 16 | [µg/L]   | DK(Kd)   | 8288 (32.6)   | 863 (60.6)                       | 396 (74.9)   | 291 (81.5)  | 232 (86.6)                             | 161 (95.6)   | 74.3 (117.8) |   |
| 17 | Molybdän   | AK   | 35.0  | 35.0                             | 35.0   | 35.0  | 35.0                                   | 35.0   | 35.0         |   |
| 18 | [µg/L]   | DK(Kd)   | 1969 (24.8)   | 379 (46.3)                       | 216 (57.1)   | 173 (62.0)  | 147 (65.9)                             | 114 (72.5)   | 66.7 (88.0)  |   |
| 19 | Nickel   | AK   | 185   | 73.1                             | 51.3   | 44.4  | 39.7                                   | 33.0   | 21.3         |   |
| 20 | [µg/L]   | DK(Kd)   | 104 (15.0)  | 27.8 (20.4)                      | 22.2 (21.5)  | 21.2 (21.7)   | 20.7 (21.8)                            | 20.2 (21.9)  | 20.0 (22.0)  |   |
| 21 | Vanadium   | AK   | 583   | 230                              | 161  | 139   | 125                                    | 104  | 67.0         |   |
| 22 | [µg/L]   | DK(Kd)   | 1218 (25.2)   | 214 (46.1)                       | 119 (56.5)   | 94.5 (61.1)   | 79.9 (64.7)                            | 61.1 (70.9)  | 35.9 (84.8)  |   |
| 23 | Zink   | AK   | 1854  | 731                              | 513  | 444   | 397                                    | 330  | 213          |   |
| 24 | [µg/L]   | DK(Kd)   | 854 (17.2)  | 243 (29.0)                       | 168 (33.7)   | 148 (35.4)  | 136 (36.6)                             | 121 (38.4)   | 104 (40.7)   |   |
| 25 | S15 PAK  | AK   | 143   | 56.4                             | 39.6   | 34.2  | 30.6                                   | 25.4   | 16.4         |   |
| 26 | [µg/L]   | DK   | > 200   | > 200                            | > 200  | 111 (131.8)   | 46.5 (131.8)                           | 13.6 (131.8)   | 1.79 (131.8) |   |
| 27 | Naphtalin  | AK   | 143   | 56.4                             | 39.6   | 34.2  | 30.6                                   | 25.4   | 16.4         |   |
| 28 | [µg/L]   | DK   | > 1000  | 234 (1.4)                        | 65.3 (1.4)   | 47.7 (1.4)  | 30.4 (1.4)                             | 18.9 (1.4)   | 7.71 (1.4)   |   |
| 29 | MKW  | AK   | 4769  | 1879                             | 1320   | 1141  | 1021                                   | 847  | 548          |   |
| 30 | [µg/L]   | DK   | > 100000  | 1260 (47.9)                      | 352 (47.9)   | 246 (47.9)  | 197 (47.9)                             | 149 (47.9)   | 108 (47.9)   |   |
| 31 | BTEX   | AK   | 47.7  | 20.0                             | 20.0   | 20.0  | 20.0                                   | 20.0   | 20.0         |   |
| 32 | [µg/L]   | DK   | 20.0 (0.11)   | 20.0 (0.11)                      | 20.0 (0.11)  | 20.0 (0.11)   | 20.0 (0.11)                            | 20.0 (0.11)  | 20.0 (0.11)  |   |
| 33 | PCB, ges.  | AK   | 2.38  | 0.94                             | 0.66   | 0.57  | 0.51                                   | 0.42   | 0.27         |   |
| 34 | [µg/L]   | DK   | 0.81 (26.3)   | 0.02 (26.3)                      | 0.01 (26.3)  | 0.01 (26.3)   | 0.01 (26.3)                            | 0.01 (26.3)  | 0.01 (26.3)  |   |
| 35 | Phenol   | AK   | 302   | 119                              | 83.6   | 72.3  | 64.6                                   | 53.7   | 34.7         |   |
| 36 | [µg/L]   | DK   | 2000 (0.03)   | 2000 (0.03)                      | 2000 (0.03)  | 2000 (0.03)   | 2000 (0.03)                            | 2000 (0.03)  | 2000 (0.03)  |   |
| 37 | Chlorphenole   | AK   | 302   | 119                              | 83.6   | 72.3  | 64.6                                   | 53.7   | 34.7         |   |
| 38 | [µg/L]   | DK   | > 1000  | > 1000                           | > 1000   | > 1000  | > 1000                                 | 892 (0.32)   | 140 (0.32)   |   |
| 39 | Chlorbenzole   | AK   | 23.8  | 9.40                             | 6.60   | 5.71  | 5.10                                   | 4.24   | 2.74         |   |
| 40 | [µg/L]   | DK   | 1.00 (2.1)  | 1.00 (2.1)                       | 1.00 (2.1)   | 1.00 (2.1)  | 1.00 (2.1)                             | 1.00 (2.1)   | 1.00 (2.1)   |   |
| 41 | Hexachl. benzole   | AK   | 23.8  | 9.40                             | 6.60   | 5.71  | 5.10                                   | 4.24   | 2.74         |   |
| 42 | [µg/L]   | DK   | > 10  | 0.28 (56.2)                      | 0.06 (56.2)  | 0.04 (56.2)   | 0.03 (56.2)                            | 0.02 (56.2)  | 0.01 (56.2)  |   |
| 43 | Atrazin  | AK   | 12.2  | 4.80                             | 3.37   | 2.92  | 2.61                                   | 2.17   | 1.40         |   |
| 44 | [µg/L]   | DK   | 19.2 (0.15)   | 1.25 (0.15)                      | 0.65 (0.15)  | 0.52 (0.15)   | 0.45 (0.15)                            | 0.35 (0.15)  | 0.23 (0.15)  |   |
| 45 | Bromazil   | AK   | 12.2  | 4.80                             | 3.37   | 2.92  | 2.61                                   | 2.17   | 1.40         |   |
| 46 | [µg/L]   | DK   | 1.63 (0.07)   | 0.35 (0.07)                      | 0.25 (0.07)  | 0.22 (0.07)   | 0.20 (0.07)                            | 0.18 (0.07)  | 0.15 (0.07)  |   |
| 47 | Diuron [µg/L]  | AK   | 12.2  | 4.80                             | 3.37   | 2.92  | 2.61                                   | 2.17   | 1.40         |   |
| 48 | [µg/L]   | DK   | 1.69 (0.40)   | 0.25 (0.40)                      | 0.16 (0.40)  | 0.14 (0.40)   | 0.13 (0.40)                            | 0.11 (0.40)  | 0.08 (0.40)  |   |
| 49 | Glyphosat  | AK   | 12.2  | 4.80                             | 3.37   | 2.92  | 2.61                                   | 2.17   | 1.40         |   |
| 50 | [µg/L]   | DK   | > 100   | 72.7 (77.0)                      | 6.95 (77.0)  | 3.35 (77.0)   | 2.08 (77.0)                            | 1.07 (77.0)  | 0.38 (77.0)  |   |
| 51 | Simazin  | AK   | 12.2  | 4.80                             | 3.37   | 2.92  | 2.61                                   | 2.17   | 1.40         |   |
| 52 | [µg/L]   | DK   | > 100   | 5.16 (0.13)                      | 1.96 (0.13)  | 1.40 (0.13)   | 1.11 (0.13)                            | 0.78 (0.13)  | 0.41 (0.13)  |   |
| 53 | sonst. Herbizide   | AK   | 12.2  | 4.80                             | 3.37   | 2.92  | 2.61                                   | 2.17   | 1.40         |   |
| 54 | [µg/L]   | DK   | > 100   | 91.7 (77.0)                      | 8.67 (77.0)  | 4.15 (77.0)   | 2.56 (77.0)                            | 1.30 (77.0)  | 0.45 (77.0)  |   |
| 55 | AMPA   | AK   | 12.2  | 4.80                             | 3.37   | 2.92  | 2.61                                   | 2.17   | 1.40         |   |
| 56 | [µg/L]   | DK   | > 100   | 72.7 (77.0)                      | 6.95 (77.0)  | 3.35 (77.0)   | 2.08 (77.0)                            | 1.07 (77.0)  | 0.38 (77.0)  |   |
| 57 | Die Tabelle wurde am 16/03/2018 um 15:08:10 Uhr erstellt/aktualisiert. |  |   |                                  |  |   |  |  |              |   |

### 3.3.5.2 Medienschutzbasierte Einbauwerte (Blätter "ME\_\*")

Die medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) aller Stoffkomponenten für die Einbauweisen des Straßen-, Wege und Erdbaus und für die Bahnbauweisen werden in insgesamt 14 Tabellenblättern gespeichert. Für jede Einbauweisen-Gruppe werden fünf Tabellen für die ME der Metalle und der organischen Stoffkomponenten/-gruppen geschrieben und drei weitere Tabellen für Sulfat, Chlorid und Fluorid.

Wie oben beschrieben (siehe Abschnitt 2.1.7.2), werden die ME für Metalle und organische Stoffkomponenten/-gruppen für drei Szenarien möglicher Untergrundverhältnisse geschrieben (ungünstig, günstig mit Sickerstrecke in sandigem Boden sowie günstig mit Sickerstrecke in schluffigem Boden).

Für Sulfat und Chlorid werden die ME spezifisch für jeden MEB als Funktion der MEB-Salzspezifischen Abklingkurve der Stofffreisetzung berechnet. Die Ergebnistabellen sind dementsprechend strukturiert und enthalten Werte nur für jene MEB, in welchen Sulfat und/oder Chlorid bewertungsrelevante Inhaltsstoffe darstellen. Da Fluorid weder ein deutliches und regelmäßig nachgewiesenes Abklingverhalten noch einen nennenswerten Abbau oder Rückhalt zeigt (vgl. Susset et al. 2018 und Susset und Leuchs 2011), ergibt sich eine medienschutzbasierte Beurteilung wie für Stoffe ohne Abklingverhalten im ungünstigen Fall ohne Abbau/Rückhaltung (also  $GFS \times F_{QT} \times 1,5$ ). Abbildung 3-35 zeigt ein Beispiel einer ME-Tabelle.

Abbildung 3-35 : Tabellenblatt zur Speicherung der medienenschutzbasierten Einbauwerte (ME) (hier Blatt "ME\_StraWege1" für die Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaues für die Stoffkomponenten Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom (ges.) und Kupfer).

| Tabelle 2.1                                       |  | Medienenschutzbasierte Einbauwerte von Schwermetallen und Arsen in den Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaues für die Bewertung der Zulässigkeit von mineralischen Ersatzbaustoffen im dritten Arbeitsentwurf der ErsatzbaustoffV |      |             |      |           |       |      |       |       |         |   |                  |
|---|--|--|------|-------------|------|-----------|-------|------|-------|-------|---------|---|------------------|
| Medienenschutzbasierte Einbauwerte für die Stoffe |  | Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht außerhalb von Wasserschutzgebieten  |      |             |      |           |       |      |       |       |         |   |                  |
| Antimon (Sb)                                      |  | Arsen (As)   |      | Blei (Pb)   |      | ungünstig |       |      |       |       | günstig |   |                  |
| Cadmium (Cd)                                      |  | Chrom ges. (Cr)  |      | Kupfer (Cu) |      | 1         |       |      |       |       | Sand    |   | Lehm/Schluff/Ton |
| Idf Nr. Einbauweisen                              |  | 2  |      |             |      |           |       |      |       |       |         | 3 |                  |
| 1   | Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumen gebunden   | <b>keine Modellierung geschlossener Bauweisen<br/>Bewertungen gemäß LAGA<br/>Eckpunkte (2004) und RuA-StB (E-2004)</b>   |      |             |      |           |       |      |       |       |         |   |                  |
| 2   | Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht  |  |      |             |      |           |       |      |       |       |         |   |                  |
| 3   | Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln untergebundener Deckschicht   |  |      |             |      |           |       |      |       |       |         |   |                  |
| 4   | Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht   |  |      |             |      |           |       |      |       |       |         |   |                  |
| 5   | Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platte |  |      |             |      |           |       |      |       |       |         |   |                  |
| 6   | Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung                                       |  |      |             |      |           |       |      |       |       |         |   |                  |
| 7   | Schottertragschicht (ToB) unter geb. Deckschicht   | 270  | 540  | 1242        | 353  | 1643      | 6846  | 292  | 7201  | 18876 |         |   |                  |
| 8   | Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter geb. Deckschicht   | 108  | 540  | 1080        | 123  | 11297     | 7873  | 524  | 21323 | 12933 |         |   |                  |
| 9   | Dämme oder waire gemais Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise                                 | <b>keine Modellierung geschlossener Bauweisen</b>  |      |             |      |           |       |      |       |       |         |   |                  |
| 10  | Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE  | 150  | 300  | 690         | 1192 | 3815      | 15896 | 1224 | 16718 | 43825 |         |   |                  |
| 11  | Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen  | 60.0   | 300  | 600         | 286  | 26228     | 18280 | 1217 | 49506 | 30028 |         |   |                  |
| 12  | Deckschicht ohne Bindemittel   | <b>Bewertung relativ zur Zuordnung der Materialien zu den wasserundurchlässigen Bauweisen 13</b>   |      |             |      |           |       |      |       |       |         |   |                  |
| 13  | ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht               | 7.50   | 15.0 | 34.5        | 7.50 | 21.9      | 91.3  | 7.53 | 93.3  | 252   |         |   |                  |
| 14  | Bauweisen 13 unter Plattenbelägen  | 3.00   | 15.0 | 30.0        | 3.00 | 151       | 105   | 7.00 | 284   | 173   |         |   |                  |
| 15  | Bauweisen 13 unter Pflaster  | 7.50   | 15.0 | 34.5        | 8.21 | 33.9      | 141   | 7.64 | 149   | 389   |         |   |                  |
| 16a   | Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E                     | 3.00   | 15.0 | 30.0        | 5.64 | 517       | 360   | 24.0 | 976   | 592   |         |   |                  |
| 16b   | Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analoger                     | 31.5   | 63.0 | 145         | 75.8 | 316       | 1316  | 47.9 | 1384  | 3627  |         |   |                  |
| 17a   | Schutzwälle unter kulturfähigem Boden  | 12.6   | 25.2 | 58.7        | 23.7 | 2171      | 1513  | 101  | 4097  | 2485  |         |   |                  |
| 17b   | Schutzwälle unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre   | 7.50   | 15.0 | 34.5        | 9.01 | 40.8      | 170   | 7.87 | 179   | 469   |         |   |                  |
|   |  | 3.00   | 15.0 | 30.0        | 3.06 | 281       | 196   | 13.0 | 530   | 321   |         |   |                  |
|   |  | 12.8   | 25.5 | 58.7        | 15.3 | 69.4      | 289   | 13.4 | 304   | 797   |         |   |                  |
|   |  | 5.10   | 25.5 | 51.0        | 5.21 | 477       | 333   | 22.1 | 901   | 546   |         |   |                  |

3.3.5.3 Einsatztabellen (Blätter "Einsatz\_\*")

Das abschließende Bewertungsergebnis, die Einsatztabellen der mineralischen Ersatzbaustoffe (und ggf. ihrer einzelnen Qualitätsklassen) wird in den beiden Tabellenblättern „Einsatz\_StraWege“ und „Einsatz\_Bahnbw“ für jeweils einen MEB gespeichert. Bei einer vollständigen Bewertung aller MEB wird das Ergebnis des jeweils aktuell betrachteten MEB in diese Blätter eingetragen und dann im WORD-Format exportiert.

Ein „+“ zeigt an, dass die betrachtete Materialklasse des Ersatzbaustoffs in der betreffenden Einbauweise verwendet werden kann, ein „-“ bedeutet, dass eine Verwendung nicht zulässig ist. Eine automatische Generierung von Fußnoten – wie sie in der Kabinettsfassung der EBV verwendet werden – erfolgt dabei nicht. Über eine individuelle Bewertung können die diesen Fußnoten zu Grunde liegenden medienschutzbasierten Einbauwerte jederzeit ermittelt und die Bewertung in allen Einzelheiten geprüft werden (siehe hierzu auch Abschnitt 3.4.3.2 sowie die Beispiele in Abschnitt 4.2.1).

Eine automatisierte Bewertung der Einbaumöglichkeiten in geschlossenen (bzw. nicht oder gering wasserdurchlässigen) Bauweisen wird in BEMEB nicht vorgenommen. Die Bewertung der nicht oder gering wasserdurchlässigen Bauweisen war nicht Gegenstand der verschiedenen UBA-Vorhaben, da diese – wie in Susset und Leuchs (2011) erläutert – nicht medienschutzbasiert beurteilt werden können. Für die Kabinettsfassung der MantelV wurden diese Bauweisen analog zu den Beurteilungen nach LAGA Eckpunktepapier (2004) und nach RuA-StB (E 2004) bewertet (detailliert in Susset et al. 2018 und Susset und Leuchs 2011).

Die Bewertung von Bauweisen innerhalb von Wasserschutzgebieten (Spalten 4-6) erfolgt in Relation zu den medienschutzbasierten Bewertungen in den Spalten 1-3 entsprechend der Abstufung nach Susset und Leuchs (2011). Wie in Susset et al. (2018; Kapitel 4.5.2.3) erläutert, folgt die Bewertung folgenden Regeln:

- ▶ Die Bauweisen innerhalb von Wasserschutzgebieten sind nur im günstigen Fall (mindestens Sand) zulässig.
- ▶ Wenn der ungünstige Fall (Spalte 1) unmittelbar nach Fachkonzept positiv beurteilt wird, sind alle Bauweisen innerhalb von Wasserschutzgebieten zulässig. Für die Spalten 1 bis 6 gilt in diesem Fall: + / + / + / + / + / +.
- ▶ Wenn der ungünstige Fall (Spalte 1) nach Fachkonzept negativ beurteilt wird, sind Bauweisen in WSG III A bzw. HSG III zulässig mit der Einschränkung BU (B: zugelassen im Abstand von mindestens 1 Kilometer von der Fassungsanlage und U: zugelassen ausschließlich für den günstigen Fall bei Unterlagerung mit Lehm/Schluff/Ton) und WSG III B bzw. HSG IV mit der Einschränkung U. Wasservorranggebiete sind zugelassen ohne weitere Einschränkung. Für die Spalten 1 bis 6 gilt dann: - / + / + / BU / U / +.
- ▶ Wenn der günstige Fall “Sand“ (Spalte 2) nach Fachkonzept negativ beurteilt wird, sind Bauweisen in WSG III A bzw. HSG III und WSG III B bzw. HSG IV nicht zugelassen. Wasservorranggebiete sind zugelassen mit der zusätzlichen Einschränkung “U“ für günstige Verhältnisse und Bodentyp “Lehm/Schluff/Ton“. Für die Spalten 1 bis 6 gilt hier: - / - / + / - / - / U.

3-36 Tabellenblatt zur Speicherung der Einsatztabelle des jeweils aktuell bewerteten MEB (hier Blatt “Einsatz\_StraWege“ für die Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für den MEB BG-3)

Abbildung :

|    | A   | B  | C  | D       | E | F                                   | G       | H | I                     |
|----|---|--|--|---------|---|-------------------------------------|---------|---|-----------------------|
| 2  | <b>Tabelle 3.2: Einsatzmöglichkeiten im Straßen-, Wege- und Erdbau</b>            |  |  |         |   |                                     |         |   |                       |
| 3  | <b>BG-3</b>   |  | Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht   |         |   |                                     |         |   |                       |
| 4  |   |  | außerhalb von Wasserschutzbereichen  |         |   | innerhalb von Wasserschutzbereichen |         |   |                       |
| 5  |   |  | ungünstig  | günstig |   | WSG IIIA, HSG III                   | günstig |   | Wasservor-ranggebiete |
| 6  |   |  |  |         |   |                                     |         |   |                       |
| 7  | lfd Nr.   | Einbauweisen   | 1  | 2       | 3 | 4                                   | 5       | 6 |                       |
| 8  | 1   | Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden  | <b>keine Modellierung geschlossener Bauweisen<br/>Bewertungen gemäß LAGA<br/>Eckpunkte (2004) und RuA-StB (E-2004)</b> |         |   |                                     |         |   |                       |
| 9  | 2   | Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht  |  |         |   |                                     |         |   |                       |
| 10 | 3   | Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht  |  |         |   |                                     |         |   |                       |
| 11 | 4   | Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht   |  |         |   |                                     |         |   |                       |
| 12 | 5   | Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten                        |  |         |   |                                     |         |   |                       |
| 13 | 6   | Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung   |  |         |   |                                     |         |   |                       |
| 14 | 7   | Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht   | -  | +       | + | BU                                  | U       | + |                       |
| 15 | 8   | Frostschuttschicht (ToB), Bodenverbesserung, und Unterbau bis 1m Dicke ab Planum, unter gebundener Deckschicht   | -  | -       | + | -                                   | -       | U |                       |
| 16 | 9   | Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise  | <b>keine Modellierung geschlossener Bauweisen</b>  |         |   |                                     |         |   |                       |
| 17 | 10  | Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE  | -  | +       | + | BU                                  | U       | + |                       |
| 18 | 11  | Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen  | -  | +       | + | BU                                  | U       | + |                       |
| 19 | 12  | Deckschicht ohne Bindemittel   | -  | +       | + | BU                                  | U       | + |                       |
| 20 | 13  | ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum, Verfüllung von Leitungsgräben und Unterbau bis 1m Dicke ab Planum, unter Deckschicht ohne Bindemittel | -  | -       | - | -                                   | -       | - |                       |
| 21 | 14  | ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum, Verfüllung von Leitungsgräben und Verfüllung von Baugruben unter Plattenbelägen                       | -  | -       | - | -                                   | -       | - |                       |
| 22 | 15  | ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum, Verfüllung von Leitungsgräben und Verfüllung von Baugruben unter Pflaster                             | -  | -       | - | -                                   | -       | - |                       |
| 23 | 16a   | Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE                                 | -  | -       | - | -                                   | -       | - |                       |
| 24 | 16b   | Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE, mit Kapillarsperre             | -  | -       | + | -                                   | -       | U |                       |
| 25 | 17a   | Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht   | -  | -       | - | -                                   | -       | - |                       |
| 26 | 17b   | Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht, mit Kapillarsperre   | -  | -       | - | -                                   | -       | - |                       |
| 27 | Die Tabelle wurde am 20/03/2019 um 11:18:03 Uhr erstellt/aktualisiert.            |  |  |         |   |                                     |         |   |                       |
| 14 | ME_Bahnbw3 ME_Bahnbw4 ME_Bahnbw5 ME_StraWegeS1 ME_StraWegeS2 ME_StraWegeS3 ME_Bah |  |  |         |   |                                     |         |   |                       |

### 3.4 Graphische Benutzeroberfläche

#### 3.4.1 Menüleiste

Alle Funktionalitäten des BEMEB-Werkzeugs, welche durch eine graphische Benutzeroberfläche und entsprechende Dialoge geführt werden, sind in einer eigenen Menüleiste „BemEb“ gruppiert (Abbildung 3-37). Je nachdem, welche Funktion vom Anwender gewählt wird, werden spezifische Benutzerformulare aufgerufen, die in den folgenden Abschnitten im Detail beschrieben werden.

Abbildung 3-37: Menüleiste des BEMEB-Werkzeugs in Excel



### 3.4.2 Daten laden oder sichern

Die für die Bewertung mit BEMEB erforderlichen Eingangsdaten können von lokalen und externen Speicherorten geladen werden und lokal abgespeichert werden. Die erforderlichen Daten sind in vier Kategorien organisiert (siehe auch 3.3.2): chemische Verbindungen, Böden, Einbauweisen und Materialwerte. Für jede Kategorie stehen dieselben Optionen zur Verfügung (Abbildung 3-38).

Alle Eingangsdaten werden außerhalb des BEMEB-Werkzeugs im xml-Format verwaltet (siehe auch Anhang 6.3).

Abbildung 3-38: Optionen zum Laden oder Speichern von Daten (hier bezüglich der chemischen Verbindungen)



Für das Laden und Speichern von Eingangsdaten aus einem (in einen) lokalen Dateordner wird ein entsprechender Dialog aufgerufen, wobei der standardmäßig verwendete Ordner für lokal gespeicherte Eingangsdaten der Unterordner „inputdata“ ist.

Die Eingangsdaten können zudem von einer externen „offiziellen“ Quelle (herunter)geladen werden. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass geprüfte Daten auf dem aktuellsten Stand eingelesen werden. Änderungen in der Datengrundlage, beispielsweise aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse, können so einfach, bequem und zeitnah berücksichtigt werden. Die Daten werden dazu zunächst vom Server (Internetzugang erforderlich) heruntergeladen und im Unterordner „inputdata/offiziell“ gespeichert und anschließend in BEMEB geladen.

### 3.4.3 Bewertungsmöglichkeiten (intern)

Das BEMEB-Tool stellt verschiedene Möglichkeiten der Bewertung zur Verfügung – von einer vollständigen Bewertung der Einbaumöglichkeiten aller mineralischen Ersatzbaustoffe (MEB) nach

Abbildung :  
EBV (Standardbewertung) auf Basis des UBA-Fachkonzepts bis hin zur individuellen Bewertung von einzelnen MEB oder zur detaillierten Betrachtung einzelner Stoffkomponenten oder -gruppen. Diese „in-



ternen“ Bewertungsmöglichkeiten basieren alle auf analytischen Modellen zu Beschreibung der Stofffreisetzung im Quellterm, der Stoffanreicherung in der Sickerstrecke zwischen UK Bauwerk und OdB und des Stofftransports im Transportterm (siehe Abschnitte 2.2, 2.3 und 2.4). Sie sind in der Menüleiste unter „Bewertungsmöglichkeiten (intern)“ zu finden“ (Abbildung 3-39). Einen Überblick über die BEMEB-Bewertungsoptionen gibt Tabelle 3-5.

Abbildung 3-39: Interne Bewertungsmöglichkeiten in der BEMEB-Menüleiste



Tabelle 3-5: Übersicht der internen Bewertungsmöglichkeiten der BEMEB-Software

| Bewertungsoption  | Beschreibung   |
|---|--|
| Express-Bewertung<br>(Standardbewertung leicht gemacht) | <i>Mit drei Mausklicks zu einer vollständigen Bewertung</i><br>In einem Vorgang werden zunächst automatisch für alle Einbauweisen, Verbindungen, Böden und mineralischen Ersatzbaustoffe der EBV die maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen und medianschutzbasierte Einbauwerte berechnet und diese Ergebnisse in entsprechende Tabellenblätter eingetragen. Anschließend wird für alle Materialklassen der mineralischen Ersatzbaustoffe eine Tabelle der Einbaumöglichkeiten erstellt. |
| Individuelle Bewertung                                  | <i>Bewertung einzelner mineralischer Ersatzbaustoffe im Detail</i><br>Einzelne mineralische Ersatzbaustoffe werden für bestimmte Fälle (Einbauweise, Bodentyp) bewertet und die Ergebnisse im Detail dargestellt.<br>Die Parameter für Quellterm und Transportterm können hier auch abweichend vom Standardfall festgelegt werden, um deren Bedeutung einzeln zu analysieren, bspw. um die Sensitivität des Bewertungsergebnisses in Bezug auf einzelne Parameterwerte abzuschätzen.           |
| Suche Einsatzmöglichkeiten                              | <i>Mit einem Mausklick zu den Einsatzmöglichkeiten eines Ersatzbaustoffs</i><br>Für einzelne mineralische Ersatzbaustoffe werden für alle Einbauweisen die Einbaumöglichkeiten geprüft und das Ergebnis dieser Prüfung in entsprechende Tabellenblätter eingetragen.   |

### 3.4.3.1 Express-Bewertung

Die Express-Bewertung ist als Standardoption für die Bewertung der Einbaumöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen gedacht, insbesondere für den Fall, wenn infolge einer Änderung der Bewertungsgrundlagen, beispielsweise aufgrund neuer fachtechnischer Erkenntnisse

(Soprtionsisothermenparameter o. ä.), eine neue Berechnung der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen und der medienschutzbasierten Einbauwerte erforderlich wird und auf dieser Grundlage die Einbaumöglichkeiten der mineralischen Ersatzbaustoffe neu zu bewerten sind. So wurden bereits durch Susset et al. (2018) mit BEMEB Berechnungen unter Berücksichtigung der neuen Geringfügigkeitsschwellenwerte 2016 der LAWA (2017) durchgeführt. Danach resultieren einzelne geänderte medienschutzbasierte Einbauwerte für Arsen und Fluorid. Susset et al. (2018; Kapitel 4.5.1) erläutern die Änderungen von Materialwerten und Fußnoten in der EBV, die dann erforderlich wären, wenn im Rahmen der Bundesratsabstimmungen eine Umsetzung der GFS 2016 (LAWA 2017) in der EBV beschlossen wird.

In der Express-Bewertung wird eine Bewertung des jeweiligen Standardszenarios nach Abschnitt 2.1.7.1 vorgenommen.

