



Abschlussbericht

Verwertung von MV-Rostschlacke in Bauvorhaben

Augsburg, 2002

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
Josef-Vogl-Technikum
Am Mittleren Moos 46
Tel.: (08 21) 70 00 - 2 90
Fax: (08 21) 70 00 - 2 99
E-Mail: josef-vogl-technikum@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.bayern.de/lfu>

Redaktionelle Bearbeitung: Dr. Harald Weigand
Dr.-Ing. Clemens Marb
Hildegard Rothe

Projektleiter: Dr.-Ing. Clemens Marb
Bearbeiter: Dr.-Ing. Bernhard Hentschel (01.02.1999 - 31.01.2001)
Dr. Ronzon Mallick (01.02.2001 - 31.07.2002)
Markus Launer Dipl.-Ing. (FH) (01.07.1999 - 31.12.2000)
Uta Bauer Dipl.-Ing. (FH) (01.05.2001 - 28.02.2002)
Cornelia Gemeinhardt Dipl.-Ing. (FH) (02.05.2002 - 31.07.2002)
Victoria Gebser (01.06.1999 - 30.09.2001)
Sippel Claudia (15.10.2001 - 31.05.2002)

Zitiervorschlag:

Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.):

„Verwertung von Rostschlacken aus der thermischen Abfallbehandlung im Rahmen von Bauvorhaben: Geotechnische und umweltrelevante Eigenschaften des Schlackekörpers unter den in der Verwertungspraxis üblichen Einbaubedingungen“

Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU).

© Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Josef-Vogl-Technikum, Augsburg 2000

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	5
2 Entstehung, Zusammensetzung und Eigenschaften von MV-Schlacken.....	7
2.1 Entstehungsprozesse	7
2.2 Mineralogie und Geochemie	9
2.3 Alterungsvorgänge.....	10
2.4 Auslaugverhalten	12
2.5 Baustoffliche Verwertung	13
2.6 Gesetzliche Rahmenbedingungen der Verwertung.....	14
3 Zielsetzung.....	15
4 Untersuchungsobjekte und -methoden.....	17
4.1 Bauvorhaben.....	17
4.1.1 Bauvorhaben A	17
4.1.2 Bauvorhaben B	18
4.1.3 Bauvorhaben C	19
4.1.4 Bauvorhaben D	19
4.1.5 Bauvorhaben E	19
4.2 Freiflächenversuche	21
4.3 Charakterisierung der MV-Schlacke.....	22
5 Ergebnisse.....	23
5.1 Feststoffcharakterisierung	23
5.1.1 Glühverlust und Kohlenstoffgehalt.....	23
5.1.2 Korngrößenverteilung.....	23
5.1.3 Elementgehalte.....	25
5.2 Eluatuntersuchungen	29
5.2.1 pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit.....	29
5.2.2 Schwermetallkonzentrationen.....	29
5.3 Mineralogie.....	35
5.3.1 Mineralphasenbestand.....	36
5.3.2 Spezifische Oberfläche.....	39

5.3.3	Dichte und Porosität	40
5.4	Bautechnische Eigenschaften.....	41
5.5	Wasser-, Stoff- und Wärmehaushalt von Schlackekörpern	42
5.5.1	Freiflächenversuch 1	42
5.5.2	Freiflächenversuche 2 und 3.....	45
5.6	Auslaugverhalten der Schlackekörper	48
5.6.1	Freiflächenversuch 1	49
5.6.2	Freiflächenversuche 2 und 3.....	52
5.7	Eindimensionale Simulation des Wasser- und Wärmetransportes im Schlackefeld.....	60
5.7.1	Simulation der Wasserverteilung im Schlackekörper	63
5.7.2	Simulation des Wärmetransports im Schlackekörper	67
5.8	Luft-/Wasserverteilung im Porenraum von MV-Schlacke	70
5.8.1	Vorgehensweise	70
5.8.2	Luft-/Wasserverteilung im Kornverband.....	71
5.8.3	Luft-/Wasserverteilung im Einzelkorn	73
6	Literaturverzeichnis	75

Zusammenfassung

Um die Nachhaltigkeit baustofflicher Verwertungswege für Müllverbrennungsschlacke (MV-Schlacke) zu bewerten, müssen deren umweltrelevante und mechanische Eigenschaften unter (bau)praxisüblichen Bedingungen erfasst werden. Wesentliche Aspekte sind dabei der Wasser-, Stoff- und Wärmehaushalt sowie die bautechnischen Eigenschaften von Schlacke-Schüttkörpern (z.B. Raumbeständigkeit bei Druckbeanspruchung).

Die vorliegende Untersuchung hatte zum Ziel, den diesbezüglichen Kenntnisstand zu erweitern und soweit möglich Handlungsempfehlungen für die Verwertungspraxis zu geben. Verfolgt wurde hierzu ein integrativer Ansatz aus Untersuchungen an bestehenden Bauwerken unterschiedlicher Standzeit (Bauwerksgründungen und Tragschichten unter Asphaltdeck- und Pflasterschichten) und an Testfeldern, die unter praxisüblichen, definierten Bedingungen auf der Freifläche des Josef-Vogl-Technikums des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz aufgebaut wurden.

Um die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu gewährleisten, wurden ausschließlich Objekte betrachtet, bei denen MV-Schlacke aus dem MHKW Burgkirchen verwendet wurde. Anhand der Korngrößenverteilung ist diese als sandiger bis stark sandiger, schwach schluffiger Kies mit einem Größtkorn von 42 mm einzuordnen. In bautechnischer Hinsicht ist somit eine weitgehende Frostsicherheit des Materials gewährleistet. Die Untersuchungen umfassten die Schwermetallkonzentrationen in Feststoff-, Eluat- und Sickerwasserproben, feststoff- und hydrochemische Kenngrößen (Kohlenstoffgehalte, Glühverlust, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Abdampfdruckstand, Anionenkonzentration) sowie den Mineralphasenbestand. Die baustofflichen Eigenschaften der MV-Schlacke wurden mittels standardisierter bodenmechanischer Kennwerte (Proctordichte, Verformungsmodul) charakterisiert und durch Materialuntersuchungen (Rein-, Rohdichte, Porosität, spez. Oberfläche, Luft-/Wasserporenanteile) ergänzt. Um festzustellen, ob der Wasser- und Wärmehaushalt von Schlackekörpern mittels bestehender Modellvorstellungen abgebildet werden kann, wurden die Ergebnisse von Simulationsrechnungen mit gemessenen Feuchte- und Temperaturganglinien verglichen.

Die Feststoffgehalte und -eigenschaften der MV-Schlacke aus den fünf untersuchten Bauvorhaben zeigten keinen signifikanten Zusammenhang zur Standzeit der Schlackekörper bzw. deren Exposition zur Atmosphäre. Die Analyse des Ausbrandgrades ergab, dass die einschlägigen LAGA-Anhaltswerte im Mittel eingehalten wurden; punktuelle Überschreitungen sind im Fall des TOC auf die kleinräumige Heterogenität des Schüttguts und die variable Abfallzusammensetzung, im Fall des Glühverlustes auf die Bildung wasserreicher Sekundärphasen zurückzuführen. Die Schwermetall-Feststoffgehalte lagen unterhalb der Anhaltswerte und standen in Einklang mit den Ergebnissen der vierteljährlichen Fremdüberwachung der Rostschlacken aus dem MHKW Burgkirchen.

Im Gegensatz zu den Feststoff-Kenngrößen zeigten die Eluate gem. DIN DEV S4 einen deutlichen Zusammenhang zur Stand- bzw. Lagerungszeit der in der Bauvorhaben eingesetzten Schlacken (Spannweite: wenige Wochen bis mehrere Jahre). Tendenziell nehmen die elektrische Leitfähigkeit, die Chlorid- und Sulfat- sowie die Schwermetallkonzentrationen mit der Stand-/Lagerungszeit ab. Mögliche Ursachen sind die Verarmung mobilisierbarer Gehalte infolge des fortgesetzten Ausstrags in den Wasserpfad bzw. Mineralneubildungen, die zu auslaugbeständigeren Bindungsformen führen.

Die Freiflächenversuche wurden an verdichtet eingebauten und umfassend instrumentierten Schlackekörpern mit einem Volumen von 6,75 bzw. 5,4 m³ durchgeführt. Die meteorologischen Umgebungsdaten wurden mittels einer Wetterstation erfasst. Betrachtet wurden Versuchsvarianten, die sich hinsichtlich der Form des Wasserzutritts unterscheiden. Die Beregnung erfolgte quasi-kontinuierlich (Versuch 1), als natürlicher Niederschlag (Versuch 2) sowie als Impulsberegnung in Anlehnung an die gemessenen Niederschlagshöhen (Versuch 3). Hierdurch sollten Unterschiede in

der Sickerwasseremission gezielt herbeigeführt sowie Vergleichsdaten für die Validierung von Simulationsergebnissen gewonnen werden.

Da die kumulativen Berechnungs- bzw. Niederschlagsmengen in den Freiflächenversuchen nahezu identisch waren, konnten die emittierten Stofffrachten direkt miteinander verglichen werden. Hierbei zeigte sich, dass die Sickerwasseremissionen der Schwermetalle bezogen auf die Gesamtgehalte durchweg im Promillebereich lagen, was eine weitgehende Inertisierung des Schadstoffpotenzials in der Schlackematrix belegt. Der kumulative Stoffaustrag mit dem Sickerwasser betrug elementabhängig bis zu 30 Mass.-% der nach DIN DEV S4 mobilisierbaren Gehalte.

Der zeitliche Verlauf der Schadstoff-Konzentrationen im Sickerwasser aller Freiflächenversuche zeigte innerhalb der Berechnungsvarianten ein einheitliches Muster. Hinsichtlich der zeitlichen Variabilität der Ganglinien nahm der Versuch unter natürlichen Niederschlagsbedingungen eine Stellung zwischen den Varianten ‚Quasi-kontinuierliche Berechnung‘ und ‚Impulsberechnung‘ ein. Hinweise auf eine Korrelation von Konzentration und Sickerwasserverweilzeit wurden nicht gefunden. Dies legt nahe, dass die Einstellung der Sickerwasserkonzentrationen im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht mit den durchströmten Bereichen der Feststoffschüttung erfolgt und im Beobachtungszeitraum nicht durch ratenlimitierte Stoffübergangsprozesse beeinflusst wird. Einzelne Konzentrationssignale lagen im Sickerwasser deutlich über den Werten der DIN DEV S4 Eluate. Damit erlaubt das S4 Eluat zwar eine konservative Abschätzung der mittelfristigen Schadstofffrachten aus Schlackehaufwerken, nicht jedoch eine verlässliche Einschätzung der maximal möglichen Sickerwasserkonzentrationen.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation des Wasserhaushalts der Schlackekörper ergaben im oberflächennahen Bereich der Haufwerke im Mittel ähnliche Wassergehalte wie die gemessenen. Mit der Tiefe weichen die Simulationsergebnisse zunehmend von den Messwerten ab und sind durch eine insgesamt höhere Amplitude gekennzeichnet. Dies weist auf Unsicherheiten bei der Parametrisierung der Wassergehalts-Saugspannungscharakteristik und der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsfunktion hin. Die Simulation des Wärmehaushalts des Schlackekörpers lieferte unabhängig von der Tiefe eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen Haufwerkstemperatur. Hieraus ist zu folgern, dass der Wärmehaushalt von Schlackekörpern mit Mächtigkeiten, die im Grundbaubereich üblich sind, mit hinreichender Genauigkeit anhand des Verlaufs der Umgebungstemperatur, der Wärmekapazitäten und der effektiven Wärmeleitfähigkeit berechnet werden kann. Interne Wärmequellen als Folge exothermer (Mineral-)Reaktionen scheinen dabei aufgrund des Oberflächen/Volumen-Verhältnisses und der diffusen Wärmeabgabe an die Umgebung vernachlässigbar zu sein.

Im Rahmen der mineralogischen Untersuchungen wurde geprüft, inwieweit sich die aus der Zunahme der spez. Oberfläche gefolgerte Dynamik des Mineralbestands definierten Bildungsprozessen (Carbonate, Hydrate etc.) zuordnen lässt. Hierbei wurde eine nicht-systematische Zunahme von Calcit sowie von Ettringit und Hydrocalumit festgestellt. Untersuchungen an einzelnen Kornfraktionen belegen, dass diese Neubildungen vorwiegend mit der Schlämmkorn- und Feinsandfraktion assoziiert sind. Aufgrund deren geringer Massenanteile scheint eine Beeinträchtigung der baustofflichen Eigenschaften durch Mineralneubildungen nicht gegeben zu sein. Dies wurde durch die Untersuchungen zur mechanischen Belastbarkeit mittels dynamischem Plattendruckversuch bestätigt. Die Ergebnisse lieferten Verformungsmoduln und Verdichtungsgrade, die unabhängig von der Standzeit mit denen natürlicher im Erd- und Grundbau eingesetzter Materialien vergleichbar sind.

Die Untersuchungen der Wasser- und Luftporenanteile in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad mittels Computertomographie zeigen, dass sich aufgrund des rheologischen Verhaltens der MV-Schlacke im Proctorversuch Dichtediskontinuitäten zwischen den einzelnen Einbaulagen ergeben.

Tiefenunabhängig bleiben darüber hinaus auch im Mikrobereich koexistente luft-, luft/wasser- und wassergefüllte Porenräume erhalten.

Aus den Untersuchungsergebnissen ist zu folgern, dass

- die Reaktivität von MV-Schlacke im Hinblick auf die Dynamik des Stoffhaushalts (Stoffübergang in die Wasserphase, Mineralneubildungsprozesse) auch nach der gemäß LAGA vorgeschriebenen Lagerungszeit von drei Monaten andauert,
- sich eine verlängerte Lagerungszeit der MV-Schlacke deutlich positiv auf deren Auslaugverhalten auswirkt,
- die mittelfristige Schadstofffracht der aus MV-Schlackekörpern resultierenden Sickerwasseremissionen in geeigneter Weise durch das DIN DEV S4 Eluat abgeschätzt werden kann, Emissionsspitzen jedoch unterschätzt werden,
- ein ungehinderter Wasserzutritt zu bautechnisch verwerteten Schlackekörpern konstruktiv verhindert werden sollte,
- exotherme Reaktionen in Schlackehaufwerken im Grundbau üblicher Mächtigkeiten (1,5 m) für deren Wärmehaushalt eine untergeordnete Rolle spielen und
- die mechanische Belastbarkeit von verdichtet eingebauten Schlackekörpern vergleichbar mit natürlichen im Erd- und Grundbau eingesetzten Materialien ist.

Zusammenfassend stellt der Einsatz im Rahmen von Bauvorhaben eine sinnvolle Verwertungsmöglichkeit für MV-Schlacke als Sekundärrohstoff dar. Hierbei ist neben einer langfristigen Qualitätssicherung durch den Hersteller ein ordnungsgemäßer Umgang durch den Bauherrn inkl. entsprechender Unterweisung des Personals erforderlich. Während der Bauphase müssen eine ausreichende Bewässerung zur Vermeidung von Staubemissionen und Erreichung maximaler Einbaudichten sichergestellt und Vorkehrungen gegen ungehinderten Zutritt von Niederschlagswasser getroffen werden. Hinsichtlich einer Minimierung der Auslaugbarkeit erscheint eine über den Zeitraum von drei Monaten hinausgehende Zwischenlagerung sinnvoll.

1 Einleitung

Bei der thermischen Behandlung von Restmüll fällt Rostschlacke (MV-Schlacke) als massenmäßig wichtigster Verbrennungsrückstand an. Um die Nachhaltigkeit hochwertiger stofflicher Verwertungsstrategien (i.R. von Bauvorhaben) zu bewerten, sind die umweltrelevanten und mechanischen Eigenschaften von Schlackekörpern unter praxisüblichen Bedingungen zu erfassen. Dazu zählen einerseits deren Wasser-, Stoff- und Wärmehaushalt, andererseits deren bautechnische Eigenschaften.

Im Jahr 2000 wurden in Bayern 86 % des Gesamtrestabfalls (2.509.672 Mg) in 17 Anlagen thermisch behandelt [1]. Dies bedeutet eine Steigerung der Verbrennungsquote um 1,2 % zum Vorjahr. Einwohnerbezogen wurden im Jahr 2000 von 206,0 kg Restabfall 177,1 kg thermisch behandelt.

Die bei der Abfallverbrennung entstehende Rohschlacke beläuft sich auf eine Masse von rund 636.000 Mg, was etwa 29 % des Inputs entspricht; d.h. je Mg thermisch behandeltem Restabfall entstehen 290 kg Roh-Schlacke. Im Jahr 2000 wurden hiervon 76 % (422.760 Mg) nach entsprechender Aufbereitung (Abtrennung von Metallen: 58.811 Mg) und Klassierung (Kornfraktionen größer/kleiner 40 mm) als Rostschlacke im Straßen-, Wege- und Deponiebau oder als Bergversatz verwertet. Die restlichen 154.646 Mg MV-Schlacke wurde auf Deponien abgelagert.

Voraussetzung für eine baustoffliche Verwertung der MV-Schlacke ist die Einhaltung von Qualitätsnormen bez. physikalisch-chemischer Parameter, eluierbarer Inhaltsstoffe und mechanischer Belastbarkeit [2]. Da die Mineralneu- und -umbildungen in der reaktiven MV-Schlacke auch nach der vorgeschriebenen Lagerungszeit von drei Monaten [3] andauern, sind Veränderungen der geochemischen Eigenschaften nach erfolgter baustofflicher Verwertung nicht auszuschließen.

Mit dem Vorhaben „Verwertung von Rostschlacken aus der thermischen Abfallbehandlung im Rahmen von Bauvorhaben: Geotechnische und umweltrelevante Eigenschaften des Schlackekörpers unter den in der Verwertungspraxis üblichen Einbaubedingungen“ sollen der diesbezügliche Kenntnisstand erweitert, die Nachhaltigkeit der Verwertungspraxis geprüft und soweit möglich Handlungsempfehlungen für die baustoffliche Verwertung abgeleitet werden.

2 Entstehung, Zusammensetzung und Eigenschaften von MV-Schlacken

2.1 Entstehungsprozesse

Müllverbrennungsschlacken (MV-Schlacken) entstehen bei der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen in Müllverbrennungsanlagen (Abb. 1). Bei der thermischen Abfallbehandlung fallen etwa 25 bis 35 Mass.-% feste und grobkörnige Rückstände in Form von Rostabwurf oder als Rostdurchfall an. Die Qualität der MV-Schlacke wird zum einen von der Abfallzusammensetzung und zum anderen von den Prozess- bzw. Verbrennungsbedingungen wie der Ofentemperatur, der Verweilzeit auf dem Rost und der Homogenisierung des Abfalls vor der Aufgabe auf den Rost bestimmt. Der Verbrennungsrückstand lässt sich in erster Näherung über die Ausbrandparameter Glühverlust und TOC-Gehalt (Total Organic Carbon) charakterisieren [4]. Die Schlacke unterliegt im Zuge von Alterungsreaktionen Mineralneu- und -umbildungen, bei denen die Inhaltsstoffe weitgehend inertisiert werden und die spezifische Oberfläche i.d.R. zunimmt.

Die Entstehungsprozesse von MV-Schlacken während der thermischen Behandlung werden im Folgenden exemplarisch am Beispiel des MHKW Burgkirchen erläutert. Das MHKW Burgkirchen ging 1994 in Betrieb und wird von der MHB Müllheizkraftwerk Betriebsgesellschaft mbH geführt. Eigentümer ist der Zweckverband Abfallverwertung Südostbayern (ZAS). Das Kraftwerk verfügt über zwei Verbrennungslinien, mit denen bei einem durchschnittlichen Heizwert des Abfalls von 10.000 kJ/kg ein Durchsatz von jeweils bis zu 15 Mg Abfall/h erfolgen kann. Bei den angelieferten Abfällen handelt es sich um Haus-, Sperr- und Gewerbemüll.