Die Express-Bewertung kann als komplette Neubewertung oder als Aktualisierung durchgeführt werden (siehe Tabelle 3-6). Bei einer Aktualisierung werden nur jene Fälle, d.h. Kombinationen Stoffkomponente-Einbauweise-Böden (bei Organika und Metallen) bzw. Stoffkomponente-EinbauweiseErsatzbaustoff (bei Salzen), neu bewertet, für die Änderungen in den Eingangsparametern angezeigt werden (siehe Abschnitt 0). Die neu zu bewertenden Fälle werden von der BEMEB-Software automatisch ermittelt und bewertet. Die Ergebnistabellenblätter in BEMEB (maximal zulässige Quelltermkonzentrationen, ME, Einbaumöglichkeiten) werden standardmäßig komplett überschrieben, d.h. es werden nicht nur die Ergebnis-Werte der neu bewerteten Fälle aktualisiert, sondern auch alle anderen Werte aus den jeweiligen Ergebnisdateien gelesen und in die Tabellenblätter eingetragen. Ist Letzteres nicht erwünscht, ist im Benutzerdialog (Abbildung 3-40) das entsprechende Kontrollkästchen zu aktivieren.

Ein optionaler Bereich „Erläuterung, Hilfe“ gibt Hinweise zur Bedienung des Formulars.

Die Dauer der Bewertung ist abhängig von der Zahl der neu zu bewertenden Fälle. Eine komplette Neubewertung benötigt je nach Computerleistung und gewünschter Genauigkeit der iterativen Suche nach der maximal zulässigen Quelltermkonzentration (siehe dazu Abschnitt 2.4.2) zwischen 20 und 45 Minuten. Wenn bereits Ergebnisse aus einer früheren kompletten Bewertung vorliegen, ist eine Neubewertung als Aktualisierung daher einer kompletten Neubewertung in aller Regel vorzuziehen. Der Fortschritt der Bewertung wird angezeigt.

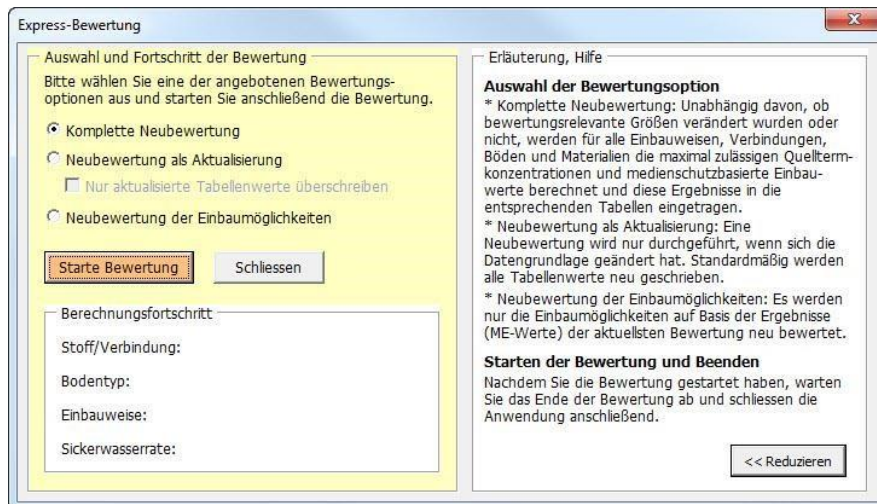
Die Benutzeroberfläche zur Express-Bewertung zeigt Abbildung 3-40.

Tabelle 3-6: Übersicht der verschiedenen Modi der Express-Bewertung

| Modus                  | Beschreibung   |
|------------------------|--|
| Komplette Neubewertung | Unabhängig davon, ob bewertungsrelevante Größen verändert wurden oder nicht, werden für alle Einbauweisen, Verbindungen, Böden und mineralischen Ersatzbaustoffe die maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen, die medienschutzbasierten Einbauwerte und die Einbaumöglichkeiten berechnet und diese Ergebnisse in die entsprechenden Tabellen eingetragen. |

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Neubewertung als Aktualisierung      | Eine Neubewertung wird nur durchgeführt, wenn sich die Datengrundlage geändert hat.<br>Standardmäßig werden alle Tabellenwerte neu geschrieben. Wenn nur die neu berechneten Werte geschrieben werden sollen, dann muss der Haken an der entsprechenden Option gesetzt werden. |
| Neubewertung der Einbaumöglichkeiten | Es werden nur die Einbaumöglichkeiten auf Basis der Ergebnisse (MEWerte) der aktuellsten Bewertung neu bewertet.   |

Abbildung 3-40: Benutzerführung „Express-Bewertung“



### Komplette Neubewertung

In diesem Modus werden folgende Programmablaufschritte durchlaufen:

1. Vorbereitung der Bewertung, v.a. Ermittlung der zu bewertenden Stoffkomponenten;
2. Berechnung der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen der Organika und Metalle für die alle Bewertungsfälle, d.h. für alle Kombinationen Stoffkomponente-Einbauweise-Böden (bei Organika und Metallen) bzw. Stoffkomponente-Einbauweise-mineralischer Ersatzbaustoff (bei Salzen) und Belegung der BEMEB-Datenfelder;
3. Berechnung der medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) der Organika und Metalle für alle Bewertungsfälle auf Basis der in Schritt 2 berechneten Werte der maximal zulässigen Quelltermkonzentration;
4. Berechnung der medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) der Salze für alle Bewertungsfälle auf Basis der in Schritt 2 berechneten Werte der maximal zulässigen Quelltermkonzentration;
5. Export der in den Schritten 2 bis 4 berechneten Datenfelder in die entsprechenden Dateien im Unterordner „data“ (siehe Tabelle 3-7);
6. Befüllung der Tabellenblätter mit den maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen für Organika und Metalle: maxQTK\_StraWege\_Sand, maxQTK\_StraWege\_SLT, maxQTK\_Bahnbw\_Sand und maxQTK\_Bahnbw\_SLT;
7. Befüllung der Tabellenblätter mit den medienschutzbasierten Einbauwerten für Organika und Metalle: ME\_StraWege1, ME\_StraWege2, ME\_StraWege3, ME\_StraWege4, ME\_StraWege5 sowie

- ME\_Bahnbw1, ME\_Bahnbw2, ME\_Bahnbw3, ME\_Bahnbw4 und ME\_Bahnbw5;  
 8. Befüllung der Tabellenblätter mit den medien-schutzbasierten Einbauwerten für Salze:  
 ME\_StraWegeS1, ME\_StraWegeS2 sowie ME\_BahnbwS1 und ME\_BahnbwS2.

Der Zeitpunkt der Bewertung wird am Tabellenende vermerkt.

Tabelle 3-7: Übersicht der Ergebnisdateien der Bewertung

| Name der Datei       | Beschreibung   |
|----------------------|--|
| mqt_c_btc.data.txt   | Maximal zulässige Quelltermkonzentrationen bei Anwendung des Durchbruchkriteriums  |
| mqt_c_accum.data.txt | Maximal zulässige Quelltermkonzentrationen bei Anwendung des Anreicherungskriteriums                                     |
| kd.data.txt          | Sorptionsverteilungskoeffizient aus der Linearisierung der Isotherme für die maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen |
| me_salts.data.txt    | Medien-schutzbasierte Einbauwerte für die Salze  |
| me.data.txt          | Medien-schutzbasierte Einbauwerte für die Organika und Metalle   |

### Neubewertung als Aktualisierung

In diesem Modus werden nur ausgewählte Fälle neu bewertet und die Ergebnisse einer früheren Bewertung aktualisiert. Die zu durchlaufenden Programmablaufschritte unterscheiden sich geringfügig von den oben beschriebenen Schritten für den Modus „Komplette Bewertung“ hinsichtlich des Einlesens und Aktualisierens der Bewertungsergebnisse:

1. Vorbereitung der Bewertung, v.a. Ermittlung der Fälle, d.h. der Kombinationen Stoffkomponente-Einbauweise-Böden (bei Organika und Metallen) bzw. Stoffkomponente-Einbauweise-Ersatzbaustoff (bei Salzen) neu bewertet werden müssen;
2. Einlesen der Ergebnisse aus der letzten vollständigen Bewertung – sofern vorhanden – in die BEMEB-Datenfelder. Diese verteilen sich auf die Inhalte von insgesamt fünf Dateien, die im Unterordner „data“ abgelegt sind (siehe Tabelle 3-7). Falls keine Ergebnisse vorhanden sind, werden alle Fälle neu bewertet (gleichbedeutend mit Modus „Komplette Neubewertung“ – siehe oben);
3. Berechnung der maximal zulässigen Quelltermkonzentration der Organika und Metalle für die in Schritt 1 bestimmten Fälle und Aktualisierung der BEMEB-Datenfelder;
4. Berechnung der medien-schutzbasierten Einbauwerte (ME) der Organika und Metalle für die in Schritt 1 bestimmten Fälle auf Basis der in Schritt 3 berechneten Werte der maximal zulässigen Quelltermkonzentration und Aktualisierung der BEMEB-Datenfelder;
5. Berechnung der medien-schutzbasierten Einbauwerte (ME) der Salze für die in Schritt 1 bestimmten Fälle und Aktualisierung der BEMEB-Datenfelder;

6. Export der in Schritt 3 bis 5 aktualisierten Datenfelder in die entsprechenden Dateien im Unterordner „data“;
7. Aktualisieren der Tabellenblätter mit den maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen für Organika und Metalle: “maxQTK\_StraWege\_Sand“, “maxQTK\_StraWege\_SLT“, “maxQTK\_Bahnbw\_Sand und “maxQTK\_Bahnbw\_SLT“;
8. Aktualisieren der Tabellenblätter mit den medienrechtbasierten Einbauwerten für Organika und Metalle: “ME\_StraWege1“ bis “ME\_StraWege5“ sowie “ME\_Bahnbw1“ bis “ME\_Bahnbw5“; 9. Aktualisieren der Tabellenblätter mit den medienrechtbasierten Einbauwerten für Salze: “ME\_StraWegeS1“, “ME\_StraWegeS2“ sowie “ME\_BahnbwS1“ und “ME\_BahnbwS2“.

Die neu zu bewertenden Fälle werden anhand der Änderungen in den Eingangsdaten ermittelt. Werden Eingangsdaten neu eingelesen, erfolgt eine Prüfung auf Datenänderungen, d.h. die neu eingelesenen Daten werden mit den „alten“ Daten verglichen, die zuvor in dem entsprechenden BEMEB-Tabelle abgelegt waren. Änderungen werden durch einen Eintrag („1“) in Tabellenblattspalte E angezeigt. Diese Einträge können auch händisch vom Anwender selbst gemacht werden (unabhängig davon, ob eine Datenaktualisierung vorgenommen wurde oder nicht), beispielsweise wenn einzelne ausgewählte Fälle neu bewertet werden sollen.

In allen relevanten Tabellen werden die aktualisierten Tabellenwerte durch rote Schrift gekennzeichnet. Der Zeitpunkt der Bewertung wird am Tabellenende vermerkt.

### **Neubewertung der Einbaumöglichkeiten**

In diesem Modus werden zunächst die zuletzt berechneten medienrechtbasierten Einbauwerte aus der entsprechenden Datei aus dem Ordner „data“ gelesen (siehe Tabelle 3-7) und in die entsprechenden BEMEB-Ergebnis-Tabelleblätter eingetragen: “ME\_StraWege1“ bis “ME\_StraWege5“, “ME\_Bahnbw1“ bis “ME\_Bahnbw5“, “ME\_StraWegeS1“, “ME\_StraWegeS2“ sowie “ME\_BahnbwS1“ und “ME\_BahnbwS2“. Damit wird sichergestellt, dass evtl. (auch unabsichtlich) durchgeführte manuelle Änderungen der ME-Werte korrigiert werden.

Anschließend wird die Benutzerführung auf das Formular „Ergebnisausgabe“ weitergeleitet, wo die zur Neubewertung der Einbaumöglichkeiten erforderlichen Optionen bereits gewählt sind und die Neubewertung gestartet werden kann. Die Einbaumöglichkeiten aller mineralischen Ersatzbaustoffe werden dann mit Hilfe des Berechnungstabelleblatts „Material\_cal“ bewertet und in entsprechenden Tabellen im MS-Word- und/oder MS-Excel-Format ausgegeben.

#### **3.4.3.2 Individuelle Bewertung**

Die individuelle Bewertung erlaubt dem Anwender

- ▶ Bewertungsfälle der EBV-Standardbewertung für einzelne mineralische Ersatzbaustoffe in bestimmten Bauweisen näher zu betrachten und
- ▶ Fälle zu bewerten, die von den festgelegten Szenarien der EBV-Standardbewertung abweichen.

Wird die individuelle Bewertung in der BEMEB-Menüleiste ausgewählt, dann öffnet sich ein Formular, in dem der Anwender den gewünschten Bewertungsfall spezifizieren kann (Abbildung 3-41). Im Eingabebereich „Auswahl des gewünschten Falles“ können dazu in vier Listenfeldern die

Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs, die Stoffkomponente, die Einbauweise und der Bodentyp gewählt werden. Wenn das Kontrollkästchen „nur materialrelevante Komponenten“ aktiviert ist, werden im Listenfeld „Stoffkomponente(n)“ nicht alle Stoffkomponenten, sondern nur die für den gewählten Ersatzbaustoff relevanten Komponenten angezeigt.

In Abhängigkeit der Eingaben im Eingabebereich „Auswahl des gewünschten Falles“ werden in zwei weiteren Eingabebereichen die „Eigenschaften des Quellterms“ und die „Eigenschaften des Transportterms“ für das entsprechende Standardszenario der EBV angezeigt. Für eine Einzelfallbewertung können diese Eingabegrößen verändert werden.

Ein optionaler Bereich „Erläuterung, Hilfe“ gibt Hinweise zur Bedienung des Formulars.

Für die Bewertung können entweder alle materialrelevanten Stoffkomponenten oder einzelne Komponenten berücksichtigt werden – entsprechend der vom Anwender im Listenfeld „Stoffkomponente(n)“ getroffenen Auswahl. Bei der Bewertung von Einzelkomponenten werden sehr detaillierte Bewertungsergebnisse inklusive graphischen Darstellungen erstellt. Diese werden im Unterordner „system“ abgelegt (siehe Tabelle 3-8) und nach erfolgter Berechnung automatisch in einem Ergebnis„Viewer“ angezeigt.

Hinweis: Die Durchführung individueller Bewertungen führt weder zu einer Änderung der Inhalte der Ergebnistabellenblätter in BEMEB, noch zu einer Aktualisierung der Dateien im Unterordner „data“.

Tabelle 3-8: Übersicht der Ergebnisdateien der individuellen Bewertung für Einzelkomponenten

| Name der Datei                             | Beschreibung   |
|--|--|
| source_aktuell_ak.gif                      | Konzentrationsverlauf an der UK des Bauwerks im Simulationszeitraum bis Ende des Bewertungszeitraums und darüber hinaus bei Anwendung des Anreicherungskriteriums                            |
| btc_aktuell_ak.gif                         | Konzentrationsverlauf am OdB im Simulationszeitraum bis Ende des Bewertungszeitraums und darüber hinaus bei Anwendung des Anreicherungskriteriums (nur im Falle von Organika oder Metallen)  |
| prof_aktuell_ak.gif                        | Konzentrationsverlauf entlang der Sickerstrecke zum Ende des Bewertungszeitraums bei Anwendung des Anreicherungskriteriums (nur im Falle von Organika oder Metallen)                         |
| prof_akt_ak_20.gif bis prof_akt_ak_200.gif | 10 Plots zur Darstellung der zeitlichen Entwicklung des Konzentrationsverlaufs entlang der Sickerstrecke bei Anwendung des Anreicherungskriteriums (nur im Falle von Organika oder Metallen) |
| btc_aktuell_dk.gif                         | Konzentrationsverlauf am OdB im Simulationszeitraum bis Ende des Bewertungszeitraums und darüber hinaus bei Anwendung des Durchbruchkriteriums (nur im Falle von Organika oder Metallen)     |
| prof_aktuell_dk.gif                        | Konzentrationsverlauf entlang der Sickerstrecke zum Ende des Bewertungszeitraums bei Anwendung des Durchbruchkriteriums (nur im Falle von Organika oder Metallen)                            |

|   |  |
|---|--|
| source_aktuell_dk.gif                         | Konzentrationsverlauf an der UK des Bauwerks im Simulationszeitraum bis Ende des Bewertungszeitraums und darüber hinaus bei Anwendung des Durchbruchkriteriums (nur im Falle von Organika oder Metallen) |
| prof_akt_dk_20.gif bis<br>prof_akt_dk_200.gif | 10 Plots zur Darstellung der zeitlichen Entwicklung des Konzentrationsverlaufs entlang der Sickerstrecke bei Anwendung des Durchbruchkriteriums (nur im Falle von Organika oder Metallen)                |

Bei der Bewertung von allen materialrelevanten Stoffkomponenten erfolgt die Ergebnisausgabe tabellarisch (siehe Abbildung 3-41).

In Abschnitt 4.2.1 finden sich Anwendungsbeispiele für die individuelle Bewertung mit BEMEB.

Abbildung

3-41: Benutzerformular „Individuelle Bewertung“ mit Ergebnis einer individuellen Bewertung für alle relevanten Stoffkomponenten eines mineralischen Ersatzbaustoffs (hier für die Materialklasse RC-1) in einer bestimmten Einbauweise (hier: 10 - Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE)

**Individuelle Bewertung**

Bewertung mit ggf. Einzelfall-spezifischen Parameterwerten

**Auswahl des zu bewertenden Falles**

Ersatzbaustoff(klasse): RC-1

Stoffkomponente(n): alle relevanten Verb.

nur materialrelevante Komponenten

Einbauweise: 10

Bodentyp: Sand

**Berechne bewertungsrelevante Grenzwerte**

Starte Berechnung | Bewertung abgeschlossen.

Ergebnis für alle materialrelevanten Verbindungen:  
 max. zulässige Quelltermkonzentration (MQTK),  
 medianschutzbasierter Einbauwert (ME) im Vergleich  
 zum Materialwert (MW) [alle Werte gerundet,  
 Metalle+Organika in µg/L, Salze in mg/L]

| Verbindung | MQTK   | PA     | ME       |        | MW  |
|------------|--------|--------|----------|--------|-----|
|            |        |        | ungünst. | günst. |     |
| 15 EPA     | 143    | a      | 5.0      | 4290   | 6   |
| Chrom      | 874    | a      | 300      | 26230  | 150 |
| Kupfer     | 609    | a      | 600      | 18280  | 110 |
| Vanadium   | 583    | a      | 600      | 17490  | 120 |
| Sulfat     | >MWmax | >MWmax | >MWmax   | >MWmax | 600 |

maßgebendes Kriterium: a=AK, d=DK, g=GFS/BM, q=Q, term

Verdünnungsfaktor: 20.00

Verhältnismäßigk.faktor: 1.5 (Sulfat: in MQTK berücks.)

Einbaumöglichkeiten des gewählten MEB:  
**ungünstige Verhältnisse: Einbau nicht möglich**  
**günstige Verhältnisse: Einbau möglich**

**Eigenschaften des Quellterms**

Infiltrationsrate: 1065 [mm/Jahr]

Mittlere Sickerwasser-rate an der Bauwerk-UK: 67 [mm/Jahr]

Schichtdicke: 400 [cm]

Standardszenario: Organika u. Metalle als unendliche Quelle, Salze als abklingende Quelle

Organika u. Metalle wie Salze als abklingende Quelle, sofern Kd-Werte verfügbar - andernfalls als unendliche Quelle

Organika u. Metalle wie Salze als abklingende Quelle, sofern Kd-Werte verfügbar - andernfalls als endliche Quelle

Dauer des Eintrags: [ ] [Jahre]

Zurücksetzen auf Standardwerte

**Eigenschaften des Transportterms**

Porosität des Bodens: 0.17 [-]

Lagerungsdichte: 1.42 [kg/L]

Abbauratenkonstante: stoffspez. [1/Jahr]

Distanz zum O.d.B.: 1 [m]

Dispersivität: 10 [% d. Distanz]

Bewertungszeitraum: 200 [Jahre]

Ausschöpfungsgrad der Filterkapazität: 50 [%]

Zurücksetzen auf Standardwerte

**Erläuterung, Hilfe**

**Auswahl**  
 Für den zu bewertenden Einzelfall können zunächst anhand der vier Auswahllisten für Stoffkomponente, Ersatzbaustoff, Einbauweise und Bodentyp die Parameterwerte des zugrundeliegenden Standardfalls geladen werden.

**Eigenschaften des Quellterms**  
 Der Wert für die Sickerwasserrate und der Quelltermtyp werden zunächst der gewählten Einbauweise bzw. der gewählten Stoffkomponente entsprechend gesetzt. Diese Standardwerte können bei Bedarf geändert werden.  
 Alle Parameterwerte des Transportterms können auf die Standardwerte des jeweiligen Falls zurückgesetzt werden.

**Eigenschaften des Transportterms**  
 Die Werte für Porosität, Lagerungsdichte und Abbauratenkonstante werden zunächst dem gewählten Bodentyp bzw. der gewählten Stoffkomponente entsprechend gesetzt. Diese Standardwerte können bei Bedarf geändert werden (Abbauratenkonstante nur bei Bewertung von Einzelkomponenten).  
 Weiter gelten für den Standardfall gemäß EBV folgende Annahmen:  
 - Distanz zum ODB = 1 m  
 - Dispersivität = 10% dieser Distanz  
 - Zeitraum = 200 Jahre  
 - Ausschöpfungsgrad der Feldkapazität = 50%

Diese Parameterwerte können für die Einzelfallbewertung ebenfalls geändert werden.  
 Alle Parameterwerte des Transportterms können auf die Standardwerte des jeweiligen Falls zurückgesetzt werden.

**Bewertung**  
 Durch einen Klick auf die Befehlsschaltfläche "Starte Berechnung" wird die Bewertung gestartet. Der Verlauf und das Ergebnis der Berechnung werden angezeigt. Die Darstellung ist davon abhängig, ob eine einzelne Stoffkomponente bewertet wird oder alle für den ausgewählten Ersatzbaustoff relevanten Stoffkomponenten.

<< Reduzieren

### 3.4.3.3 Suche geeigneter Einbauweisen

Mit dieser Bewertungsoption werden für einzelne Materialklassen der mineralischen Ersatzbaustoffe für alle Einbauweisen die Einbaumöglichkeiten geprüft und das Ergebnis dieser Prüfung in die Tabellenblätter Einsatz\_StraWege und Einsatz\_Bahnbw eingetragen. Die Grundlage für diese Prüfung sind die Materialwerte der gewählten Materialklasse (werden automatisch angezeigt) und die zuvor berechneten medianschutzbasierten Einbauwerte (ME) der für die gewählte Materialklasse relevanten Stoffkomponenten. Prinzipiell stehen drei Optionen zur Verfügung (siehe Abbildung 3-42):

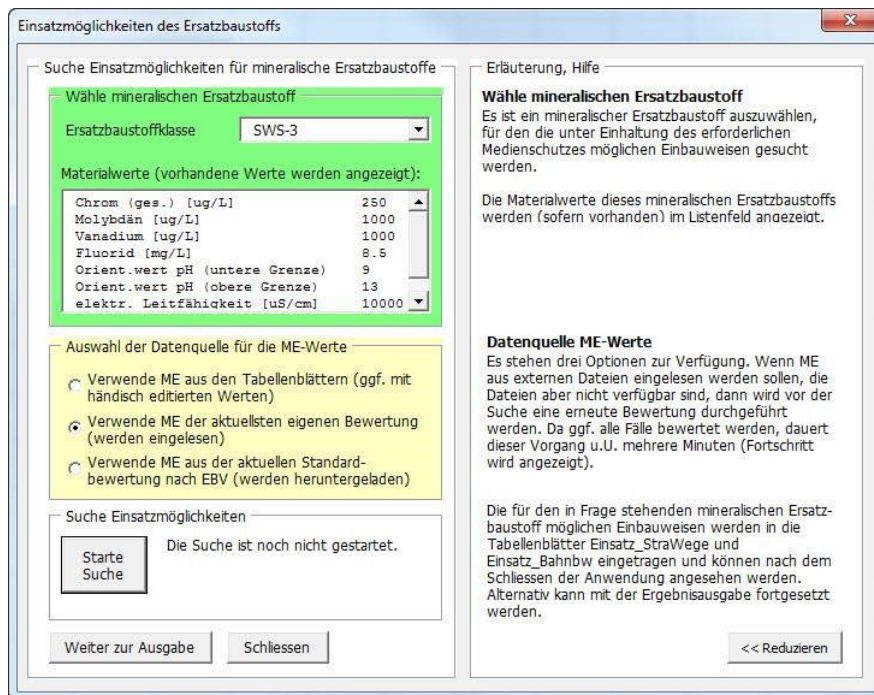
- ▶ *Verwende ME aus den Tabellenblättern (ggf. mit händisch editierten Werten):* Die aktuell in den Tabellenblättern (ME\_\*) eingetragenen ME werden verwendet;
- ▶ *Verwende ME der aktuellsten eigenen Bewertung (werden eingelesen):* Das Ergebnis einer früheren Bewertung wird verwendet, die Daten werden aus den entsprechenden Dateien im Unterordner „data“ eingelesen (siehe auch Tabelle 3-7);



- *Verwende ME aus der aktuellen Standardbewertung nach EBV (werden heruntergeladen):* Die aktuellen, der Kabinettsfassung der EBV zugrundeliegenden ME werden verwendet, die Daten werden aus den entsprechenden Dateien vom Datenserver heruntergeladen.

Wenn ME-Werte aus externen Dateien eingelesen werden sollen, diese Dateien aber nicht verfügbar sind, dann wird vor der Suche eine erneute Bewertung durchgeführt. Da ggf. alle Fälle bewertet werden, dauert dieser Vorgang u.U. mehrere Minuten (der Fortschritt wird angezeigt).

Abbildung 3-42: Benutzerführung „Einsatzmöglichkeiten des Ersatzbaustoffs“



### 3.4.4 Ergebnisausgabe, Berichte

Für alle internen, d.h. auf den oben beschriebenen analytischen Modellen nach dem UBA-Fachkonzept basierenden Bewertungsmöglichkeiten, können die Ergebnisse im Excel- und/oder Word-Format abgespeichert werden. Die hierzu notwendigen Angaben werden im Benutzerformular „Ergebnisausgabe“ gemacht (siehe Abbildung 3-44), das entweder über die Weiterleitung von den Formularen zur

(internen) Bewertung erreicht wird oder durch Aufruf über die BEMEB-Menüleiste (Abbildung 3-43).

Abbildung 3-43: Ergebnisausgabemöglichkeiten in der BEMEB-Menüleiste

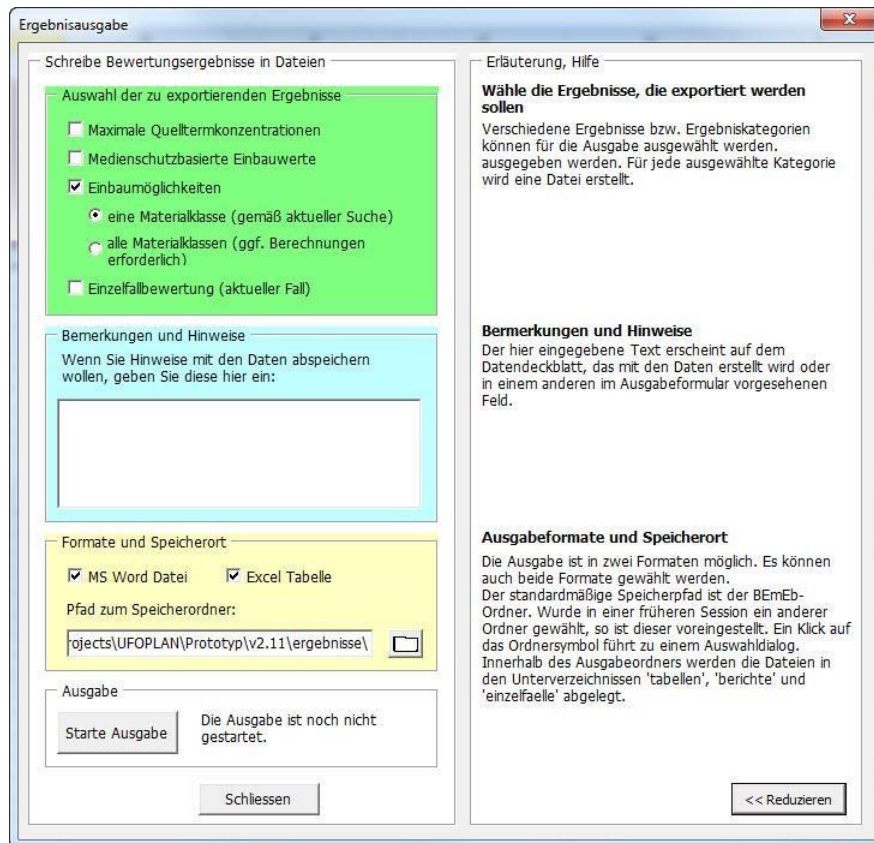


Abbildung

Für die drei wesentlichen Ergebnisparameter, die maximal zulässige Quelltermkonzentration, der medienrechtlich basierte Einbauwert und die Einbaumöglichkeiten, werden Wertetabellen ausgegeben.