Der angelieferte Abfall wird mit Hilfe eines Greifers aus dem Müllbunker über einen Einfülltrichter in den Müllschacht gegeben. Am unteren Ende des Müllschachts wird der Rost mit einem Stößel beschickt [4]. Die zur Verbrennung erforderliche Luftmasse wird über mehrere Rostabschnitte durch den Rost (Primärluft, vgl. Abb. 1) eingeblasen. Im Verbrennungsraum wird der Müll bei Temperaturen zwischen 850 - 1.000 °C verbrannt. Die bei der ‚Verbrennung‘ ablaufenden Vorgänge umfassen die Trocknung, Entgasung, Vergasung und Oxidation des Abfalls. Bei der Entgasung werden flüchtige Bestandteile wie Schwefelgase und Kohlenwasserstoffe bei Temperaturen größer 250 °C ausgetrieben.

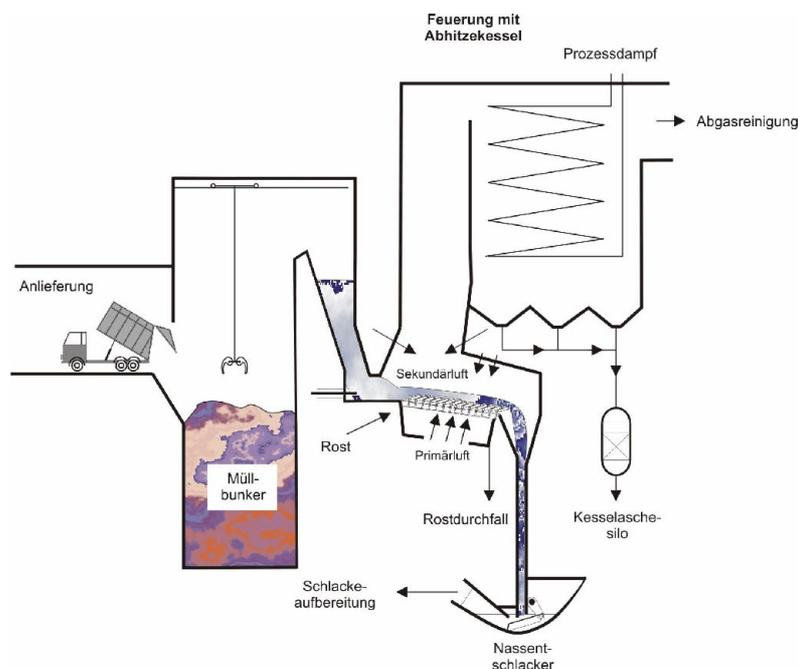


Abb. 1: Entstehung von MV-Rohschlacke im MHKW Burgkirchen

Bei der Vergasung werden Kohlenwasserstoffverbindungen bei Temperaturen zwischen 500 bis 600 °C zu Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff umgesetzt. Bei der eigentlichen ‚Verbrennung‘ werden die während der Entgasung und Vergasung entstandenen brennbaren Gase (CO und H₂) bei Temperaturen größer 800 °C zu CO₂ und H₂O oxidiert [4].

Nahe dem Schmelzpunkt des ausgebrannten Abfalls kommt es zum teilweisen Aufschmelzen und zum Verbacken der aufgeschmolzenen Bereiche mit Aschepartikeln (Sinterung). Die Festigkeit der gesinterten Schlackepartikel ist abhängig von der Sinter Temperatur, der Sinterzeit und der Schmelztemperatur des Ausgangsmaterials. Sinterschlacken stellen aufgrund der heterogenen Abfallzusammensetzung und daraus resultierenden Schwankungen im Sinterungsverhalten ein Zufallsprodukt dar.

Die Schlacke wird in sog. Nassentschlackern (z.B. Stößelnassentschlacker) gelöscht. Die Aufbereitung umfasst Sieben, Sichten und Abtrennen von Eisen und NE-Metallen (Magnet-/Wirbelstromabscheider). Es fallen zwei Schlackefraktionen an, die anhand der Partikelgrößen in Feinschlacke (d_p 0/8 mm) und Grobschlacke (d_p 8/40 mm) unterteilt werden.

Im MHKW Burgkirchen gelangt die Schlacke über Förderbänder in einen Rohschlackenbunker, in dem sie zwei bis vier Wochen unter diskontinuierlicher Befeuchtung bis zur maximalen Wasseraufnahmefähigkeit gelagert wird. Typische Wassergehalte der Schlacke nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker liegen zwischen 15 bis 20 % [5, 6]. Im Schlackebunker finden erste Alterungsreaktionen statt. Diese beinhalten die Bindung der Inhaltsstoffe (Bindung zw. Fein- und Grobkorn), mit der eine Minderung der Auslaugbarkeit einhergeht [7]. Gleichzeitig finden erste Hydratations- (z.B. Umwandlung von Anhydrit (CaSO₄) in Gips (CaSO₄ · 2H₂O)) und Oxidationsreaktionen (z.B. Bildung von Metallhydroxiden und -oxiden in Form von Reaktionssäumen um feine Körner, vgl. Abb. 2) statt.

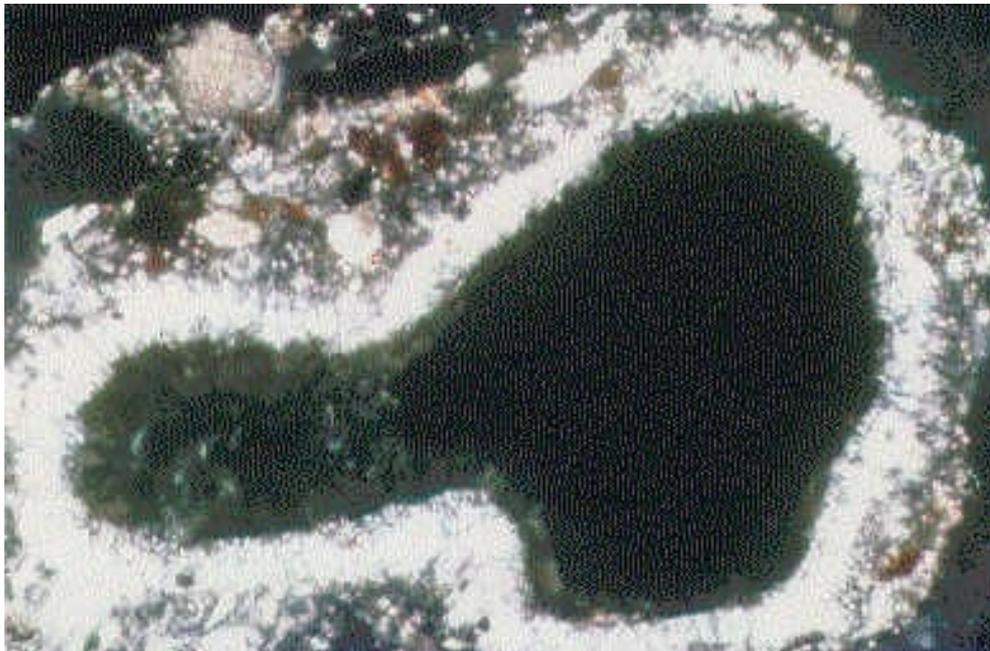


Abb. 2: Korrosionssaum um ein Schlackekorn; 10-fache Vergrößerung

2.2 Mineralogie und Geochemie

Schlacken sind ein inhomogenes, partikelförmiges Stoffgemisch, das sich zu ca. 45 Mass.-% aus Aschen, ca. 40 Mass.-% aus Schmelzprodukten, ca. 10 Mass.-% aus abfallspezifischen Inhaltsstoffen wie Glas, Keramik und Steinen, ca. 5 Mass.-% aus Metallen und bis zu 2 Mass.-% aus organischem Material zusammensetzt [5]. Die Massenanteile der Inhaltsstoffe variieren je nach Verbrennungstechnik, -temperatur und Restabfallzusammensetzung. Laut Literaturangaben [3, 8] sind etwa 40 Mass.-% der mineralischen Schlackenanteile amorph (Gläser, Aschen) und 60 Mass.-% kristallin (neugebildete Minerale).

Die Aschen und Schmelzprodukte unterscheiden sich sowohl morphologisch als auch in der Partikelgröße. Die Aschen werden aus Glasabrieb, anorganischen und organischen Rückständen sowie Ruß- und Staubpartikeln mit einer durchschnittlichen Größe von < 0,002 bis 2 mm gebildet. Demgegenüber stellen die Schmelzprodukte stark poröse, unregelmäßig geformte Mineralkörner einer Partikelgröße von > 2 mm dar, die aus einer silikatischen Matrix (Glas) mit kristallinen Neubildungen (Silikate und Oxide) bestehen [5, 9, 10].

Bei den silikatischen Mineralneubildungen handelt es sich hauptsächlich um Melilithe (Gehlenit-Akermanit-Mischreihe), Pyroxene (Augit-Diopsid-Hedenbergit-Mischreihe) und Amphibole und Minerale der Olivin-Gruppe. Ebenso treten Oxide der Spinell-Gruppe als Schwermetallphasen (Magnetit, Maghemit, Hercynit, Chromit, Ulvöspinell und Magnesioferrit) auf. Das Wachstum der Kristalle erzeugt sowohl flächige, skelettäre, dendritische als auch feine nadelige Strukturen [11].

Die Glasphasen entstehen als Erstarrungsprodukte während des Abschreckens der Verbrennungsrückstände im Nassentschlacker. Sie zeigen typischerweise ein Fließgefüge (Einregelung der Kristalle, lagige Pigmentierung, Glasbläschen), welches einer zähen Schmelze entspricht [9, 10, 12]. Bedingt durch Mikroinhomogenitäten wie Kristallite oder eingelagerte Tröpfchen und Farbträger (wie Fe, Ti, Mn, Cr, Cu und Pb) sind die Gläser unterschiedlich gefärbt (Abb. 3). Neugebildetes Glas deutet auf eine Gutbetttemperatur von ~1.000 °C hin [8, 10, 12].

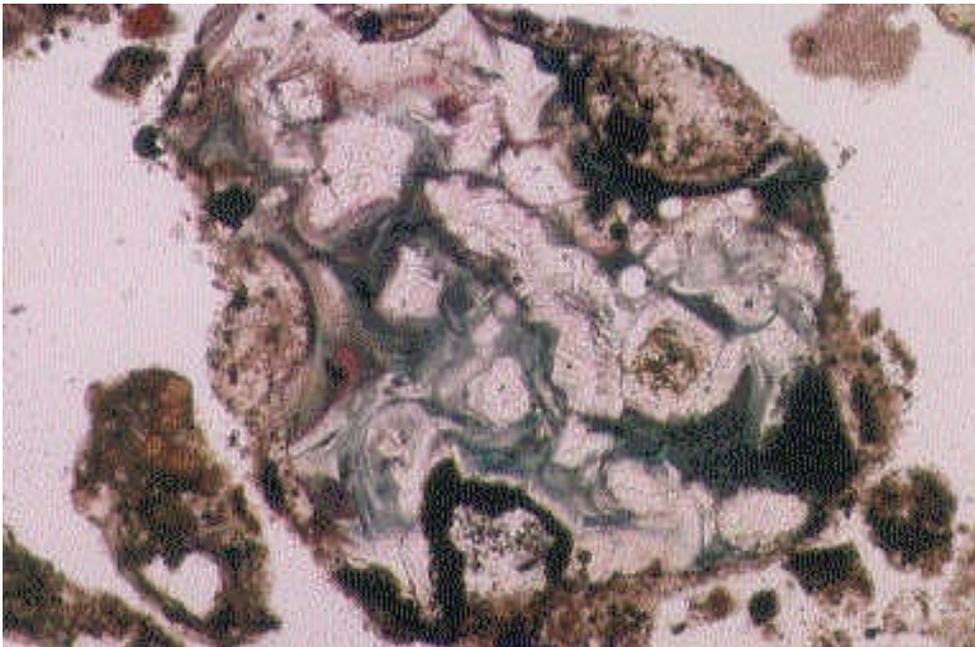


Abb. 3: Dünnschliffaufnahme einer Schlackeprobe, bestehend aus blaugefärbtem Glas (mit Fließgefüge) und Mineralneubildungen; 10-fache Vergrößerung



Abb. 4: Dünnschliffaufnahme einer Schlackeprobe mit undulös auslöschendem Quarzkorn; 10-fache Vergrößerung

Bei den abfallspezifischen Inhaltsstoffen handelt es sich um Durchläufermaterialien (Glas, Keramik-, Gesteins- und Mineralbruchstücke), welche die Verbrennung unbeschadet überstehen. Quarz zeigt typischerweise die sog. undulöse Auslöschung (vgl. Abb. 4). Diese kommt durch Druckbeanspruchung zustande, durch die sich das Kristallgitter zu einem feinen, submikroskopischen Mosaik verformt. Aufgrund der thermischen Beanspruchung weist Quarz oftmals parallel orientierte Spalt- risse auf [10].

Unter mineralogischen Gesichtspunkten stellt die MV-Schlacke ein mit Eisen durchsetztes Calcium-Aluminium-Silikat [12] dar, das in seinen Hauptbestandteilen natürlichen Gesteinen der Erdkruste wie Basalten, Basaniten, Andesiten und Daciten gleicht [6, 13]. Dabei liegen die Gehalte an Schwermetallen, Chlor und Schwefel über den Werten natürlicher Gesteine (Tab. 1).

2.3 Alterungsvorgänge

Die in Rostschlacken auftretenden kristallinen Phasen und Gläser sind unter den praxisüblichen Lagerungsbedingungen nebeneinander nicht stabil. Dies löst im Nassentschlacker und bei der Zwischenlagerung eine Reihe geochemischer Prozesse aus, die als Alterungsvorgänge beschrieben werden [14, 15]. Hierbei handelt es sich um Verfestigungsreaktionen (Carbonatisierung), Glas- und Metallkorrosionen (Oxidation und/oder Hydratation) sowie um Lösungs- und Fällungsreaktionen.

Die glasigen Neubildungen reagieren in Anwesenheit von Wasser nach Gelbildung mit dem in der Schlacke vorkommenden Calciumhydroxid (Portlandit) zu Calciumaluminatsilikat-Hydraten (CASH-Phasen, z.B. Ettringit $\{Ca_6Al_2[(OH)_4,SO_4]_3 \cdot 26 H_2O\}$). Diese Reaktion wird durch die Zunahme der spezifischen Oberfläche im Zuge der Alterung begünstigt [16]. Eine umweltrelevante Eigenschaft der neugebildeten Calciumaluminatsilikat-Hydrate ist deren Fähigkeit, als „Speicherminerale“ Schwermetalle zu binden und so deren Mobilität herabzusetzen [17, 18, 19]. Limitierend für eine langfristige Immobilisierung der Schwermetalle ist die Mineralstabilität unter veränderten Milieubedingungen (pH-Wert, Redoxpotenzial, Temperatur etc.). Beispielsweise liegt der thermodynamische Stabilitätsbereich der nadelförmig hexagonal-prismatischen Ettringit-Kristalle zwischen pH 10,8 und 12,5. Im stärker basischen Bereich erfolgt eine temperaturabhängige Umwandlung in Monosulfat ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$). Ettringit ist zudem nur bei geringen CO_3^{2-} -Konzentrationen stabil. Bei einer längeren CO_2 -Einwirkung zerfällt Ettringit in die stabilen Endprodukte Calcit, Gips und Aluminiumhydroxid [20, 21].

Tab. 1: Vergleich der Gesamtgehalte an Haupt- und Nebenelementen von Basalt [6] und MV-Schlacken [6, 22, 23, 24]

Hauptelemente	Basalt [g/kg]	Schlacke [g/kg]	Nebenelemente	Basalt [g/kg]	Schlacke [g/kg]
Silizium	280	140 - 260	Kupfer	0,06	0,2 - 7,0
Aluminium	82	5 - 95	Chrom	0,1	0,1 - 9,6
Calcium	41	30 - 140	Zink	0,07	0,5 - 21
Natrium	24	5 - 35	Blei	0,013	0,6 - 5,2
Magnesium	23	4 - 18	Nickel	0,08	0,04 - 0,76
Kalium	21	3 - 21	Cadmium	0,0002	0,0001 - 0,082
Eisen	56	20 - 110	Quecksilber	0,00008	0,0001 - 0,02
Schwefel	1,1	2 - 4	Arsen	0,002	0,003 - 0,022
Chlor	0,26	0,3 - 6,3			
Kohlenstoff	0,13	5 - 50			

Der in frischer Schlacke vorkommende Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) bildet sich während der Alterung vollständig zurück. Die Ursache für diesen Umbau sind neben der Bildung von Calciumaluminatsilikat-Hydrat (CASH) stattfindende Carbonatisierungsreaktionen, bei denen Portlandit aus der Umgebungsluft Kohlendioxid aufnimmt und Calciumcarbonat bildet [25]. Das Fortschreiten der Carbonatisierung zeigt sich unter anderem in einer Erhöhung des anorganischen Gesamtkohlenstoffgehaltes (TIC) im Verlauf der Alterung.

Anhydrit (CaSO_4) reagiert während der Alterung mit Wasser zu Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) bzw. zu Bassanit ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$) [26], was zu abnehmenden Anhydritgehalten führt [27].

Schon auf dem Gutbett reagiert metallisches Eisen zum Oxid, das mit den silikatischen Bestandteilen des Gutbetts Eisen-Silikate bildet. Weiterhin bilden sich Hämatit (Fe_2O_3) bzw. Goethit (FeOOH) [5, 16]. Hieraus resultiert nach [15] in einem Alterungszeitraum von 2 bis 3 Jahren eine signifikante Zunahme der Eisenoxide. Laut Lichtensteiger [16] sind die Eisenmetalle innerhalb von 5 bis 10 Jahren vollständig korrodiert und die entsprechenden Neubildungen (Hydroxide und Oxide) abgeschlossen.

Aluminium verwittert unter Wasserstoffentwicklung zu Aluminiumhydroxid. Dieser Prozess läuft an feinen Aluminiumkörnern innerhalb kürzester Zeit ab, wohingegen sich an größeren Körnern eine passivierende Hydroxidschicht bilden kann [16].

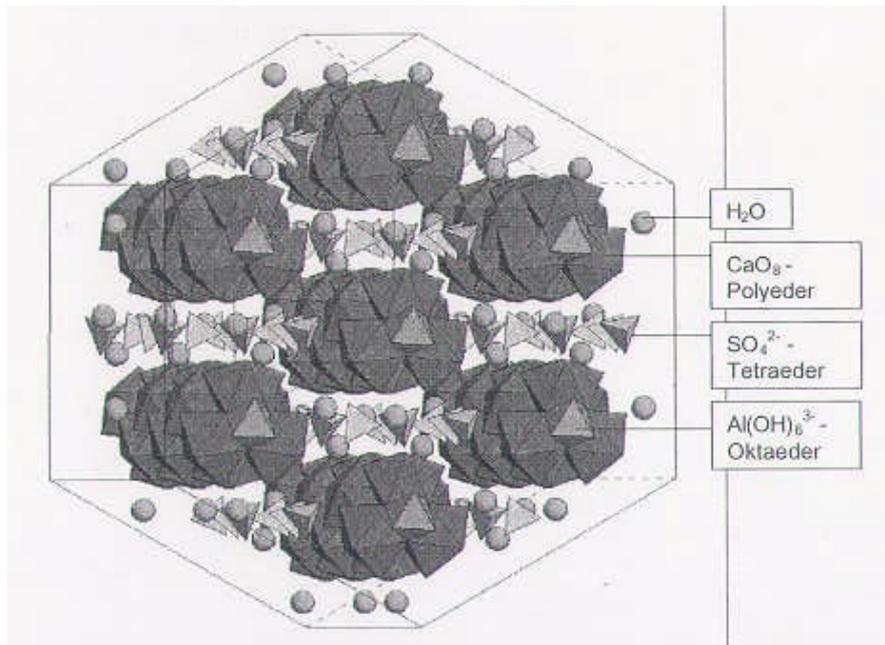


Abb. 5: Struktur von Ettringit [20, 21]

2.4 Auslaugverhalten

Ein wichtiges Kriterium für die nachhaltige Verwertung von Schlacke ist die Abschätzung des Ausmaßes möglicher Emissionen in den Sickerwasserpfad. Mit Hilfe von Elutionstests wie dem Schüttelversuch gemäß DIN 38 414 Teil 4 [28] wird das Auslaugverhalten von Schwermetallen aus Feststoffen ermittelt. Daneben werden die freisetzungsbestimmenden Prozesse auch anhand aufwändigerer Perkolations-, Säulen-, Lysimeter- und Titrationsversuche untersucht [11, 14, 29, 30, 31].

Die Eluatkonzentrationen der Schwermetalle werden durch milieuspezifische mobilisierende (Lösung, Desorption) und immobilisierende Prozesse (Fällung, Sorption), denen die vorherrschenden Schwermetall-Spezies unterliegen, kontrolliert [14]. Eine wesentliche Einflussgröße ist hierbei der pH-Wert. Die Kenntnis des pH-Pufferverhaltens der Schlacke ist daher für eine Langzeitabschätzung der Sickerwasseremissionen besonders wichtig. Dieses wird anhand von Titrationskurven bestimmt, die einen Rückschluss auf die pH-kontrollierende Festphase erlauben. Typische Anfangs-pH-Werte (ohne Säurezugabe) liegen zwischen pH 11 und 12 (Pufferbereich des Portlandzements). Oberhalb von pH 10 erfolgt die Pufferung unter Auflösung von Calciumhydroxiden und -silikaten. Bis zum pH-Wert von 7,5 ist die Freisetzung von Calcium proportional zur zugegebenen Säurekonzentration. Im weiteren Verlauf der Titration (bis zum neutralen pH-Bereich) erfolgt die Auflösung von Calciumcarbonat, gefolgt von Bicarbonat, Calciumsilikat und weiteren Silikatverbindungen. Unterhalb von pH 5 werden Al(OH)_3 und unter noch saureren Bedingungen Fe(OH)_3 gelöst [14].

Schwermetalle kommen in der Schlacke als Metalle, Legierungen oder in Glasphasen, Oxiden (Spinelle) oder Silikaten vor (Pyroxene, Melilithe) vor. Im Einklang mit den pH-abhängigen Stabilitätsbereichen vieler schwermetallhaltiger Mineralphasen z.B. {Anglesit (PbSO_4), Otavit (CdCO_3), Zinksilikat (ZnSiO_3)} ist bei pH-Werten < 8 mit einer deutlich zunehmenden Eluierbarkeit zu rechnen [18].

2.5 Baustoffliche Verwertung

Von den Hausmüllverbrennungsrückständen dürfen im Erd- und Straßenbau ausschließlich MV-Schlacken verwendet werden. Da sich die Hauptschadstofffrachten erfahrungsgemäß in den MV-Filterstäuben (aus der Abgasreinigung) und in den Salzen und Schlämmen (aus der Schadgasabscheidung und Abwasseraufbereitung) finden, dürfen diese weder allein noch mit der MV-Schlacke vermischt eingesetzt werden [32].

Die bisherigen Einsatzgebiete von MV-Schlacken liegen vorwiegend im Straßen- und Wegebau sowie im Landschafts- und Deponiebau. MV-Schlacken werden aber auch als Zuschlagstoffe für Baumaterialien und Bergversatzmaterial im Untertagebereich in Abhängigkeit von der Gesetzeslage der einzelnen Bundesländer eingesetzt [33]. MV-Schlacken können als (hydraulisch und bituminös) gebundenes bzw. ungebundenes Tragschichtmaterial für Baustraßen, befestigte Nebenflächen (Parkplätze, Geh- und Radwege) bzw. land- und forstwirtschaftliche Wege, für Dammschüttungen und Lärmschutzwälle, als Auffüllmaterial im Industrie- und Gewerbebau und zur Zwischenabdeckung und Oberflächenprofilierung im Deponiebau verwendet werden. In Abb. 6 sind die Verwertungswege der MV-Schlacke in Deutschland graphisch dargestellt. Der verwertete Anteil der Rohschlacke belief sich im Jahr 1999 in Bayern auf 76 Mass.-%.

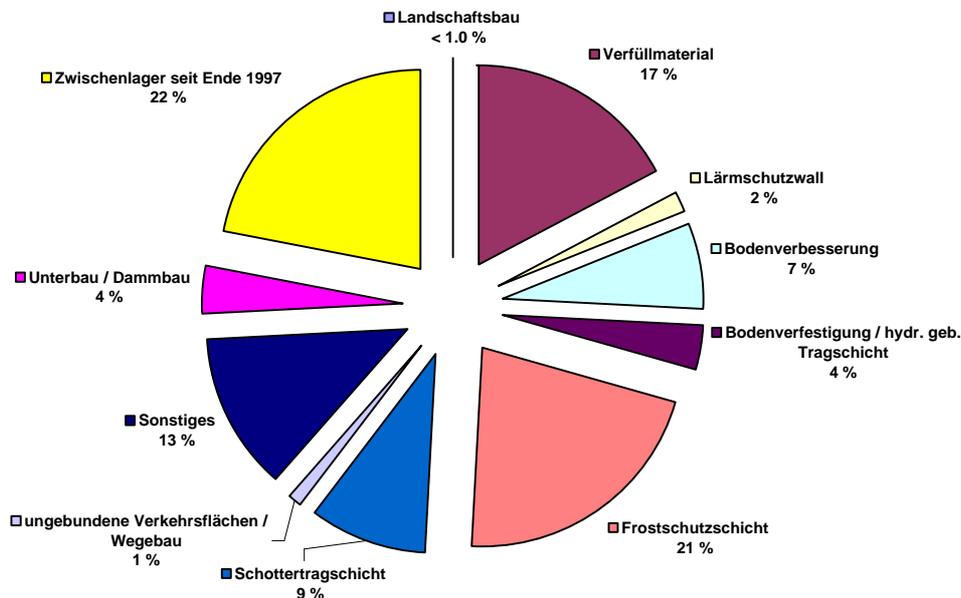


Abb. 6: Verwertung von MV-Schlacke in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1997 [34]

Werden MV-Aschen als Frostschuttschicht bzw. für die Verfestigung mit hydraulischen Bindemitteln eingesetzt, so können sie nach [35] für die Bauklassen IV bis VI verwendet werden. Ausgeschlossen ist die Verwendung von MV-Schlacke als Leitungsrabenverfüllmaterial, da es zu massiven Korrosionserscheinungen von Betonkörpern und deren Armierung kommen kann.

Problematisch ist der Einsatz der MV-Schlacke hinsichtlich wasserwirtschaftlicher Belange, da Auslaugungen von Schadstoffen, selbst nach längerer Zwischenlagerung, nicht gänzlich auszuschließen sind. Hierzu wird von der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen [35] ausdrücklich auf mögliche wasserwirtschaftliche Bedenken hingewiesen. Die Herstellung von Tragschichten mit bituminösen Bindemitteln unter Verwendung oder Mitverwendung von MV-Schlacken ist grundsätzlich möglich, doch wird dadurch erfahrungsgemäß der Bindemittelanspruch des Mischgutes erhöht. Weiterhin ist der Staubanfall an Mischanlagen bei der Mischgutherstellung wesentlich höher als bei der Verwendung herkömmlicher Mineralstoffe [36].

In der Literatur wurden zudem Bauschäden beschrieben, die aufgrund von volumenvergrößernden Reaktionen der MV-Schlacke durch Feuchtigkeit Zutritt entstanden sind [37, 38]. Diese Hebungen können aber durch eine angemessene Zwischenlagerung der Schlacke vor dem Einbau minimiert werden. Diese Verbesserung der Raumbeständigkeit ist bei einer Zwischenlagerungszeit von 3 Monaten [39] meist gegeben [32]. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, dass der Gehalt an mergeligen und tonigen Bestandteilen durch Verwitterungsvorgänge und damit verbundener Tonmineralneubildung ansteigen kann.

2.6 Gesetzliche Rahmenbedingungen der Verwertung

Das abfallwirtschaftliche Ziel einer möglichst umfassenden stofflichen Verwertung dient

- einer Reduktion der Abfallmassen,
- der Einsparung von Primärrohstoffen und Energie und
- der Schonung von Deponiekapazität, Ressourcen, Natur und Landschaft.

Oberster Grundsatz gem. § 2 des KrW-/AbfG [40] ist die Vermeidung von Abfällen; nicht vermeidbare Abfälle sind umweltverträglich zu verwerten. Dabei stehen eine stoffliche, biologische und energetische Verwertung im Vordergrund.

Ziele der TASI [41] sind, nicht vermiedene Abfälle soweit wie möglich zu verwerten, den Schadstoffgehalt der Abfälle so gering wie möglich zu halten und eine umweltverträgliche Behandlung und Ablagerung der nichtverwertbaren Abfälle sicherzustellen. Die TASI enthält Anforderungen an die Verwertung, Behandlung und sonstige Entsorgung von Siedlungsabfällen nach dem Stand der Technik. Für die Ablagerung der nicht verwertbaren Aschen und Schlacken sind die Zuordnungswerte für die Deponieklasse I anzustreben, mindestens jedoch die für die Deponieklasse II einzuhalten.

Mit Hilfe des Merkblatts der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) „Merkblatt über die Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle“ [39] und den dazugehörigen Technischen Regeln „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln“ [42] wurde eine Vereinheitlichung der Untersuchung und Bewertung von Reststoffen und Abfällen erreicht. Darin werden Forderungen an die Stoffkennwerte der Schlacke, Güteüberwachungskriterien, Anforderungen an den Einsatz von Schlacke im Straßenbau etc. gestellt. Für eine Verwertung der MV-Schlacken sollten zur Qualitätssicherung die Rückstände separiert, die Schlacken entwässert, die Eisenfraktion abgetrennt und gewaschen werden. Da Schlacken sehr reaktiv sind und es schon im Nassentschlacker durch den Zutritt von Wasser, Kohlendioxid und Sauerstoff aus der Atmosphäre zu gas- und wärmeproduzierenden Alterationsreaktionen kommt, schreibt [39] eine dreimonatige Zwischenlagerung bei ausreichender Bewässerung und Luftzufuhr vor. Dabei können diese Reaktionen kontrolliert und möglichst geschlossen ablaufen. Durch eine definierte Alterung der Schlacken vor der Verwertung lässt sich insgesamt eine deutliche Verringerung der Schadstoffmobilitäten [43, 44] erreichen.

Im Merkblatt über die „Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau, Teil: Müllverbrennungsasche (MV-Asche)“ [45] werden die Einbaubedingungen näher beschrieben. Grundsätzlich sind als Anwendungen Tragschichten ohne Bindemittel und mit bituminösen Bindemitteln, Befestigung ländlicher Wege und Nebenflächen, Bodenverfestigung, Unterbau und Lärmschutzwälle möglich. Weitere Anforderungen für die Verwendung von Rückständen im Straßenbau sind in ZTVT-StB 95 [35] aufgeführt.

3 Zielsetzung

Ziel dieser Untersuchung ist die Charakterisierung mineralogischer, geochemischer und bodenmechanischer Eigenschaften von baustofflich verwerteter MV-Schlacke. Hierdurch soll der Kenntnisstand bezüglich der Nachhaltigkeit der bisherigen Verwertungspraxis unter wirtschaftlichen und umwelttechnischen Gesichtspunkten erweitert und eventuelle Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

Die Untersuchungen werden einerseits an konkreten Verwertungsvorhaben im Industrie-, Gewerbe- und Straßenbau, andererseits an umfangreich instrumentierten Testfeldern durchgeführt. Die räumliche Skala des Untersuchungsprogramms umfasst sowohl den Verwertungs- als auch den Technikumsmaßstab. In zeitlicher Hinsicht bildet die Auswahl an Verwertungsobjekten Standzeiten des Schlackekörpers bis zu 3 Jahren ab.

Im Einzelnen umfassen die Untersuchungsziele

im Labor- und Technikumsmaßstab

- die Kennzeichnung des Wasser-, Wärme- und Stoffhaushalts von MV-Schlackekörpern unter dem Einfluss umwelttechnisch relevanter mineralogischer Prozesse
- die Charakterisierung der bautechnischen Eigenschaften (insbesondere der Raumbeständigkeit) und deren zeitlicher Entwicklung in definiert eingebauten Schlackekörpern mittels bodenmechanischer Untersuchungsmethoden

und im Verwertungsmaßstab

- die geotechnische Bewertung bestehender Bauwerksgründungen, in denen MV-Schlacke stofflich verwertet wurde
- die Evaluierung eventueller Veränderungen der bodenmechanischen Eigenschaften von MV-Schlackekörpern und deren Auslaugpotenzial in Abhängigkeit von der Standzeit nach Einbau

sowie

- die kritische Prüfung des Prozessverständnisses bez. des Wasser- und Wärmehaushalts von MV-Schlackekörpern anhand des Vergleichs von Simulationsergebnissen mit Messdaten.

4 Untersuchungsobjekte und -methoden

Im Folgenden werden die untersuchten baustofflichen Verwertungsmaßnahmen (Bauvorhaben A bis E) sowie dreier Freiflächenversuche auf dem Gelände des Josef-Vogl-Technikums dargestellt. Bei letzteren wurde Müllverbrennungsschlacke in Verschalungssystemen verdichtet eingebracht und mit Feuchte-/Temperatursensoren bestückt. Die meteorologischen Umgebungsdaten wurden mit einer Wetterstation erfasst.

Um die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu gewährleisten, wurden ausschließlich Schlackekörper mit MV-Schlacke aus dem MHKW Burgkirchen untersucht. Die verschiedenen Untersuchungsobjekte werden zunächst vorgestellt und im Kapitel 5 vergleichend diskutiert.

4.1 Bauvorhaben

Die untersuchten Bauvorhaben unterscheiden sich hinsichtlich der Standzeiten der Schlackekörper zum Zeitpunkt der Beprobung und der Exposition gegenüber atmosphärischen Einflüssen. Der geogene Untergrund der Bauvorhaben A bis D wird gemäß geologischer Übersichtskarte [46] aus quartären Schottern (Pleistozän) mit sandigen bis tonig-schluffigen Kiesen als Gesteinstyp gebildet. Das Bauvorhaben E weist eine quartäre Auffüllung aus stark kiesigem, sandigem Ton (GOK bis 0,6 m) über stark feinsandigem, schluffigem Ton auf (Hanglehm; 0,6 bis 1,1 m).

4.1.1 Bauvorhaben A

Bei dieser Baumaßnahme ist die MV-Schlacke als Füllmaterial unterhalb der Bodenplatte einer Lagerhalle eingebaut. Das Bauvorhaben wurde 1996 begonnen und 1997 abgeschlossen. Die Beprobung erfolgte im Jahr 2000. Dies entspricht einer Standzeit des beprobten Schlackekörpers von ca. 3 Jahren.



Abb. 7: Kernbohrung durch den Hallenboden (Betonplatte)



Abb. 8: Kernbohrung in einem Versorgungsschacht unter dem Schlackekörper

Um Schlackeproben aus dem Verfüllbereich zu erhalten, wurden zwei Kernbohrungen (vgl. Abb. 7 und Abb. 8) durch die Bodenplatte der Lagerhalle sowie in einem Versorgungsschacht unterhalb der Bodenplatte durchgeführt und je drei Proben entnommen. Die Probenansprache zeigte neben der MV-Schlacke Beimengungen von Kies und Sand.

4.1.2 Bauvorhaben B

In diesem Bauvorhaben ist die MV-Schlacke als Tragschichtmaterial unterhalb einer Pflasterdecke eingebaut (vgl. Abb. 9). Die Baumaßnahme wurde im Jahr 1998 begonnen und 1999 abgeschlossen. Die Beprobung durch das Bayerische Landesamt für Umweltschutz erfolgte im Jahr 2000. Dies entspricht einer Standzeit des beprobten Schlackekörpers von ca. 1-2 Jahren.

Zur Probenahme wurden an zwei etwa $1,0 \cdot 1,0 \text{ m}^2$ großen Flächen das Pflaster und der unterliegende (im Zuge der Fugenfüllung eingetragene) Splitt bis zur Oberkante der MV-Schlacke zurückgebaut. Insgesamt wurden vier Stechzylinderproben tiefendifferenziert entnommen (Pflasteröffnung A: 0 - 20 und 20 - 40 cm unter GOK; Pflasteröffnung B: 0 - 30 und 30 - 60 cm unter GOK). Bei der Ansprache wurden wiederum Beimengungen von Kies und Sand festgestellt.

Parallel zur Probenahme erfolgten bodenmechanische Untersuchungen des Schlackekörpers durch den Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München. Diese umfassten statische und dynamische Plattendruckversuche sowie leichte Rammsondierungen.



Abb. 9: Beprobung einer Schlackegründung durch Abtragung der Betonstein-/Splitt-Überdeckung

4.1.3 Bauvorhaben C

Bei dieser Baumaßnahme dient die MV-Schlacke als Tragschichtmaterial unter einer Asphaltdecke. Zur Erhöhung der Raumbeständigkeit der Tragschicht wurde die Schlacke mittels einer Vibrationswalze (vgl. Abb. 10) verdichtet. Bis zum Aufbringen der Asphaltdecke wurde der Schlackekörper zum Schutz gegen Verdunstung mit Kunststoffplanen abgedeckt. Der Einbau und die Probenahme erfolgten zeitnah vor dem Aufbringen der Asphaltdecke; die Standzeit entsprach wenigen Tagen. Insgesamt wurden acht statistisch über die Fläche verteilte Proben der oberen Lage (0 - 15 cm unter GOK) entnommen und zu zwei Mischproben vereint.

4.1.4 Bauvorhaben D

Auch bei dieser Baumaßnahme dient die MV-Schlacke als Tragschichtmaterial unterhalb einer Asphaltdeckschicht. Die Müllverbrennungsschlacke wurde im Jahr 2000 eingebaut und mittels einer Vibrationswalze verdichtet. Eine Austrocknung des Schlackekörpers wurde durch Abdeckung mit Kunststoffplanen verhindert. Die Beprobung erfolgte nach einer Standzeit von einigen Tagen. Insgesamt wurden sieben statistisch über die Baufläche verteilte Proben aus der oberen Lage (Tiefe: ca. 0 - 15 cm) entnommen und zu drei Mischproben vereint.

4.1.5 Bauvorhaben E

Bei dem noch nicht vollständig abgeschlossenen Bauvorhaben E wird MV-Schlacke als Trag- und Frostschuttschicht unter einem Busbetriebshof eingebaut.

Es wurden zwei Schlackeproben entnommen. Bei der einen Probe handelt es sich um MV-Schlacke, die eine Woche zuvor eingebaut und verdichtet, aber noch nicht mit Asphalt überdeckt wurde. Im Gegensatz zu den Bauvorhaben A bis D war die Schlacke zuvor ca. ein Jahr gelagert worden.



Abb. 10: Aufbringung des Schlackeplanums mittels Radlader am Tag der Probenahme



Abb. 11: Verdichtung der eingebauten Müllverbrennungsschlacke mittels Vibrationswalze am Tag der Probenahme

4.2 Freiflächenversuche

Um unter definierten Einbaubedingungen einerseits die zeitliche Entwicklung des Wasser-, Stoff- und Wärmehaushalts, andererseits eventuelle Veränderungen der bodenmechanischen Eigenschaften verfolgen zu können, wurden auf der Freifläche des Josef-Vogl-Technikums halbtechnische Untersuchungen an drei Schlackekörpern unter variierten Randbedingungen durchgeführt.