Die Ausgabe ist sowohl als Tabelle im Excel-Format als auch in Form einer Tabelle als Word-Dokument möglich. Die Dateien werden standardmäßig im Unterordner „ergebnisse/tabellen“ (Excel) bzw. „ergebnisse/berichte“ (Word) abgespeichert (siehe Tabelle 3-10 in Abschnitt 3.5.2). Im Eingabebereich „Formate und Speicherort“ kann auch ein anderer Ordner gewählt werden.

3-44: Benutzerführung „Ergebnisausgabe“



3.4.5 Hilfe, Einstellungen, etc.

Der Weg zu verschiedenen Eingabefeldern für übergeordnete Einstellungen der Bewertung und die Anpassung der Sichtbarkeit der Tabellenblätter sowie zum online-Handbuch führt über einen entsprechenden Bereich in der BEMEB-Menüleiste (Abbildung 3-45).

Abbildung 3-45: Bereich „Hilfe, Einstellungen“ in der BEMEB-Menüleiste



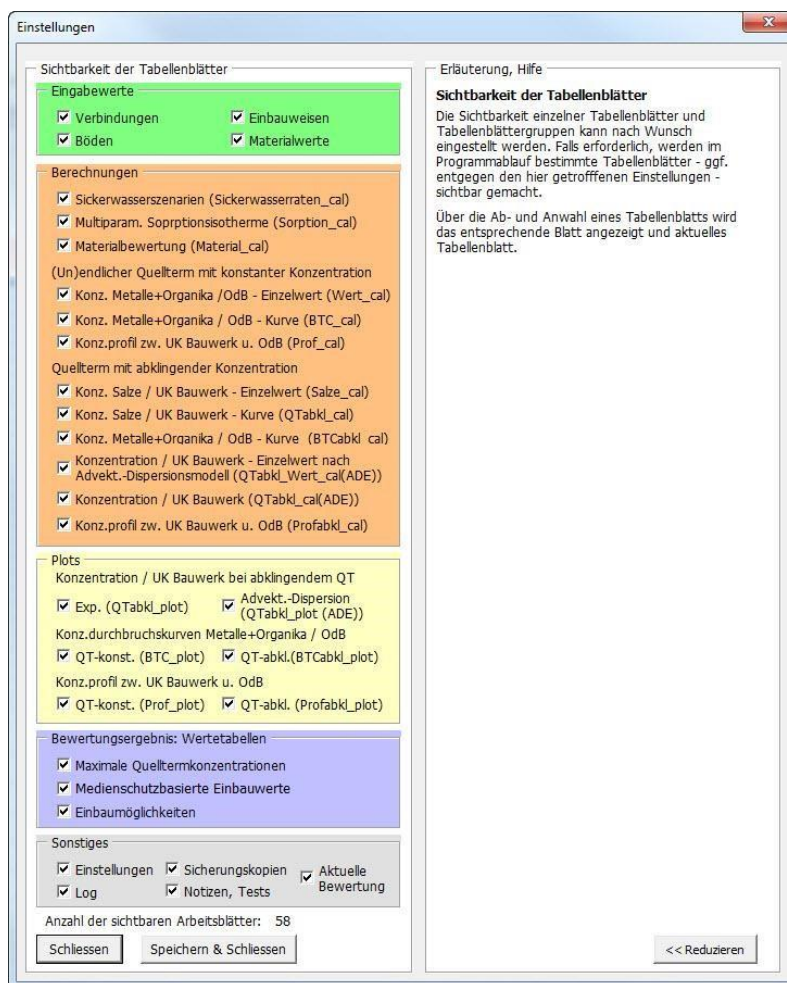
### 3.4.5.1 Hilfe

Hilfestellungen zur Bedienung von BEMEB bietet ein online-Handbuch, das über diesen Menüeintrag aufgerufen werden kann. Kontext-spezifische Hilfe bieten zudem die Hilfetexte zu den einzelnen Benutzerformularen.

### 3.4.5.2 Sichtbarkeit

BEMEB umfasst insgesamt rd. 60 Tabellenblätter. Über den Menüeintrag „Sichtbarkeit“ wird ein Benutzerformular aufgerufen (siehe Abbildung 3-46), über welches der Anwender bestimmte Tabellenblätter anwählen und Einstellungen zur Sichtbarkeit einzelner Tabellenblätter und Tabellenblattgruppen vornehmen kann.

Abbildung 3-46: Benutzerformular „Sichtbarkeit“ der Tabellenblätter



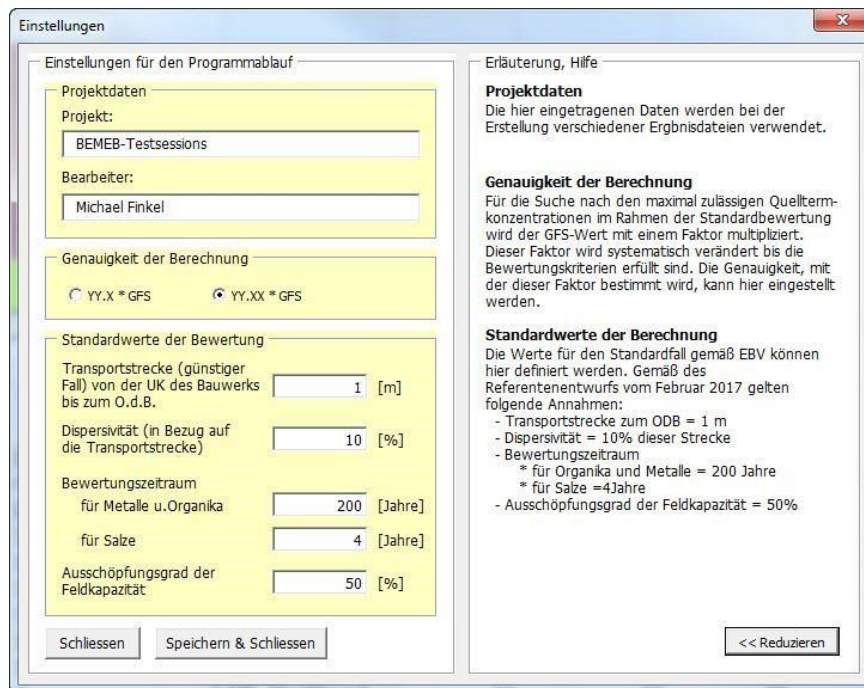
### 3.4.5.3 Einstellungen

Dieser Menüeintrag führt zu einem Benutzerformular, in dem verschiedene übergeordnete Einstellungen zur Bewertung vorgenommen werden können (Abbildung 3-47). Neben allgemeinen

Abbildung

Projektdatei und der gewünschten Genauigkeit der iterativen Suche der maximal zulässigen Quelltermkonzentration können hier auch die Schlüsselparameter der EBV-Standardbewertung (Transportstrecke, Dispersivität als Prozentwert der Transportstrecke, Bewertungszeitraum, Ausschöpfungsgrad der maximalen Feldkapazität) verändert werden, z.B. im Rahmen einer systematischen Bewertung der Bedeutung der einzelnen Größen für das Bewertungsergebnis (Sensitivitätsanalyse).

3-47: Benutzerführung „Einstellungen“



### 3.5 Dateien und Formate

#### 3.5.1 Eingabedaten

Die BEMEB-Eingangsdaten werden außerhalb von BEMEB im xml-Format gespeichert. Tabelle 3-9 gibt einen Überblick über den Speicherort und die Bezeichnung der Dateien.

Tabelle 3-9: Übersicht der Dateien der BEMEB-Eingangsdaten

| Dateiinhalte   | Dateiformat | Speicherort (standardmäßig)  |
|--|-------------|--|
| Spezifische Eingangsdaten für die chemischen Verbindungen (Metalle, Organika, Salze) | XML         | ./inputdata/verbindungen.xml bzw. ./inputdata/offiziell/verbindungen.xml |

|   |     |   |
|---|-----|---|
| Spezifische Eingangsdaten für die Bodenarten  | XML | ./inputdata/boeden.xml bzw.<br>./inputdata/offiziell/boeden.xml               |
| Spezifische Eingangsdaten für die Einbauweisen  | XML | ./inputdata/einbauweisen.xml bzw.<br>./inputdata/offiziell/einbauweisen.xml   |
| Eingangsdaten zur Charakterisierung der mineralischen Ersatzbaustoffe (Materialwerte) | XML | ./inputdata/materialwerte.xml bzw.<br>./inputdata/offiziell/materialwerte.xml |

### 3.5.2 Ergebnisausgabe

#### 3.5.2.1 Ergebnistabellen für die Standardbewertung

Die Ergebnisse der Standardbewertung können im MS WORD- oder MS EXCEL-Format abgespeichert werden. Tabelle 3-10 gibt einen Überblick über den Speicherort und die Bezeichnung der Dateien. Die Unterordner „berichte“ und „tabellen“ werden standardmäßig innerhalb des Ordners „ergebnisse“ angelegt. Der Anwender kann über das Benutzerformular „Ergebnisausgabe“ auch einen anderen Ordner bestimmen.

Tabelle 3-10: Übersicht der Ergebnisausgabedateien der Standardbewertung

| Dateiinhalte                               | Dateiformat | Speicherort   |
|--|-------------|---|
| Maximal zulässige Quelltermkonzentrationen | WORD        | ./berichte/Tab_MQTK(JJJJ-M-T_ZEIT).docx                 |
| Maximal zulässige Quelltermkonzentrationen | EXCEL       | ./tabellen/Tab_MQTK(JJJJ-M-T_ZEIT).xlsx                 |
| Medienschutzbasierte Einbauwerte           | WORD        | ./berichte/Tab_ME(JJJJ-M-T_ZEIT).docx                   |
| Medienschutzbasierte Einbauwerte           | EXCEL       | ./tabellen/Tab_ME(JJJJ-M-T_ZEIT).xlsx                   |
| Einbaumöglichkeiten                        | WORD        | ./berichte/Tab_Einsatz_<MEB-Klasse>(JJJJ-M-T_ZEIT).docx |
| Einbaumöglichkeiten                        | EXCEL       | ./tabellen/Tab_Einsatz_<MEB-Klasse>(JJJJ-M-T_ZEIT).xlsx |

#### 3.5.2.2 Ergebnisberichte für die individuelle Bewertung

Für die Ergebnisse einer individuellen Bewertung stehen Dateivorlagen für Microsoft Word zur Verfügung. Diese sind im Unterordner „system“ abgelegt. Für die Ausgabe der Ergebnisse einer

Abbildung

stoffspezifischen Bewertung wird die Dateivorlage „IndivBewTemplateSingle.docx“ verwendet, für individuelle Bewertungen bezgl. aller für den ausgewählten MEB relevanten Stoffkomponenten und –gruppen wird die Dateivorlage „IndivBewTemplateMult.docx“ verwendet. Die Bewertungsergebnisse werden mit Hilfe von Textmarken in diese Dateivorlagen eingefügt. Die Eingabe erfolgt über das Tabellenblatt „AktuelleBewertung“, in dem die Zuordnungen Textmarke ↔ Ergebnisinhalt (Parameter bzw. Grafik) von BEMEB automatisch vorgenommen werden. Der Anwender kann diese Vorlagen nach Wunsch ändern und überarbeiten oder durch andere Vorlagen ersetzen, in die dann ebenfalls Ergebnisinhalt über die Verwendung von Textmarken eingetragen werden können.

Tabelle 3-11: Übersicht der Ergebnisausgabedateien der individuellen Bewertung

| Dateiinhalt   | Dateiformat | Speicherort (standardmäßig)  |
|---|-------------|--|
| Individuelle Bewertung (einzelne Stoffkomponente)                 | WORD        | ./berichte/Rep_<MEB-Klasse>_<Stoffkomponente>_<Einbauweise>_<Bodenart>_<Quellterm-Szenario>.docx |
| Individuelle Bewertung (alle materialrelevanten Stoffkomponenten) | WORD        | ./berichte/Rep_<MEB-Klasse>_AlleRelev_<Einbauweise>_<Boden-art>_<Quellterm-Szenario>.docx        |

## 3.6 Anbindung und Verwendung von WinSMART für die Einzelfallbewertung (extern)

### 3.6.1 Einführende Hinweise

Die in BEMEB implementierten Bewertungsmöglichkeiten decken ein großes Spektrum an Anwendungsfällen ab, sind aber limitiert auf Berechnungen auf Basis analytischer Modelle. Obgleich solche analytischen Modelle für viele Anfangs- und Randbedingungen verfügbar und geeignet sind, setzen sie verschiedene vereinfachende Annahmen voraus, die bei bestimmten komplexeren Bewertungsfällen - im Gegensatz zu den Standardbewertungen nach EBV - nicht gegeben sind. Für die Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von MEB im Einzelfall sind diesbezüglich vor allem folgende Annahmen zu nennen:

- ▶ der Untergrund im Bereich der Sickerstrecke ist homogen,
- ▶ Desorption und Sorption sind schnelle Prozesse und können über Gleichgewichtsbeziehungen beschrieben werden,
- ▶ die Verteilung der Stoffe zwischen Festphase und wässriger Phase ist konzentrationsunabhängig bzw. die konzentrationsabhängige Verteilung kann näherungsweise durch eine linearisierte Isotherme beschrieben werden.

Um auch solche Fälle bewerten zu können, in welchen die genannten Annahmen erwartungsgemäß nicht erfüllt werden, enthält BEMEB eine Schnittstelle zum Simulationswerkzeug WinSMART, welches auf einer numerischen Beschreibung von Stofffreisetzung und Stofftransport basiert und das deshalb nicht den oben genannten Beschränkungen unterliegt.

WinSMART wird ebenfalls durch eine graphische Benutzeroberfläche unterstützt und wurde bereits erfolgreich zur Prognose von zeitabhängigen Freisetzungsraten (Quellterm) und für die Berechnung des Schadstofftransports im Sickerwasser eingesetzt (z.B. Madlener 2003; Madlener et al. 2004; Susset 2004; Henzler 2004; Henzler et al. 2006; Beyer et al. 2007 und 2009; Finkel und Grathwohl 2017). WinSMART wurde anhand der dem Fachkonzept der ErsatzbaustoffV zu Grunde liegenden analytischen Lösungen verifiziert (Finkel 1999).

Die Schadstofffreisetzung wird in WinSMART als kinetischer (zeitabhängiger) diffusionsgesteuerter Desorptionsprozess beschrieben. Hierbei können insbesondere die spezifischen Körnungen bzw. Korngrößenverteilungen der mineralischen Ersatzbaustoffe berücksichtigt werden. Die Stofffreisetzung wird als Summe der Freisetzung aus den einzelnen Korngrößenklassen simuliert. Auch die Freisetzung aus Baustoffgemischen mit heterogenen Eigenschaften in Bezug auf Korngröße und Sorptionskapazität kann berechnet werden. Alternativ kann auf eine Simulation der Stofffreisetzung verzichtet werden, wenn Freisetzungsraten auf der Basis von Typkurven des Abklingverhaltens berücksichtigt werden sollen. Die Berechnung des Transportterms kann auch für nicht-lineare Sorptionsisothermen und für ein von den Standardszenarien abweichendes Bodenprofil und abweichende Bodeneigenschaften durchgeführt werden.

### 3.6.2 Funktionsweise der Schnittstelle zwischen BEMEB und WinSMART

Die Schnittstelle ist nur aktiv, wenn mit BEMEB eine individuelle Bewertung für einen Einzelstoff durchgeführt wurde. In diesen Fällen werden die Berechnungsparameter des betrachteten Bewertungsfalls in eine xml-Datei geschrieben, welche von WinSMART als Eingabedatei verwendet wird.

Die Schnittstelle wird aufgerufen über die Schaltfläche „WinSMART öffnen“ im Benutzerformular „Individuelle Bewertung“ (Abbildung 3-48). Es erscheint ein Benutzerformular, in dem die gewünschte Simulation (→ „Gegenstand der Bewertung“) gewählt und ggf. Parameterwerte geändert oder ergänzt werden können (Abbildung 3-49).

Prinzipiell stehen drei Optionen für die Simulation zur Verfügung:

- ▶ *Quell-Term*: Es wird nur die Freisetzung aus dem mineralischen Ersatzbaustoff simuliert (Hinweis: Diese Option ist in der aktuellsten BEMEB-Version noch nicht verfügbar);
- ▶ *Transport-Term*: Es wird nur reaktive Stofftransport mit dem Sickerwasser entlang der Sickerstrecke zum OdB simuliert;
- ▶ *Quell- und Transport-Term*: Es wird sowohl die Freisetzung aus dem Ersatzbaustoff als auch der reaktive Stofftransport mit dem Sickerwasser entlang der Sickerstrecke zum OdB simuliert (Hinweis: Diese Option ist in der aktuellsten BEMEB-Version noch nicht verfügbar).

Über die Schaltfläche „WinSMART aufrufen“ wird die Simulation gestartet. Hierzu wird erst die xml-Eingabedatei generiert und in dem Unterordner „examples“ der WinSMART-Arbeitsumgebung im Ordner „winsmart“ gespeichert. Eine entsprechende Meldung wird angezeigt und muss bestätigt werden (Abbildung 3-50).

Abbildung 3-48: Benutzerformular „Individuelle Bewertung“ mit aktivierter Schnittstelle zum Simulationswerkzeug WinSMART nach erfolgter Bewertung eines Einzelstoffs (hier: Nickel aus Gießerei-Kupolofenschlacke (GKOS) in Einbauweise B8 bei sandigem Unterboden)



Individuelle Bewertung

Bewertung mit ggf. Einzelfall-spezifischen Parameterwerten

**Auswahl des zu bewertenden Falles**

Ersatzbaustoff(klasse): GKOS

Stoffkomponente(n): Nickel

nur materialrelevante Komponenten

Einbauweise: BB

Bodentyp: Sand

**Berechne bewertungsrelevante Grenzwerte**

Starte Berechnung | Bewertung abgeschlossen. | Zeige Grafik

Grafiken für Animation erstellen

Maximal zulässige Quelltermkonzentration der gewählten Stoffkomponente:

Anreicherungskriterium: 120.63 µg/L  
 Durchbruchskriterium: 29.85 µg/L  
**maßgebend: 29.85 µg/L**

Medienschutzbasierter Einbauwert der gewählten Stoffkomponente:

Quelltermfaktor FQT: 2.20  
 Verhältnismäßigkeitsfaktor: 1.50

**ME für ...**

**ungünstige Verhältnisse: 66.00 µg/L**  
**günstige Verhältnisse: 98.52 µg/L**

Einbaumöglichkeiten des gewählten MEB bezgl. der gewählten Stoffkomponente:

Materialwert: 30.00 µg/L  
**ungünstige Verhältnisse: Einbau möglich**  
**günstige Verhältnisse: Einbau möglich**

**Eigenschaften des Quellterms**

Infiltrationsrate: 515 [mm/Jahr]  
 Mittlere Sickerwasser-rate an der Bauwerk-UK: 103 [mm/Jahr]  
 Schichtdicke: 30 [cm]

Unendliche Quelle - konstante Konzentration  
 Endliche Quelle - konstante Konzentration  
 Dauer des Eintrags: [Jahre]  
 Abklingende Quelle  
 Verteilungskoeffizient: - [L/kg]

Zurücksetzen auf Standardwerte

**Eigenschaften des Transportterms**

Porosität des Bodens: 0.17 [-]  
 Lagerungsdichte: 1.42 [kg/L]  
 Abbauratenkonstante: 0.00 [1/Jahr]  
 Distanz zum O.d.B.: 1 [m]  
 Dispersivität: 10 [% d. Distanz]  
 Bewertungszeitraum: 200 [Jahre]  
 Ausschöpfungsgrad der Filterkapazität: 50 [%]

Zurücksetzen auf Standardwerte

Schliessen | Ausgabe | WinSMART öffnen | Hilfe >>

Hinweise  
Keine.

Abbildung 3-49: Benutzerformular „Vor dem WinSMART-Aufruf – Prüfung und Ergänzung der Eingabeparameter“

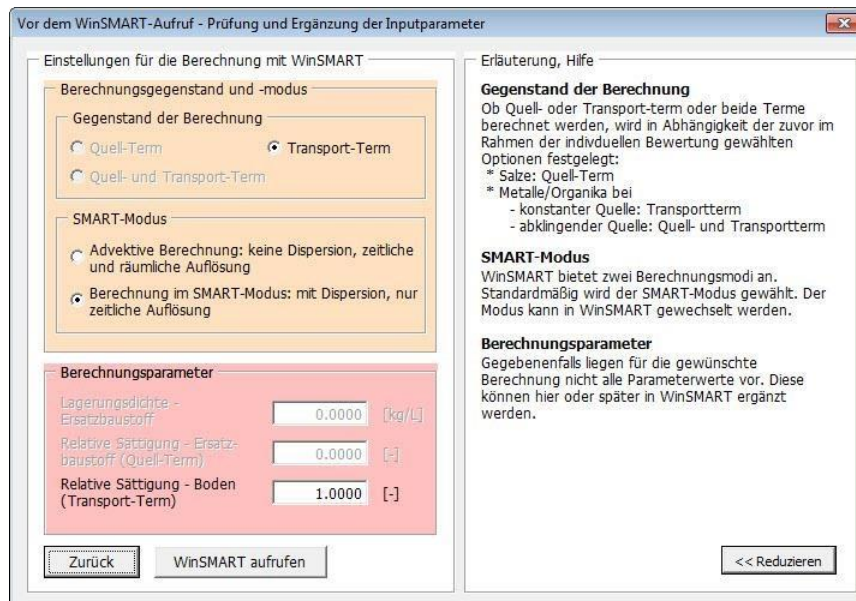


Abbildung 3-50: BEMEB-Meldung über die erfolgreiche Erstellung der WinSMART-Inputdatei im xmlFormat



WinSMART startet automatisch, liest die zuvor erstellte xml-Datei ein und führt die Berechnung durch. Der Fortschritt der Berechnung wird durch Informationen zum dem aktuell berechneten Zeitschritt angezeigt: Nummer des Zeitschritts – Simulationszeit (s) und Konzentration am Ende der Sickerstrecke (mg/L) (Abbildung 3-51).

Nach erfolgter Berechnung kann die Durchbruchkurve am OdB angezeigt werden (wähle dazu im Bereich unten links „Durchbruchkurven (Schadstoffe)“ und ggf. im Menü „Einstellungen > Einheiten“ die gewünschte Einheit für die Zeitachse“ (Abbildung 3-52).

Damit ist der aktuelle Bewertungsfall im Simulationswerkzeug WinSMART reproduziert. Von dieser Referenz ausgehend, können die Funktionalitäten und Möglichkeiten des numerischen Simulationswerkzeugs genutzt werden, um eine erweiterte Einzelfallbetrachtung durchzuführen. Einzelheiten zur Anwendung von WinSMART sind im Online-Handbuch von WinSMART beschrieben. WinSMART kann auch unabhängig von BEMEB verwendet werden. WinSMART wird gestartet mit einem Doppelklick auf die Datei WinSMART.jar im Ordner „winsmart“.

Abbildung 3-51: WinSMART-Benutzeroberfläche nach erfolgter Simulation

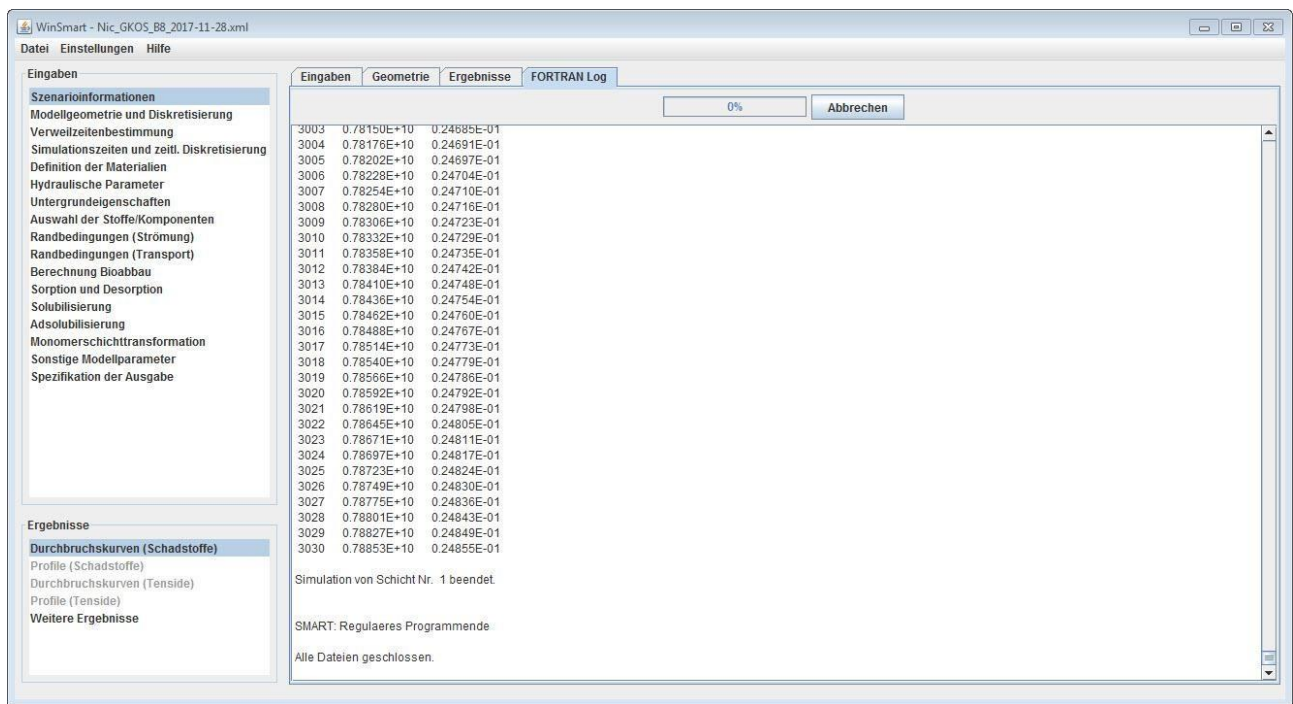
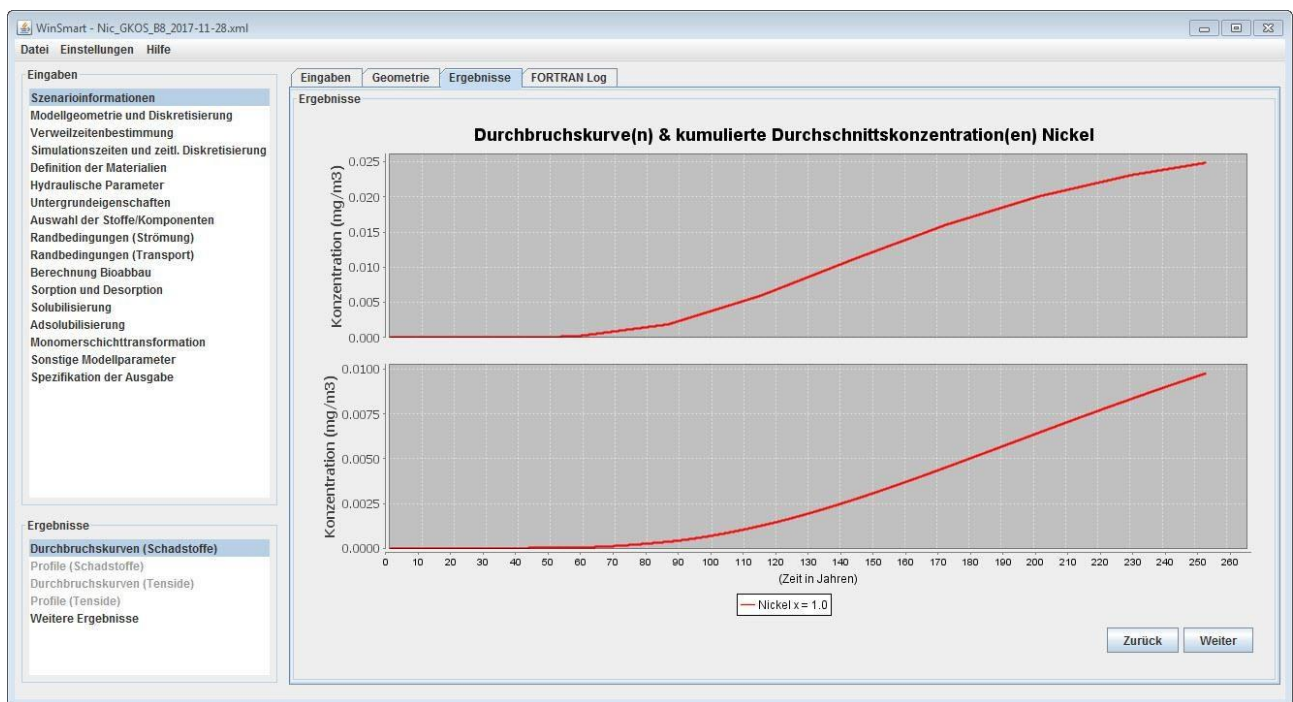


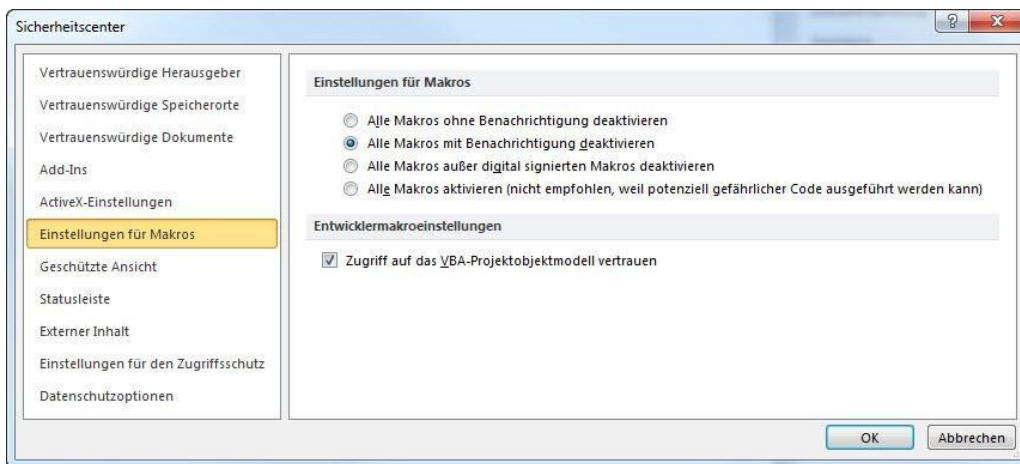
Abbildung 3-52: WinSMART-Benutzeroberfläche mit Simulationsergebnis



### 3.7 Systemvoraussetzungen für BEMEB

BEMEB wurde unter Windows 7 / Excel 2010 und unter Windows 10 / Excel 2016 getestet. Andere bzw. besondere Systemvoraussetzungen sind nicht bekannt. Es ist sicherzustellen, dass die Option „Zugriff auf das VBA-Projektmodell vertrauen“ aktiviert ist (Abbildung 3-53). Dazu in der ExcelMenüleiste „Datei“ wählen und dort „Optionen > Sicherheitscenter“ (in neueren Excel-Versionen: „Optionen > Trust Center“). Dort die Schaltfläche „Einstellungen für das Sicherheitscenter“ (bzw. „... Trust Center“) wählen und im angezeigten Menü unter „Einstellungen für Makros“ (bzw. „Makroeinstellungen“) ein Häkchen bei „Zugriff auf das VBA-Projektmodell vertrauen“ machen. Mit „OK“ abschließen.