Hierzu wurden Verschalungssysteme mit MV-Schlacke in 6 Lagen à 25 cm Mächtigkeit befüllt. Um mit den Bauvorhaben A bis E vergleichbare Einbaubedingungen zu erzielen, wurden die einzelnen Lagen mittels Rüttelplatte verdichtet. Die Schlackekörper wurden zur Erfassung des Wärme- und Wasserhaushalts mit je neun Temperatur- (Pt 100) und Feuchtesensoren (TDR, anhand gravimetrischer Wassergehaltsbestimmungen kalibriert) instrumentiert. Die Messstellen lagen in den Tiefen 0,25, 0,75 und 1,25 m unter der Haufwerksoberfläche. Das Sickerwasser wurde über einen Pumpensumpf (vgl. Abb. 12) aufgefangen und auf umweltrelevante Inhaltsstoffe analysiert. Die Aufzeichnung der atmosphärischen Umgebungsbedingungen Niederschlagsmenge, Außentemperatur, Luftfeuchte und Globalstrahlung im Wellenlängenspektrum des Sonnenlichts erfolgte mit Hilfe einer Wetterstation.

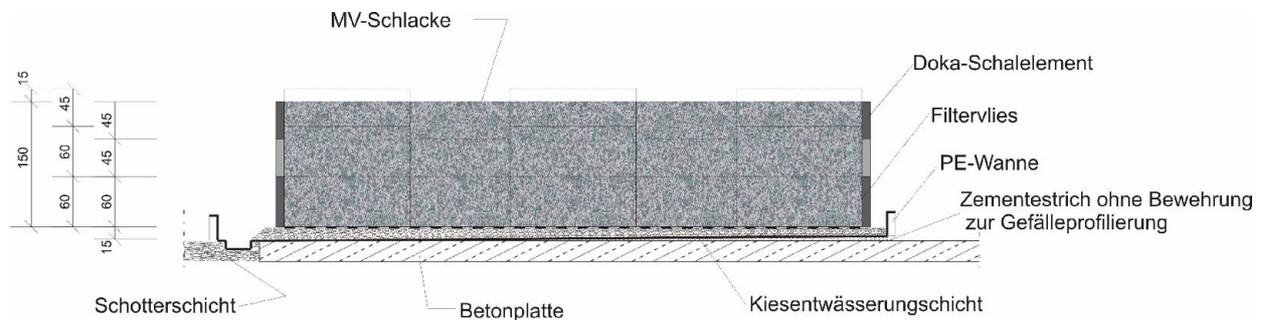


Abb. 12: Darstellung des Versuchsaufbaus am Beispiel des Freiflächenversuchs 1; Maßangaben in cm



Abb. 13: Blick auf den Versuchsaufbau der Freiflächenversuche 2 und 3

Die Berechnungsweise („obere“ Randbedingung) der einzelnen Freiflächenversuche und deren Exposition gegenüber der Atmosphäre sind zusammen mit der Dimensionierung der Versuchsaufbauten und den durchgeführten Feststoffbeprobungen in Tab. 2 wiedergegeben. Aus den Randbedingungen resultieren unterschiedliche Verweilzeiten des Sickerwassers im Schlackehaufwerk. Im Fall von Freiflächenversuch 1 wurde die Verweilzeit im Rahmen einer Flussunterbrechung maximiert, um festzustellen, ob und inwieweit die Schadstoffemission einer Ratenlimitierung unterliegt. Für Details zum Aufbau, zur Berechnung und zur verwendeten Messelektronik wird auf den Zwischenbericht [47] verwiesen.

Tab. 2: Experimentelle Bedingungen der Freiflächenversuche

	Freiflächenversuch 1	Freiflächenversuch 2	Freiflächenversuch 3
Maße [m] (Länge x Breite x Höhe)	3 x 1,5 x 1,5	3 x 1,2 x 1,5	3 x 1,2 x 1,5
Trockenmasse [Mg]	9,4	8,1	7,3
„obere“ Randbedingung	künstliche Beregnung: 3 mal täglich 30 mm (16 Tage) 1 Flussunterbrechung (50 Tage) 3 mal täglich 30 mm (16 Tage)	natürlicher Niederschlag und Verdunstung	künstliche Beregnung gemäß gemessenem Niederschlag
Exposition	abgedeckt	offen	abgedeckt
Feststoffprobenahme	Ein- und Rückbau	Einbau, Standzeit 120 Tage und 150 Tage	
Versuchsdauer [d]	93	240	

4.3 Charakterisierung der MV-Schlacke

Die Grobcharakterisierung des Schlackematerials umfasste die Parameter Trockensubstanz, Korngrößenverteilung, Glühverlust sowie die Gehalte an Gesamt- (TC), anorganischem (TIC) und organischem (TOC) Kohlenstoff. Die Untersuchungen erfolgten gem. einschlägiger Vorschriften [42] nach folgenden Normen:

- Trockensubstanz (im Trockenschrank bei 105 °C) nach DIN 38 414 Teil 2 (DEV S2) [48],
- Korngrößenverteilung durch Siebanalyse gem. DIN 52 098 [49] mit den Maschenweiten von 0,063 bis 31,5 mm,
- Glühverlust (im Ofen bei 550 °C) nach DIN 38 414 Teil 3 (DEV-S 3) [50],
- Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) nach Abfallablagereungsordnung [51],
- gesamter organischer (TOC) und anorganischer (TIC) Kohlenstoffgehalt nach Abfallablagereungsverordnung [51].

5 Ergebnisse

5.1 Feststoffcharakterisierung

5.1.1 Glühverlust und Kohlenstoffgehalt

Die Glühverluste der Proben aus den diversen Bauvorhaben bewegen sich zwischen 1,0 und 3,5 Mass.-% mit einem Mittelwert von 2,3 Mass.-%. Die Proben der Freiflächenversuche weisen dagegen deutlich höhere Glühverluste um 4 – 5 Mass.-% auf.

Die tendenzielle Überschreitung des LAGA-Anhaltswerts für den Glühverlust (3 Mass.-%) ist mit der Bildung wasserreicher Sekundärphasen, die sich bei der Bestimmungstemperatur von 550 °C zusätzlich zu den organischen Komponenten zersetzen, zu erklären. Dieser Befund bestätigt, dass der Glühverlust bei gealterten bzw. eingebauten Schlacken keine eindeutigen Aussagen zum Ausbrandgrad mehr erlaubt (vgl. Tab. 3).

Eine Abhängigkeit des Glühverlusts von der Standzeit bzw. vom Schutz gegenüber atmosphärischen Einflüssen kann nicht abgeleitet werden.

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff lag bei allen Proben zwischen 0,5 und 1,5 Mass.-% mit einem Mittelwert von 1,0 Mass.-%.

Für die Freiflächenversuche 1 bis 3 ergaben sich vergleichsweise geringe TOC-Gehalte von 0,7 bis 0,8 Mass.-%. Die Schwankungsbreite der Werte weist auf eine nur geringe räumliche Variabilität des organischen Kohlenstoffgehalts im Schlackekörper hin. Der TOC-Zuordnungswert von 1 Mass.-% [39, 42] wurde durchgängig eingehalten.

Demgegenüber zeigen die TOC-Werte des Bauvorhabens A abweichend von früheren Bestimmungen und von den Bauvorhaben B bis E eine deutliche Überschreitung des Anhaltswerts (Tab. 3). Da nicht davon auszugehen ist, dass sich die Prozessbedingungen bei der thermischen Abfallbehandlung in der Müllverbrennungsanlage Burgkirchen grundsätzlich verändert haben, liegt es nahe, dass die Abweichungen der TOC-Gehalte von der Abfallzusammensetzung herrühren.

Tab. 3: Glühverlust (GV) der Schlacken aus den untersuchten Baumaßnahmen A bis E sowie Gehalte an organischem (TOC) und anorganischem Kohlenstoff (TIC); Vergleich mit LAGA [39, 42]; x_i : Einzelwert, \bar{x} : Mittelwert, σ : Standardabweichung; Probenzahl $n \geq 6$

	Einheit	A (1996)		B (1998)		C (2000)		D (2000)		E (2001)		LAGA
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	x_1	x_2	
GV		3,4	0,3	3,3	0,2	3,5	0,6	1,7	0,4	1,0	0,2	3
TOC	Mass.-%	1,5	0,3	0,6	0,2	0,6	0,2	0,5	0,2	1,0	0,2	1
TIC		1,7	0,3	0,4	0,1	0,4	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2	-

5.1.2 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung wurde durch den Lehrstuhl und Prüfamts der TU München (Bauvorhaben A und B) bzw. durch das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (Freiflächenversuche 1, 2 und 3) bestimmt. Die Abb. 14 gibt beispielhaft die Summensieblinien der Einbau- und Rückbauproben des Freiflächenversuchs 1 wieder.

Die Sieblinien aller Schlackeproben waren generell durch einen gleichmäßigen Verlauf geprägt. Sand und Kies stellen die Hauptbestandteile dar und liegen zu ungefähr gleichen Teilen vor. Der

Schlämmkornanteil ist mit ca. 1 bis 1,5 Mass.-% gering. Korndurchmesser größer 8 mm traten kaum in Erscheinung. Gemäß des Feinkornanteils (Fraktion < 0,063 mm) von ca. 5 Mass.-% ist die Schlacke als frostsicheres Material einzustufen.

Anhand der Klassifikation gem. DIN 18 196 [52] ergeben sich aus der Körnungslinie die in Tab. 4 aufgelisteten Ungleichförmigkeits- (Maß für die Steilheit der Körnungslinie) und Krümmungszahlen (Verlauf der Körnungslinie). Entsprechend dieser Kennzahlen ist die Textur sämtlicher Schlackekörper als sandiger bis stark sandiger, schwach schluffiger Kies der Bodengruppe GW (weitgestufter Kies) bzw. GU (Kies mit geringem Feinkornanteil) zu bezeichnen.

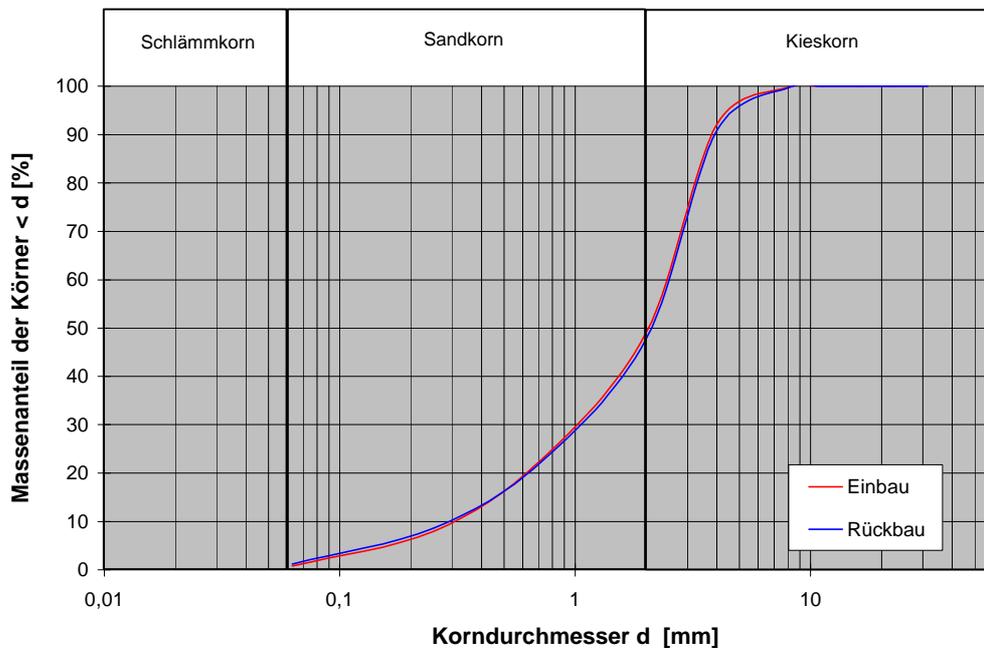


Abb. 14: Summensieblinien der MV-Schlacken aus der Einbau- und Rückbauphase: Freiflächenversuch 1

Tab. 4: Aus den Körnungsanalysen abgeleitete Krümmungs- und Ungleichförmigkeitszahlen

	Ungleichförmigkeitszahl U	Krümmungszahl C
Bauvorhaben A	20,0	1,4 - 1,7
Bauvorhaben B	13,5	1,3 - 1,4
Freiflächenversuch 1 Einbau/Rückbau	8,0	1,4
Freiflächenversuch 2 Einbau	6,7	1,4
Rammkern 1	9,6	1,1
Rammkern 2	9,2	1,2
Freiflächenversuch 3 Einbau	6,2	1,4
Rammkern 1	11,0	1,2
Rammkern 2	9,2	1,2

5.1.3 Elementgehalte

Die Schwermetalluntersuchungen erfolgten gemäß DIN 38 414 Teil 7 (DEV S7) [53]. Analysiert wurden die Konzentrationen der Elemente Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink. Daneben wurden der Glühverlust, die Kornporosität, die Roh- und Reindichte sowie die spezifische Oberfläche der Schlackeproben ermittelt. Die Ergebnisse der untersuchten Bauvorhaben und der Freiflächenversuche werden im Folgenden vorgestellt.

Die die Schlackeproben aus den Bauvorhaben und Freiflächenversuchen charakterisierenden physikalisch-chemischen Parameter und die Schwermetallgehalte sind in den Tab. 5 bis Tab. 7 anhand von Mittelwerten und Standardabweichungen den Anhaltswerten der LAGA-Merkblätter [39, 42] gegenübergestellt.

Es zeigt sich, dass die mittleren Feststoffgehalte aller Untersuchungsobjekte deutlich unterhalb der LAGA-Anhaltswerte liegen. Der Anhaltswert für Cadmium (20 mg/kg) wurde in Einzelproben des Freiflächenversuchs 1 punktuell überschritten; das Gleiche gilt für den Glühverlust von 3 %.

Aufgrund der zum Teil beträchtlichen Schwankungen der Analysenergebnisse der Einzelproben innerhalb der einzelnen Bauvorhaben und Freiflächenuntersuchungen (vgl. Tab. 5 bis Tab. 7) konnten keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit von der Standzeit oder der Exposition gegenüber atmosphärischen Einflüssen abgeleitet werden. Die räumliche Variabilität der Schwermetallgehalte innerhalb der einzelnen Schlackekörper scheint zu groß, um anhand der Königswasser-aufschlüsse eine eventuelle von den Einbaubedingungen abhängige Abreicherung einzelner Elemente feststellen zu können.

Tab. 5: Physikalisch-chemische Daten und Schwermetallgehalte der Schlacken aus den Bauvorhaben sowie Anhaltswerte nach LAGA [39, 42]; TM: Trockenmasse, GV: Glühverlust, ε : Kornporosität, ρ_{rein} : Reindichte, ρ_{roh} : Rohdichte, x_i : Einzelwert, \bar{x} : Mittelwert, σ : Standardabweichung, Probenzahl $n = 6$; n.b.: nicht bestimmt

	Einheit	Bauvorhaben A		Bauvorhaben B		Bauvorhaben C		Bauvorhaben D		Bauvorhaben E		LAGA
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	x_1	x_2	
TM		85,7	3,1	84,9	1,4	85,1	1,0	90,2	2,3	88,8	96,7	—
GV	%	3,4	0,3	3,3	0,2	3,5	0,6	1,7	0,4	1,0	0,2	3
e		n.b.	n.b.	24,2	1,7	26,9	6,4	19,0	4,5	18,2	19,7	—
Γ_{rein}	g/cm ³	n.b.	n.b.	2,9	0,04	2,9	0,03	2,9	0,1	2,9	2,9	—
Γ_{roh}		n.b.	n.b.	2,2	0,1	2,2	0,2	2,4	0,1	2,4	2,4	—
spez. Oberfläche	m ² /g	n.b.	n.b.	9,4	0,9	8,6	1,0	5,1	0,9	8,1	1,7	—
Arsen	mg/kg	n.b.	n.b.	12,3	1,3	10,3	1,7	10,2	1,3	7,7	5,7	—
Blei		1.145	220	1.277	252	1.099	388	891	70	891	498	6.000
Cadmium		4,4	1,5	6,7	1,0	8,1	4,3	5,1	0,7	2,6	1,3	20
Chrom_{ges}		n.b.	n.b.	305	29	276	65	254	12	203	237	2.000
Kupfer		2.704	596	3.494	470	2.931	789	2.725	285	1.658	1.438	7.000
Nickel		102	36	281	74	222	26	199	11	97	86	500
Quecksilber		0,04	0,01	0,03	0,01	0,04	0,02	0,02	0,01	< 0,004	< 0,004	—
Zink		2.513	565	3.711	472	3.461	853	2.802	437	2.683	2.048	10.000

Tab. 6: Physikalisch-chemische Daten und Schwermetallgehalte der Schlacken aus dem Freiflächenversuch 1 (Ein- und Rückbauphase) und Werte nach LAGA [39, 42]; TM: Trockenmasse, GV: Glühverlust, ε : Porosität, ρ_{rein} : Reindichte, ρ_{roh} : Rohdichte, \bar{x} : Mittelwert, σ : Standardabweichung; Probenzahlen: n_{Einbau} : 6, $n_{\text{Rückbau}}$: 18

	Einheit	\bar{x}'_{Einbau}	S_{Einbau}	$\bar{x}'_{\text{Rückbau}}$	$S_{\text{Rückbau}}$	LAGA
TM		88,1	0,5	82,7	1,3	—
GV		4,5	0,3	4,0	0,4	3
s	%	0,7	0,04	0,7	0,03	1
TIC		0,5	0,1	0,5	0,1	—
e		29,3	6,6	34,1	2,1	—
ρ_{rein}	g/cm ³	2,7	0,2	2,8	0,03	—
ρ_{roh}		1,9	0,04	1,8	0,1	—
spez. Oberfläche	m ² /g	14,0	2,7	13,3	1,4	—
Arsen	mg/kg	12,7	1,0	10,7	1,2	—
Blei		1.051	114	1.524	209	6.000
Cadmium		11,1	4,6	12,6	7,1	20
Chrom_{ges}		289	23	261	34	2.000
Kupfer		2.972	363	3.532	400	7.000
Nickel		225	27	227	37	500
Quecksilber		0,02	0,01	0,05	0,01	—
Zink		4.324	244	4.266	334	10.000

Tab. 7: Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen der Schlackeproben der Freiflächenversuche 2 und 3 (Index 2, 3) in Einbau- und Rammkernproben, Vergleich mit den Werten nach LAGA [39, 42]; TM: Trockenmasse, GV: Glühverlust, ε : Porosität, ρ_{rein} : Reindichte, ρ_{roh} : Rohdichte, \bar{x} : Mittelwert, σ : Standardabweichung; Probenzahl $n = 3$; n.b.: nicht bestimmt

	Einheit	Einbauphase				Rammkern Februar 2002				Rammkern April 2002				LAGA
		\bar{x}'_2	σ_2	\bar{x}'_3	σ_3	\bar{x}'_2	σ_2	\bar{x}'_3	σ_3	\bar{x}'_2	σ_2	\bar{x}'_3	σ_3	
TM		84,7	0,6	84,6	0,4	83,2	1,1	84,8	0,6	84,2	0,6	83,4	0,7	—
GV		3,8	0,4	4,2	0,3	5,4	0,4	5,5	0,5	4,8	0,1	4,8	0,2	3
TOC	%	0,7	0,1	0,8	0,1	1,0	0,2	0,9	0,1	0,7	0,4	0,9	0,1	1
TIC		0,4	0,02	0,5	0,1	0,3	0,1	0,4	0,2	0,5	0,1	0,5	0,1	—
e		37,6	2,7	33,5	2,0	34,6	1,5	34,7	2,5	34,3	0,8	31,1	2,2	—
Γ_{rein}	g/cm ³	2,8	0,04	2,8	0,04	2,8	0,04	2,7	0,02	2,8	0,02	2,8	0,02	—
Γ_{roh}		1,7	0,1	1,9	0,1	1,8	0,04	1,8	0,1	1,8	0,03	1,9	0,1	—
spez. Oberfläche	m ² /g	7,2	0,9	7,3	1,0	11,1	0,5	11,7	1,4	9,6	1,4	9,2	1,4	—
Arsen	mg/kg	8,0	0,9	8,5	0,7	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	—
Blei		902	120	1.306	277	1.005	162	1.157	293	953	219	1.055	300	6.000
Cadmium		5,8	1,5	10,5	2,5	14,3	13,2	8,7	3,1	16,3	2,4	10,5	6,7	20
Chrom_{ges}		179	21	171	10	230	12	235	13	213	20	238	24	2.000
Kupfer		2.552	367	3.139	821	2.806	217	2.843	513	2.914	722	2.679	567	7.000
Nickel		131	20	132	22	175	27	156	7	159	12	186	43	500
Quecksilber		< 0,004	0,008	< 0,004	0,003	0,013	0,002	0,046	0,055	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	—
Zink		3.252	641	3.904	426	3.864	246	3.898	223	4.646	1.860	3.632	496	10.000

5.2 Eluatuntersuchungen

Die Untersuchungen der Feststoffeluatate aus den Bauvorhaben und Freiflächenversuchen sowie der angefallenen Sickerwässer der Freiflächenversuche auf die Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Gesamttrockenrückstand und Schwermetallkonzentrationen erfolgte nach folgenden Methoden:

- pH-Wert nach DIN 38 404 Teil 5 [54],
- elektrische Leitfähigkeit nach DIN 38 404 Teil 8 [55],
- Gesamttrockenrückstand (Abdampfrückstand) nach DIN 38 409 Teil 1 [56],
- Schwermetallkonzentration (Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink) mittels ICP-MS bzw. AAS,
- Chlorid- und Sulfatkonzentration mittels Ionenchromatographie nach DIN EN ISO 10 304-1 [57],
- Redoxpotenzial nach DIN 38 404 Teil 6 [58] bei den untersuchten Sickerwässern der Freiflächenversuche 2 und 3.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen präsentiert und miteinander verglichen (Tab. 8 bis Tab. 11).