Abbildung 3-53: MS Excel Einstellungen für Makros

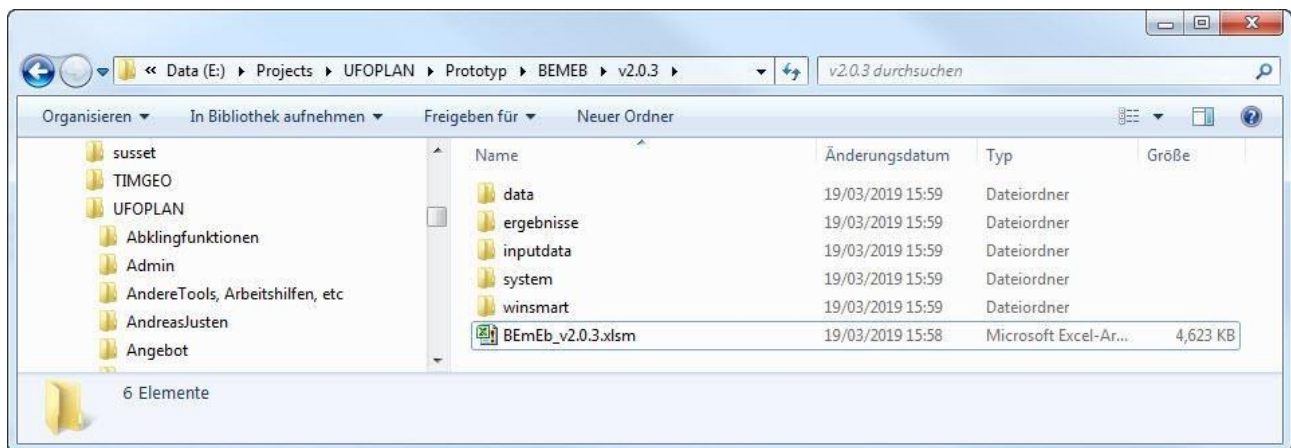


### 3.8 Hinweise zur Installation von BEMEB

Um BEMEB nutzen zu können, muss keine Installation im engeren Sinne durchgeführt werden, sondern eine Archiv-Datei, die alle erforderlichen Dateien enthält, in einem beliebigen (vom Anwender frei wählbaren) Ordner entpackt werden.

Nach dem Entpacken sollten Sie einen BEMEB-Arbeitsbereich eingerichtet haben, wie er nachfolgend abgebildet ist.

Abbildung 3-54: Inhalte des Arbeitsordners für BEMEB nach Entpacken der BEMEB-Archiv-Datei

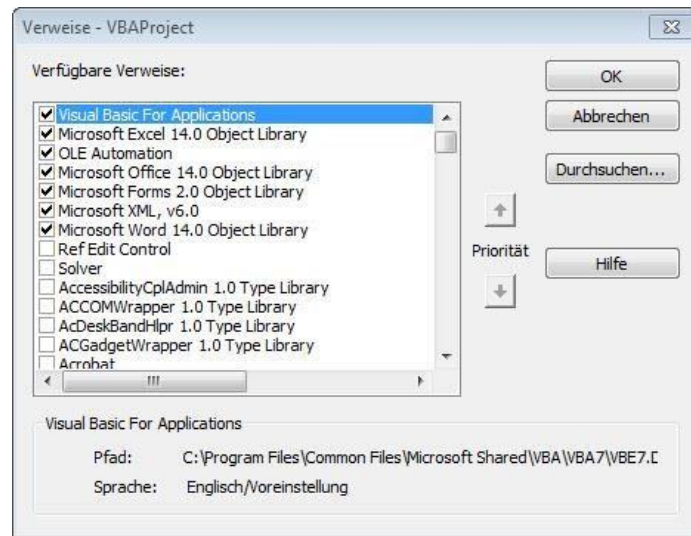


Es ist jederzeit möglich, Kopien der BEMEB-xlsm-Datei anzufertigen und diese Kopien parallel zur Original-Version (= in demselben Ordner) abzuspeichern. Alternativ können Kopien des gesamten Arbeitsbereichs erstellt werden, wobei Ordner-Struktur und -Namen innerhalb des BEMEBArbeitsbereichs unverändert bleiben müssen.

### 3.9 Bekannte Probleme

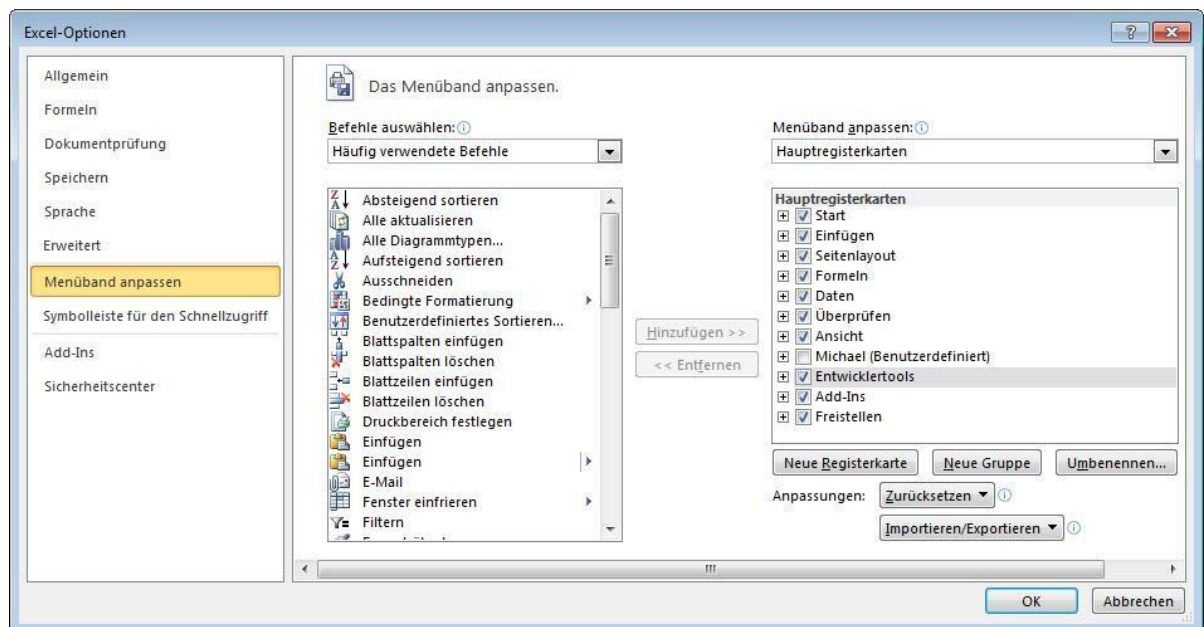
- ▶ **Problem:** Die im Plot-Viewer der individuellen Bewertung (siehe Abschnitte 3.4.3.2 und 4.2) angezeigten Plots haben gegebenenfalls eine falsche Skalierung (Plot wird nicht komplett angezeigt).  
**Lösung:** Das zur Erstellung des Plots verwendete Arbeitsblatt auf 80% skalieren und Bewertung wiederholen.
- ▶ **Problem:** Ein oder mehrere Funktionalitäten der BEMEB-Menüleiste sind nicht mehr wählbar („eingegraut“).  
**Lösung:** Die BEMEB-Excel-Anwendung schließen und neu starten.
- ▶ **Problem:** Formular- bzw. Dialogfenster der graphischen Benutzeroberfläche werden nicht angezeigt.  
**Lösung:** Die Koordinaten für die Fensterpositionierung auf der Monitorfläche für alle Fenster auf Null setzen. Dazu im Tabellenblatt „Einstellungen“ alle Zellen im Bereich G25 bis H33 mit einer „0“ belegen.
- ▶ **Problem:** Excel-Anwendung startet nicht korrekt – eine Meldung über einen Kompilerfehler oder bezgl. nicht definierten Objekten wird angezeigt.  
**Lösung:** BEMEB wurde vermutlich von einem Computer mit einer neueren Excel-Version zu einem Computer mit älterer Excel-Version transferiert und die in der neueren Version automatisch gesetzten Verweise auf die Objektbibliotheken werden nicht gefunden. Wähle in der Excel-Menüleiste oben das Register „Entwicklertools“ und dort die Schaltfläche „Visual Basic“.  
Es öffnet sich die Visual Basic Entwicklungsumgebung. Wähle dort „Extras>Verweise“.

Abbildung 3-55: Erforderliche Verweise für MS Visual Basic for Applications (VBA)



Hinweis: Ggf. wird das Register „Entwicklertools“ nicht angezeigt. In diesem Fall in der ExcelMenüleiste „Datei“ wählen und dort „Optionen“. In dem sich öffnenden Dialog „Excel-Optionen“ in der Navigationsspalte links „Menüband anpassen“ wählen (Abbildung 3-56). Im erscheinenden Menü im Fenster rechts das Häkchen vor „Entwicklertools“ setzen. Mit OK beenden.

Abbildung 3-56: Anpassen der Excel-Optionen zur Anzeige der Entwicklertools





## 4 BEMEB-Anwendung anhand von Beispielen

### 4.1 Express-Bewertung

#### 4.1.1 Komplette Neubewertung

Eine komplette Neubewertung ist erforderlich nach einem Datenverlust, d.h. wenn die in dem Unterordner „data“ als Textdateien gespeicherten Bewertungsergebnisse versehentlich gelöscht wurden oder die Inhalte dieser Dateien in unvorhergesehener Weise verändert wurden. Eine komplette Neubewertung stellt diese Dateien wieder her und schreibt die Inhalte der Ergebnistabellenblätter neu. Einzelheiten sind in Abschnitt 3.4.3.1 beschrieben.

Auch wenn verschiedene Eingangsdaten der Bewertung geändert wurden, d.h. ein oder mehrere Einträge in den Tabellenblättern „Verbindungen“, „Boeden“, „Einbauweisen“ und „Materialwerte“ geändert wurden und diese Änderungen nicht in Spalte E („Änderung?“) gekennzeichnet wurden (siehe dazu auch den folgenden Abschnitt), kann eine komplette Neubewertung sinnvoll sein.

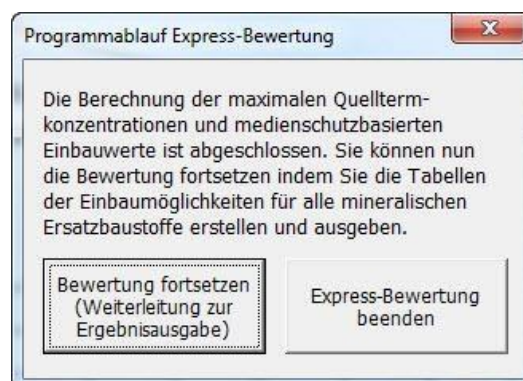
Hinweis: Mit einer Neubewertung auf Basis von Eingangsdaten, die gegenüber den Standardwerten der EBV geändert wurden, werden Ergebnisse erzeugt, die ggf. nicht konform mit der EBV-Standardbewertung sind und zu anderen Einbautabellen führen als in der Kabinettsfassung der EBV.

Um die komplette Neubewertung zu starten, wähle zunächst in der BEMEB-Menüleiste „Bewertung > Express“. Im erscheinenden Formular „Express-Bewertung“ wähle die Option „Komplette Neubewertung“ und betätige die Schaltfläche „Bewertung starten“.

Die komplette Bewertung ist in zwei Arbeitsschritte aufgeteilt. Im ersten Schritt werden für alle Bewertungsfälle die maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen sowie die medien-schutzbasierten Einbauwerte berechnet und die Werte abgespeichert (s.o.). In einem (optionalen) zweiten werden die Einbaumöglichkeiten aller Materialklassen ermittelt und entsprechende Ausgabedateien generiert. Eine entsprechend Abfrage wird nach Abschluss des ersten Schrittes angezeigt (Abbildung 4-1).

Für Metalle und Organika sind insgesamt 416 Bewertungsfälle zu betrachten (26 Verbindungen, 16 Sickerwasserraten). Aufgrund der iterativen Berechnung des Durchbruchkriteriums benötigt die Bewertung etwa 10 bis 15 Minuten (je nach Rechnerleistung).

Abbildung 4-1: Dialog nach Abschluss des ersten Arbeitsschritts der kompletten Neubewertung





### 4.1.2 Neubewertung als Aktualisierung

Eine „Neubewertung als Aktualisierung“ ist für den Fall vorgesehen, wenn einzelne Änderungen der Eingangsdaten der Bewertung vorgenommen wurden und das Bewertungsergebnis entsprechend aktualisiert werden soll. Einzelheiten sind in Abschnitt 3.4.3.1 beschrieben.

In diesem Anwendungsbeispiel betrachten wir den Fall, dass die Bewertung für einen Sandboden durchgeführt werden soll, dessen Eigenschaften von dem in der EBV definierten Bodentyp „Sand“ unzureichend repräsentiert wird. Vier Parameterwerte werden exemplarisch verändert: Tongehalt 1.1% (statt 2.46%), Corg 0.04% (0.1%), FeOx 45 mg/kg (73 mg/kg) und AlOx 260 mg/kg (421 mg/kg). Auf die Änderungen wird durch den Eintrag „1“ in Zelle E9 hingewiesen (Abbildung 4-2).

Auf dieselbe Art könnten auch in einem oder mehreren weiteren Tabellenblättern („Verbindungen“, „Einbauweisen“ und „Materialwerte“) Änderungen vorgenommen werden.

Hinweis: Mit einer Neubewertung auf Basis von Eingangsdaten, die gegenüber den Standardwerten der EBV geändert wurden, werden Ergebnisse erzeugt, die ggf. nicht konform mit der EBVStandardbewertung sind und zu anderen Einbautabellen führen als in der Kabinettsfassung der EBV.

Abbildung 4-2: Tabellenblatt „Boeden“ nach den Änderungen zur Betrachtung eines von den Standardbodenarten der EBV abweichenden Bodens

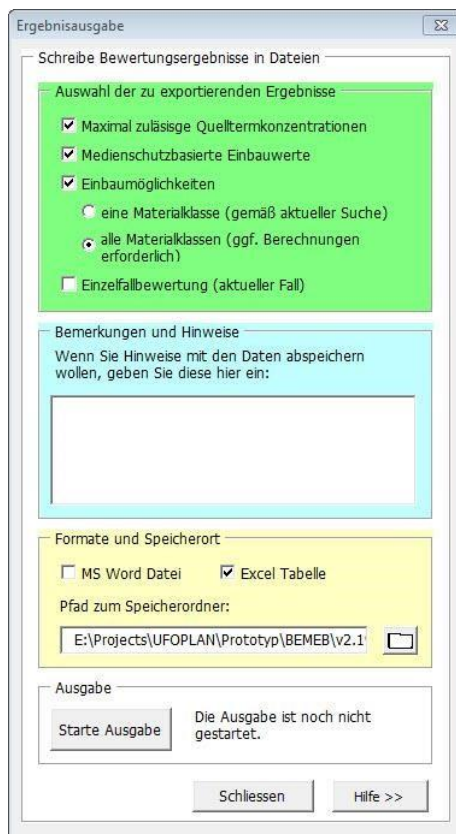
|    | A            | B | C | D | E         | F                           | G           | H         | I          | J          | K             | L                 | M        | N          | O                   | P                      | Q         | R            | S             |
|----|--------------|---|---|---|-----------|-----------------------------|-------------|-----------|------------|------------|---------------|-------------------|----------|------------|---------------------|------------------------|-----------|--------------|---------------|
| 1  | <b>Böden</b> |   |   |   |           | Anzahl insgesamt: 2         |             |           |            |            |               |                   |          |            |                     |                        |           |              |               |
| 2  |              |   |   |   |           | Stand vom: 5/12/2016        |             |           |            |            |               |                   |          |            |                     |                        |           |              |               |
| 3  |              |   |   |   |           | Geprüft von: Michael Finkel |             |           |            |            |               |                   |          |            |                     |                        |           |              |               |
| 4  |              |   |   |   |           |                             |             |           |            |            |               |                   |          |            |                     |                        |           |              |               |
| 5  |              |   |   |   |           |                             |             |           |            |            |               |                   |          |            |                     |                        |           |              |               |
| 6  |              |   |   |   |           | <b>Böden</b>                |             |           |            |            |               |                   |          |            |                     |                        |           |              |               |
| 7  |              |   |   |   | Änderung? | Parametercode               | B1          | B2        | B3         | B4         | B5            | B6                | B7       | B8         | B9                  | B10                    | B11       | B12          | B13           |
| 8  |              |   |   |   | 1         | Parameter                   | Bezeichnung | Verfasser | Datum      | pH (CaCl2) | Tongehalt [%] | Mnox (Pb) [mg/kg] | Corg [%] | Fed [g/kg] | Effektive Porosität | Lagerungsdichte [kg/L] | CaCo3 [%] | Feox [mg/kg] | Allox [mg/kg] |
| 9  |              |   |   |   | 1         | Boden #1                    | Sand        | Finkel    | 06.09.2016 | 4.8        | 1.1           | 231               | 0.04     | 10.2       | 0.17                | 1.42                   | 0         | 45           | 260           |
| 10 |              |   |   |   |           | Boden #2                    | LST         | Finkel    | 06.09.2016 | 6.6        | 12            | 231               | 0.1      | 10.2       | 0.26                | 1.45                   | 5.2       | 2500         | 38            |

Um eine Neubewertung als Aktualisierung durchzuführen, wähle zunächst in der BEMEB-Menüleiste „Bewertung > Express“. Nach Auswahl der Option „Neubewertung als Aktualisierung“ im Formular „Express-Bewertung“ kann die Bewertung mit einem Klick auf die Schaltfläche „Starte Bewertung“ gestartet werden. Der Bewertungsfortschritt wird angezeigt.

Für Metalle und Organika sind insgesamt 416 Bewertungsfälle zu betrachten (26 Verbindungen, 16 Sickerwasserraten). Aufgrund der iterativen Berechnung des Durchbruchkriteriums benötigt die Bewertung etwa 10 bis 15 Minuten (je nach Rechnerleistung).

Nach Abschluss der Berechnung der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen und der medien-schutzbasierten Einbauwerte erfolgt – wie in der Komplettbewertung (s.o.) – eine Abfrage, ob auch die Einbautabellen erstellt werden sollen. Falls dies gewünscht ist, erfolgt eine Weiterleitung zum Formular „Ergebnisausgabe“ (Abbildung 4-3). Sollen die Bewertungsergebnisse auf Basis der geänderten Daten mit den anderen Ergebnissen verglichen werden, empfiehlt es sich, auch die maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen und der medien-schutzbasierten Einbauwerte auszugeben (vor dem Start der Ausgabe die entsprechenden Häkchen im Formular setzen).

Abbildung 4-3: BEMEB-Formular „Ergebnisausgabe“: Angaben für die Ausgabe aller Ergebnisse der Bewertung als Excel-Tabellen



### 4.1.3 Neubewertung der Einbaumöglichkeiten

Die Neubewertung der Einbaumöglichkeiten basiert auf den zuletzt berechneten medienschutzbasierten Einbauwerten (welche aus der entsprechenden Datei aus dem Ordner „data“ gelesen und in die entsprechenden BEMEB-Ergebnis-Tabellenblätter eingetragen wird; siehe Abschnitt 3.4.3.1 für Einzelheiten). Über den systematischen Vergleich von medienschutzbasierten Einbauwerten und Materialwerten werden die Einbaumöglichkeiten ermittelt und entsprechende Einbautabellen erstellt.

Um eine Neubewertung der Einbaumöglichkeiten durchzuführen, wähle zunächst in der BEMEBMenüleiste „Bewertung > Express“. Nach Auswahl der Option „Neubewertung der Einbaumöglichkeiten“ im Formular „Express-Bewertung“ kann die Bewertung mit einem Klick auf die Schaltfläche „Starte Bewertung“ gestartet werden. Es erfolgt zunächst eine Weiterleitung auf das Formular „Ergebnisausgabe“, wo die zur Neubewertung der Einbaumöglichkeiten erforderlichen Optionen bereits gewählt sind und die Neubewertung gestartet werden kann. Die Einbaumöglichkeiten aller Ersatzbaustoffe werden dann in Tabellen im MS-Word- und/oder MS-Excel-Format ausgegeben.

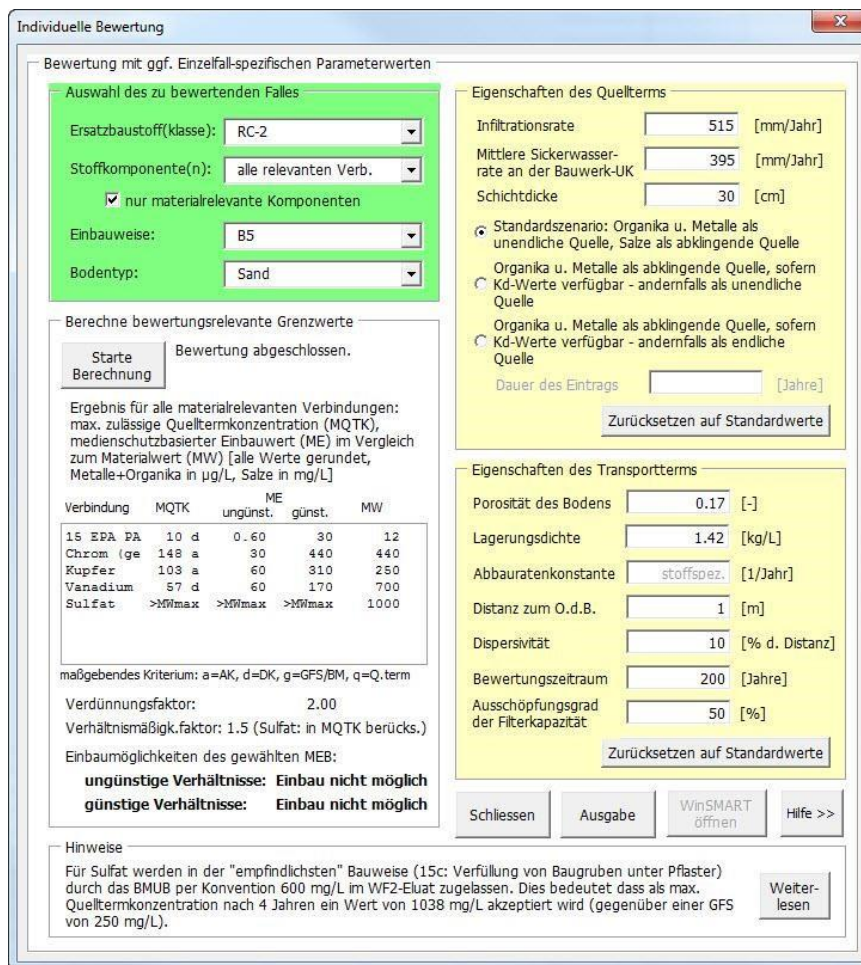
## 4.2 Individuelle Bewertung

### 4.2.1 Bewertung der Einbaumöglichkeiten für Ersatzbaustoffe

#### 4.2.1.1 EBV-Standardszenario

In diesem Anwendungsbeispiel wird ein Recyclingbaustoff der Materialklasse 2 betrachtet (RC-2), wobei die Einbaumöglichkeiten in der Einbauweise B5 für den günstigen Fall bei sandigem Unterboden bewertet werden (der ungünstige Fall wird immer ebenfalls bewertet). Zunächst wird eine Bewertung für alle materialrelevanten Stoffkomponenten durchgeführt. Die entsprechenden Eingaben sowie das Ergebnis dieser individuellen Bewertung zeigt Abbildung 4-4. Die Berechnung wird nach einem Klick auf die Schaltfläche „Berechnung starten“ automatisch durchgeführt. Nach dem Ende der Berechnung wird das Ergebnis angezeigt, d.h. die berechneten MQTK und ME werden den Materialwerten (MW) von RC-1 gegenübergestellt. Ein Zusatzbuchstabe gibt an, welches Kriterium maßgebend ist (hier: a = Anreicherungskriterium, d = Durchbruchskriterium). Der für die Einbauweise relevante Quellterm- bzw. Verdünnungsfaktor wird ebenfalls angezeigt. Bei ungünstigen Verhältnissen ist ein Einbau nicht möglich. Auch für den günstigen Fall ist im Allgemeinen ein Einbau von RC-2 in die Bauweise B5 nicht möglich, da für Vanadium der ME für den günstigen Fall kleiner ist als der MW von RC2 ( $173 \mu\text{g L}^{-1}$  gegenüber  $700 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Für Materialqualitäten, welche den ME-Wert für Vanadium einhalten, ist der Einbau bei günstigen Verhältnissen (mindestens ein Meter lange grundwasserfreie Sickerstrecke im sandigen Unterboden) allerdings möglich. Dies ist in der Kabinettsfassung der Mantelverordnung durch Fußnoten geregelt (BMUB 2017).

Abbildung 4-4: Benutzerformular nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung aller materialrelevanter Stoffkomponenten und -gruppen eines MEB (hier für die Materialklasse RC-2 in der Einbauweise B5 bei sandigem Unterboden)



Eine nähere Betrachtung ist auch für einzelne Stoffkomponenten und -gruppen möglich. Dazu muss im Listenfeld „Stoffkomponente(n)“ die gewünschte Komponente gewählt und die Berechnung erneut durchgeführt werden. Die Berechnung einer einzelnen Komponente erfordert mehr Rechenzeit, weil diverse Ergebnisplots generiert werden (s.u. und Abschnitt 3.4.3.2).

Die Ergebnisse werden – sofern der Transportterm bewertungsrelevant und daher zu berücksichtigen ist – für beide Bewertungskriterien dargestellt (Abbildung 4-5). Zur Veranschaulichung wird der Konzentrationsverlauf am OdB für die maximal zulässige Quelltermkonzentration nach dem maßgebenden Kriterium automatisch in einem zweiten Fenster angezeigt (Abbildung 4-6). Weitere Plots des Konzentrationsprofils entlang der Sickerstrecke am Ende des Bewertungszeitraums sowie der Entwicklung der Konzentration im Quellterm und der Stoffanreicherung im Bereich der Sickerstrecke innerhalb des Bewertungszeitraums können ebenfalls angezeigt werden. Die Entwicklung des Konzentrationsprofils innerhalb des Bewertungszeitraums kann auch als Animation in 10 Zeitschritten angesehen werden.

Für das Ergebnis aufgrund des zweiten, jeweils nicht maßgebenden Kriteriums werden ebenfalls Plots bereitgestellt (Abbildung 4-7).

Abbildung 4-5: Benutzerformular nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung einer einzelnen materialrelevanten Stoffkomponente eines MEB (hier Vanadium in der Einbauweise B5)

**Individuelle Bewertung**

Bewertung mit ggf. Einzelfall-spezifischen Parameterwerten

**Auswahl des zu bewertenden Falles**

Ersatzbaustoff(klasse): RC-2

Stoffkomponente(n): Vanadium

nur materialrelevante Komponenten

Einbauweise: B5

Bodentyp: Sand

**Eigenschaften des Quellterms**

Infiltrationsrate: 515 [mm/Jahr]

Mittlere Sickerwasser-  
rate an der Bauwerk-UK: 395 [mm/Jahr]

Schichtdicke: 30 [cm]

Unendliche Quelle - konstante Konzentration

Endliche Quelle - konstante Konzentration  
Dauer des Eintrags: [ ] [Jahre]

Abklingende Quelle  
Verteilungskoeffizient: [ ] [L/kg]

Zurücksetzen auf Standardwerte

**Eigenschaften des Transportterms**

Porosität des Bodens: 0.17 [-]

Lagerungsdichte: 1.42 [kg/L]

Abbauratenkonstante: 0.00 [1/Jahr]

Distanz zum O.d.B.: 1 [m]

Dispersivität: 10 [% d. Distanz]

Bewertungszeitraum: 200 [Jahre]

Ausschöpfungsgrad  
der Filterkapazität: 50 [%]

Zurücksetzen auf Standardwerte

Berechne bewertungsrelevante Grenzwerte

Grafiken für Animation erstellen

Maximal zulässige Quelltermkonzentration  
der gewählten Stoffkomponente:

|                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| Anreicherungskriterium: | 98.9 µg/L        |
| Durchbruchskriterium:   | 57.4 µg/L        |
| <b>maßgebend:</b>       | <b>57.4 µg/L</b> |

Medienschutzbasierter Einbauwert  
der gewählten Stoffkomponente:

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| Quelltermfaktor FQT:        | 2.0 |
| Verhältnismäßigkeitsfaktor: | 1.5 |

**ME für ...**

|                                 |                   |
|---------------------------------|-------------------|
| <b>ungünstige Verhältnisse:</b> | <b>60.0 µg/L</b>  |
| <b>günstige Verhältnisse:</b>   | <b>172.3 µg/L</b> |

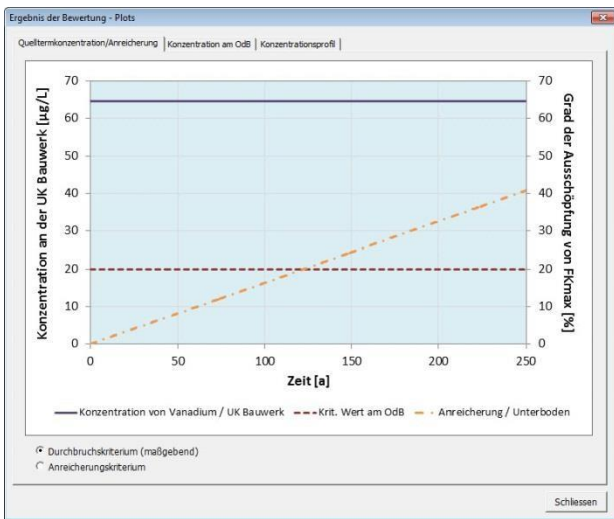
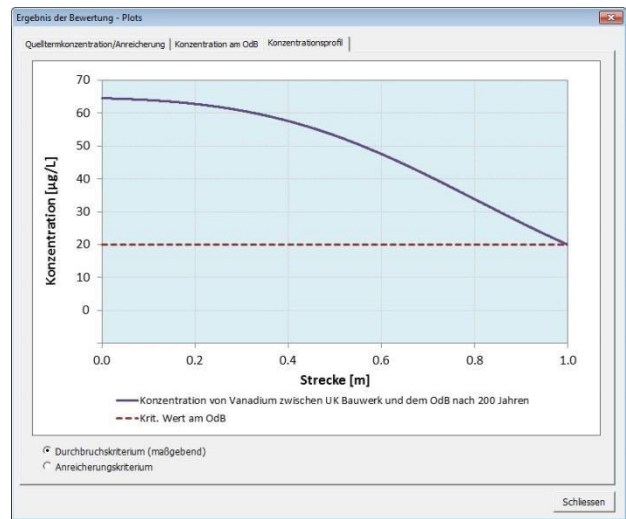
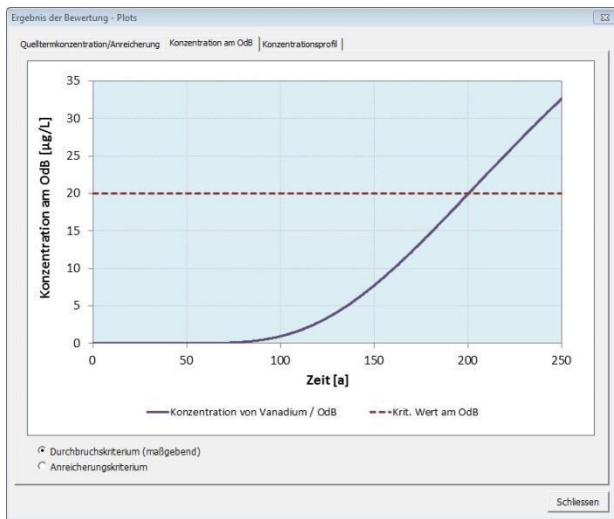
Einbaumöglichkeiten des gewählten MEB  
bezgl. der gewählten Stoffkomponente:

|                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Materialwert:                   | 700.0 µg/L                  |
| <b>ungünstige Verhältnisse:</b> | <b>Einbau nicht möglich</b> |
| <b>günstige Verhältnisse:</b>   | <b>Einbau nicht möglich</b> |

Hinweise  
Keine.

Abbildung

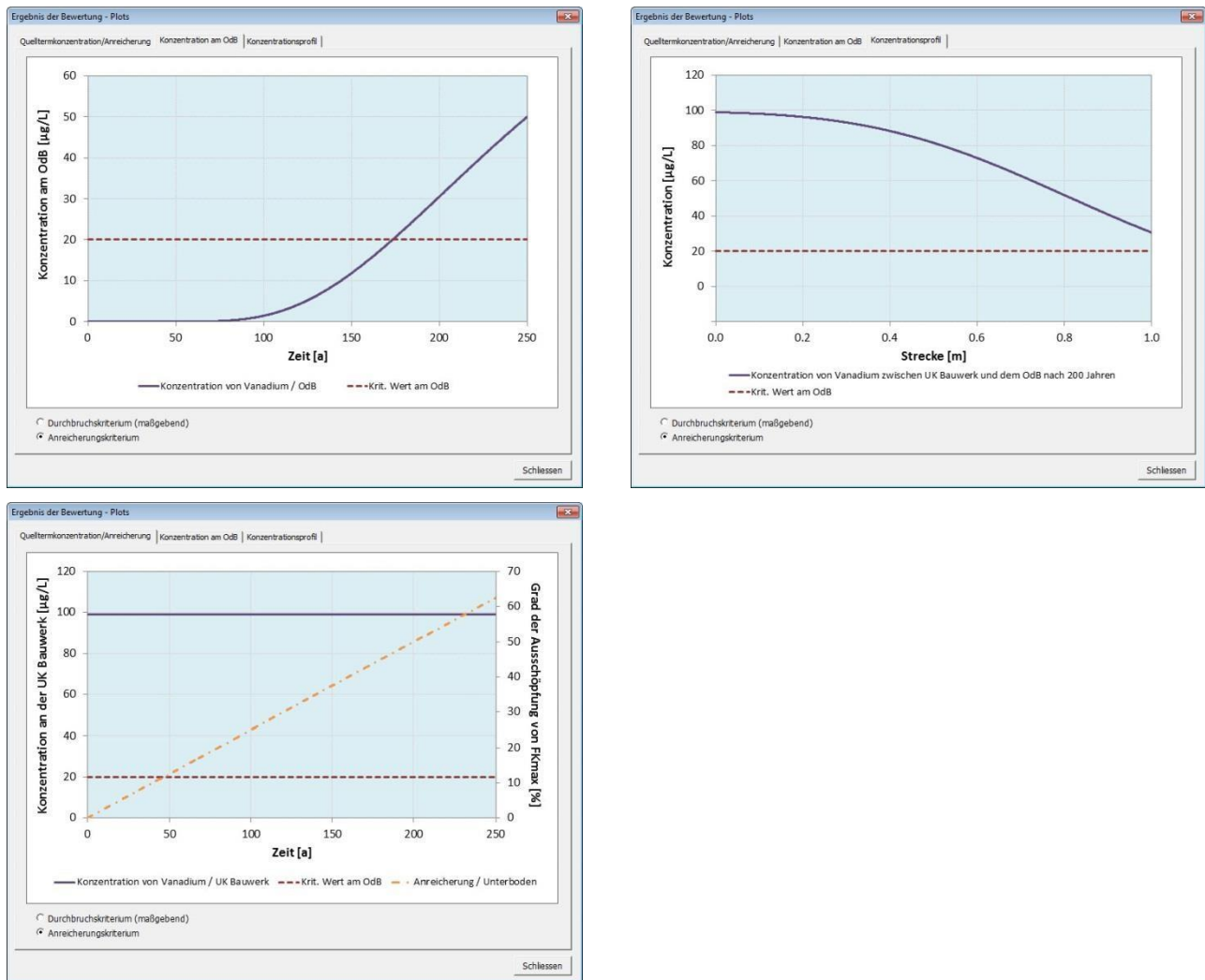
4-6: Ergebnisgrafiken nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung einer einzelnen materialrelevanten Stoffkomponente (Vanadium) eines MEB (RC-2): Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB (links oben), Konzentrationsprofil entlang der Sickerstrecke (rechts oben) sowie Entwicklung der Konzentration im Quellterm und der Stoffanreicherung (links unten), jeweils für die maximal zulässige Quelltermkonzentration in der Bauweise B5 bei sandigem Unterboden für das maßgebende Durchbruchskriterium.



4-7: Ergebnisgrafiken nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung einer einzelnen materialrelevanten Stoffkomponente (Vanadium) eines MEB (RC-2): Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB (links oben), Konzentrationsprofil entlang der Sickerstrecke (rechts oben) sowie Entwicklung der Konzentration im Quellterm und der Stoffanreicherung (links unten), jeweils für die maximal zulässige

Abbildung

Quelltermkonzentration in der Bauweise B5 bei sandigem Unterboden für das nicht maßgebende Anreicherungskriterium.



Wird als Einzelkomponente z.B. Sulfat oder Chlorid mit abklingender Freisetzungsrates betrachtet, für das der Transportterm unberücksichtigt bleibt und allein der Quellterm bzw. das Abklingen der Freisetzungsrates und der Konzentrationsverlauf an der Bauwerk-UK für die Bewertung maßgeblich sind, wird im Eingabebereich „Eigenschaften der Quellterms“ automatisch die entsprechende Option gesetzt (Abbildung 4-8). Zur Veranschaulichung wird nach Abschluss der Berechnung/Bewertung das Bewertungsergebnis in einem zweiten Fenster graphisch dargestellt (Abbildung 4-9).

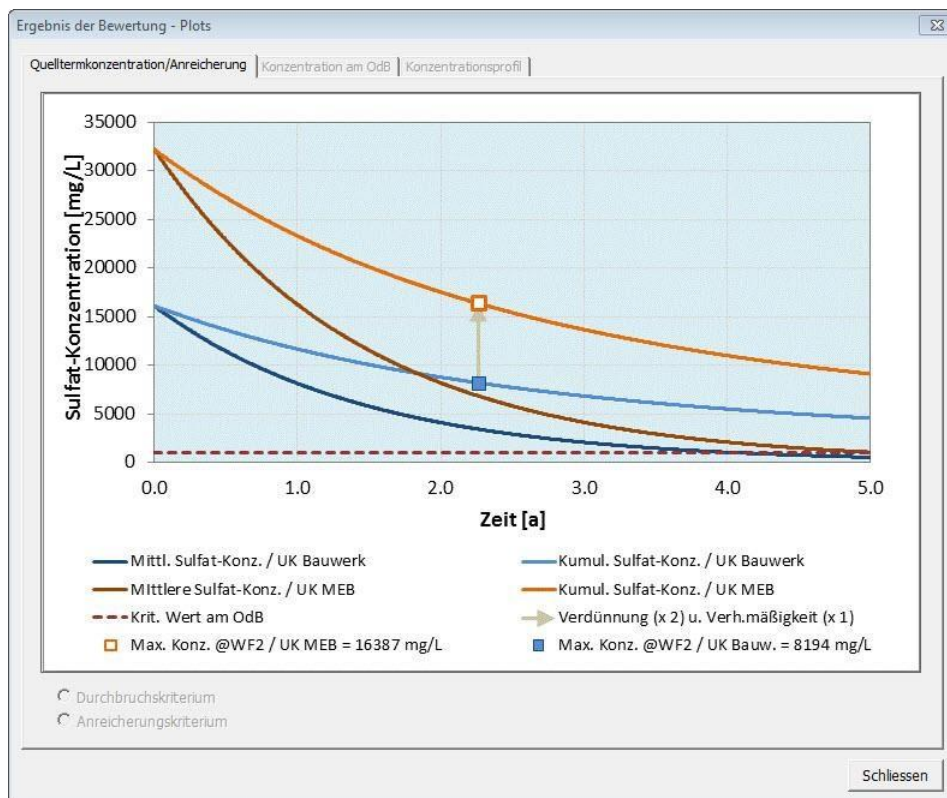
- 4-8: Benutzerformular nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung einer einzelnen materialrelevanten Stoffkomponente eines MEB, für die nur der Quellterm maßgebend ist (hier Sulfat in der Einbauweise B5).

Abbildung

- 4-9: Ergebnisgrafiken nach einer individuellen Bewertung unter Berücksichtigung einer einzelnen materialrelevanten Stoffkomponente eines MEB: Entwicklung der mittleren aktuellen und der kumulativen Konzentration an der UK des Bauwerks sowie an der UK des MEB für die von BEMEB ermittelte maximal zulässige Quelltermkonzentration (hier Sulfat in der Einbauweise B5).



Abbildung



#### 4.2.1.2 Vom Standard abweichende Szenarien

Die individuellen Bewertungsmöglichkeiten von BEMEB können auch zur Bewertung von Einzelfällen verwendet werden, d.h. um die Bewertung für andere Verhältnisse und Rahmenbedingungen durchzuführen als sie in den Standardszenarien der EBV repräsentiert sind. Gegenüber den Standardszenarien abweichende Bedingungen kann es in Bezug auf verschiedene Einflussgrößen geben (Abbildung 4-10).

Beispielsweise ergeben sich aus einer geringeren Gesamtinfiltration (z.B. durch geringeren Niederschlag oder geringere Abflussbeiwerte) und einer entsprechend geringeren gemittelten Sickerwasserrate an der Bauwerk-UK günstigere Bedingungen für retardierbare und/oder abbaubare Substanzen. Für Salze ergeben sich dagegen ungünstigere Bedingungen, da sich der Auswaschungsprozess bei geringerer Durchsickerung des MEB verlangsamt und daraus geringere maximal zulässige Quelltermkonzentrationen und medienschutzbasierten Einbauwerte resultieren, die ein Abklingen der Konzentrationen auf den GFS bzw. den BM innerhalb des Beurteilungszeitraums gewährleisten.

Eine Änderung des Quellterm- bzw. Verdünnungsfaktors ist nicht möglich. Hier liegen hydraulische Berechnungen für die einzelnen Einbauweisen zugrunde, welche Geometrie, Randbedingungen und Materialkombinationen berücksichtigen (vgl. Susset et al. 2018). Die Möglichkeit einer manuellen Änderung erschien daher nicht sachgerecht. Nichtsdestotrotz ist es durchaus vorstellbar, dass durch geeignete Geometrien und Baumaterialien, deren hydraulische Eigenschaften auf das Ausbilden von Kapillarsperren hin ausgerichtet werden, weitere Reduktionen der Infiltration in den MEB und des

### Abbildung

Austrags von Schadstoffen in das Grundwasser erzielt werden könnten. In einem solchen Fall müssten die

erforderlichen hydraulischen Berechnungen für das neue Bauwerksdesign durchgeführt und eine neue Einbauweise mit den entsprechenden Parameterwerten für  $I$ ,  $F_{QT}$  und  $SWR$  in BEMEB ergänzt werden.

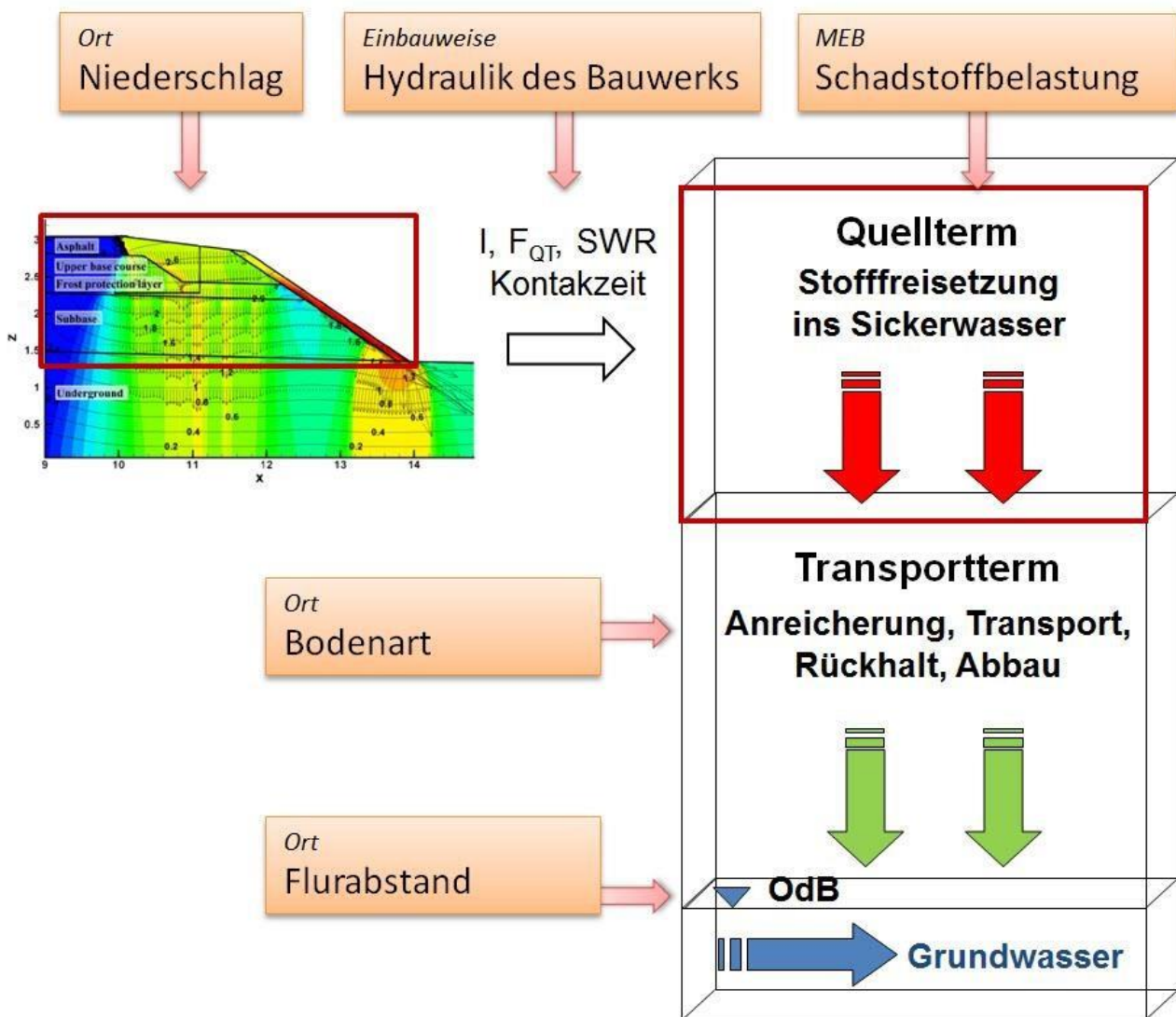
Wenn für einen MEB nachgewiesen werden kann, dass das Schadstoffreservoir endlich ist oder die Freisetzungsraten über die Zeit merklich abklingen, dann kann dies durch einen anderen Quelltermtyp als in der Standardbewertung berücksichtigt werden.

Auch die Charakterisierung des Transportterms kann in der individuellen Bewertung verändert werden: die relevanten Bodeneigenschaften, die Länge der Sickerstrecke, die anzusetzende Dispersivität und der Ausschöpfungsgrad der Filterkapazität.

Bei der Bewertung von einzelnen Stoffkomponenten kann auch die Abbauratenkonstante verändert werden (wenn ein entsprechendes Abbaupotential für betrachteten Einzelfall nachgewiesen werden kann).

Die individuelle Bewertung kann auch für kürzere oder längere Beurteilungszeiträume als im Standardfall der EBV durchgeführt werden.

Abbildung 4-10: Schematische Darstellung der Einflussgrößen bei der Ableitung von medienenschutzbasierten Einbauwerten.



Im folgenden Anwendungsbeispiel wird die Freisetzung von Antimon aus Kupferhüttenmaterial (CUM) betrachtet. Näher bewertet werden die Einbaumöglichkeiten in der Einbauweise 14a für den günstigen Fall bei sandigem Unterboden (der ungünstige Fall wird immer mit bewertet). Hierbei werden die Ergebnisse für zwei unterschiedliche Definitionen für den Quellterm verglichen.

Hintergrund sind die Ergebnisse des ersten Teilprojekts dieses Forschungsvorhabens an der Universität Tübingen (Susset et al. 2017), in dem eine über die Zeit abklingende Freisetzung von Antimon aus Kupferhüttenmaterial beobachtet und für die Beschreibung der Abklingkurve ein Verteilungskoeffizient von  $1.6 \text{ L kg}^{-1}$  bestimmt wurde.

Zunächst wird eine Bewertung für einen Quellterm mit konstanter Freisetzungsrage durchgeführt. Die entsprechenden Eingaben sowie das Ergebnis dieser individuellen Bewertung zeigt Abbildung 4-11. Die Berechnung wird automatisch durchgeführt und das Ergebnis angezeigt, wenn die Schaltfläche „Berechnung starten“ gedrückt wird. In diesem Fall ist das Durchbruchkriterium maßgebend, mit einer maximal zulässigen Quelltermkonzentration bis WF2 von  $5.02 \mu\text{g L}^{-1}$ . Unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsfaktors ergibt sich ein ME für günstige Verhältnisse von  $7.50 \mu\text{g L}^{-1}$ . Dieser

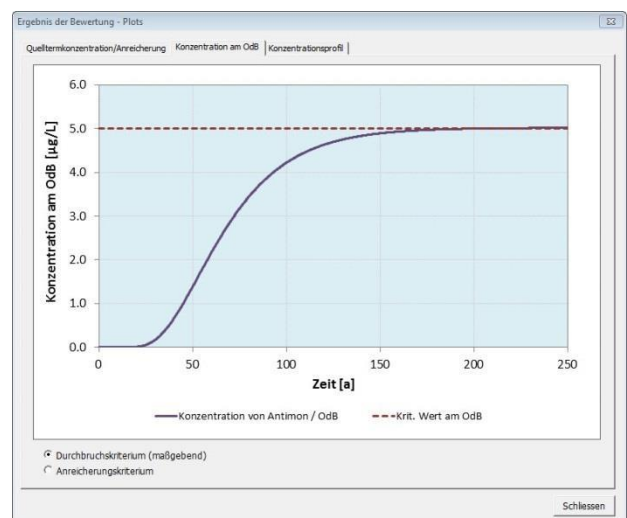
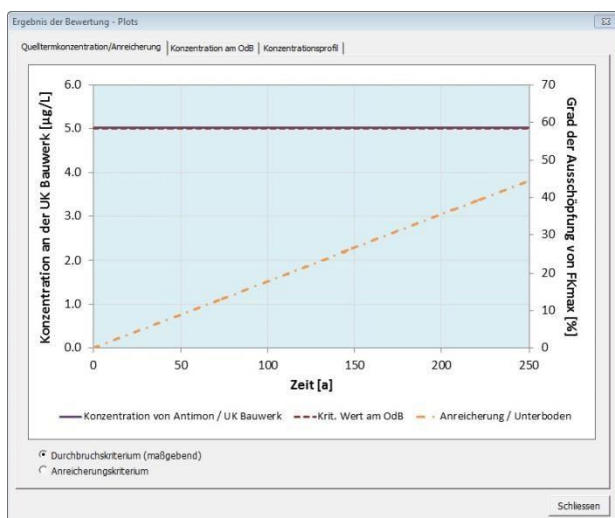
Abbildung 4-11 :

Wert ist geringer als der Materialwert von CUM in der Materialklasse 1 bezgl. Antimon, weshalb ein Einbau nicht zulässig ist. Zu beachten ist, dass die Einbaumöglichkeit hier nur in Bezug auf den betrachteten Einzelstoff bewertet wird. Zur Erfüllung des Anreicherungskriteriums wäre ein nur unwesentlich höherer Wert für die maximale Quelltermkonzentration bis WF2 zulässig ( $7.06 \mu\text{g L}^{-1}$ ).

Plots zur Veranschaulichung des Ergebnisses werden automatisch erzeugt (Abbildung 4-12).

Nach Abschluss der Bewertung kann das Bewertungsergebnis als 2-seitiger Kurzbericht im MS WordFormat ausgegeben werden. Über die Schaltfläche „Ausgabe“ wird das Formular für die Ausgabe aufgerufen, in dem die Speicheradresse angegeben und Hinweise zur Bewertung für den Kurzbericht eingetragen werden können (Abbildung 4-13). Abschließend die Schaltfläche „Starte Ausgabe“ drücken und die Erstellung der Ergebnisausgabedatei abwarten (siehe auch Abschnitt 3.5.2.2).

4-11 Benutzerformular nach der individuellen Bewertung für Antimon in CUM-1 in der Einbauweise 14a für einen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzung.



Individuelle Bewertung

Bewertung mit ggf. Einzelfall-spezifischen Parameterwerten

**Auswahl des zu bewertenden Falles**

Ersatzbaustoff(klasse): CUM-1

Stoffkomponente(n): Antimon

nur materialrelevante Komponenten

Einbauweise: 14a

Bodentyp: Sand

**Eigenschaften des Quellterms**

Infiltrationsrate: 377 [mm/Jahr]

Mittlere Sickerwasser-  
rate an der Bauwerk-UK: 377 [mm/Jahr]

Schichtdicke: 50 [cm]

Unendliche Quelle - konstante Konzentration

Endliche Quelle - konstante Konzentration  
Dauer des Eintrags: [Jahre]

Abklingende Quelle  
Verteilungskoeffizient: - [L/kg]

Zurücksetzen auf Standardwerte

**Eigenschaften des Transportterms**

Porosität des Bodens: 0.17 [-]

Lagerungsdichte: 1.42 [kg/L]

Abbauratenkonstante: 0.00 [1/Jahr]

Distanz zum O.d.B.: 1 [m]

Dispersivität: 10 [% d. Distanz]

Bewertungszeitraum: 200 [Jahre]

Ausschöpfungsgrad  
der Filterkapazität: 50 [%]

Zurücksetzen auf Standardwerte

**Berechne bewertungsrelevante Grenzwerte**

Starte Berechnung Bewertung abgeschlossen. Zeige Grafik

Grafiken für Animation erstellen

Maximal zulässige Quelltermkonzentration  
der gewählten Stoffkomponente:

|                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| Anreicherungskriterium: | 7.06 µg/L        |
| Durchbruchskriterium:   | 5.02 µg/L        |
| <b>maßgebend:</b>       | <b>5.02 µg/L</b> |

Medienschutzbasierter Einbauwert  
der gewählten Stoffkomponente:

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| Quelltermfaktor FQT:        | 1.00 |
| Verhältnismäßigkeitsfaktor: | 1.50 |

**ME für ...**

|                                 |                  |
|---------------------------------|------------------|
| <b>ungünstige Verhältnisse:</b> | <b>7.50 µg/L</b> |
| <b>günstige Verhältnisse:</b>   | <b>7.53 µg/L</b> |

Einbaumöglichkeiten des gewählten MEB  
bezgl. der gewählten Stoffkomponente:

|                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Materialwert:                   | 25.00 µg/L                  |
| <b>ungünstige Verhältnisse:</b> | <b>Einbau nicht möglich</b> |
| <b>günstige Verhältnisse:</b>   | <b>Einbau nicht möglich</b> |

Hinweise  
Keine.