5.2.1 pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit

Die Eluate der Feststoffproben aus den Bauvorhaben und Freiflächenversuchen zeigen übereinstimmend mit dem Pufferbereich des Portlandzements pH-Werte zwischen 10,7 und 12 (Tab. 8 bis Tab. 10).

Die elektrischen Leitfähigkeiten und Abdampfrückstände (Gesamttrockenrückstände) der Eluate aus den beprobten Bauvorhaben sind im Vergleich zur Feinfraktion nicht gealterter Schlacke (vgl. Tab. 11) gering. Dies ist konsistent mit den ebenfalls geringen Chlorid- und Sulfatkonzentrationen (Tab. 8 bis Tab. 10).

Die Unterschiede in den Eluatleitfähigkeiten, -salzkonzentrationen und pH-Werten der einzelnen Bauvorhaben zeigen eine Abhängigkeit von der Standzeit der Schlackekörper bzw. der Lagerungsdauer der eingebauten Schlacken: die höchsten Leitfähigkeitswerte wurden bei den Bauvorhaben C und D (Standzeit wenige Tage) gemessen. Die Schlacke des Bauvorhabens E, die ebenfalls eine Standzeit von nur wenigen Tagen aufwies, war vor dem Einbau etwa ein Jahr gelagert worden. Offensichtlich sinkt die Eluierbarkeit in der Schlacke enthaltener Salze sowohl mit zunehmender Standzeit als auch mit erhöhter Lagerungsdauer. Mögliche Ursachen liegen in der Verarmung auslaugbarer Bestandteile und/oder einem alterungsbedingten Aufbau neuer Mineralphasen mit geringerer Löslichkeit.

Die Eluatuntersuchungen an den Feststoffproben der Freiflächenversuche zeigen im Vergleich zu den Bauvorhaben höhere Chlorid- und Sulfatkonzentrationen und entsprechend deutlich höhere elektrische Leitfähigkeiten und Abdampfrückstände. Die aus den Bauvorhaben gefolgerte zeitabhängige Entwicklung der Abdampfrückstände, Leitfähigkeiten und Anionenkonzentrationen wird durch die Freiflächenversuche bestätigt.

5.2.2 Schwermetallkonzentrationen

In den Tab. 8 bis Tab. 10 sind die in den Eluaten der Schlacken aus den Bauvorhaben und den Freiflächenversuchen ermittelten Schwermetallkonzentrationen in Form von Mittelwerten und Standardabweichungen zusammengestellt. Die Aufstellung verdeutlicht, dass die Zuordnungswerte der LAGA-Merkblätter [42] mit Ausnahme einzelner Überschreitungen bei Blei eingehalten werden.

Wie bei den Feststoffgehalten treten auch in den Eluatkonzentrationen z.T. beträchtliche Schwankungen auf. Diese reflektieren die variierende Belastung der zur Elution herangezogenen Teilproben. Ein Trend zur Abhängigkeit der Eluierbarkeit von der Standzeit kann im Vergleich der Bauvorhaben A bis D für die Elemente Blei und Zink abgeleitet werden. Wie bei den Begleitaneionen Chlorid und Sulfat scheint im Fall der Schwermetallkonzentrationen vorwiegend die Lagerungsdauer auslaugmindernd zu wirken. So zeigen die Proben des Bauvorhabens E (Lagerungsdauer 1 Jahr) gegenüber den Maßnahmen A bis D deutlich geringere Blei- und Zinkkonzentrationen im Eluat. Eventuell begünstigt die Alterung im Schlackebunker des MHKW Burgkirchen vor allem die Überführung der Schwermetalle in eine weniger lösliche Bindungsform (z.B. in Form von Carbonaten).

Die Ergebnisse der Freiflächenversuche unterstützen den Befund standzeitabhängig rückläufiger Schwermetall-Eluatkonzentrationen in den untersuchten Bauvorhaben. Ein Rückgang der Eluatkonzentrationen zwischen Ein- und Rückbauphase von Freiflächenversuch 1 ist bei den Elementen Blei, Cadmium und Kupfer festzustellen (Tab. 9); bei den Freiflächenversuchen 2 und 3 werden zwischen Einbau und Rammkernbeprobung abnehmende Eluatkonzentrationen bei Blei, Chrom, Kupfer und Zink (Tab. 10) festgestellt. Ein Unterschied der Eluatwerte als Folge der experimentellen Randbedingungen (künstliche Beregnung vs. natürlicher Niederschlag) kann nicht abgeleitet werden, da sich bereits die Eluatwerte der beim Einbau entnommenen Proben deutlich unterscheiden.

Um festzustellen, inwieweit sich aus der Lagerung bzw. Standzeit Veränderungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften der MV-Schlacke in Bezug auf die Roh-Schlacke ergeben, wurde auf die Ergebnisse der vierteljährlichen Fremdüberwachung des MHKW Burgkirchen zurückgegriffen (Tab. 11).

Der Vergleich der Schwermetallgehalte im Feststoff zeigt übereinstimmende Werte bei der Feinfraktion. Dies bestätigt, dass bei Beurteilung des Stoffhaushalts anhand der Gesamtgehalte kein Trend in Abhängigkeit von Lagerungsdauer oder Standzeit der Schlacke abzuleiten ist. Hinsichtlich der Eluatwerte sind die elektrischen Leitfähigkeiten der Schlackeproben aus den Freiflächenversuchen mit denjenigen der Feinfraktion der vierteljährlichen Fremdüberwachung (Tab. 11) vergleichbar. Die Eluate aus den Schlacken der Bauvorhaben A, B und E zeigen hingegen elektrische Leitfähigkeiten, die denen der Grobfraktion ähneln. Die Schwermetallkonzentrationen in den Eluaten der untersuchten Schlackeproben stimmen größenordnungsmäßig mit denen der Fremdüberwachung überein.

Tab. 8: Schwermetallkonzentrationen (Eluate) der untersuchten Bauvorhaben A bis E im Vergleich mit den Zuordnungswerten nach LAGA [39, 42]; AR: Abdampfdruckstand, LF: elektrische Leitfähigkeit, x_i : Einzelwert, x' : Mittelwert, σ : Standardabweichung; Probenzahl $n \neq 6$

	Einheit	Bauvorhaben A		Bauvorhaben B		Bauvorhaben C		Bauvorhaben D		Bauvorhaben E		LAGA
		x'	σ	x'	σ	x'	σ	x'	σ	x_1	x_2	
pH-Wert	—	10,7	1,0	11,1	0,1	11,7	0,3	11,4	0,1	11,1	11,7	7 - 13
LF	$\mu\text{S/cm}$	727	244	920	50	2.322	196	2.097	426	709	1.296	6.000
AR	mg/l	258	145	363	93	966	83	649	168	342	396	—
Blei	$\mu\text{g/l}$	27,9	2,3	22,0	2,2	70,4	8,1	48,0	6,7	1,2	5,9	50
Cadmium		3,1	0,7	1,5	0,1	2,2	0,1	4,0	0,3	< 0,2	< 0,2	5
Kupfer		27,4	11,9	11,6	1,5	33,3	6,7	23,0	2,3	9,1	7,5	300
Nickel		15,2	2,3	1,0	1,1	6,2	1,7	10,0	2,6	< 2,0	2,3	40
Quecksilber		< 0,05	—	< 0,05	—	< 0,05	—	< 0,05	—	—	—	1
Zink		14,0	7,4	49,1	4,2	57,8	8,0	53,0	8,8	9,5	33,6	300
Chlorid	mg/l	74,0	42,4	43,2	24,1	272,0	23,7	175,9	33,5	46,5	71,7	250
Sulfat		42,6	38,7	34,7	8,5	52,9	6,0	59,0	22,0	51,8	12,3	600

Tab. 9: Eluate der Schlacken aus Freiflächenversuch 1: Vergleich der Proben aus Ein- und Rückbau mit den Zuordnungswerten nach LAGA [39, 42]; AR: Abdampfrückstand, LF: elektrische Leitfähigkeit, \bar{x} : Mittelwert, σ : Standardabweichung, Probenzahl n_{Einbau} : 6, $n_{\text{Rückbau}}$: 18

	Einheit	\bar{x}'_{Einbau}	σ'_{Einbau}	\bar{x}'_{Rückbau}	σ'_{Rückbau}	LAGA
pH	-	12,0	0,1	11,5	0,1	7 – 13
LF	$\mu\text{S/cm}$	3.303	107	1.990	636	6.000
AR	mg/l	1.475	212	983	484	—
Blei	$\mu\text{g/l}$	47,0	5,8	10,0	4,6	50
Cadmium		2,0	1,1	0,3	0,03	5
Kupfer		40,0	3,0	22,0	5,6	300
Nickel		1,0	1,0	2,0	1,1	40
Quecksilber		< 0,05	—	< 0,05	—	1
Zink		37,0	1,8	41,0	7,3	300
Chlorid		mg/l	475,6	43,2	248,4	141,0
Sulfat	100,5		21,2	80,8	25,5	600

Tab. 10: Eluatuntersuchungen der Schlackeproben aus den Freiflächenversuchen 2 und 3; Vergleich mit den Zuordnungswerten nach LAGA [39, 42]; AR: Abdampfrückstand, LF: elektrische Leitfähigkeit, x': Mittelwert, σ : Standardabweichung, n.b.: nicht bestimmt

	Einheit	Einbau				Rammkern Februar 2002				Rammkern April 2002				LAGA
		x' ₂	σ_2	x' ₃	σ_3	x' ₂	σ_2	x' ₃	σ_3	x' ₂	σ_2	x' ₃	σ_3	
pH	—	11,9	0,02	11,9	0,01	11,6	0,1	11,6	0,1	11,6	0,1	11,6	0,04	7 - 13
LF	$\mu\text{S/cm}$	3.313	85	3.200	63	1.770	220	2.226	177	1.935	252	2.014	509	6.000
AR	mg/l	1.309	237	1.172	29	767	116	981	75	815	115	853	264	—
Arsen	$\mu\text{g/l}$	2,3	0,3	2,7	0,6	1,9	0,3	2,5	0,1	2,4	0,3	2,2	0,1	—
Blei		27,6	22,3	35,7	3,1	9,4	3,1	9,1	2,8	13,8	5,2	14,7	3,3	50
Cadmium		0,3	0,03	0,3	0,02	0,2	0,01	0,3	0,02	0,4	0,02	0,4	0,04	5
Chrom_{ges}		35,5	2,8	32,3	2,6	29,3	7,5	35,9	3,7	22,1	4,1	21,7	3,5	200
Kupfer		37,8	8,2	45,9	3,9	26,2	3,8	37,4	3,5	28,7	5,4	27,2	7,6	300
Nickel		3,8	0,7	4,1	0,3	< 1,0	—	< s1,0	—	< 2,0	—	< 2,0	—	40
Quecksilber		< 0,05	—	< 0,05	-	n.b.	—	n.b.	—	n.b.	—	n.b.	—	1
Zink		42,8	16,7	53,8	5,2	33,9	11,1	30,5	4,2	34,7	18,4	31,4	5,2	300
Chlorid	mg/l	356,4	8,3	360,9	8,2	215,0	39,0	308,0	8,0	237,0	59,3	245,0	122,0	250
Sulfat		34,0	8,8	37,8	6,3	50,1	6,7	54,4	15,8	38,8	2,6	34,4	4,1	600

Tab. 11: Mittelwerte aus den Feststoff- und Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke des MHKW Burgkirchen (vierteljährliche Fremdüberwachung); GV: Glühverlust, TOC: gesamter organischer Kohlenstoff, EOX: extrahierbare organisch gebundene Halogene, LF: elektrische Leitfähigkeit, DOC: gelöster organischer Kohlenstoff

		Feststoff				Eluat	
		Feinfraktion (0 – 6 mm)	Grobfraktion (6 – 40 mm)			Feinfraktion (0 – 6 mm)	Grobfraktion (6 – 40 mm)
	Einheit				Einheit		
GV	%	3,4	0,7	pH	-	11,5	10,7
TOC		0,5	0,1	LF	µS/cm	2.629	847
EOX		mg/kg	1,1	< 1,0	DOC	mg/l	10,3
Arsen	mg/kg	13,4	7,7	Arsen	µg/l	< 5,0	< 5,0
Blei		1.567	767	Blei		< 5,0	5,2
Cadmium		6,9	1,5	Cadmium		< 5,0	< 1,0
Chrom		266	249	Chrom		78,0	17,0
Kupfer		3.936	2.447	Kupfer		41,0	8,5
Nickel		238	175	Nickel		1,5	6,3
Quecksilber		0,26	0,45	Quecksilber		0,80	< 0,50
Zink		4.238	2.153	Zink		62,0	47,0
				Chlorid	mg/l	443,5	113,5

5.3 Mineralogie

Die mineralogischen Untersuchungen umfassten die Charakterisierung der MV-Schlacke mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie und der Polarisationsmikroskopie (Phasenanalyse), der Stickstoffsorptionsanalyse und der Dichtebestimmung.

Röntgendiffraktometrie

Um die Haupt- und Nebenphasen der MV-Schlacke zu charakterisieren, wurden aus den gemahlten Proben der Bauvorhaben und der Freiflächenversuche flache Präparate hergestellt, die mit Hilfe eines Röntgendiffraktometers (D 5000, Fa. Bruker AXS) untersucht wurden. Zur Erhöhung der Auflösung der linienreichen Beugungsdiagramme wurden einige Proben vor dem Mahlen in unterschiedliche Kornfraktionen aufgetrennt. Dazu wurden Siebe mit folgenden Maschenweiten verwendet: 63 μm , 100 μm und 1.000 μm . Die qualitative Auswertung der Beugungsdiagramme erfolgte mit der Software „Diffracplus“ der Fa. Bruker AXS.

Da mit der Röntgendiffraktometrie die kristallinen Mineralphasen ermittelt werden, beziehen sich die erhaltenen Ergebnisse nicht auf die untersuchte Gesamtprobe, sondern auf den kristallinen Anteil der Reststoffe (ohne Aschen und Gläser). Dieser macht ca. 60 % der Gesamtmasse aus.

Polarisationsmikroskopie

Die optischen Untersuchungen wurden mit einem Polarisationsmikroskop an polierten Dünnschliffen der ungemahlten MV-Schlacke durchgeführt. Zusätzlich erfolgte eine röntgendiffraktometrische Kennzeichnung der Mineralhaupt- und -nebenphasen. Die verschiedenen Phasengruppen wie opake und lichtdurchlässige Bestandteile sowie Gläser und Poren wurden per Auszählverfahren ermittelt.

Stickstoffsorption

Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche wurde an getrocknetem und ungemahlenem Probenmaterial (Einwaage 5 - 10 g) mit einem Stickstoffsorptionsmessgerät (Fa. Micromeritics) gem. BET-Methode (DIN 66 131) [59] durchgeführt. Die Messung erfolgte nach mehrstündiger Entgasung unter Aufnahme der Adsorptions- und Desorptionsisotherme. Die gemessenen Isothermen entsprechen generell dem Typ IV. Dieser Isothermenverlauf deutet auf ein makro- und mesoporöses Material mit Poren $> 2 \text{ nm}$ hin.

Dichte und Porosität

Bei der Charakterisierung der Schlackedichten ist zwischen der Rein- (Korndichte) und Rohdichte als Materialkenngrößen und der Schüttdichte als Eigenschaft des eingebauten und verdichteten Schlackekörpers zu unterscheiden.

Bei der Rein- oder Korndichte handelt es sich um die Materialdichte ohne Poren und sonstige Hohlräume. Diese wurde mit Hilfe der Helium-Pyknometrie (Messgerät „AccuPyc“, Fa. Micromeritics) an den getrockneten und ungemahlten Proben ermittelt. Bei der Bestimmung der Rohdichte werden die Poren des Schlackekorns mit erfasst. Dadurch ist die ermittelte Reindichte immer größer als die Rohdichte. Die Rohdichte wurde mit dem Messgerät „GeoPyc“ (Fa. Micromeritics) bestimmt.

Aus der Differenz der beiden Dichten lässt sich die Porosität der Schlackekörner berechnen. Der Anteil an geschlossenen Poren kann aus der Differenz der Porosität des gemahlten und unge-

mahlenden Schlackematerials ermittelt werden. Es ergeben sich geschlossene Porositäten von wenigen Prozent (0,1 bis 1,5 Vol.-%), was bedeutet, dass die aus der Rein- und Rohdichte bestimmte Porosität als Gesamtporosität des Kornes angesehen werden kann [3].

5.3.1 Mineralphasenbestand

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus den mineralogischen Untersuchungen mit Hilfe des Röntgendiffraktometers erläutert und vergleichend diskutiert. Der in den Schlackeproben aus den Bauvorhaben und den Freiflächenversuchen identifizierte Mineralbestand ist in Tab. 12 zusammen mit den chemischen Formeln der einzelnen Minerale aufgeführt.

Die dominierenden Mineralgruppen sind Silikate, Carbonate und Oxide. Außerdem treten während der Schlackealterung aus Anhydrit sekundär gebildeter Gips und primär vorhandener Halit auf.

Weitere Hydratphasen wie Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_4, \text{SO}_4]_3 \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$) und α -Hydrocalumit ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) wurden in den Schlackeproben aus den Bauvorhaben A bis D bzw. E und den Freiflächenversuchen vorgefunden.

Tab. 12: Mineralbestand der in den Freiflächenversuchen 2 und 3 eingebauten Müllverbrennungsschlacken aus dem MHKW Burgkirchen

Mineralname	„chemische Formel“	Mineralname	chemische Formel
Silikate		Sulfate	
Quarz	SiO_2	Anhydrit	CaSO_4
Augit	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$	Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Melilith	$(\text{Ca}, \text{Na})_2[(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_7]$	Chloride	
Diopsid	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$	Halit	NaCl
Wollastonit	CaSiO_3	Sylvin	KCl
Oxide		Sulfide	
Magnesioferrit	MgFe_2O_4	Galenit (Bleiglanz)	PbS
Magnetit	Fe_3O_4	Carbonate	
Chromit	FeCr_2O_4	Calcit	CaCO_3
Hämatit	Fe_2O_3	Magnesit	MgCO_3
Perowskit	CaTiO_3		
Freikalk	CaO		

Die Vielfalt des Mineralphasenbestands kann auch anhand polarisationsmikroskopischer Untersuchungen visualisiert werden. In Abb. 15 ist exemplarisch die Dünnschliffansicht eines Schlackekorn wiedergegeben.