Schliessen Ausgabe WinSMART öffnen Hilfe >>

Abbildung 4-12: Ergebnisplots der individuellen Bewertung für Antimon in CUM-1 in der Einbauweise 14a für einen Quellterm mit konstanter Stofffreisetzung: Entwicklung der Konzentration im Quellterm und der Stoffanreicherung (links) und Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB (rechts).

Abbildung 4-13 : Benutzerformular zur Ausgabe der Ergebnisse nach der individuellen Bewertung für Antimon in CUM-1 in der Einbauweise 14a.

Die Bewertung für einen Quellterm mit abklingender Freisetzungsrates ergibt ein anderes Bild. Abbildung 4-14 zeigt die Eingaben sowie das Ergebnis dieser individuellen Bewertung. Nach einem Klick auf die Schaltfläche „Berechnung starten“ wird die Berechnung automatisch durchgeführt und das Ergebnis angezeigt. In diesem Fall ist das Anreicherungskriterium maßgebend, mit einer maximal zulässigen Quelltermkonzentration bis WF2 (MQTK) von  $101 \mu\text{g L}^{-1}$ . Unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsfaktors ergibt sich daraus ein ME für günstige Verhältnisse von  $151 \mu\text{g L}^{-1}$ . Dieser Wert ist höher als der Materialwert von CUM in der Güteklasse 1 bezgl. Antimon, weshalb ein Einbau zulässig wäre. Zu beachten ist, dass die Einbaumöglichkeit hier nur in Bezug auf den betrachteten Einzelstoff bewertet wird. Zur Beurteilung der Einbaubarkeit von CUM-1 in der Einbauweise 14a ist eine entsprechende Bewertung für alle materialrelevanten Stoffe durchzuführen.

Plots zur Veranschaulichung des Ergebnisses werden automatisch erzeugt (Abbildung 4-15). Es ist klar zu sehen, dass der Quellterm relativ schnell abklingt und das Durchbruchkriterium nicht das maßgebende Kriterium ist – die zu erwartende maximale Konzentration am OdB bei Einhaltung des Anreicherungskriteriums liegt deutlich unter dem kritischen Wert am OdB (GFS bzw. BM).

Zu beachten ist, dass die MQTK zur Erfüllung des Anreicherungskriteriums sehr viel höher ist als im Vergleichsfall eines Quellterms mit konstanter Freisetzungsrates ( $131 \mu\text{g L}^{-1}$  gegenüber  $5.02 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Dies ist auf das Abklingen der Freisetzung zurückzuführen.

4-14 Benutzerformular für die individuelle Bewertung nach Abschluss der Bewertung für Antimon in CUM-1 in der Einbauweise 14a für einen Quellterm mit abklingender Stofffreisetzung

The screenshot shows the 'Individuelle Bewertung' (Individual Evaluation) window. It is divided into several sections:

- Auswahl des zu bewertenden Falles (Selection of the case to be evaluated):**
  - Ersatzbaustoff(klasse): CUM-1
  - Stoffkomponente(n): Antimon
  - nur materialrelevante Komponenten
  - Einbauweise: 14a
  - Bodentyp: Sand
- Berechne bewertungsrelevante Grenzwerte (Calculate evaluation-relevant limit values):**
  - Buttons: **Starte Berechnung**, **Bewertung abgeschlossen.**, **Zeige Grafik**
  - Grafiken für Animation erstellen
  - Maximal zulässige Quelltermkonzentration der gewählten Stoffkomponente:
 

|                         |                    |
|-------------------------|--------------------|
| Anreicherungskriterium: | 100.71 µg/L        |
| Durchbruchskriterium:   | 235.21 µg/L        |
| <b>maßgebend:</b>       | <b>100.71 µg/L</b> |
  - Medienschutzbasierter Einbauwert der gewählten Stoffkomponente:
 

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| Quelltermfaktor FQT:        | 1.00 |
| Verhältnismäßigkeitsfaktor: | 1.50 |
  - ME für ...**

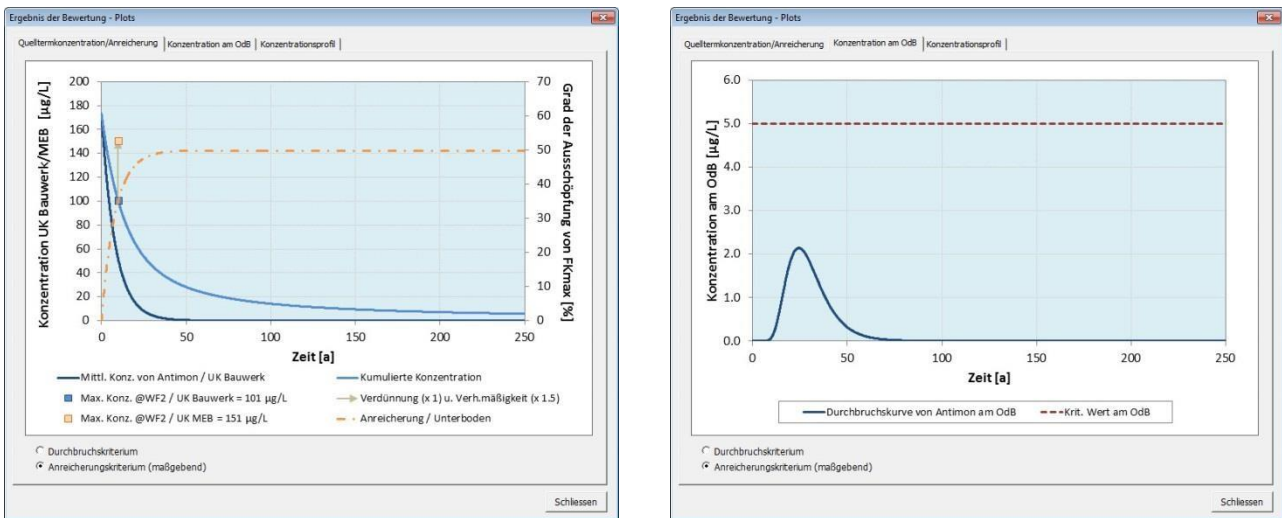
|                                 |                    |
|---------------------------------|--------------------|
| <b>ungünstige Verhältnisse:</b> | <b>7.50 µg/L</b>   |
| <b>günstige Verhältnisse:</b>   | <b>151.07 µg/L</b> |
  - Einbaumöglichkeiten des gewählten MEB bezgl. der gewählten Stoffkomponente:
 

|                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Materialwert:                   | 25.00 µg/L                  |
| <b>ungünstige Verhältnisse:</b> | <b>Einbau nicht möglich</b> |
| <b>günstige Verhältnisse:</b>   | <b>Einbau möglich</b>       |
- Eigenschaften des Quellterms (Properties of the source term):**
  - Infiltrationsrate: 377 [mm/Jahr]
  - Mittlere Sickerwasser-rate an der Bauwerk-UK: 377 [mm/Jahr]
  - Schichtdicke: 50 [cm]
  - Unendliche Quelle - konstante Konzentration
  - Endliche Quelle - konstante Konzentration
    - Dauer des Eintrags: [ ] [Jahre]
  - Abklingende Quelle
    - Verteilungskoeffizient: 1.6 [L/kg]
  - Zurücksetzen auf Standardwerte
- Eigenschaften des Transportterms (Properties of the transport term):**
  - Porosität des Bodens: 0.17 [-]
  - Lagerungsdichte: 1.42 [kg/L]
  - Abbauratenkonstante: 0.00 [1/Jahr]
  - Distanz zum O.d.B.: 1 [m]
  - Dispersivität: 10 [% d. Distanz]
  - Bewertungszeitraum: 200 [Jahre]
  - Ausschöpfungsgrad der Filterkapazität: 50 [%]
  - Zurücksetzen auf Standardwerte
- Buttons: **Schliessen**, **Ausgabe**, **WinSMART öffnen**, **Hilfe >>**

Abbildung 4-15: Ergebnisplots der individuellen Bewertung für Antimon in CUM-1 in der Einbauweise 14a für einen Quellterm mit abklingender Stofffreisetzung: Entwicklung der Konzentration im Quellterm und der Stoffanreicherung (links) und Konzentrationsdurchbruchskurve am OdB (rechts).



Abbildung :



#### 4.2.2 Suche geeigneter Einbauweisen

Mit dieser Bewertungsoption werden die Einbaumöglichkeiten für einzelne Materialklassen der mineralischen Ersatzbaustoffe geprüft und das Ergebnis dieser Prüfung in die Tabellenblätter „Einsatz\_StraWege“ und „Einsatz\_Bahnbw“ eingetragen. Die Grundlage für diese Prüfung sind die Materialwerte der gewählten Materialklasse und die zuvor berechneten medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) der für das gewählte Material relevanten Stoffkomponenten.

Die Prüfung wird mit Hilfe des Tabellenblatts „Material\_cal“ durchgeführt, welches wiederholt (für jede Einbauweise) aufgerufen wird, um bei der Suche alle Einbauweisen zu berücksichtigen.

Um eine Suche durchzuführen, wähle in der BEMEB-Menüleiste den Menüpunkt „Suche geeignete Einbaumöglichkeiten“ um das Benutzerformular für die Suche aufzurufen (Abbildung 4-16). Wähle eine Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs aus, z.B. HMVA-1, und starte die Suche (Schaltfläche „Starte Suche“). In der Suche werden nun automatisch die Einbaumöglichkeiten von HMVA-1 in allen prinzipiell in Frage kommenden Einbauweisen für günstige und ungünstige Verhältnisse geprüft. Nach dem Ende der Bewertung wird die Einsatz-Tabelle für HMVA-1 im Straßen-, Wege- und Erdbau angezeigt (Tabellenblatt „Einsatz\_StraWege“, siehe Abbildung 4-17).

Abbildung 4-16: Benutzerformular zur Suche von Einsatzmöglichkeiten für eine ausgewählte Materialklasse (hier: HMVA-1)

Einsatzmöglichkeiten des Ersatzbaustoffs

Suche Einsatzmöglichkeiten für mineralische Ersatzbaustoffe

Wähle mineralischen Ersatzbaustoff

Ersatzbaustoffklasse: HMVA-1

Materialwerte (vorhandene Werte werden angezeigt):

|                     |     |
|---------------------|-----|
| Antimon [ug/L]      | 10  |
| Chrom (ges.) [ug/L] | 150 |
| Kupfer [ug/L]       | 110 |
| Molybdän [ug/L]     | 55  |
| Vanadium [ug/L]     | 55  |
| Chlorid [mg/L]      | 160 |
| Sulfat [mg/L]       | 820 |

Auswahl der Datenquelle für die ME-Werte

- Verwende ME aus den Tabellenblättern (ggf. mit händisch editierten Werten)
- Verwende ME der aktuellsten eigenen Bewertung (werden eingelesen)
- Verwende ME aus der aktuellen Standardbewertung nach EBV (werden heruntergeladen)

Suche Einsatzmöglichkeiten

Starte Suche

Die Suche ist abgeschlossen. Sehen Sie die Ergebnisse in den Tab.blättern oder setzen Sie mit der Ergebnisausgabe fort.

Weiter zur Ausgabe    Schliessen    Hilfe >>

Abbildung 4-17: Tabellenblatt „Einsatz\_StraWege“ nach der Suche der Einsatzmöglichkeiten für eine Materialklasse (hier: HMVA-1).

| Einsatzmöglichkeiten für den Ersatzbaustoff |  | Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht     |         |       |                                     |                  |                       |
|---|--|--|---------|-------|-------------------------------------|------------------|-----------------------|
|   |  | außerhalb von Wasserschutzbereichen        |         |       | innerhalb von Wasserschutzbereichen |                  |                       |
| HMVA-1                                      |  | ungünstig                                  | günstig |       | WSG IIIA, HSG III                   | WSG IIIB, HSG IV | Wasservorangengebiete |
| lfd Nr.                                     | Einbauweisen   | 1  | Sand    | L/S/T | 4                                   | 5                | 6                     |
| 1   | Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden  |  |         |       |                                     |                  |                       |
| 2   | Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht  |  |         |       |                                     |                  |                       |
| 3   | Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht  |  |         |       |                                     |                  |                       |
| 4   | Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht   |  |         |       |                                     |                  |                       |
| 5   | Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten                        |  |         |       |                                     |                  |                       |
| 6   | Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung   |  |         |       |                                     |                  |                       |
| 7   | Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht   | +  | +       | +     | +                                   | +                | +                     |
| 8   | Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung, und Unterbau bis 1m Dicke ab Planum, unter gebundener Deckschicht   | -  | +       | +     | BU                                  | U                | +                     |
| 9   | Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise  | keine Modellierung geschlossener Bauweisen |         |       |                                     |                  |                       |
| 10  | Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE  | +  | +       | +     | +                                   | +                | +                     |
| 11  | Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen  | +  | +       | +     | +                                   | +                | +                     |
| 12  | Deckschicht ohne Bindemittel   | +  | +       | +     | +                                   | +                | +                     |
| 13  | ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum, Verfüllung von Leitungsgräben und Unterbau bis 1m Dicke ab Planum, unter Deckschicht ohne Bindemittel | -  | +       | +     | BU                                  | U                | +                     |
| 14  | ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum, Verfüllung von Leitungsgräben und Verfüllung von Baugruben unter Plattenbelägen                       | -  | +       | +     | BU                                  | U                | +                     |
| 15  | ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum, Verfüllung von Leitungsgräben und Verfüllung von Baugruben unter Pflaster                             | -  | +       | +     | BU                                  | U                | +                     |
| 16a   | Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE                                 | -  | +       | +     | BU                                  | U                | +                     |
| 16b   | Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE, mit Kapillarsperre             | -  | +       | +     | BU                                  | U                | +                     |
| 17a   | Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht   | -  | +       | +     | BU                                  | U                | +                     |
| 17b   | Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht, mit Kapillarsperre   | -  | +       | +     | BU                                  | U                | +                     |

Um das Ergebnis auszugeben, gehe weiter zur Ausgabe (Schaltfläche „Weiter zur Ausgabe“). Es öffnet sich das Formular für die Ergebnisausgabe. Die Auswahl der exportierenden Ergebnisse ist bereits entsprechend der vorangegangenen Aktion ausgewählt. Prüfe Formate und Speicherort und starte die Ausgabe (Schaltfläche „Starte Ausgabe“). Die Ergebnisdateien werden am Speicherort in entsprechenden Unterordnern abgelegt: (i) im Unterordner „tabellen“ (MS Excel-Dateien) die Datei „Tab\_Einsatz\_HMVA-1(Jahr-Monat-Tag\_Zeit).xlsx“, (ii) im Unterordner „berichte“ (MS Word-Dateien) die Datei „Tab\_Einsatz\_HMVA-1(Jahr-Monat-Tag\_Zeit).docx“.

## 5 Quellenverzeichnis

Bear, J. (1979): Hydraulics of Groundwater. Mc Graw Hill, New York.

- Beyer, C., Konrad, W., Hee, P., C., Bauer, S., Rügner, H., Liedl, R., Grathwohl, P. (2007): Modell-basierte Sickerwasserprognose für die Verwertung von Recyclingbaustoff. *Grundwasser* 12(2): 94-107.
- Beyer C., Konrad W., Rügner H., Bauer S., Liedl R., Grathwohl P. (2009): Model-based prediction of long-term leaching from secondary materials in road constructions and noise protection dams, *Waste Management* 29(2), 839-850.
- BGR (2006): BÜK 1000 - Digitale Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stand: 2006.
- BMU (2000): Hydrologischer Atlas von Deutschland, 3. Lieferung 2003.- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), Berlin.
- BMUB (2017): Kabinettsfassung des Bundesministeriums für Umwelt, Natur- und Verbraucherschutz, Bau und Reaktorsicherheit zur Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung vom 06.02.2017, <[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Abfallwirtschaft/mantelv\\_entwurf\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/mantelv_entwurf_bf.pdf)>
- Bourg A.C.M. (1995): Speciation of Heavy Metals in Soils and Groundwater and Implications for their Natural and Provoked Mobility. In: Salomons, Förstner, Mader (Hsg.): *Heavy Metals*. Springer, Berlin.
- Bürger, M., Kocher, B., Marks, T., Hillmann, R., 2008. Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung: Modellannahmen für Straßenbauwerke.- Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen vom Juli 2008.
- Calmano, W., Hong, J., Förstner, U. (1992): Einfluß von pH-Wert und Redoxpotential auf die Bindung und Mobilisierung von Schwermetallen in kontaminierten Sedimenten. *Vom Wasser* 78: 245-257.
- Chiou, C.T., Peters, L. J., Freed, V. H. (1979): A physical concept of soil-water equilibria for nonionic organic compounds. *Science* 206(11): 831-832.
- Dijkstra, J.J., Meeussen, J.C.L., Comans, R.N.J. (2004): Leaching of heavy metals from contaminated soils: an experimental and modelling study. *Environmental Science and Technology* 38: 4390-4395.
- DIN 19528 (2009). Elution von Feststoffen – Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von organischen und anorganischen Stoffen.
- Duijnsveld, W.H.M., Godbersen, L., Dilling, J., Gäbler, H.E., Utermann, J., Klump, G., Scheeder, G. (2008): Ermittlung flächenrepräsentativer Hintergrundkonzentrationen prioritärer Schadstoffe im Bodensickerwasser. Endbericht UBA-Forschungsvorhaben 204 72 264, 163 pp.
- Duijnsveld, W.H.M.; Godbersen, L.; Dilling, J.; Gäbler, H.-E.; Utermann, J. (2010): Ermittlung flächenrepräsentativer Hintergrundkonzentrationen von Spurenelementen im Bodensickerwasser. *Bodenschutz*, 04.2010: 96-102
- Finkel, M., Grathwohl, P. (2017): Impact of pre-equilibration and diffusion limited release kinetics on effluent concentration in column leaching tests: Insights from numerical simulations. *Waste Management* 63: 58–73.
- Finkel, M. (1999): Quantitative Beschreibung des Transports von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und Tensiden in porösen Medien. - *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, TGA, C47*, 98 S.
- Fraunhofer Institut Schmallenberg (2007): Daten zu Sorption und Abbauraten organischer Stoffe. Mitteilung des FraunhoferInstituts, dem BMU am 24.01.2007 vorgelegt.
- Fraunhofer Institut Schmallenberg (2009): Gutachten zu Untersuchungen zu Sorption von Glyphosat und dessen Abbauprodukt AMPA an Unterböden. Gutachten für das BMU, den BMU vorgelegt am 26.01.2009.
- Gäbler, H.E., Glüh, K., Bahr, A., Utermann, J. (2009): Quantification of vanadium adsorption by German soils, *Journal of Geochemical Exploration* 103: 37–44.
- Glugla, G., Jankiewicz, P., Rachimow, C., Lojek, K., Richter, K., Fürtig, G., Krahe, P (2003): Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses.- *BfG-Bericht, Nr. 1342*, 106 S.

- Grathwohl, P., Susset, B. (2001): Sickerwasserprognose für organische Schadstoffe: Grundlagen und Stand der Forschung. *altlastenspektrum* 6, 285-293.
- Grathwohl, P., Rahman, M. (2002): Partitioning and pore-filling: Solubility-normalized sorption iso-therms of nonionic organic contaminants in soils and sediments.- *Israel J. of Chemistry* 42: 67-75.
- Grathwohl, P., Liedl, R. Konrad, W., Beyer, C., Amankwah, E.A. (2006): BMBF-Verbund-Forschungsvorhaben "Sickerwasserprognose", Teilprojekt 1a: "Übertragung der Ergebnisse des BMBF-Förderschwerpunktes Sickerwasserprognose auf repräsentative Fallbeispiele"; Teilprojek 1b: "Bestimmung der Retardation unter Nichtgleichgewichtsbedingungen", Abschlussbericht zum BMBF-Projekt "Sickerwasserprognose" Nr. 02WP0517 des Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG) der Universität Tübingen, TIB Hannover, DOI: 10.2314/GBV:527536415.
- Grathwohl, P., Susset, B. (2009): Comparison of percolation to batch and sequential leaching tests: theory and data. *Waste Management* 29, 2681–2688.
- Henzler, R. (2004): Quantifizierung und Modellierung der PAK-Elution aus verfestigten und unverfestigten Abfallmaterialien. Dissertation. *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, TGA, C76, 2004, 118 S.*
- Henzler R., Rügner H., Grathwohl P. (2006): Bewertung der Filter- und Pufferfunktion von Unterböden für organische Schadstoffe, *Bodenschutz* 10 (1), 8-14.
- Herms U., Brümmer G. (1984): Einflussgrößen der Schwermetalllöslichkeit und -bindung in Böden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 147: 400-424.
- Karickhoff, S., Brown, D., Scott, T. (1979): Sorption of hydrophobic pollutant on natural sediments. *Wat. Res.* 13: 241-248.
- Kleineidam, S.; Rügner, H., Grathwohl, P. (1999): Influence of Petrographic Composition/Organic Matter Distribution of Fluvial Aquifer Sediments on the Sorption of Hydrophobic Contaminants. *Sediment. Geol.* 129: 311-325.
- Kleineidam, S., Schüth, C., Grathwohl, P. (2002): Solubility-normalized combined adsorption-partitioning sorption isotherms for organic pollutants. *Environmental Science and Technology* 36: 4689-4697.
- KM GmbH (2011): Untersuchungen zum Infiltrationsverhalten von Pflaster- und Plattenbelägen.- KM GmbH für Straßenbau und Umwelttechnik, Ergebnisbericht dem BMU im März 2011 vorgelegt.
- LAGA - Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (2004): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln. *Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA(20)*.
- Madlener, I. (2004): Quantifizierung und Modellierung des PAK-Desorptionsverhaltens aus feinkörnigem Material mittels Säulenversuchen (DIN V 19736) und Hochdruck-Temperatur-Elution (ASE). Dissertation. *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, TGA, C75, 172 S.*
- Madlener, I., R. Henzler, Grathwohl, P. (2003): Material Investigations to determine the leaching behaviour of PAHs at elevated temperatures. In: Halm D. und Grathwohl P.: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Groundwater Risk Assessment at Contaminated Sites (GRACOS) and Integrated Soil and Water Protection (SOWA)*. *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten C69: 193198.*
- Ogata, A., Banks, R B (1961): A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media; *US Geol. Surv. Prof. Paper* 411-A: 1-9.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A, Vetterling, W.T., Flannery, B.P. (1992): *Numerical Recipes in Fortran 77 - The Art of Scientific Computing*. Second Edition, Cambridge University Press.
- Ridders, C.J.F. (1979): *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. CAS-26: 979–980.
- RuA-StB (E 2004): Richtlinien für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen in Straßenbau. Ausgabe 2001, FGSV-Nr.642.

- Rügner, H., Henzler, R., Grathwohl, P. (2005): Beurteilung der Empfindlichkeit der Filter- und Pufferfunktion von Böden (i.B. Unterböden) nach Maßstäben des vorsorgenden Bodenschutzes für organische Schadstoffe. Abschlussbericht der Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften zum Projekt: „LABO 2003 B 2.03“ (Programm: "Wasser und Boden" 2002 der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz).
- Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G.W. Hartge, K.H., Schwertmann, U. (1992): Scheffer/Schachtschabel - Lehrbuch der Bodenkunde, Enke Stuttgart, 13. Auflage, 491 S.
- Schug, B., Hoß, T., Düring, R.-A., Gäth, S. (1999): Regionalization of sorption capacities for arsenic and cadmium. Plant and Soil 213: 181–187.
- Seth, R., Mackay, D., Muncke, J. (1999): Estimating of organic carbon partition coefficient and its variability for hydrophobic chemicals. Environ. Sci. Technol. 33(14): 2390-2394.
- Stange, C.F., Rückkamp, D. (2016): Experimentelle Ermittlung und statistische Ableitung von substratüber-greifenden Adsorptionsisothermen für Arsenat und Vanadat. UBA-Texte, Projektnummer 40227, Umweltbundesamt.
- Susset, B. (2004): Materialuntersuchungen und Modellierungen zur Unterscheidung Ungleichgewicht/Gleichgewicht in Säulenversuchen zur Sickerwasserprognose für organische Schadstoffe. Dissertation, Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten TGA 74, University of Tübingen, Germany.
- Susset, B., Leuchs, W. (2008): Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Böden – Ermittlung der QuellstärkeEntwicklung und des Rückhalte- und/oder Abbaupotentials mittels Freilandlysimetern und Laborelationsmethoden (Förderkennzeichen O2WP0286). Abschlussbericht des Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, Germany.
- Susset, B., Leuchs, W. (2011): Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes Sickerwasserprognose in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden – Ableitung von Materialwerten im Eluat und Einbaumöglichkeiten mineralischer Ersatzbaustoffe (Förderkennzeichen UFOPLAN 20574251). Abschlussbericht des Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz NordrheinWestfalen, Recklinghausen, Germany.  
<<http://www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft/publikationen/ersatzstoffe.pdf>>.
- Susset, B., Grathwohl, P. (2011): Leaching standards for mineral recycling materials – A harmonized regulatory concept for the upcoming German Recycling Decree. Waste Management 31(2): 201-214.
- Susset, B. (2016): Beurteilung der Stofffreisetzung aus Ziegelmaterialien in Deckschichten ohne Bindemittel nach dem UBAGrenzwertableitungskonzept für die Mantelverordnung. Gutachten für den Bundesverband der Ziegelindustrie, dem BMUB 07/2016 übermittelt.
- Susset, B., Grathwohl, P., Finkel, M., Oest, J., Betz, A. (2017): Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil I: Stofffreisetzungsverhalten mineralischer Abfälle. Abschlussbericht, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Universität Tübingen, Dezember 2017, 397 S.
- Susset, B., Maier, U., Finkel, M., Grathwohl, P. (2018): Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge. Fachbericht zu den wissenschaftlichen Grundlagen einer Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken (Ersatzbaustoffverordnung, Artikel 2 der MantelV). Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Universität Tübingen, März 2018, 479 S. <[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-03-27\\_texte\\_26-2018\\_mineralischeersatzbaustoffe.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-03-27_texte_26-2018_mineralischeersatzbaustoffe.pdf)>
- Utermann, J., Meyenburg, G., Altfelder, S., Gäbler, H.-E., Duijnsveld, W.H.M., Bahr, A., Streck, T. (2005): Entwicklung eines Verfahrens zur Quantifizierung von Stoffkonzentrationen im Sickerwasser auf der Grundlage chemischer und physikalischer Pedotransferfunktionen. - Abschlussbericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) zum Teilprojekt O2WP0206 im BMBF- F&E-Vorhaben „Sickerwasserprognose“, vorgelegt beim Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Projektträger

Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), Koordination: Heinrich-Sontheimer-Laboratorium für Wassertechnologie (HSL) im Technologiezentrum Wasser (TZW), 212 S., Technische Informationsbibliothek, Universitätsbibliothek Hannover (TIB/UB).

Utermann, J. (2011): Hintergrundwerte gelöster Spurenelemente im wässrigen Eluat für Böden aus dem ländlichen Raum. Bodenschutz – Hrsg. König, Bachmann, Utermann BoS 50. Lfg. V/2011, 31 pp.

van Genuchten, M.Th. and W.J. Alves. (1982): Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation: Technical bulletin no. 1661, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1982. 151 pp.