Abb. 15: Polarisationsmikroskopische Ansicht eines Schlacke-Dünnschliffs; 10-fache Vergrößerung

Um festzustellen, ob und inwieweit Veränderungen im Mineralphasenbestand im Rahmen experimenteller Untersuchungen belegbar sind, wurden zu unterschiedlichen Zeiten entnommene Proben der Freiflächenversuche 2 und 3 auf ihren Mineralphasenbestand hin untersucht. Die Ergebnisse sind in Tab. 13 in Form halbquantitativer Konzentrationen (Bestimmungsgrenze 2 - 5 Mass.-%) wiedergegeben.

Im Vergleich zu den Ergebnissen einer früheren Untersuchung [3] zeichnen sich die Proben der Freiflächenversuche 2 und 3 durch geringere Pyroxen- und Calcitgehalte und das vollkommene Fehlen von Ettringit aus (vgl. Tab. 14). In allen Proben lag die Portlanditkonzentration unter 3 Mass.-%. Eine zeitliche Entwicklung der Mineralphasenzusammensetzung ist schwach ausgeprägt. Die leichte Zunahme der Spinelle weist auf eine stattfindende Metallkorrosion hin; Hydrocalumit scheint unter den herrschenden Bedingungen nicht stabil zu sein und wird innerhalb des Versuchszeitraums zurückgebildet.

Tab. 13: Halbquantitativer Mineralgehalt der Schlackeproben der Freiflächenversuche 2 und 3 (V 2, V 3) in Mass.-% bezogen auf 60 % kristallinen Anteil im Vergleich zu früheren Messungen [3]; n.n.: nicht nachweisbar

	Einbau		Rammkern Februar 2002		Rammkern April 2002		Vergleichswerte [3]
	V 2	V 3	V 2	V 3	V 2	V 3	
Silikate							
Quarz	38,9	40,1	43,8	41,2	44,0	38,1	31,5
Melilithe	5,7	6,8	5,6	7,2	6,3	6,2	7,8
Pyroxene	2,7	3,0	3,1	3,4	3,2	3,4	9,4
Feldspäte	2,7	2,7	2,5	2,7	5,2	2,5	7,2
Spinelle	5,1	6,0	6,4	7,7	7,9	8,3	9,5
Carbonate							
Calcit	9,3	12,7	10,8	12,3	9,2	8,6	22,5
Oxide							
Spinelle	5,1	6,0	6,4	7,7	7,9	8,3	9,5
Hämatit	3,5	4,0	3,9	5,3	3,9	4,1	5,1
Perowskit	3,3	3,3	3,3	4,1	3,7	3,0	0,8
Rutil	6,6	3,7	3,3	2,5	4,1	4,0	3,7
Gips	4,9	4,9	4,5	4,5	4,5	4,4	2,5
Sulfate							
Gips	4,9	4,9	4,5	4,5	4,5	4,4	2,5
Anhydrit	4,1	4,8	3,3	3,3	2,4	2,9	5,6
Hydrocalumit	4,2	6,9	2,1	3,0	2,5	2,2	n.n.

Um festzustellen, ob die einzelnen Mineralphasen bevorzugt mit bestimmten Partikelgrößen assoziiert sind, erfolgten weitere Untersuchungen an vier Korngrößenfraktionen der MV-Schlacke (< 63 µm, 63 bis 100 µm, 100 bis 1.000 µm und > 1.000 µm). Die Ergebnisse sind in Tab. 14 zusammengefasst.

Es zeigt sich, dass Quarz und Spinelle bevorzugt in den Kornfraktionen > 100 µm vorliegen und zu den kleineren Kornfraktionen hin abnehmen. Calcit dagegen verhält sich umgekehrt und tritt bevorzugt in der Fraktion < 63 µm auf. Bei Hydrocalumit ist in der Ausgangsprobe ein deutlich erhöhter Gehalt in der feinen Kornfraktion zu erkennen. Die anhand der Originalproben festgestellte Hydrocalumit-Rückbildung während der Versuchsdauer erfolgt somit vornehmlich in der Kornfraktion < 63 µm.

Tab. 14: Gehalte ausgesuchter Mineralphasen in verschiedenen Kornfraktionen; n.n.: nicht nachweisbar

	Kornfraktionen			
	< 63 µm	63 - 100 µm	100 - 1.000 µm	> 1.000 µm
	Einbau (September 2001) [%]			
Quarz	10,6	12,3	44,2	38,0
Melilithe	4,1	3,7	3,4	3,7
Pyroxene	1,9	1,9	2,1	2,7
Spinelle	4,9	4,4	5,4	5,5
Calcit	19,4	17,1	11,8	7,4
Gips	3,7	7,4	6,1	2,5
Hydrocalumit	8,0	8,6	6,1	2,5
	Rammkern (Februar 2002) [%]			
Quarz	8,6	11,8	29,5	44,2
Melilithe	3,5	n.n.	2,5	3,9
Pyroxene	2,3	2,5	2,3	2,5
Spinelle	3,8	4,3	5,8	5,8
Calcit	27,0	25,8	10,2	7,4
Gips	n.n.	n.n.	3,7	2,5
Hydrocalumit	2,5	2,5	1,8	2,5
	Rammkern (April 2002) [%]			
Quarz	9,8	11,5	34,3	30,7
Melilithe	4,9	4,1	3,1	3,2
Pyroxene	2,9	3,1	2,5	3,7
Spinelle	3,8	4,8	4,7	5,8
Calcit	21,7	19,6	12,3	8,0
Gips	3,7	n.n.	2,5	2,5
Hydrocalumit	1,6	2,4	2,5	1,6

Sofern Mineralneu- und -umbildungen über die Lösungsphase und nicht durch ein direktes Aufwachsen von Kristallen an bestehenden Oberflächen erfolgen, ist damit zu rechnen, dass sich eine zeitliche Dynamik des Mineralphasenbestands vornehmlich in kleinen Kornfraktionen niederschlägt.

5.3.2 Spezifische Oberfläche

Die Entwicklung der spezifischen Oberfläche lässt Rückschlüsse auf den Ablauf von Mineralneu- und -umbildungen zu. Frühere am Josef-Vogl-Technikum durchgeführte Untersuchungen [3] zeigten, dass sich im Zuge der Alterung die spezifische Oberfläche der Schlacke von 2,7 auf etwa

17 m²/g erhöht. Daneben sind mechanisch bedingte Zunahmen der spezifischen Oberfläche als Folge einer Kornzertrümmerung bei Belastungsvorgängen zu erwarten.

Die Proben der untersuchten Bauvorhaben zeigen Maximalwerte der spezifischen Oberfläche von 9,4 m²/g (Bauvorhaben B; Standzeit 1-2 Jahre) und Minima von 5,1 m²/g (Bauvorhaben D; Standzeit wenige Tage). Damit wird die Oberflächenzunahme mit zunehmender Alterung bzw. Standzeit tendenziell bestätigt. Offen bleibt, ob die im Vergleich zu den früheren Untersuchungen insgesamt niedrigeren Maximalwerte der spezifischen Oberfläche auf noch nicht vollständig abgeschlossene, komplexe Alterungsprozesse hindeuten. Im Fall von Mineralneubildungen, die nur in einem intermediären Stadium der Schlackealterung stabil sind (vgl. Rückbildung Hydrocalumit), ist bei fortgesetzter Alterung alternativ auch ein Rückgang der spezifischen Oberfläche denkbar.

Diese Hypothese wird durch die insgesamt größere spezifische Oberfläche der Proben aus den Freiflächenversuchen von bis zu 16,1 m²/g gestützt, die bezüglich der Standzeiten von mehreren Monaten eine Position zwischen den Bauvorhaben A und B bzw. C und D einnehmen.

5.3.3 Dichte und Porosität

Die am Josef-Vogl-Technikum bestimmten Roh- und Reindichten (Korndichten) der Schlacken aus den untersuchten Bauvorhaben ergeben im Mittel Werte um 2,3 g/cm³ für die Rohdichte und 2,9 g/cm³ für die Reindichte. Die Reindichten der Schlacken der Freiflächenversuche entsprechen denen der Bauvorhaben (2,9 g/cm³), während die Rohdichten mit 1,9 g/cm³ geringer sind.

Die berechneten Kornporositäten für die Bauvorhaben A bis D liegen zwischen 18 und 26 Vol.-%. Die (frisch angelieferte) Schlacke für Baumaßnahme E weist mit etwa 36 Vol.-% eine deutlich höhere Porosität auf. Auch für die Freiflächenversuche ergeben sich Porositäten zwischen 29 und 38 Vol.-% (Tab. 15). Die geringeren Kornporositäten der Bauvorhaben im Vergleich zu den Freiflächenversuchen sprechen für eine stärkere Kornzertrümmerung im Zuge der Verdichtung infolge stärkerer mechanischer Belastung (schwerer Walzenzug vs. Rüttelplatte). Die Zusammenstellung verdeutlicht, dass sowohl bei den Rein- als auch bei den Rohdichten kaum einbaubedingte Unterschiede festzustellen sind, was die Ergebnisse der Korngrößenanalyse untermauert.

Tab. 15: Mittelwerte der Reindichten, Rohdichten sowie der daraus berechneten Kornporositäten der Schlacke aus den Freiflächenversuchen; ρ_{rein} : Reindichte, ρ_{roh} : Rohdichte, ϵ_{Korn} : Kornporosität, Probenzahl $n = 6$

	ρ_{rein} [g/cm ³]	ρ_{roh} [g/cm ³]	ϵ_{Korn} [%]
Freiflächenversuch 1			
Einbau	2,7	1,9	29,3
Rückbau	2,8	1,8	34,1
Freiflächenversuch 2			
Einbau	2,8	1,9	33,5
Rammkern 1	2,7	1,8	34,7
Rammkern 2	2,8	1,9	31,1
Freiflächenversuch 3			
Einbau	2,8	1,7	37,6
Rammkern 1	2,8	1,8	34,6
Rammkern 2	2,8	1,8	34,3

5.4 Bautechnische Eigenschaften

Um die Raumbeständigkeit der Schlackekörper der untersuchten Bauvorhaben und Freiflächenversuche zu kennzeichnen, wurden vom Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München Tragfähigkeitsuntersuchungen (dynamischer Plattendruckversuch) durchgeführt. Der Versuch beruht auf der Erzeugung einer Stoßbelastung mit Hilfe des leichten Fallgewichtes nach TP BF-StB Teil B 8.3. Der Durchmesser der Lastplatte betrug einheitlich 30 cm, was einer Reichweite des Impulses (Eindringtiefe der Stoßbelastung) von 25 bis 50 cm entspricht.

Bei dem Freiflächenversuch 1 wurden an drei Stellen dynamische Plattendruckversuche durchgeführt; bei den Freiflächenversuchen 2 und 3 wurden je drei zeitlich versetzte Untersuchungen vorgenommen. Hierdurch sollte eine eventuelle Zunahme der Raumbeständigkeit infolge der Standzeit bzw. durch Frost-Tau-Wechsel geprüft werden.

Die Werte der Verformungsmoduln (E_{vd}) der bei den Bauvorhaben und den Freiflächenversuchen 2 und 3 durchgeführten Plattendruckversuche sind in Tab. 16 eingetragen.

Tab. 16: Ergebnisse der dynamischen Plattendruckversuche

		Verformungsmodul E_{vd} [MN/m ²]					
Bauvorhaben	B	48,4					
	C	36,1					
	D	37					
Freiflächenversuch		Oktober 2001		Februar 2002		April 2002	
	2	45,5	46,1	85,2	-	83,12	87,43
	3	57,8	61,0	68,5	64,5	76,18	64,16

Die Verformungsmoduln E_{vd} der Freiflächenversuche 1 des ersten Beprobungstermins sind vergleichbar mit den Verformungsmoduln der untersuchten Bauvorhaben B bis D, die Werte zwischen 36 und 48 MN/m² aufweisen. Dies zeigt, dass die Eigenschaften der Schlackekörper in den Technikumversuchen den praxisüblichen Einbaubedingungen weitgehend entsprechen.

Für gemischtkörnige Böden mit einem Feinkornanteil von maximal 15 % lässt sich näherungsweise der Verdichtungsgrad D_{pr} aus dem Verformungsmodul ableiten [60]. Zu Untersuchungsbeginn wurde für den Schlackekörper des Freiflächenversuchs 2 ein Verdichtungsgrad von 97 % und für den Schlackekörper des Freiflächenversuchs 3 ein Verdichtungsgrad von > 100 % ermittelt. Entsprechend der höheren E_{vd} -Werte zum zweiten und dritten Untersuchungstermin wurden im Verlauf der Versuche in beiden Freiflächenversuchen Verdichtungsgrade von > 100 % erreicht. Hieraus kann auf eine Zunahme der mechanischen Stabilität von Schlackekörpern mit der Standzeit geschlossen werden. Dies ist konsistent mit den unterschiedliche Standzeiten der Schlackekörpern der Bauvorhaben.

Bezüglich der genannten Kennwerte sind die bodenmechanischen Eigenschaften der MV-Schlacke vergleichbar den natürlicher Materialien, die im Erd- und Straßenbau verwendet werden.

5.5 Wasser-, Stoff- und Wärmehaushalt von Schlackekörpern

5.5.1 Freiflächenversuch 1

Der Schlackekörper wurde während der ersten Beregnungsphase für eine Dauer von 16 Tagen täglich in einem Abstand von 4 Stunden für 1 bzw. 2 Minuten bewässert. Die Beregnungsintensität entsprach 137 l/d. In der ersten Beregnungsphase wurden kumuliert 2,199 m³ Wasser aufgegeben; bezogen auf die Oberfläche des Schlackekörpers entspricht dies einer Niederschlagshöhe von 489 mm. Damit stimmen die gewählten Beregnungsdaten in etwa mit der halbjährlichen Niederschlagsmenge im Raum Augsburg [61] überein.

Bereits am dritten Tag nach Beregnungsstart fiel Sickerwasser an. Die Sickerwassermenge stieg von anfangs 31 l/d innerhalb einer Woche auf ca. 100 l/d und erreichte ein Maximum von ca. 130 l/d. Nach dem ersten Beregnungsstopp reduzierte sich die Sickerwassermenge auf 10 l/d und nahm über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen kontinuierlich weiter ab. Der kumulierte Sickerwasseranfall betrug 1,512 m³. Die Differenz zwischen Beregnungs- und Sickerwasservolumen ergibt eine Wasserspeicherung im Schlackekörper von 687 l. Verdunstungsverluste wurden in erster Näherung aufgrund des abgedeckten Feldes vernachlässigt. Im Schlackekörper kam es somit zu einer Wasserzunahme von 1.273 auf 1.960 l, was einer Wassergehaltserhöhung von 13,6 auf 20,9 Mass.-% entspricht. Dieser Anstieg steht im Einklang mit den Messdaten der TDR-Sonden (vgl. Abb. 16). Im Rahmen der zweiten Beregnungsperiode wurden nach einer Flussunterbrechung von 50 Tagen 1,903 m³ Wasser aufgegeben. Bereits am zweiten Tag nach Beregnungsstart fiel Sickerwasser an. Diese Beobachtung ist konsistent mit dem höheren Ausgangswassergehalt zum Beregnungsstart und der entsprechend geringeren Saugspannung im Haufwerk. Der bereits zu Beginn hohe Wasserdurchsatz von ca. 90 l/d steigerte sich innerhalb einer Woche nach Beregnungsstart auf ca. 130 l/d und blieb nahezu unverändert bis ca. 1 Tag nach Abschalten der Beregnung. Die Sickerwassermenge reduzierte sich jetzt deutlich auf Werte um 10 l/d und nahm kontinuierlich über einen Zeitraum von ca. 2 Wochen auf Werte um 2 l/d ab. Der kumulative Sickerwasseranfall betrug 1,756 m³. Aus der Differenz von Beregnungseintrag und Sickerwasseraustrag resultiert eine Wasserrückhaltung von 267 l. Damit erhöhte sich die gespeicherte Wassermenge von 1.960 auf 2.227 l, was einer Wassergehaltszunahme von 20,9 auf 23,8 Mass.-% im Schlackehaufwerk entspricht.

Feststoff/Wasser/Luft-Verteilung vor und nach den Beregnungsperioden

Mit der Kenntnis der „feuchten“ Einbaudichte, des Wassergehalts und der Rohdichte lassen sich die Massen und Volumina im Dreiphasensystem Schlackekörper vor und nach der Beregnung wie folgt darstellen (vgl. Tab. 17).

Unter Zugrundelegung der analysierten Reindichte von ca. 2,8 Mg/m³ und der bekannten Trockenmasse von 9,363 Mg resultiert ein Festsubstanzvolumen von 3,344 m³. Subtrahiert man von dem Gesamthaufwerksvolumen (6,75 m³) das Festsubstanzvolumen, ergibt sich das maximal vorhandene Porenvolumen (Summe von Inter- und Intraaggregatporosität) zu 3,406 m³; dies entspricht 50,5 Vol.-%. Der theoretische Sättigungswassergehalt beträgt 36,4 Mass.-%. Dieser wurde im Rahmen des Experiments aufgrund der gewählten Randbedingungen („oberer“ Rand: diskontinuierliche Beregnung mit moderaten Infiltrationsraten, „unterer“ Rand: freies Dränen) nicht erreicht, d.h. während des Versuchs lag ein Dreiphasensystem mit variierenden Luft- und Wassergehalten vor.

Tab. 17: Mengenverhältnisse Feststoff-/Wasser-/Luftverhältnisse im „Schlackehaufwerk“ vor und nach den beiden Berechnungsperioden, m_W : Masse Wasser, m_d : Masse Schlacke (trocken), m_s : Masse Schlacke (feucht), V_{ges} : Volumen (gesamt), V_W : Volumen Wasser, V_d : Volumen Schlacke, V_L : Volumen Luftporen, w : Wasseranteil bez. auf m_d , n_W : Wasseranteil bez. auf V_{ges} , n_s : Schlackeanteil bez. auf V_{ges} , n_L : Luftporenanteil bez. auf V_{ges}

Parameter	Einheit	vor Berechnung	nach Berechnung
m_W	Mg	1,273	1,957
m_d		9,363	9,363
m_s		10,636	10,960
V_{ges}	m ³	6,750	6,750
V_W		1,273	1,957
V_d		3,344	3,344
V_L		2,133	1,449
w	Mass.-%	13,6	20,9
n_W	Vol.-%	18,9	29,0
n_s		49,5	49,5
n_L		31,6	21,5

Zeit- und tiefenabhängige Wassergehaltsverteilung

Die Tagesmittelwerte der stündlich erfassten Messdaten der Feuchtesensoren sind in Abb. 16 dargestellt. Um den Einfluss der Beregnung auf die Messwerte zu verdeutlichen, sind in diesem Diagramm auch die Werte 60 Tage vor Beregnungsbeginn mit eingezeichnet. Die Wassergehalte schwankten vor Beginn der Beregnung nur gering in einem Bereich von 14 bis 16,5 Mass.-%. Infolge der Beregnung war in allen Messebenen ein Anstieg der Wassergehalte zu beobachten. Auffällig ist, dass die Wassergehaltszunahme insbesondere bei der zweiten Beregnungsperiode nahezu zeitgleich erfolgt. Dies weist auf sehr schnelle Wasserflüsse innerhalb des Schlackekörpers hin. Während der Flussunterbrechung erfolgt eine Dränung des Haufwerks, die zu rückläufigen Wassergehalten führt (Redistributionsphase).

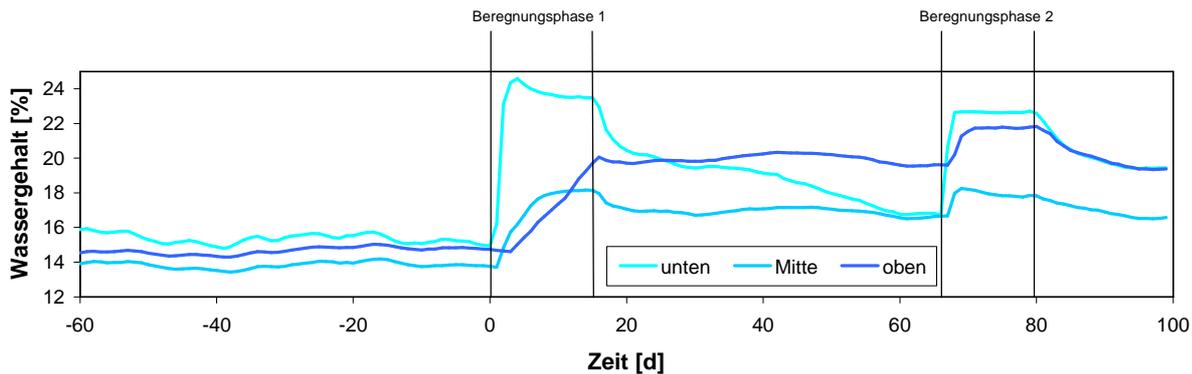


Abb. 16: Wassergehaltsverlauf im Schlackekörper Freiflächenversuch 1

Temperaturverlauf

Die Auswertung über die gesamte Messzeit von Anfang Mai 2000 bis Ende Oktober 2000 ergab tages- und jahreszeitabhängig eine Schwankungsbreite der Lufttemperatur von 5 °C bis 35 °C, wobei die Unterschiede zwischen den Tag- und Nachtwerten bei 10 bis 15 °C lagen. Die Luftfeuchtigkeit schwankte in einem Bereich von 50 bis 95 %. Die erfasste Globalstrahlung lieferte Werte bis zu 25 W/m². Die Temperaturdiagramme (Abb. 17) geben die Tagesmittelwerte des Versuchszeitraums wieder. Die Temperaturen im Schlackekörper lagen im Bereich von 10 °C und 30 °C. Die Ganglinien der randnahen Messpunkte (Abb. 17a) weisen im Vergleich zum Zentralbereich (Abb. 17b) eine größere Amplitude auf. Die Temperaturverteilung im Schlackehaufwerk wurde nicht durch Wärmeentwicklung infolge ablaufender exothermer Reaktionen verursacht, sondern war das Ergebnis von Wärmetransportprozessen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Dies bekräftigten die Temperaturmaxima {vgl. Abb. 17c} Mitte Juni (~ bei 25 °C), und Mitte August (~ bei 36 °C) sowie der tendenzielle Temperaturrückgang von Mitte August bis Ende Oktober.

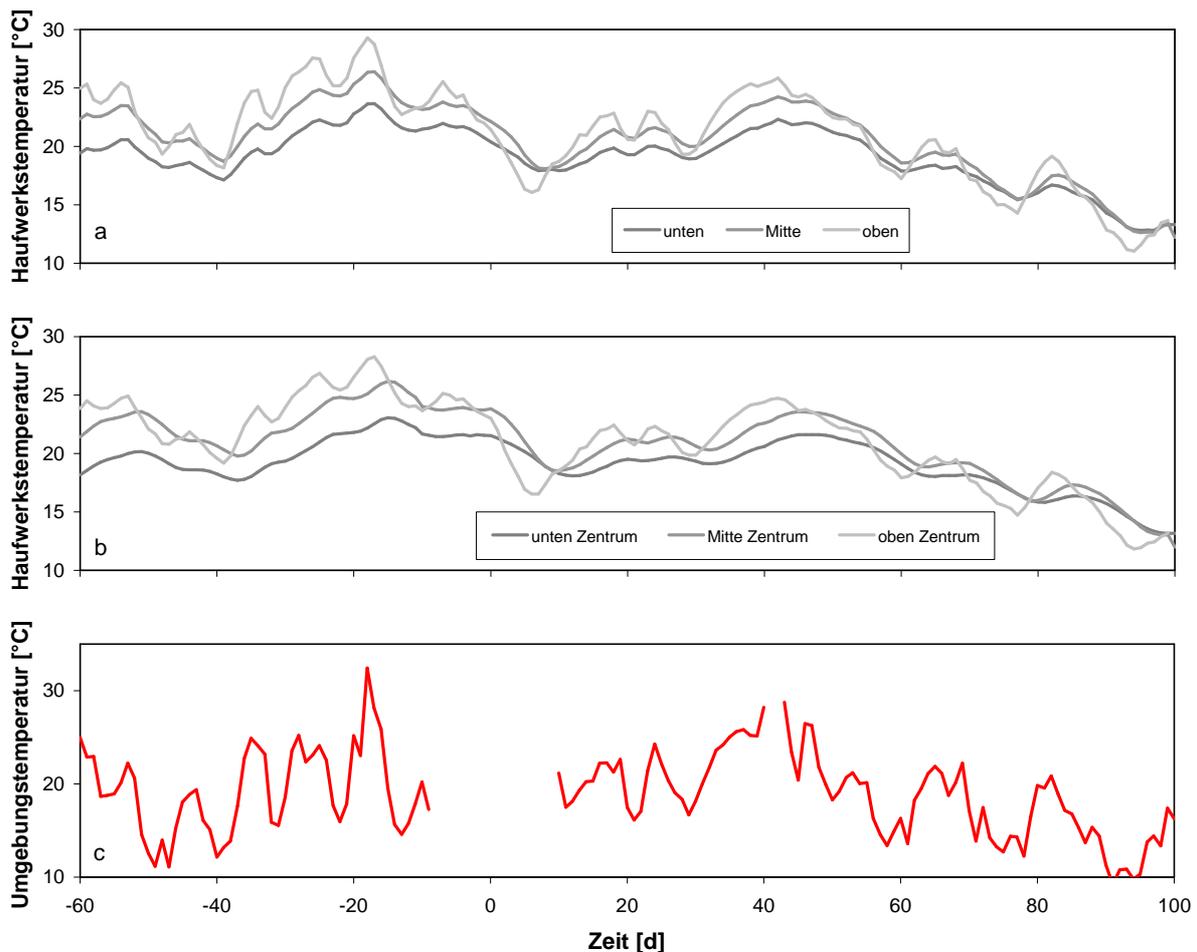


Abb. 17: Temperaturverlauf im Haufwerk verglichen mit der Umgebungstemperatur; Sensoren im a) Randbereich, b) Zentrum des Haufwerks, c) Umgebungstemperatur

5.5.2 Freiflächenversuche 2 und 3

Feststoff/Wasser/Luft-Verteilung

Unter Zugrundelegung der ermittelten Reindichte von ca. $2,8 \text{ Mg/m}^3$ und der bekannten Trockenmasse von $7,0 \text{ Mg}$ (offenes) bzw. $6,4 \text{ Mg}$ (abgedecktes) ergeben sich Festsubstanzvolumina von $2,5 \text{ m}^3$ (offenes) und $2,3 \text{ m}^3$ (abgedecktes Feld). Subtrahiert man von den Gesamtvolumina der Schlackehaufwerke ($5,54$ bzw. $5,04 \text{ m}^3$) die Festsubstanzvolumina, erhält man die maximal vorhandenen Porenvolumina (Summe von Inter- und Intraaggregatporosität) zu $3,04 \text{ m}^3$ (54,9 Vol.-% des offenen Feldes) bzw. $2,74 \text{ m}^3$ (55,4 Vol.-% des abgedeckten Feldes). Beide Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie bei dem Feldversuch 1 (50,5 Vol.-%).

Legt man für die weitere Betrachtung eine Wasserverdunstung von $32,5 \text{ mm}$ aus dem offenen Feld zugrunde, entspricht dies einer Evaporation von rd. 8 % bezogen auf die gesamte Niederschlagsmenge. Dieser Wert liegt etwa um den Faktor 9 unterhalb der Literaturdaten für Süddeutschland – die mittlere Verdunstung beträgt auf unbewachsenen Böden ca. 50 – 70 % der eingebrachten Niederschlagsmenge [62]. Die geringere Verdunstung ist im Wesentlichen jahreszeitlich bedingt; drei-fünftel der Versuchszeit lag im Winterhalbjahr. Analog dem Freiflächenversuch 1 lässt sich aus der „feuchten“ Einbaudichte, dem Wassergehalt und der Rohdichte die Massen und Volumina beider Schlackehaufwerke beim Einbau ermitteln (vgl. Tab. 18).

Tab. 18: Feststoff-/Wasser-/Luftverhältnisse der Schlackehaufwerke im Freiflächenversuch 2 und 3 (V2, V3) nach Einbau, m_W : Masse Wasser, m_d : Masse Schlacke trocken, m_s : Masse Schlacke feucht, V_{ges} : Volumen gesamt, V_W : Volumen Wasser, V_d : Volumen Schlacke, V_L : Volumen Luftporen, w : Wasser bez. auf m_d , n_W : Wasser bez. auf V_{ges} , n_s : Schlackeanteil bez. auf V_{ges} , n_L : Luftporen bez. auf V_{ges}

Parameter	Einheit	V2	V3
m_W	Mg	1,07	0,99
m_d		7,00	6,40
m_s		8,10	7,30
V_{ges}	m^3	5,54	5,04
V_W		1,07	0,99
V_d		2,50	2,30
V_L		1,80	1,75
w	Mass.-%	15,3	15,4
n_W	Vol.-%	19,3	19,6
n_s		45,1	45,6
n_L		32,5	34,7

Im Versuchszeitraum fielen 422 mm Niederschlag. Beim offenen Feld wurden dabei kumulativ 335 mm, beim abgedeckten Feld 374 mm als Sickerwasser ausgetragen. Bereits 2 Tage nach dem ersten Niederschlagsereignis fiel Sickerwasser an; d.h. das Wasserspeichervermögen des Haufwerks ist begrenzt. Für das offene Feld resultiert aus der Differenz Niederschlags-/Sickerwassermenge ein „Wasserrückhaltevermögen“ im Schlackekörper von 87,5 mm. Für das abgedeckte Feld beträgt dieser Wert 55 mm. D.h. aus dem offenen Schlackekörper sind max. 32,5 mm Wasser verdunstet.

Das Wasser wird überwiegend in Hydratphasen wie z.B. Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), α -Hydrocalumit ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) oder Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_4, \text{SO}_4]_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) eingebaut. Von den genannten Phasen lagen Gips und α -Hydrocalumit in den Haufwerken vor.

Zeit- und tiefenabhängige Wassergehaltsverteilung

Über die im Feld verteilten TDR-Sensoren wurde der Feuchteverlauf im Schlackekörper in drei Ebenen verfolgt. In Abb. 18 erkennt man, dass die Wassergehalte im Schlackekörper nach Niederschlagsereignissen besonders in der obersten Lage ansteigen, während die Fortpflanzung der Wassergehaltsänderungen mit der Tiefe gedämpft erfolgt. Eine verzögerte Wassergehaltszunahme gegenüber der obersten Messebene ist nicht zu erkennen, was auf „schnelle“ Wasserflüsse und wenig Speichervermögen innerhalb des Haufwerks hindeutet. Hinsichtlich der Tiefenzonierung der Wassergehalte weist das Haufwerk eine Anomalie dahingehend auf, dass die maximalen Feuchtewerte in der mittleren Lage beobachtet wurden. Eventuell spielt hierbei die Lage der Sensoren bezüglich der Verdichtungsebenen eine Rolle. Während der Frostperiode (ab Tag 48) nimmt der Feuchtegehalt (Messung des Flüssigwassergehalts) um nur ca. 1 % ab. Dies zeigt, dass neben Eis ein erheblicher Flüssigwasseranteil im Haufwerk vorhanden war.

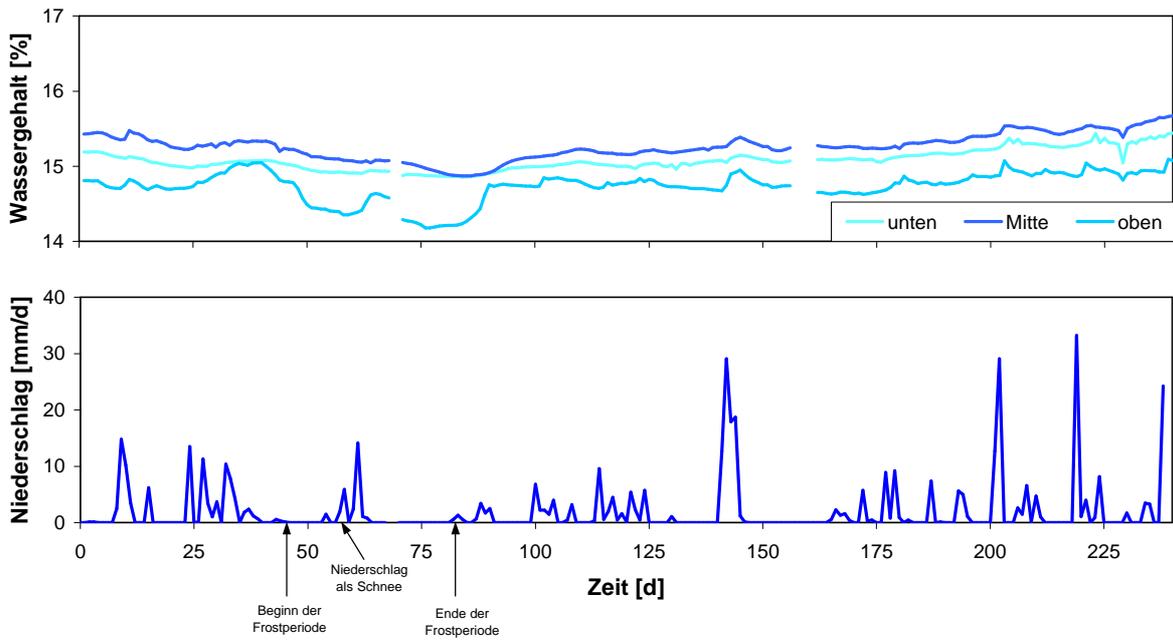


Abb. 18: Gemessene Niederschlagshöhen und Wassergehalte im Schlackekörper des Freiflächenversuchs 2

Die TDR-Sensoren im Freiflächenversuch 3 (vgl. Abb. 19) zeigen ähnliche Messwertverläufe als Folge der künstlichen Beregnungsereignisse. Auffällig ist, dass die Tiefenzonierung der Wassergehalte weit weniger ausgeprägt ist als bei dem Freiflächenversuch 2.

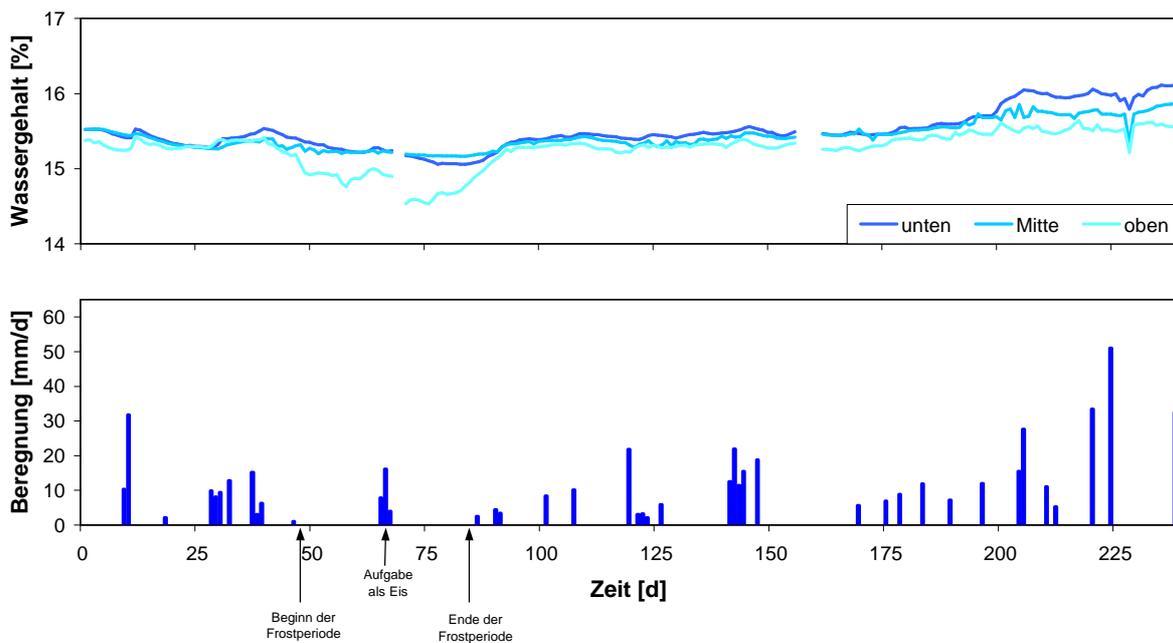


Abb. 19: Beregnungsmengen und Wassergehalte im Schlackekörper des Freiflächenversuchs 3

Temperaturverlauf

In Abb. 20 ist der Temperaturverlauf für das offene und das abgedeckte Feld dargestellt. Die Temperaturentwicklung besonders in den einzelnen Lagen beider Versuchsfelder verläuft sehr ähnlich. Man erkennt, dass die Messwerte in beiden Schlackekörpern der dem System aufgeprägten Umgebungstemperatur folgen; der Messsignalverlauf wird insgesamt durch die kalorisch-kapazitiven Eigenschaften des Haufwerks (Dreiphasensystem: Schlacke, Wasser, Luft) stark gedämpft.

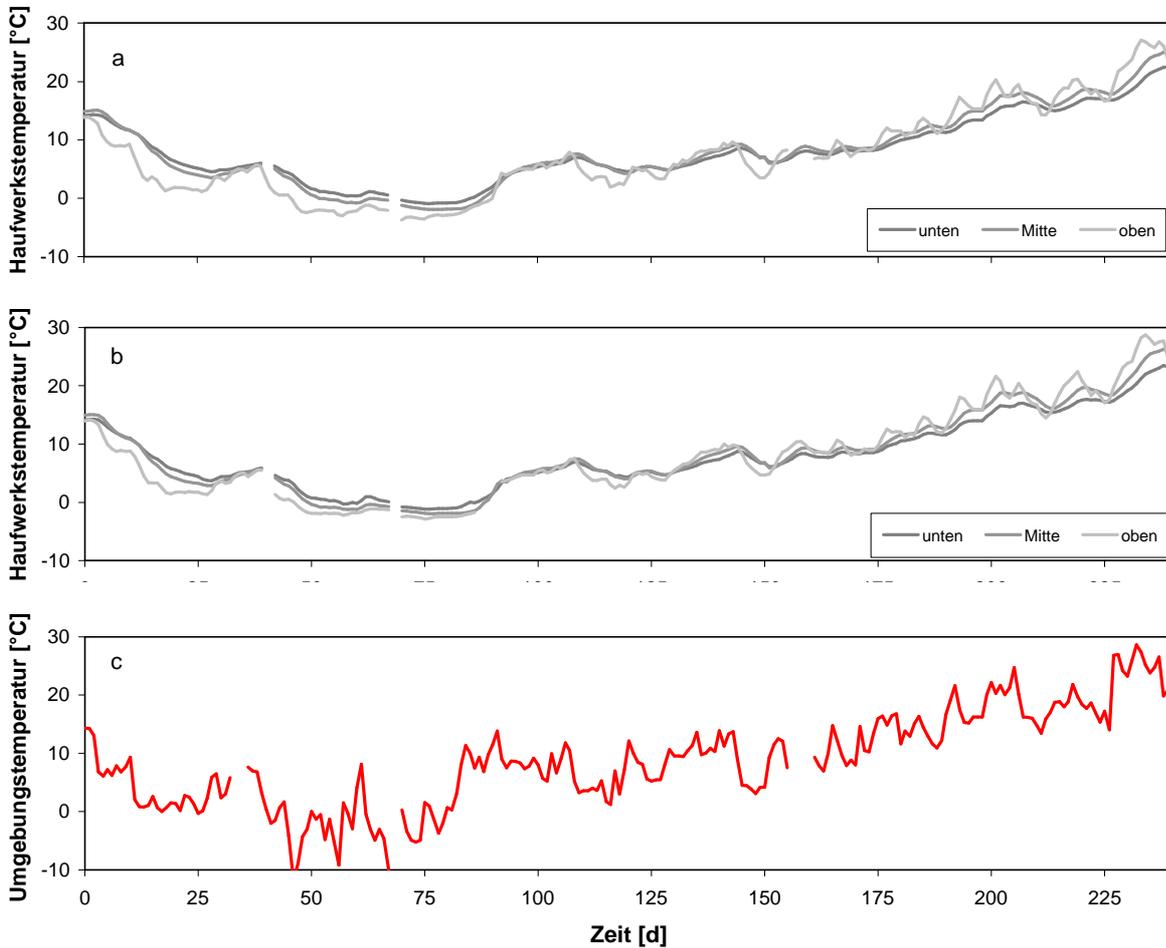


Abb. 20: Gemessene Temperaturverläufe im Vergleich zur Umgebungstemperatur in den Schlackehaufwerken (a: Freiflächenversuch 2; b: Freiflächenversuch 3)

Als die Umgebungstemperatur nach 41 Versuchstagen erstmals die 0 °C Marke unterschritt, dauerte es fast vier Wochen, bis sämtliche Temperaturmessstellen im Haufwerk Werte unter 0 °C anzeigten; die Minimalwerte liegen bei -3 °C. Durch die Anisotropie des Haufwerks gleichen sich während der Auftauphase die Temperaturverläufe weitgehend an; erst nachdem die 5 °C-Marke überschritten wurde, spreizen sich die Temperaturverläufe wieder auf.