WHG – Wasserhaushaltsgesetz (2010): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. 1.3. 2010. [https://www.gesetze-iminternet.de/whg\\_2009/index.html](https://www.gesetze-iminternet.de/whg_2009/index.html)

## 6 Anhang

### 6.1 Berechnungsparameter für die Ableitung von medienenschutzbasierten Einbauwerten

Tabelle 6-1: Kritischer Wert am OdB ( $KW_{\text{OdB}}$ : GFS bzw. BM) und maximale Filterkapazitäten der Böden für die in der EBV berücksichtigten Stoffkomponenten und Stoffgruppen

| Stoffkomponente/-gruppe | $KW_{\text{OdB}}$ [ $\mu\text{g L}^{-1}$ ] | Max. Filterkapazität                                   |  |
|-------------------------|--|--|--|
|                         |  | $F_{k\text{max}(\text{Sand})}$ [ $\text{mg kg}^{-1}$ ] | $F_{k\text{max}(\text{Lehm/Schluff/Ton})}$ [ $\text{mg kg}^{-1}$ ] |
| 15 EPA PAKs             | 0,2  | 2,7  | 2,7  |
| Naphthalin              | 1  | 2,70   | 2,7  |
| MKW                     | 100  | 90   | 90   |
| BTEX                    | 20   | 0,9  | 0,9  |
| PCB, ges.               | 0,01                                       | 0,045  | 0,045  |
| Phenol                  | 8  | 5,7  | 5,7  |
| Chlorphenole, gesamt    | 1  | 5,7  | 5,7  |
| Chlorbenzole, gesamt    | 1  | 0,45   | 0,45   |
| Hexachlorobenzol        | 0,01                                       | 0,45   | 0,45   |
| Atrazin                 | 0,1  | 0,23   | 0,23   |
| Bromacil                | 0,1  | 0,23   | 0,23   |
| Diuron                  | 0,05                                       | 0,23   | 0,23   |
| Glyphosat               | 0,1  | 0,23   | 0,23   |
| Simazin                 | 0,1  | 0,23   | 0,23   |
| Sonstige Herbizide      | 0,1  | 0,23   | 0,23   |
| AMPA                    | 0,1  | 0,23   | 0,23   |
| Antimon                 | 5  | 0,75   | 1,48   |
| Arsen                   | 10   | 2,4  | 10,3   |
| Blei                    | 23 <sup>a</sup>                            | 10   | 27   |
| Cadmium                 | 2 <sup>2</sup>                             | 0,18   | 0,75   |
| Chrom                   | 10 <sup>a</sup>                            | 16,5   | 30,5   |

<sup>2</sup> Sogenannte Bezugsmaßstäbe weichen von GFS ab (siehe Susset et al. 2018, Kapitel 3.4.2: Tabelle 23).



|          |                 |                |                |
|----------|-----------------|----------------|----------------|
| Kupfer   | 20 <sup>a</sup> | 11,5           | 18,5           |
| Molybdän | 35              | 0,5            | 0,95           |
| Nickel   | 20 <sup>a</sup> | 3,5            | 16             |
| Vanadium | 20 <sup>a</sup> | 11             | 48,5           |
| Zink     | 100             | 35             | 90             |
| Chlorid  | 250000          | nicht relevant | nicht relevant |
| Sulfat   | 1038000         | nicht relevant | nicht relevant |
| Fluorid  | 750             | nicht relevant | nicht relevant |

Tabelle 6-2: Kennwerte der beiden Bodenkategorien Sand und Lehm/Schluff/Ton, die in der EBV unterschieden werden

| Bezeichnung                                      | Einheit             | Kennwert für Sand | Kennwert für Lehm/Schluff/Ton |
|--|---------------------|-------------------|-------------------------------|
| pH (CaCl <sub>2</sub> )                          | -                   | 4,8               | 6,6                           |
| Tongehalt  | %                   | 2,46              | 12                            |
| Oxalatlöslicher Mangangehalt Mn <sub>ox</sub>    | mg kg <sup>-1</sup> | 231               | 231                           |
| Organischer Kohlenstoffgehalt C <sub>org</sub>   | %                   | 0,1               | 0,1                           |
| F <sub>ed</sub>                                  | g kg <sup>-1</sup>  | 10,2              | 10,2                          |
| Effektive Porosität n <sub>e</sub>               | -                   | 0,17              | 0,26                          |
| Lagerungsdichte ρ <sub>b</sub>                   | kg L <sup>-1</sup>  | 1,42              | 1,45                          |
| Karbonatgehalt CaCO <sub>3</sub>                 | %                   | 0                 | 5,2                           |
| Oxalatlöslicher Eisengehalt Fe <sub>ox</sub>     | mg kg <sup>-1</sup> | 73                | 2500                          |
| Oxalatlöslicher Aluminiumgehalt Al <sub>ox</sub> | mg kg <sup>-1</sup> | 421               | 38                            |

Tabelle 6-3: Sorptionsparameter für die in der EBV berücksichtigten organischen Stoffkomponenten und Stoffgruppen

| Stoffkomponente/gruppe | log K <sub>oc</sub><br>[L kg <sup>-1</sup> ] | K <sub>d</sub> (Sand)<br>[L kg <sup>-1</sup> ] | K <sub>d</sub> (Lehm/<br>Schluff/Ton)<br>[L kg <sup>-1</sup> ] | Erläuterung |
|------------------------|--|--|--|-------------|
|------------------------|--|--|--|-------------|

|                      |      |    |     |   |
|----------------------|------|----|-----|---|
| 15 EPA PAKs          | 5,12 |    |     | nach Karickhoff et al. (1979):<br>$\log K_{oc} = \log K_{ow} - 0,21$<br>mit $K_{ow} = 10^{5,33} \text{ L kg}^{-1}$ für eine repräsentative Substanz (Fluoranthen/Pyren) |
| Naphthalin           | 3,16 |    |     | nach Karickhoff et al. (1979):<br>$\log K_{oc} = \log K_{ow} - 0,21$  |
| MKW                  | 4,68 |    |     | nach Seth et al. (1999):<br>$\log K_{oc} = -0,88 \log S_{eff} [\text{mol l}^{-1}] + 0,07$   |
| BTEX                 | 2,06 |    |     | nach Grathwohl und Rahman (2002):<br>$\log K_{oc} = -1,06 \log S_{eff} [\text{mol l}^{-1}] - 0,119$   |
| PCB, ges.            | 4,42 |    |     | nach Chiou et al. (1983):<br>$\log K_{oc} = -0,729 * \log S_{eff} [\text{mol l}^{-1}] + 0,001$  |
| Phenol               | 1,40 |    |     | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007)   |
| Chlorphenole, gesamt | 2,50 |    |     | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007)   |
| Chlorbenzole, gesamt | 3,32 |    |     | nach ALA-Arbeitshilfe   |
| Hexachlorobenzol     | 4,75 |    |     | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007)   |
| Atrazin              | 2,17 |    |     | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007)   |
| Bromacil             | 1,86 |    |     | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007)   |
| Diuron               | 2,60 |    |     | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007)   |
| Glyphosat            |      | 77 | 370 | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2008)   |
| Simazin              | 2,13 |    |     | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007)   |
| Sonstige Herbizide   |      | 77 | 54  | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2009)   |
| AMPA                 |      | 77 | 54  | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2009)   |

Tabelle 6-4: Regressionskoeffizienten der multiparametrischen substratübergreifenden Sorptionsisotherme für die in der EBV berücksichtigten Schwermetalle

| Stoffkomponente | K <sub>f</sub> * | n     | P <sub>Corg</sub> | P <sub>MnOx</sub> | P <sub>CaCO3</sub> | P <sub>Ton</sub> | P <sub>pH</sub> | P <sub>FeOx</sub> | P <sub>AlOx</sub> |
|-----------------|------------------|-------|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| Antimon         | 3,004            | 0,841 |                   |                   |                    | 0,692            | -0,352          |                   |                   |
| Arsen           | -0,970           | 0,530 | -0,760            |                   | 0,020              | 0,100            | -0,060          | 0,670             | 0,660             |
| Blei            | 1,019            | 0,598 |                   | 0,249             |                    | 0,333            | 0,393           |                   |                   |
| Cadmium         | -1,493           | 0,835 |                   |                   |                    | 0,501            | 0,583           |                   |                   |
| Chrom           | 3,084            | 0,787 |                   |                   |                    |                  |                 |                   |                   |
| Kupfer          | 0,590            | 0,726 |                   |                   |                    | 0,428            | 0,364           |                   |                   |
| Molybdän        | 5,467            | 0,621 |                   |                   |                    | 0,726            | -0,671          |                   |                   |
| Nickel          | -0,616           | 0,757 |                   |                   |                    | 0,535            | 0,417           |                   |                   |
| Vanadium        | -0,280           | 0,650 | -0,710            |                   |                    | 0,170            |                 | 0,600             | 0,290             |
| Zink            | -0,165           | 0,574 |                   |                   |                    | 0,435            | 0,490           |                   |                   |

Tabelle 6-5: Abbauparameter für die in der EBV berücksichtigten organischen Stoffkomponenten und Stoffgruppen

| Stoffkomponente/gruppe | Halbwertszeit [d] | Abbauratenkonstante [a <sup>-1</sup> ] | Erläuterung                                   |
|------------------------|-------------------|--|---|
| 15 EPA PAKs            | 70                | 3,61                                   | nach Rügner et al. (2005)                     |
| Naphthalin             | 30                | 8,43                                   | nach Rügner et al. (2005)                     |
| MKW                    | ∞                 | 0                                      | nicht abbaubar                                |
| BTEX                   | ∞                 | 0                                      | nicht abbaubar                                |
| PCB, ges.              | ∞                 | 0                                      | nicht abbaubar                                |
| Phenol                 | 4                 | 63,25                                  | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007) |
| Chlorphenole, gesamt   | 10                | 25,30                                  | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007) |
| Chlorbenzole, gesamt   | ∞                 | 0                                      | nicht abbaubar                                |
| Hexachlorobenzol       | ∞                 | 0                                      | nicht abbaubar                                |

|                    |     |      |   |
|--------------------|-----|------|---|
| Atrazin            | 80  | 3,16 | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007) |
| Bromacil           | 180 | 1,41 | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007) |
| Diuron             | 135 | 1,87 | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007) |
| Glyphosat          | 60  | 4,22 | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007) |
| Simazin            | 46  | 5,50 | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2007) |
| Sonstige Herbizide | 50  | 5,06 | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2009) |
| AMPA               | 60  | 4,22 | nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2009) |

Tabelle 6-6: Berechnungsparameter für die in der EBV berücksichtigten Einbauweisen im Schienenverkehrswege- sowie Straßen- und Wegebau

| Code | Beschreibung   | Infiltrationsrate<br>I <sub>BB,ges.</sub> [mm/a] | Sickerwasserrate<br>an der Bauwerk-<br>UK<br>SWR [mm/a] | Quelltermfaktor<br>F <sub>QT</sub> [-] | Schichtdicke<br>D [cm] |
|------|--|--|---|--|------------------------|
| B1   | Schotteroberbau der<br>Bahnbauweise Standard<br>Damm                     | 515  | 395   | 2,3                                    | 60                     |
| B2   | Schotteroberbau der<br>Bahnbauweise Standard<br>Einschnitt               | 515  | 434   | 2                                      | 60                     |
| B3   | Schotteroberbau der<br>Bahnbauweise H                                    | 515  | 221   | 2,6                                    | 60                     |
| B4   | Schotteroberbau der<br>Bahnbauweise H<br>modifiziert                     | 515  | 103   | 2,6                                    | 60                     |
| B5   | Planumsschutzschicht<br>(PSS, KG 1) der<br>Bahnbauweise Standard<br>Damm | 515  | 395   | 2                                      | 30                     |
| B6   | Planumsschutzschicht<br>(PSS, KG 1) der                                  | 515  | 434   | 1,7                                    | 30                     |

|    |   |     |     |     |    |
|----|---|-----|-----|-----|----|
|    | Bahnbauweise Standard Einschnitt                                |     |     |     |    |
| B7 | Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H             | 515 | 221 | 2,2 | 30 |
| B8 | Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H modifiziert | 515 | 103 | 2,2 | 30 |
| B9 | Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H               | 515 | 221 | 5,1 | 30 |

| Code | Beschreibung   | Infiltrationsrate<br>I <sub>BB,ges.</sub> [mm/a] | Sickerwasserrate<br>an der Bauwerk-<br>UK<br>SWR [mm/a] | Quelltermfaktor<br>F <sub>QT</sub> [-] | Schichtdicke<br>D [cm] |
|------|--|--|---|--|------------------------|
| B10  | Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H modifiziert  | 515  | 103   | 5,1                                    | 30                     |
| B11  | Spezielle Bodenschicht der Bahnbauweise H                      | 515  | 221   | 8,1                                    | 30                     |
| B12  | Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Damm                 | 515  | 395   | 1,8                                    | 250                    |
| B13  | Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Einschnitt           | 515  | 434   | 1,6                                    | 170                    |
| B14  | Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H                             | 515  | 221   | 3,1                                    | 250                    |
| B15  | Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H modifiziert                 | 515  | 103   | 6,7                                    | 280                    |
| B16  | Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn | 709  | 171   | 8,5                                    | 60                     |
| B17  | Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn                | 709  | 171   | 4,6                                    | 305                    |

|      |   |     |     |      |     |
|------|---|-----|-----|------|-----|
| B18  | Frostschuttschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung oberhalb der FSS | 709 | 127 | 31   | 60  |
| B19  | Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung                                 | 709 | 127 | 8,7  | 305 |
| B20  | Frostschuttschicht (FSS, KG 2) bzw. Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise E1              | 515 | 38  | 3,9  | 30  |
| B21  | Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 1 mit Dichtungselement auf dem Planum                              | 515 | 38  | 16,5 | 440 |
| B22  | Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bahnbauweise E 2                       | 515 | 103 | 7,7  | 30  |
| B23  | Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 2  | 515 | 103 | 6    | 440 |
| B24a | Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise E 3a  | 515 | 273 | 2,3  | 30  |
| B24b | Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3a   | 515 | 273 | 2,3  | 440 |
| B25  | Planumsschutzschicht (PSS) der Bahnbauweise E 3b  | 515 | 179 | 3,9  | 30  |
| B26  | Unterbau (Damm) der Bahnbauweise  | 515 | 179 | 3,5  | 440 |

| Code | Beschreibung | Infiltrationsrate<br>$I_{BB,ges.}$ [mm/a] | Sickerwasserrate<br>an der Bauwerk-<br>UK<br>SWR [mm/a] | Quelltermfaktor<br>$F_{QT}$ [-] | Schichtdicke<br>D [cm] |
|------|--------------|---|---|---------------------------------|------------------------|
|      | E 3b         |   |   |                                 |                        |

|    |   |  |     |     |     |
|----|---|--|-----|-----|-----|
| 1  | Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden   | Keine Modellierung geschlossener Bauweisen |     |     |     |
| 2  | Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht   | Keine Modellierung geschlossener Bauweisen |     |     |     |
| 3  | Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht   | Keine Modellierung geschlossener Bauweisen |     |     |     |
| 4  | Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht  | Keine Modellierung geschlossener Bauweisen |     |     |     |
| 5  | Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten | Keine Modellierung geschlossener Bauweisen |     |     |     |
| 6  | Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung  | Keine Modellierung geschlossener Bauweisen |     |     |     |
| 7  | Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht  | 1803                                       | 280 | 36  | 15  |
| 8a | Frostschuttschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht   | 1803                                       | 280 | 7,7 | 35  |
| 8b | Bodenverbesserung unter gebundener Deckschicht  | 1803                                       | 280 | 7,7 | 50  |
| 8c | Unterbau bis 1m ab Planum unter gebundener Deckschicht  | 1803                                       | 280 | 7,6 | 100 |

| 9    | Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise | Keine Modellierung geschlossener Bauweisen       |   |  |                        |
|------|---|--|---|--|------------------------|
| 10   | Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE   | 1065   | 67  | 20                                     | 400                    |
| 11   | Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen   | 583  | 583   | 1                                      | 6                      |
| 12   | Deckschicht ohne Bindemittel  | 583  | 583   | 1                                      | 12                     |
| 13a  | ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung unter Deckschicht ohne Bindemittel  | 583  | 583   | 1                                      | 50                     |
| Code | Beschreibung  | Infiltrationsrate<br>I <sub>BB,ges.</sub> [mm/a] | Sickerwasserrate<br>an der Bauwerk-<br>UK<br>SWR [mm/a] | QuelltermFaktor<br>F <sub>QT</sub> [-] | Schichtdicke<br>D [cm] |
| 13b  | Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum, Verfüllung von Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel                        | 583  | 583   | 1                                      | 100                    |
| 13c  | Verfüllung von Baugruben unter Deckschicht ohne Bindemittel   | 583  | 583   | 1                                      | 300                    |
| 14a  | ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung unter Plattenbelägen  | 377  | 377   | 1                                      | 50                     |
| 14b  | Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum, Verfüllung von Leitungsgräben unter Plattenbelägen                                      | 377  | 377   | 1                                      | 100                    |
| 14c  | Verfüllung von Baugruben unter Plattenbelägen   | 377  | 377   | 1                                      | 300                    |



|     |   |      |     |     |     |
|-----|---|------|-----|-----|-----|
| 15a | ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung unter Pflaster  | 242  | 242 | 1   | 50  |
| 15b | Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum, Verfüllung von Leitungsgräben unter Pflaster  | 242  | 242 | 1   | 100 |
| 15c | Verfüllung von Baugruben unter Pflaster   | 242  | 242 | 1   | 300 |
| 16a | Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE                    | 1065 | 170 | 1   | 400 |
| 16b | Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE | 1065 | 170 | 4,2 | 400 |
| 17a | Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht  | 313  | 313 | 1   | 400 |
| 17b | Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht mit Kapillarsperre   | 313  | 313 | 1,7 | 400 |

Tabelle 6-7: Materialeigenschaften der in der EBV geregelten Ersatzbaustoffe (erforderlich für die Bewertung der Einsatzmöglichkeiten in Bezug auf die Einhaltung der Materialwerte für die Salze

| Ersatzbaustoff | Porosität in Bettungs- und Tragschichten [-]   | Porosität in (Lärm-)Schutzwällen [-] | Dichte in Bettungs- und Tragschichten [kg L <sup>-1</sup> ] | Dichte in (Lärm-) Schutzwällen [kg L <sup>-1</sup> ] | Relative Wassersättigung [-] |
|----------------|--|--------------------------------------|---|--|------------------------------|
| HOS            | 0,3  | 0,33                                 | 1,9   | 1,81   | 0,65                         |
| HS             | 0,3  | 0,33                                 | 1,5   | 1,425  | 0,65                         |
| SWS            | Salze nicht relevant für diesen Ersatzbaustoff |                                      |   |  |                              |
| EDS            | 0,285  | 0,32                                 | 2,5   | 3,75   | 0,45                         |
| CUM            | 0,46   | 0,46                                 | 3,7   | 3,7  | 0,5                          |
| GKOS           | Salze nicht relevant für diesen Ersatzbaustoff |                                      |   |  |                              |
| GRS            | Salze nicht relevant für diesen Ersatzbaustoff |                                      |   |  |                              |
| SKG            | Salze nicht relevant für diesen Ersatzbaustoff |                                      |   |  |                              |
| SKA            | 0,3  | 0,33                                 | 1,7   | 1,62   | 0,65                         |
| SFA            | 0,3  | 0,33                                 | 1,7   | 1,62   | 0,65                         |
| BFA            | 0,3  | 0,33                                 | 1,7   | 1,62   | 0,65                         |
| HMVA           | 0,33   | 0,36                                 | 1,9   | 1,81   | 0,65                         |
| SAVA           | 0,3  | 0,33                                 | 2,5   | 2,375  | 0,45                         |
| RC             | 0,27   | 0,31                                 | 1,94  | 1,84   | 0,65                         |
| GS             | Salze nicht relevant für diesen Ersatzbaustoff |                                      |   |  |                              |
| BG             | 0,27   | 0,31                                 | 1,94  | 1,84   | 0,65                         |

Tabelle 6-8: Materialwerte für die in der EBV geregelten Materialklassen für Hochofenschlacke (HOS), Hüttensand (HS) und Stahlwerkschlacke (SWS)

| Stoffkomponente/-gruppe | HOS-1 | HOS-2 | HS  | SWS-1 | SWS-2 | SWS-3 |
|-------------------------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|
| Chrom                   |       |       |     | 110   | 190   | 250   |
| Molybdän                |       |       |     | 55    | 400   | 1000  |
| Vanadium                |       |       | 55  | 180   | 450   | 1000  |
| Sulfat                  | 1300  | 3600  | 350 |       |       |       |
| Fluorid                 |       |       |     | 1,1   | 4,7   | 8,5   |

Tabelle 6-9: Materialwerte für die in der EBV geregelten Materialklassen für Kupferhüttenmaterial (CUM), Gießerei-Kupolofenschlacke (GKOS) und Gießereirestsand (GRS)

| Stoffkomponente/-gruppe | CUM-1 | CUM-2 | CUM-3 | GKOS | GRS-1 | GRS-2 |
|-------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Antimon                 | 25    | 25    | 55    |      |       |       |
| Stoffkomponente/-gruppe | CUM-1 | CUM-2 | CUM-3 | GKOS | GRS-1 | GRS-2 |
| Arsen                   | 55    | 65    | 110   |      | 65    | 100   |
| Blei                    |       |       |       | 90   | 90    | 600   |
| Chrom                   |       |       |       | 150  | 110   | 120   |
| Kupfer                  | 55    | 110   | 230   |      | 110   | 150   |
| Molybdän                | 110   | 110   | 400   |      | 55    | 400   |
| Nickel                  |       |       |       | 30   | 30    | 240   |
| Vanadium                |       |       |       | 55   | 200   | 250   |
| Zink                    |       |       |       |      | 160   | 650   |
| Fluorid                 |       |       |       |      | 8,7   | 80    |

Tabelle 6-10: Materialwerte für die in der EBV geregelten Materialklassen für Hausmüllverbrennungsasche (EDS), Steinkohle-Schmelzkammergranulat (SKG) und Steinkohlenkesselasche (SKA), Steinkohlenflugasche (SFA) und Braunkohlenflugasche (BFA)

| Stoffkomponente/gruppe | EDS-1 | EDS-2 | EDS-3 | SKG  | SKA | SFA  | BFA  |
|------------------------|-------|-------|-------|--|-----|------|------|
| Chrom                  | 110   | 110   | 250   | Modell-basierte<br>Bewertung nicht<br>erforderlich |     | 1000 | 150  |
| Molybdän               | 55    | 220   | 2000  |  | 400 | 7000 | 400  |
| Vanadium               |       |       |       |  | 230 | 300  | 0    |
| Sulfat                 | 810   | 1000  | 1200  |  | 600 | 4500 | 2500 |
| Fluorid                | 1,1   | 4,7   | 8,7   |  |     |      |      |

Tabelle 6-11: Materialwerte für die in der EBV geregelten Materialklassen für Hausmüllverbrennungsasche (HMVA), Sonderabfallverbrennungsasche (SAVA) und Recyclingbaustoffe (RC)

| Stoffkomponente/gruppe | HMVA-1 | HMVA-2 | HMVA-3 | SAVA-1 | SAVA-2 | RC-1 | RC-2 | RC-3 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|
| 15 EPA PAKs            |        |        |        |        |        | 6    | 12   | 25   |
| Antimon                | 10     | 60     | 150    | 30     | 150    |      |      |      |
| Arsen                  |        |        |        | 65     | 120    |      |      |      |
| Chrom                  | 150    | 460    | 600    | 65     | 250    | 150  | 440  | 900  |
| Kupfer                 | 110    | 1000   | 2000   | 130    | 500    | 110  | 250  | 500  |
| Molybdän               | 55     | 400    | 1000   | 400    | 1890   |      |      |      |
| Vanadium               | 55     | 150    | 200    | 130    | 200    | 120  | 700  | 1350 |
| Chlorid                | 160    | 5000   | 5000   | 920    | 2300   |      |      |      |
| Sulfat                 | 820    | 3000   | 3000   | 2000   | 3300   | 600  | 1000 | 3500 |
| Fluorid                |        |        |        | 4,7    | 8,7    |      |      |      |

Tabelle 6-12: Materialwerte für die in der EBV geregelten Materialklassen für Gleisschotter (GS) und Baggergut (BG)

| Stoffkomponente/gruppe | GS-0 | GS-1 | GS-2 | GS-3 | BG-0 | BG-1 | BG-2 | BG-3 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 15 EPA PAKs            | 0,3  | 2,3  | 42   | 50   | 0,3  | 2,3  | 3,8  | 20   |
| MKW                    | 150  | 160  | 310  | 500  | 150  | 160  | 160  | 310  |
| PCB, ges.              |      |      |      |      | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,04 |
| Phenol                 |      |      |      |      | 12   | 91   | 2000 | 2000 |
| Chlorphenole, gesamt   |      |      |      |      | 1,5  | 50   | 55   | 100  |
| Chlorbenzole, gesamt   |      |      |      |      | 1,5  | 1,7  | 1,7  | 4    |
| Hexachlorobenzol       |      |      |      |      | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,04 |
| Atrazin                | 0,2  | 0,7  | 3,5  | 14   |      |      |      |      |
| Bromacil               | 0,2  | 0,4  | 1,2  | 5,3  |      |      |      |      |

|                    |     |     |     |                 |     |     |     |      |
|--------------------|-----|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----|------|
| Diuron             | 0,1 | 0,2 | 0,8 | 4, <sup>3</sup> |     |     |     |      |
| Glyphosat          | 0,2 | 1,7 | 17  | 27              |     |     |     |      |
| Simazin            | 0,2 | 1,5 | 12  | 27              |     |     |     |      |
| Sonstige Herbizide | 0,2 | 2,1 | 17  | 27              |     |     |     |      |
| AMPA               | 2,5 | 4,5 | 17  | 50              |     |     |     |      |
| Antimon            |     |     |     |                 | 10  | 10  | 10  | 15   |
| Arsen              |     |     |     |                 | 15  | 20  | 95  | 100  |
| Blei               |     |     |     |                 | 35  | 90  | 250 | 470  |
| Cadmium            |     |     |     |                 | 3   | 3   | 10  | 15   |
| Chrom              |     |     |     |                 | 15  | 150 | 290 | 530  |
| Kupfer             |     |     |     |                 | 30  | 110 | 170 | 320  |
| Molybdän           |     |     |     |                 | 55  | 55  | 55  | 110  |
| Nickel             |     |     |     |                 | 30  | 30  | 150 | 280  |
| Vanadium           |     |     |     |                 | 30  | 55  | 450 | 840  |
| Zink               |     |     |     |                 | 150 | 160 | 840 | 1600 |
| Sulfat             |     |     |     |                 | 250 | 450 | 450 | 1000 |

| Nr. | Parameter   | Einheit | Erläuterung                              |
|-----|-------------|---------|--|
| V1  | Bezeichnung |         |  |
| V2  | Verfasser   |         |  |
| V3  | Datum       |         |  |
| V4  | Gruppencode |         | Organika (O), Metalle (M) oder Salze (S) |

| Nr. | Parameter | Einheit | Erläuterung |
|-----|-----------|---------|-------------|
|-----|-----------|---------|-------------|

### 3.2 Ergänzende Informationen zu den Inhalten der BEMEB-Tabellenblätter

Tabelle 6-13: Liste und Erläuterung der Eingangsparameter der Stoffkomponenten

|     |   |                           |   |
|-----|---|---------------------------|---|
| V5  | Krit. Wert am OdB                         | $\square \text{g L}^{-1}$ | Kritischer Wert am Ort der Beurteilung (i.d.R. = GFS, bei Metallen ggf. = BM)                           |
| V6  | Max. Filterkapazität $F_{k_{\max}}$ Sand  | $\text{mg kg}^{-1}$       |   |
| V7  | Max. Filterkapazität $F_{k_{\max}}$ L/S/T | $\text{mg kg}^{-1}$       | L/S/T = Lehm/Schluff/Ton  |
| V8  | $\log K_{ow}$                             | -                         | wird in BEMEB aktuell nicht verwendet   |
| V9  | Molekulargewicht                          | $\text{g mol}^{-1}$       | wird in BEMEB aktuell nicht verwendet   |
| V10 | Effektive Löslichkeit $S_{eff}$           | $\text{mg L}^{-1}$        | wird in BEMEB aktuell nicht verwendet   |
| V11 | Effektive Löslichkeit $S_{eff}$           | $\text{mol L}^{-1}$       | wird in BEMEB aktuell nicht verwendet   |
| V12 | $\log K_{oc}$                             | -                         |   |
| V13 | Erläuterung - Sorption                    |                           |   |
| V14 | Halbwertszeit                             | d                         |   |
| V15 | Erläuterung - Abbau                       |                           |   |
| V16 | $\log K^*$                                | -                         | Koeffizient substratübergreifende Isotherme nach Utermann (2005) und Stange und Rückkamp (2016)         |
| V17 | $K^*$                                     | -                         | Koeffizient für die substratübergreifende Isotherme nach Schug (1999)                                   |
| V18 | pH  | -                         | Koeffizient substratübergreifende Isotherme nach Utermann (2005) und Stange und Rückkamp (2016)         |
| V19 | $\log$ Tongehalt                          | -                         | Koeffizient substratübergreifende Isotherme nach Utermann (2005) und Stange und Rückkamp (2016)         |
| V20 | Tongehalt                                 | -                         | Koeffizient substratübergreifende Isotherme nach Schug (1999)   |
| V21 | $\log$ Conc                               | -                         | Koeffizient für die substratübergreifende Isotherme nach Utermann (2005) und Stange und Rückkamp (2016) |
| V22 | Corg                                      | -                         | Koeffizient substratübergreifende Isotherme nach Schug (1999)   |
| V23 | $\log$ MnOx                               | -                         | Koeffizient substratübergreifende Isotherme nach Utermann (2005)  |
| V24 | Fed                                       | -                         | Koeffizient substratübergreifende Isotherme nach Utermann (2005)  |

|     |           |   |  |
|-----|-----------|---|--|
| V25 | K*        | - | Koeffizient Exponent der substratübergreifenden Isotherme nach Schug et al. (1999) |
| V26 | pH        | - | Koeffizient Exponent der substratübergreifenden Isotherme nach Schug et al. (1999) |
| V27 | Tongehalt | - | Koeffizient Exponent der substratübergreifenden Isotherme nach Schug et al. (1999) |
| V28 | Corg      | - | Koeffizient Exponent der substratübergreifenden                                    |

| Nr. | Parameter               | Einheit   | Erläuterung   |
|-----|-------------------------|---|---|
|     |                         |   | den Isotherme nach Schug et al. (1999)  |
| V29 | Fed                     | -   | Koeffizient Exponent der substratübergreifenden Isotherme nach Schug et al. (1999)  |
| V30 | K <sub>fr</sub> Sand    | □g <sup>1-n</sup> kg <sup>-1</sup> L <sub>n</sub> | Koeffizient Freundlich Isotherme für Sand   |
| V31 | n <sub>fr</sub> Sand    | -   | Exponent Freundlich Isotherme für Sand  |
| V32 | K <sub>fr</sub> Lehm    | □g <sup>1-n</sup> kg <sup>-1</sup> L <sub>n</sub> | Koeffizient Freundlich Isotherme für Lehm/Schluff/Ton   |
| V33 | n <sub>fr</sub> Lehm    | -   | Exponent Freundlich Isotherme für Lehm/Schluff/Ton  |
| V34 | log CaCO <sub>3</sub>   | -   | Koeffizient substratübergreifende Isotherme nach Stange und Rückkamp (2016)   |
| V35 | log FeOx                | -   | Koeffizient substratübergreifende Isotherme nach Stange und Rückkamp (2016)   |
| V36 | log AlOx                | -   | Koeffizient substratübergreifende Isotherme nach Stange und Rückkamp (2016)   |
| V37 | log Corg                | -   | Koeffizient substratübergreifende Isotherme nach Stange und Rückkamp (2016)   |
| V38 | Berechnungsart Sorption | -   | Kennzahl für die zur Berechnung verwendete Isotherme: 1 – Henry (Koc x foc), 2 – Freundlich, 3- substratübergreifend/Utermann, 4- substratübergreifend/Schug, 5 – substratübergreifend/Susset, 6 – substratübergreifend/Stange und Rückkamp |
| V39 | Kd-Wert HOS             | L kg <sup>-1</sup>                                | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Hochofenstückschlacke <sup>1</sup>  |

| V40 | Kd-Wert HS   | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Hüttenschlacke <sup>1</sup>  |
|-----|--------------|--------------------|--|
| V41 | Kd-Wert SWS  | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Stahlwerkschlacke  |
| V42 | Kd-Wert EDS  | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Edelstahlschlacke <sup>1</sup>   |
| V43 | Kd-Wert CUM  | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Kupferhüttenmaterial   |
| V44 | Kd-Wert GKOS | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve GießereiKupolofenschlacke <sup>1</sup>                                 |
| V45 | Kd-Wert GRS  | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Gießereirestsand <sup>1</sup>  |
| V46 | Kd-Wert SKG  | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Schmelzkammergranulat <sup>1</sup>                                     |
| V47 | Kd-Wert SKA  | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Steinkohlenkesselasche <sup>1</sup>                                    |
| V48 | Kd-Wert SFA  | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Steinkohlenflugasche <sup>1</sup>                                      |
| V49 | Kd-Wert BFA  | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Braunkohlenflugasche <sup>1</sup>                                      |
| V50 | Kd-Wert HMVA | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Hausmüllverbrennungsasche  |
| V51 | Kd-Wert SAVA | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Sonderabfallverbrennungsasche <sup>1</sup>                             |
| V52 | Kd-Wert RC   | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Recycling-Baustoff   |
| Nr. | Parameter    | Einheit            | Erläuterung  |
| V53 | Kd-Wert GS   | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Gleisschotter <sup>1</sup>   |
| V54 | Kd-Wert BG   | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Baggergut <sup>1</sup>   |
| V55 | Kd-Wert DZ   | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Dachziegel   |
| V56 | Kd-Wert VMZ  | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Vormauerziegel   |
| V57 | Kd-Wert HLZ  | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Hochlochziegel   |
| V58 | Kd-Wert BDEF | L kg <sup>-1</sup> | K <sub>d</sub> -Wert Abklingkurve Benutzerdefiniertes Material   |
| V59 | MWmax        | mg L <sup>-1</sup> | Maximalwert für Salzkonzentrationen: Konzentrationen > MW <sub>max</sub> werden nicht als Wert angezeigt |

1

Abklingwerte sind als Eingabewert für die Stoffkomponenten generell vorgesehen, auch wenn für das betreffende Material ein Abklingverhalten bislang für keine der relevanten Stoffkomponenten nachgewiesen wurde.

Tabelle 6-14: Liste und Erläuterung der Eingangsparameter der Bodentypen



| Nr. | Parameter               | Einheit             | Erläuterung   |
|-----|-------------------------|---------------------|---|
| B1  | Bezeichnung             |                     |   |
| B2  | Verfasser               |                     |   |
| B3  | Datum                   |                     |   |
| B4  | pH (CaCl <sub>2</sub> ) |                     | pH-Wert (potentiometrische Messung / 0.01 M CaCl <sub>2</sub> ) |
| B5  | Ton                     | Masse-%             | Tongehalt   |
| B6  | Mn <sub>ox</sub>        | mg kg <sup>-1</sup> | Oxalat-lösliches Mangan   |
| B7  | C <sub>org</sub>        | Masse-%             | Gehalt an organischem Kohlenstoff                               |
| B8  | Fe <sub>d</sub>         | g kg <sup>-1</sup>  | Dithionit-lösliches Eisen                                       |
| B9  | Effektive Porosität     |                     | Durchflusswirksame effektive Porosität                          |
| B10 | Lagerungsdichte         | kg L <sup>-1</sup>  | Gewicht des Bodenmaterials pro Gesamtvolumen                    |
| B11 | CaCO <sub>3</sub>       | Masse-%             | Kalkgehalt  |
| B12 | Fe <sub>ox</sub>        | mg kg <sup>-1</sup> | Oxalat-lösliches Eisen  |
| B13 | Al <sub>ox</sub>        | mg kg <sup>-1</sup> | Oxalat-lösliches Aluminium                                      |

Tabelle 6-15: Liste und Erläuterung der Eingangsparameter der Einbauweisen

| Nr. | Parameter                                  | Einheit            | Erläuterung   |
|-----|--|--------------------|---|
| E1  | Code                                       |                    | Kurzbezeichnung der Einbauweise                     |
| E2  | Bezeichnung                                |                    |   |
| E3  | Verfasser                                  |                    |   |
| E4  | Datum                                      |                    |   |
| Nr. | Parameter                                  | Einheit            | Erläuterung   |
| E5  | Bauweisenklasse                            |                    | Bahnbauweise (BaBw) oder (Straßen- und Wege (StuW)) |
| E6  | Grundwasserneubildungsrate                 | mm a <sup>-1</sup> |   |
| E7  | Sickerwasserrate an der Bauwerksunterkante | mm a <sup>-1</sup> |   |

|     |                                 |    |  |
|-----|---------------------------------|----|--|
| E8  | Verdünnungsfaktor               |    | > 1 wenn nur ein Teil des Sickerwassers im Bauwerk den Ersatzbaustoff durchströmt (siehe Kapitel 2.2.3)  |
| E9  | Verhältnismäßigkeitsfaktor      |    |  |
| E10 | Schichtdicke                    | cm | Mächtigkeit bzw. Dicke des eingebauten Ersatzbaustoffs im betreffenden Bauwerk   |
| E11 | Bewertungsrelevante Einbauweise |    | Zeiger auf die jeweils relevante Bauweise für die Bewertung von Organika und Metallen <sup>1)</sup>  |
| E12 | Typ                             |    | Bei der Einbaudichte der Ersatzbaustoffe wird unterschieden zwischen Trag- und Deckschichten (T) und Lärmschutzwällen (L) sowie Schutzwällen und Dämmen (SD) (siehe auch Tabelle 6-16) |

1)

einige Bauweisen werden wg. der verschiedenen Schichtdicken nur für die Bewertung von Salzen unterschieden, für die Bewertung von Organika und Metallen aber zusammengefasst. Für Bauweisen, die gemäß EBV nicht bewertet werden müssen gilt E11=0.

Tabelle 6-16: Liste und Erläuterung der Eingangsparameter der Ersatzbaustoffe (Materialwerte)

| Nr. | Parameter   | Einheit            | Erläuterung  |
|-----|-------------|--------------------|--|
| M1  | Bezeichnung |                    |  |
| M2  | Verfasser   |                    |  |
| M3  | Datum       |                    |  |
| M4  | 15 EPA PAKs | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Konzentration (Summenwert) der 15 EPA PAKs im Eluat bei WF2 |
| M5  | Naphthalin  | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Naphthalinkonzentration im Eluat bei WF2                    |
| M6  | MKW         | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die MKW -Konzentration im Eluat bei WF2                         |
| M7  | BTEX        | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die BTEX -Konzentration im Eluat bei WF2                        |

| M8  | PCB, ges.            | µg L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Konzentration (Summenwert) der polychlorierten Biphenyle im Eluat bei |
|-----|----------------------|--------------------|--|
| Nr. | Parameter            | Einheit            | Erläuterung  |
|     |                      |                    | WF2  |
| M9  | Phenol               | µg L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Phenol -Konzentration im Eluat bei WF2                                |
| M10 | Chlorphenole, gesamt | µg L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Konzentration (Summenwert) der Chlorphenole im Eluat bei WF2          |
| M11 | Chlorbenzole, gesamt | µg L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Konzentration (Summenwert) der Chlorbenzole im Eluat bei WF2          |
| M12 | Hexachlorobenzol     | µg L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Hexachlorobenzol Konzentration im Eluat bei WF2                       |
| M13 | Atrazin              | µg L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Atrazin -Konzentration im Eluat bei WF2                               |
| M14 | Bromacil             | µg L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Bromacil -Konzentration im Eluat bei WF2                              |
| M15 | Diuron               | µg L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Diuron -Konzentration im Eluat bei WF2                                |
| M16 | Glyphosat            | µg L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Glyphosat Konzentration im Eluat bei WF2                              |
| M17 | Simazin              | µg L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Simazin -Konzentration im Eluat bei WF2                               |
| M18 | Sonstige Herbizide   | µg L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Konzentration sonstiger Herbizide im Eluat bei WF2                    |

|     |              |                    |  |
|-----|--------------|--------------------|--|
| M19 | AMPA         | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die AMPA -Konzentration im Eluat bei WF2            |
| M20 | TCE          | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die TCE -Konzentration im Eluat bei WF2             |
| M21 | Nonylphenole | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Konzentration der Nonylphenole im Eluat bei WF2 |
| M22 | MTBE         | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die MTBE -Konzentration im Eluat bei WF2            |
| M23 | Antimon      | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen  |

| Nr. | Parameter | Einheit            | Erläuterung  |
|-----|-----------|--------------------|--|
|     |           |                    | Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Antimon -Konzentration im Eluat bei WF2   |
| M24 | Arsen     | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Arsen -Konzentration im Eluat bei WF2     |
| M25 | Blei      | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Blei -Konzentration im Eluat bei WF2      |
| M26 | Cadmium   | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Cadmium - Konzentration im Eluat bei WF2  |
| M27 | Chrom     | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Chrom -Konzentration im Eluat bei WF2     |
| M28 | Kupfer    | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Kupfer -Konzentration im Eluat bei WF2    |
| M29 | Molybdän  | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Molybdän - Konzentration im Eluat bei WF2 |
| M30 | Nickel    | □g L <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Nickel -Konzentration im Eluat bei WF2    |

|     |              |                      |  |
|-----|--------------|----------------------|--|
| M31 | Vanadium     | $\mu\text{g L}^{-1}$ | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Vanadium - Konzentration im Eluat bei WF2 |
| M32 | Zink         | $\mu\text{g L}^{-1}$ | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Zink -Konzentration im Eluat bei WF2      |
| M33 | Chlorid      | $\mu\text{g L}^{-1}$ | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Chlorid -Konzentration im Eluat bei WF2   |
| M34 | Sulfat       | $\mu\text{g L}^{-1}$ | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Sulfat -Konzentration im Eluat bei WF2    |
| M35 | Fluorid      | $\mu\text{g L}^{-1}$ | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die Fluorid -Konzentration im Eluat bei WF2   |
| M36 | DOC          | $\mu\text{g L}^{-1}$ | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die DOC -Konzentration im Eluat bei WF2       |
| M37 | PAK16-Gehalt | $\text{mg kg}^{-1}$  | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an PAK16 (Summe)          |

| Nr. | Parameter      | Einheit             | Erläuterung   |
|-----|----------------|---------------------|---|
| M38 | Arsen-Gehalt   | $\text{mg kg}^{-1}$ | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an Arsen   |
| M39 | Blei-Gehalt    | $\text{mg kg}^{-1}$ | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an Blei    |
| M40 | Cadmium-Gehalt | $\text{mg kg}^{-1}$ | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an Cadmium |
| M41 | Chrom-Gehalt   | $\text{mg kg}^{-1}$ | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an Chrom   |
| M42 | Kupfer-Gehalt  | $\text{mg kg}^{-1}$ | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an Kupfer  |

|            |                    |                     |  |
|------------|--------------------|---------------------|--|
| M43        | Nickel-Gehalt      | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an Nickel   |
| M44        | Quecksilber-Gehalt | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an Quecksilber  |
| M45        | Thallium-Gehalt    | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an Thallium   |
| M46        | Zink-Gehalt        | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an Zink   |
| M47        | TOC                | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff   |
| M48        | C10-C22            | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf die mobile Teilmenge des MKW-Index, d.h. Feststoffgehalt an C10-C22 (Summe)                     |
| M49        | C10-C40            | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den MKW-Index, d.h. den Feststoffgehalt an C10-C40 (Summe)                                      |
| M50        | BTEX-Gehalt        | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an BTEX   |
| M51        | EOX-Gehalt         | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an extrahierbaren organisch gebundene Halogenen (EOX) (Chlor, Brom und Iod) |
| M52        | LHKW-Gehalt        | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an LHKW   |
| M53        | Zyanide-Gehalt     | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen  |
| <b>Nr.</b> | <b>Parameter</b>   | <b>Einheit</b>      | <b>Erläuterung</b>   |
|            |                    |                     | Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an Zyaniden   |
| M54        | PCB-Gehalt         | mg kg <sup>-1</sup> | Materialqualität der Materialklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffs in Bezug auf den Feststoffgehalt an polychlorierten Biphenylen   |

|     |  |                     |  |
|-----|--|---------------------|--|
| M55 | Porosität Bettungs-, Trag- und Deckschichten |                     | Porosität (als mittlerer/repräsentativer Wert) des Ersatzbaustoffs bei einem Einbau in eine Bettungs-, Trag- oder Deckschicht  |
| M56 | Porosität (Lärm)Schutzwälle                  |                     | Porosität (als mittlerer/repräsentativer Wert) des Ersatzbaustoffs bei einem Einbau in einen (Lärm-)Schutzwall   |
| M57 | Dichte Bettungs-, Trag- und Deckschichten    | kg L <sup>-1</sup>  | Dichte (als mittlerer/repräsentativer Wert) des Ersatzbaustoffs bei einem Einbau in eine Bettungs-, Trag- oder Deckschicht   |
| M58 | Dichte (Lärm-)Schutzwälle                    | kg L <sup>-1</sup>  | Dichte (als mittlerer/repräsentativer Wert) des Ersatzbaustoffs bei einem Einbau in einen (Lärm-)Schutzwall  |
| M59 | Relative Sättigung                           |                     | Mittlerer/repräsentativer Wert der Wassersättigung in der durch den Ersatzbaustoff aufgebauten Schicht im Bauwerk (gemäß den Ergebnissen hydraulischer Berechnungen) |
| M60 | Orient.wert pH (untere Grenze)               |                     |  |
| M61 | Orient.wert pH (obere Grenze)                |                     |  |
| M62 | elektr. Leitfähigkeit                        | □S cm <sup>-1</sup> |  |

## 6.3 BEMEB-Eingangsdaten: Inhalte der xml-Dateien

### 6.3.1 Boeden.xml

```

<Verbindungen>
<Verbindung Bezeichnung="15 EPA PAKs">
  <Verfasser Typ="Text">Finkel</Verfasser>
  <Datum Typ="Datum">5/11/2016</Datum>
  <Gruppencode Typ="Text">O</Gruppencode>
  <GFS Typ="Zahl">0.2</GFS>
  <Max_Feldkapazitaet_Fkmax_Sand_in_mg_pro_kg
    Typ="Zahl">2.7</Max_Feldkapazitaet_Fkmax_Sand_in_mg_pro_kg>
  <Max_Feldkapazitaet_Fkmax_LST_in_mg_pro_kg
    Typ="Zahl">2.7</Max_Feldkapazitaet_Fkmax_LST_in_mg_pro_kg>
  <Hauptparameter>
  <log_Kow Typ="Zahl">na</log_Kow>
  <Molekulargewicht_in_g_pro_mol
    Typ="Zahl">na</Molekulargewicht_in_g_pro_mol>
  <Effektive_Loeslichkeit_Seфф_in_mg_pro_L
    Typ="Zahl">na</Effektive_Loeslichkeit_Seфф_in_mg_pro_L>

```

```

<Effektive_Loeslichkeit_Seff_in_mol_pro_l
  Typ="Zahl">na</Effektive_Loeslichkeit_Seff_in_mol_pro_l>
<log_Koc Typ="Zahl">5.12</log_Koc>
<Erlaeuterung_Sorption Typ="Text">na</Erlaeuterung_Sorption>
</Hauptparameter>
<Mikrobieller_Abbau>
  <Halbwertszeit_in_d Typ="Zahl">70</Halbwertszeit_in_d>
  <Erlaeuterung_Bioaabbau Typ="Text">Grathwohl</Erlaeuterung_Bioaabbau>
</Mikrobieller_Abbau>
<Isothermenkoeffizienten>
  <logKonst Typ="Zahl">na</logKonst>
  <Konst Typ="Zahl">na</Konst>
  <pH Typ="Zahl">na</pH>
  <logTongehalt Typ="Zahl">na</logTongehalt>
  <Tongehalt Typ="Zahl">na</Tongehalt>
  <logKonzentration Typ="Zahl">na</logKonzentration>
  <Corg_or_TOC Typ="Zahl">na</Corg_or_TOC>
  <logMnOx Typ="Zahl">na</logMnOx>
  <Fed Typ="Zahl">na</Fed>
  <Konstante_Expon Typ="Zahl">na</Konstante_Expon>   <pH_Expon
Typ="Zahl">na</pH_Expon>
  <Tongehalt_Expon Typ="Zahl">na</Tongehalt_Expon>
  <Corg_Expon Typ="Zahl">na</Corg_Expon>
  <Fed_Expon Typ="Zahl">na</Fed_Expon>
  <K_fr_Sand Typ="Zahl">na</K_fr_Sand>
  <n_fr_Sand Typ="Zahl">na</n_fr_Sand>
  <K_fr_LST Typ="Zahl">na</K_fr_LST>
  <n_fr_LST Typ="Zahl">na</n_fr_LST>
  <logCaCO3 Typ="Zahl">na</logCaCO3>
  <logFeOx Typ="Zahl">na</logFeOx>
  <logAlOx Typ="Zahl">na</logAlOx>
  <logCorg Typ="Zahl">na</logCorg>
  </Isothermenkoeffizienten>
  <Berechnungsart_Sorption Typ="Zahl">1</Berechnungsart_Sorption>
  <Kd_Werte_ME>
    <Kd_HOS_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_HOS_in_L_pro_kg>
    <Kd_HS_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_HS_in_L_pro_kg>
    <Kd_SWS_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_SWS_in_L_pro_kg>
    <Kd_EDS_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_EDS_in_L_pro_kg>
  <Kd_CUM_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_CUM_in_L_pro_kg>
  <Kd_GKOS_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_GKOS_in_L_pro_kg>
  <Kd_GRS_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_GRS_in_L_pro_kg>
  <Kd_SKG_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_SKG_in_L_pro_kg>
  <Kd_SKA_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_SKA_in_L_pro_kg>
  <Kd_SFA_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_SFA_in_L_pro_kg>
  <Kd_BFA_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_BFA_in_L_pro_kg>
  <Kd_HMVA_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_HMVA_in_L_pro_kg>
  <Kd_SAVA_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_SAVA_in_L_pro_kg>
  <Kd_RC_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_RC_in_L_pro_kg>

```



```

    <Kd_GS_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_GS_in_L_pro_kg>
    <Kd_BG_in_L_pro_kg Typ="Zahl">na</Kd_BG_in_L_pro_kg>
  </Kd_Werte_ME>
  <MWmax_in_mg_pro_L Typ="Zahl">na</MWmax_in_mg_pro_L>
  <Relevanz Typ="Zahl">1</Relevanz>
</Verbindung>
<Verbindung Bezeichnung="Naphthalin"> usw.
...
</Verbindung> </Verbindungen>

```

### 6.3.2 Boeden.xml

```

<Boeden>
  <Boden>
    <Bezeichnung Typ="Text">Sand</Bezeichnung>
    <Verfasser Typ="Text">Finkel</Verfasser>
    <Datum Typ="Datum">06.09.2016</Datum>
    <pH Typ="Zahl">4.8</pH>
    <Tongehalt_in_Prozent Typ="Zahl">2.46</Tongehalt_in_Prozent>
    <Mnox_in_mg_pro_kg Typ="Zahl">231</Mnox_in_mg_pro_kg>
    <Corg_in_Prozent Typ="Zahl">0.1</Corg_in_Prozent>
    <Fed_in_g_pro_kg Typ="Zahl">10.2</Fed_in_g_pro_kg>
    <Effektive_Porositaet Typ="Zahl">0.17</Effektive_Porositaet>
    <Lagerungsdichte_in_kg_pro_L Typ="Zahl">1.42</Lagerungsdichte_in_kg_pro_L>
    <CaCO3_in_Prozent Typ="Zahl">0</CaCO3_in_Prozent>
    <Feox_in_mg_pro_kg Typ="Zahl">73</Feox_in_mg_pro_kg>
    <Alox_in_mg_pro_kg Typ="Zahl">421</Alox_in_mg_pro_kg>
  </Boden>
  <Boden>
    <Bezeichnung Typ="Text">LST</Bezeichnung>
    <Verfasser Typ="Text">Finkel</Verfasser>
    <Datum Typ="Datum">06.09.2016</Datum>
    <pH Typ="Zahl">6.6</pH>
    <Tongehalt_in_Prozent Typ="Zahl">12</Tongehalt_in_Prozent>
    <Mnox_in_mg_pro_kg Typ="Zahl">231</Mnox_in_mg_pro_kg>
    <Corg_in_Prozent Typ="Zahl">0.1</Corg_in_Prozent>
    <Fed_in_g_pro_kg Typ="Zahl">10.2</Fed_in_g_pro_kg>
    <Effektive_Porositaet Typ="Zahl">0.26</Effektive_Porositaet>
    <Lagerungsdichte_in_kg_pro_L Typ="Zahl">1.45</Lagerungsdichte_in_kg_pro_L>
    <CaCO3_in_Prozent Typ="Zahl">5.2</CaCO3_in_Prozent>
    <Feox_in_mg_pro_kg Typ="Zahl">2500</Feox_in_mg_pro_kg>
    <Alox_in_mg_pro_kg Typ="Zahl">38</Alox_in_mg_pro_kg>
  </Boden> </Boeden>

```

### 6.3.3 Einbauweisen.xml

```
<Einbauweisen>
```

```

<Einbauweise Code="B1" Bezeichnung="Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard
  Damm">
  <Verfasser Typ="Text">Finkel</Verfasser>
  <Datum Typ="Datum">30.09.2014</Datum>
  <Kategorie Typ="Text">BaBw</Kategorie>
  <Grundwasserneubildungsrate Typ="Zahl">515</Grundwasserneubildungsrate>
  <Sickerwasserrate_Bauwerksunterkante
    Typ="Zahl">395</Sickerwasserrate_Bauwerksunterkante>
  <Verduennungsfaktor Typ="Zahl">2.3</Verduennungsfaktor>
  <Verhaeltnismaessigkeitsfaktor
    Typ="Zahl">1.5</Verhaeltnismaessigkeitsfaktor>
  <Schichtdicke Typ="Zahl">60</Schichtdicke>
  <ME_Relevanz Typ="Zahl">1</ME_Relevanz>
  <Typ Typ="Text">T</Typ>
</Einbauweise>
<Einbauweise Code="B2" Bezeichnung="Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard
  Einschnitt">
usw.
  ...
</Einbauweise> </Einbauweisen>

```

### 6.3.4 Materialwerte.xml

```

<Materialklassen>
<Materialklasse Bezeichnung="HOS-1">
  <Verfasser Typ="Text">Finkel</Verfasser>
  <Datum Typ="Datum">5/11/2016</Datum>
  <Maximalkonzentrationen_Sickerwasser_in_ug_pro_L>
  <EPA_PAK15 Typ="Zahl">na</EPA_PAK15>
  <Naphthalin Typ="Zahl">na</Naphthalin>
  <MKW Typ="Zahl">na</MKW>
  <BTEX Typ="Zahl">na</BTEX>
  <PCB_gesamt Typ="Zahl">na</PCB_gesamt>
  <Phenol Typ="Zahl">na</Phenol>
    <Chlorphenole_gesamt Typ="Zahl">na</Chlorphenole_gesamt>
    <Chlorbenzole_gesamt Typ="Zahl">na</Chlorbenzole_gesamt>
    <Hexacholorobenzol Typ="Zahl">na</Hexacholorobenzol>
    <Atrazin Typ="Zahl">na</Atrazin>
    <Bromacil Typ="Zahl">na</Bromacil>
    <Diuron Typ="Zahl">na</Diuron>
    <Glyphosat Typ="Zahl">na</Glyphosat>
  <Simazin Typ="Zahl">na</Simazin>
  <Sonstige_Herbizide Typ="Zahl">na</Sonstige_Herbizide>
  <AMPA Typ="Zahl">na</AMPA>
  <TCE Typ="Zahl">na</TCE>
  <Nonylphenole Typ="Zahl">na</Nonylphenole>
  <MTBE Typ="Zahl">na</MTBE>
  <Antimon Typ="Zahl">na</Antimon>

```

```

<Arsen Typ="Zahl">na</Arsen>
<Blei Typ="Zahl">na</Blei>
<Cadmium Typ="Zahl">na</Cadmium>
<Chrom Typ="Zahl">na</Chrom>
<Kupfer Typ="Zahl">na</Kupfer>
<Molybdaen Typ="Zahl">na</Molybdaen>
<Nickel Typ="Zahl">na</Nickel>
<Vanadium Typ="Zahl">na</Vanadium>
<Zink Typ="Zahl">na</Zink>
<Chlorid Typ="Zahl">na</Chlorid>
<Sulfat Typ="Zahl">1300</Sulfat>
<Fluorid Typ="Zahl">na</Fluorid>
<DOC Typ="Zahl">na</DOC>
</Maximalkonzentrationen_Sickerwasser_in_ug_pro_L>
<Maximalkonzentrationen_Feststoff_in_mg_pro_kg>
<PAK16 Typ="Zahl">na</PAK16>
<Arsen Typ="Zahl">na</Arsen>
<Blei Typ="Zahl">na</Blei>
<Cadmium Typ="Zahl">na</Cadmium>
<Chrom Typ="Zahl">na</Chrom>
<Kupfer Typ="Zahl">na</Kupfer>
<Nickel Typ="Zahl">na</Nickel>
<Quecksilber Typ="Zahl">na</Quecksilber>
<Thallium Typ="Zahl">na</Thallium>
<Zink Typ="Zahl">na</Zink>
<TOC Typ="Zahl">na</TOC>
<C10_C22 Typ="Zahl">na</C10_C22>
<C10_C40 Typ="Zahl">na</C10_C40>
<BTEX Typ="Zahl">na</BTEX> <EOX
Typ="Zahl">na</EOX>
<LHKW Typ="Zahl">na</LHKW>
<Zyanide Typ="Zahl">na</Zyanide>
<PCB Typ="Zahl">na</PCB>
</Maximalkonzentrationen_Feststoff_in_mg_pro_kg>
<Physikalische_Materialparameter>
<Porositaet_als_Bettungs_Trage_oder_Deckschicht
Typ="Zahl">0.3</Porositaet_als_Bettungs_Trage_oder_Deckschicht>
<Porositaet_als_Laerm_oder_Schutzwall
Typ="Zahl">0.33</Porositaet_als_Laerm_oder_Schutzwall>
<Lagerungsdichte_als_Bettungs_Trage_oder_Deckschicht_in_kg_pro_L
Typ="Zahl">1.9</Lagerungsdichte_als_Bettungs_Trage_oder_Deckschicht_i
n_kg_pro_L>
<Lagerungsdichte_als_Laerm_oder_Schutzwall_in_kg_pro_L
Typ="Zahl">1.81</Lagerungsdichte_als_Laerm_oder_Schutzwall_in_kg_pro
_L>
<Relative_Wassersaettigung Typ="Zahl">0.65</Relative_Wassersaettigung>
</Physikalische_Materialparameter>
<Orientierungswerte>
<pH_untere_Grenze Typ="Zahl">9</pH_untere_Grenze>

```

```
<pH_obere_Grenze Typ="Zahl">12</pH_obere_Grenze>
<Elektrische_Leitfaehigkeit
  Typ="Zahl">5000</Elektrische_Leitfaehigkeit>
</Orientierungswerte>
</Materialklasse>
<Materialklasse Bezeichnung="HOS-2"> usw.
...
</Materialklasse> </Materialklassen>
```