5.6 Auslaugverhalten der Schlackekörper

Die Entwicklung des Stoffbestands von Schlackekörpern unter Auslaugbedingungen wird durch eine Vielzahl ineinander greifender Prozesse bestimmt. Für den durch Desorptions- und Lösungsvorgänge vermittelten Stoffübergang *fest-flüssig* sowie für die Stabilität von individuellen Festphasen spielt der pH-Wert, die Ionenstärke und das Redoxpotenzial eine wesentliche Rolle. Daneben können v.a. gelöste organische Verbindungen als Lösungsvermittler und Komplexbildner

die Mobilität kationischer Schwermetalle erhöhen. Im Fall ratenlimitierter Stoffübergänge sind verweilzeitabhängige Sickerwasserkonzentrationen zu erwarten. Dies gilt insbesondere für die Freiflächenversuche 2 und 3, die den natürlichen meteorologischen Bedingungen ausgesetzt waren bzw. gemäß der gemessenen Niederschlagshöhe künstlich beregnet wurden. Hieraus resultiert ein von Niederschlagshäufigkeit, -intensität und momentanem Wassergehalt abhängiges Verweilzeitenspektrum. Demgegenüber wurde bei dem Freiflächenversuch 1 die Verweilzeit des Haufwerkswassers im Rahmen einer Flussunterbrechung variiert.

5.6.1 Freiflächenversuch 1

Die bei den Freiflächenversuchen aus den Schlackehaufwerken austretenden Sickerwässer wurden gesammelt und regelmäßig analysiert. In der Abb. 21 ist der Verlauf der Sickerwasserparameter pH-Wert und Leitfähigkeit im Freiflächenversuch 1 dargestellt.

Der Verlauf des Sickerwasser-pH zeigt bis ca. 15 Tage nach Beregnungsstart Werte im stark basischen Bereich, wie sie in Gegenwart eines Portlanditpuffers erwartet werden können. Ab ca. 18 Tagen Versuchsdauer fällt der pH-Wert kontinuierlich und erreicht im Nachlauf der ersten Beregnungsphase ein Minimum von 7,7. Ein ähnliches Verhalten ist während der zweiten Beregnungsphase festzustellen. Diese pH-Wert-Entwicklung deutet auf die Abreicherung eines schnell verfügbaren Anteils des Portlanditpuffers unter der Einwirkung gelösten Kohlendioxids hin. Die erneute pH-Zunahme zu Beginn der zweiten Beregnungsphase wäre demnach die Konsequenz einer ratenlimitierten Nachlieferung des Puffers während der Flussunterbrechung.

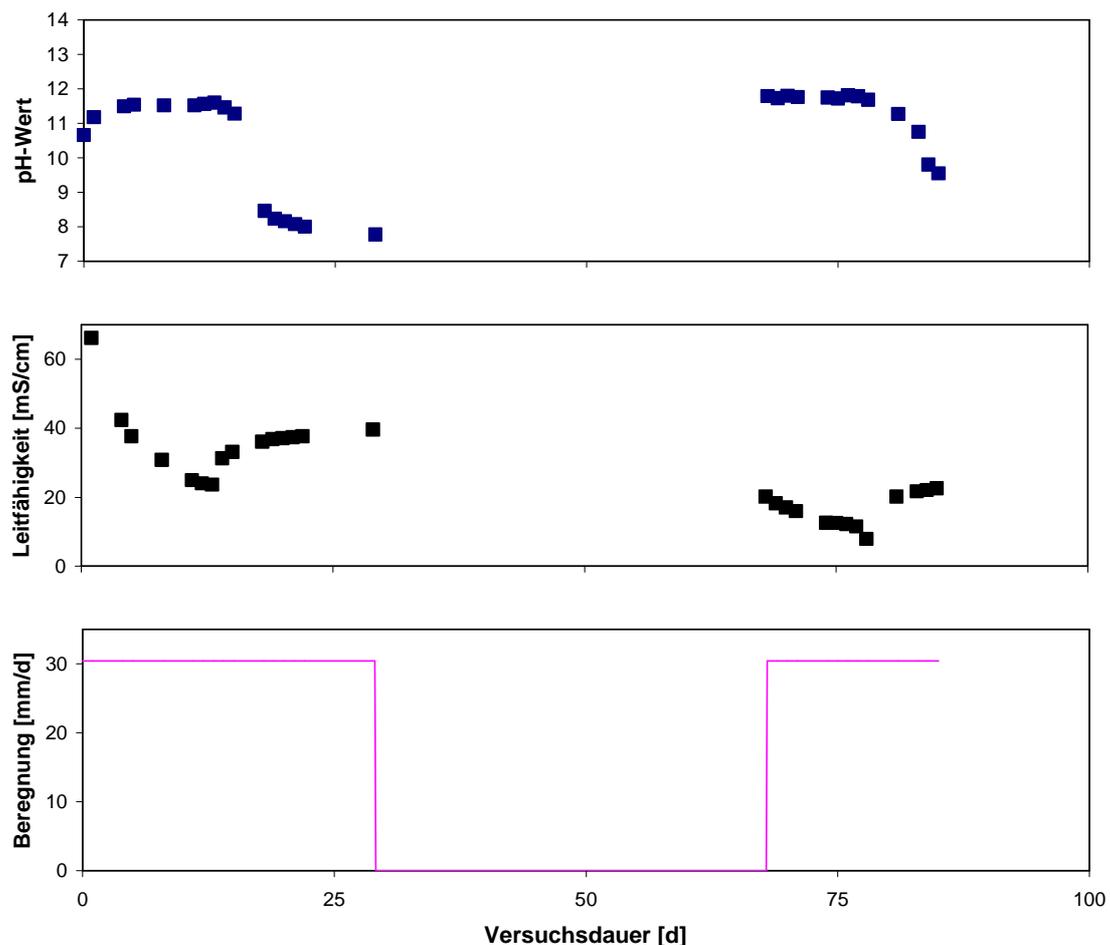


Abb. 21: Zeitlicher Verlauf von Niederschlagshöhe sowie von pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit im Sickerwasser des Freiflächenversuchs 1

Die elektrische Leitfähigkeit nimmt während der ersten Beregnungsphase von 70 mS/cm auf unter 24 mS/cm ab, was auf hohe Salzfrachten im Sickerwasser hinweist. Im Gegensatz zum Verlauf der pH-Werte zeigt die Leitfähigkeit einen Wiederanstieg nach ca. 12 Tagen Beregnung. Eventuell spielt beim Austrag der Elektrolyte die Überlagerung von pH-Effekten und zunehmender Verarmung des Schlackekörpers an löslichen Salzen eine Rolle. Während der zweiten Beregnungsphase laufen analoge Vorgänge ab: die Leitfähigkeit sinkt von 27 mS/cm auf Werte von unter 8 mS/cm und steigt danach auf Werte um 23 mS/cm an. Eine erneute Zunahme der Leitfähigkeit zu Beginn der zweiten Beregnungsperiode ist nicht festzustellen.

Die Schwermetallkonzentrationen sind in Abb. 22 exemplarisch anhand von Arsen, Cadmium, Kupfer und Nickel wiedergegeben. Während das Niveau der Schwermetall-Sickerwasseremissionen elementspezifisch ist, zeigen die Konzentrationsverläufe in erster Näherung ein der elektrischen Leitfähigkeit ähnliches Muster.

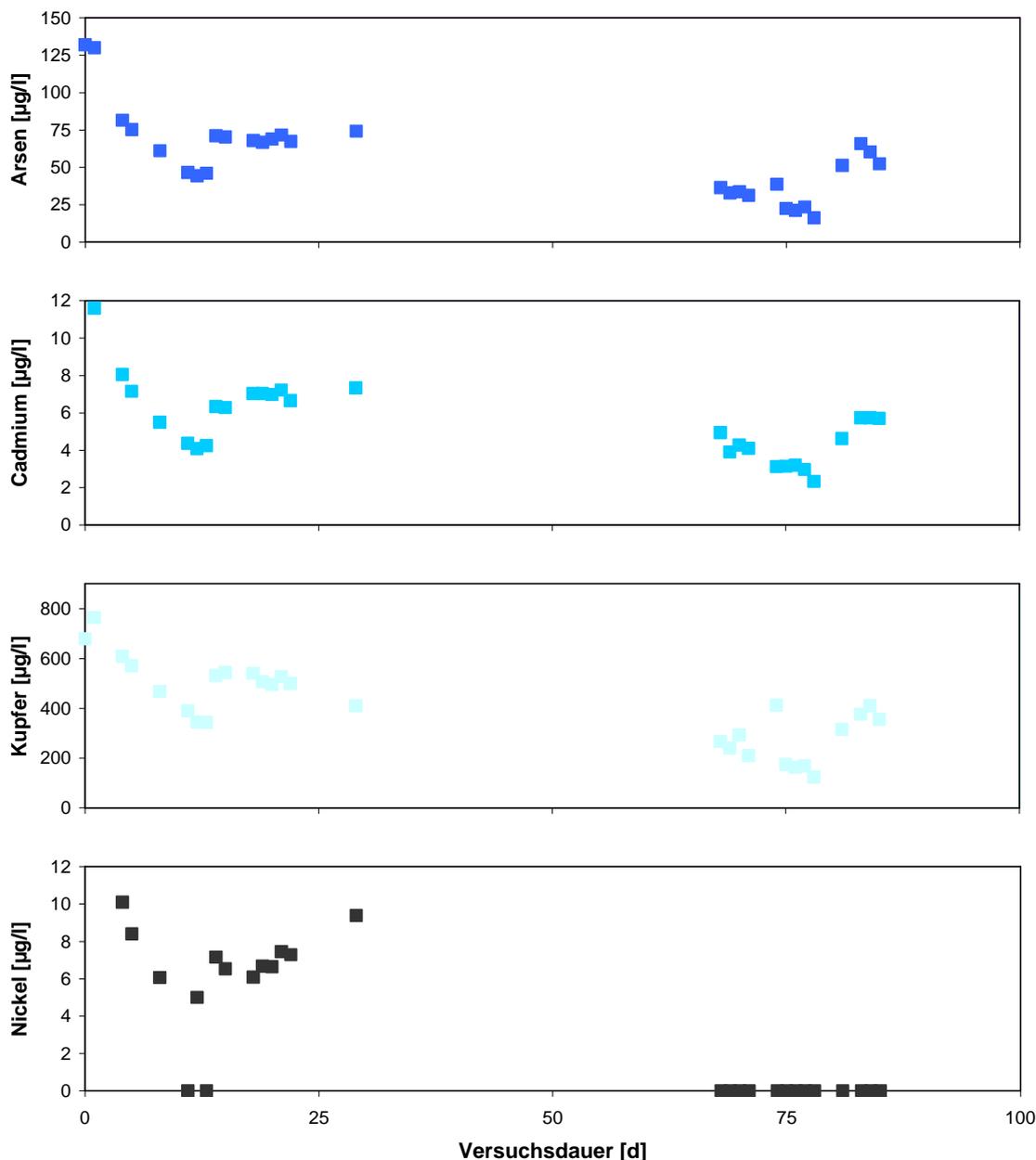


Abb. 22: Zeitlicher Verlauf ausgewählter anorganischer Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser des Freiflächenversuchs 1

Dies gilt sowohl für den eventuell durch Überlagerung aus Verarmung der Feststoffkonzentration und abnehmender pH-Pufferkapazität hervorgerufenen Konzentrationsanstieg nach ca. 12 Tagen Beregnung als auch für das Fehlen eines Konzentrationssprungs zu Beginn der zweiten Beregnungsphase. Offensichtlich erfolgte der Schwermetallaustrag über den Versuchszeitraum vorwiegend im makroskopisch thermodynamischen Gleichgewicht und wurde nur mittelbar (Kinetik der pH-Pufferung) durch ratenlimitierte Stoffübergänge geprägt.

Bilanzierung des Schadstoffinventars

Im Folgenden sind die über den Sickerwasserpfad ausgetragenen Salz- und Schwermetallfrachten den Gesamtgehalten und den im DIN DEV S4-Eluat mobilisierbaren Gehalten gegenübergestellt. Die mobilisierbaren Schwermetallkonzentrationen erhält man durch Hochrechnung der Eluatanalysen (DEV S4) aus den gewonnenen Schwermetallkonzentrationen (in µg/l) auf die Gesamtmasse der Schlacke (g).

Tab. 19: Vergleich der im Schlackekörper (Freifläche) enthaltenen Gesamt-Schwermetall- und Salzgehalte vor der ersten und nach der zweiten Beregnungsphase sowie der mobilisierbaren Massen gemäß DIN DEV S4 ; n.b.: nicht bestimmt

	Gesamtmasse vor Beregnung [g]	mobilisierbare Masse (DEV S4) [g]	Gesamtmasse nach Beregnung [g]	mobilisierbare Masse (DEV S4) [g]
Arsen	307	n.b.	288	n.b.
Blei	12.670	4,44	12.490	0,94
Cadmium	126	0,23	124	0,03
Chrom_{ges}	5.896	n.b.	5.893	n.b.
Kupfer	38.470	3,77	38.580	2,03
Nickel	3.177	0,11	2.880	0,18
Quecksilber	29,3	4,68	29,3	4,68
Zink	50.510	3,49	50.560	3,81
Chlor/Chlorid	85.700	*)44.500	73.800	*)23.300
Schwefel/Sulfat	106.100	**)9.400	112.000	**)7.600

*) Messwert Chlorid

**) Messwert Sulfat

Der Vergleich der über den Sickerwasserpfad ausgetragenen wasserlöslichen Schwermetallfrachten mit den im Schlackekörper enthaltenen mobilisierbaren Schwermetallgehalten (Eluat nach DEV S4, Tab. 19) verdeutlicht den geringen Anteil der ausgetragenen Schwermetalle im Vergleich zu den Gesamtgehalten in der Schlacke. Bedingt durch die Heterogenität des Materials und des Haufwerks sind die Schwankungen der Feststoffgehalte vor und nach der Beregnung so groß, dass ein Einfluss der über das Sickerwasser ausgetragenen Mengen nicht zu erkennen ist.

Die mobilisierbaren Schwermetallgehalte erhält man durch Hochrechnung der aus den Eluatanalysen (DEV S4) gewonnenen Schwermetallkonzentrationen (in µg/l) auf die Gesamtmasse der Schlacke (g) im Haufwerk.

Von den mobilisierbaren Schwermetallmengen wurden besonders stark Kupfer und Zink ausgewaschen. Cadmium und Blei dagegen wurden in geringerem Ausmaß eluiert, was auf eine geringere Mobilität von Blei und Cadmium unter den gegebenen Prozessbedingungen (v.a. pH-Wert < 12) hindeutet.

Tab. 20: Vergleich der im Schlackekörper (Freifläche) enthaltenen Gesamt-Schwermetall- und Salzgehalte vor der Berechnung mit den über das Sickerwasser ausgetragenen Frachten; n.b.: nicht bestimmt

	Gesamtmasse vor Berechnung [g]	mobilisierbare Masse (DEV S4) [g]	ausgetragene Masse	
			absolut [g]	relativ zu (DEV S4) [%]
Arsen	307	n.b.	0,15	-
Blei	12.670	4,44	0,05	1,1
Cadmium	126	0,23	0,02	6,9
Chrom_{ges}	5.896	n.b.	1,78	-
Kupfer	38.470	3,77	1,16	30,8
Nickel	3.177	0,11	n.b.	-
Quecksilber	29,3	4,68	0,0001	0,00002
Zink	50.510	3,49	0,73	21,0
Chlor/Chlorid	85.700	^{*)} 44.500	^{*)} 23.600	52,9
Schwefel/Sulfat	106.100	^{**)} 9.400	^{**)} 2.270	24,1

^{*)} Messwert Chlorid

^{**)} Messwert Sulfat

In der Tab. 20 sind die Summengehalte der mit dem Sickerwasser im Verlauf der beiden Berechnungsperioden ausgetragenen Chlorid- und Sulfatfrachten dargestellt. Wie bei den Schwermetallen erfolgt auch bei diesen beiden Anionen der Hauptaustag im Verlauf der eigentlichen Berechnungszeiten, während die im Anschluss an die Berechnungsphasen ausgetragenen vergleichsweise geringen Restwassermengen nur unwesentlich zu den Gesamtfrachten beitragen.

Im gesamten Schlackekörper liegen 106 kg Schwefel bzw. 86 kg Chlor vor, von denen etwa 9 kg als Sulfat und 45 kg als Chlorid mobilisierbar sind. Die insgesamt während der Berechnungsperioden ausgetragenen Massen entsprechen etwa 24 % und 53 % der gem. DIN DEV S4 mobilisierbaren Sulfat- und Chloridmasse.

5.6.2 Freiflächenversuche 2 und 3

Die Abb. 23 zeigt die Entwicklung von pH-Wert, Redoxpotenzial und elektrischer Leitfähigkeit im Freiflächenversuch 2 für den Bilanzzeitraum von 200 Tagen (29. Oktober 2001 bis 17. Mai 2002).

Der pH-Wert liegt über den gesamten Versuchszeitraum im basischen Bereich und nimmt von 11,6 bei Versuchsbeginn auf pH 9 ab. Die pH-Pufferung wird in diesem Bereich durch die Lösung von Kalk (CaO) und Portlandit {Ca(OH)₂} kontrolliert [30]. Der Schlackekörper nimmt durch den Gasaustausch mit der Atmosphäre und über das Niederschlagswasser CO₂ auf, so dass im Zuge der Carbonatisierung {Umsetzung von CaO und Ca(OH)₂ zu CaCO₃} langfristig abnehmende pH-Werte im

Sickerwasser resultieren. Auffällig ist der im Zusammenhang mit einem Starkregenereignis bei ca. 140 Tagen beobachtete erneute pH-Anstieg auf Werte um 11,8. Eventuell wurde während des Sickerwasserdurchtritts Portlandit aus Porenräumen freigesetzt, die bei geringeren Niederschlagsintensitäten nicht durchflossen werden. Das gemessene Redoxpotenzial ist durch rasche Schwankungen gekennzeichnet und geht tendenziell zu reduzierenden Bedingungen, wie sie auch im Rahmen von Auslaugexperimenten im Labormaßstab festgestellt wurden [63]. Beim Starkregenereignis nach 140 Tagen ging das Redoxpotenzial auf Werte < 0 mV zurück.

Die elektrische Leitfähigkeit des Sickerwassers deutet mit Werten zwischen 10 und 40 mS/cm auf einen verstärkten Austrag mobiler Ladungsträger hin. In der zeitlichen Entwicklung zeigt sich eine nahezu kontinuierliche Zunahme der Leitfähigkeit bis zum Beginn der Frostperiode (40 Tage).

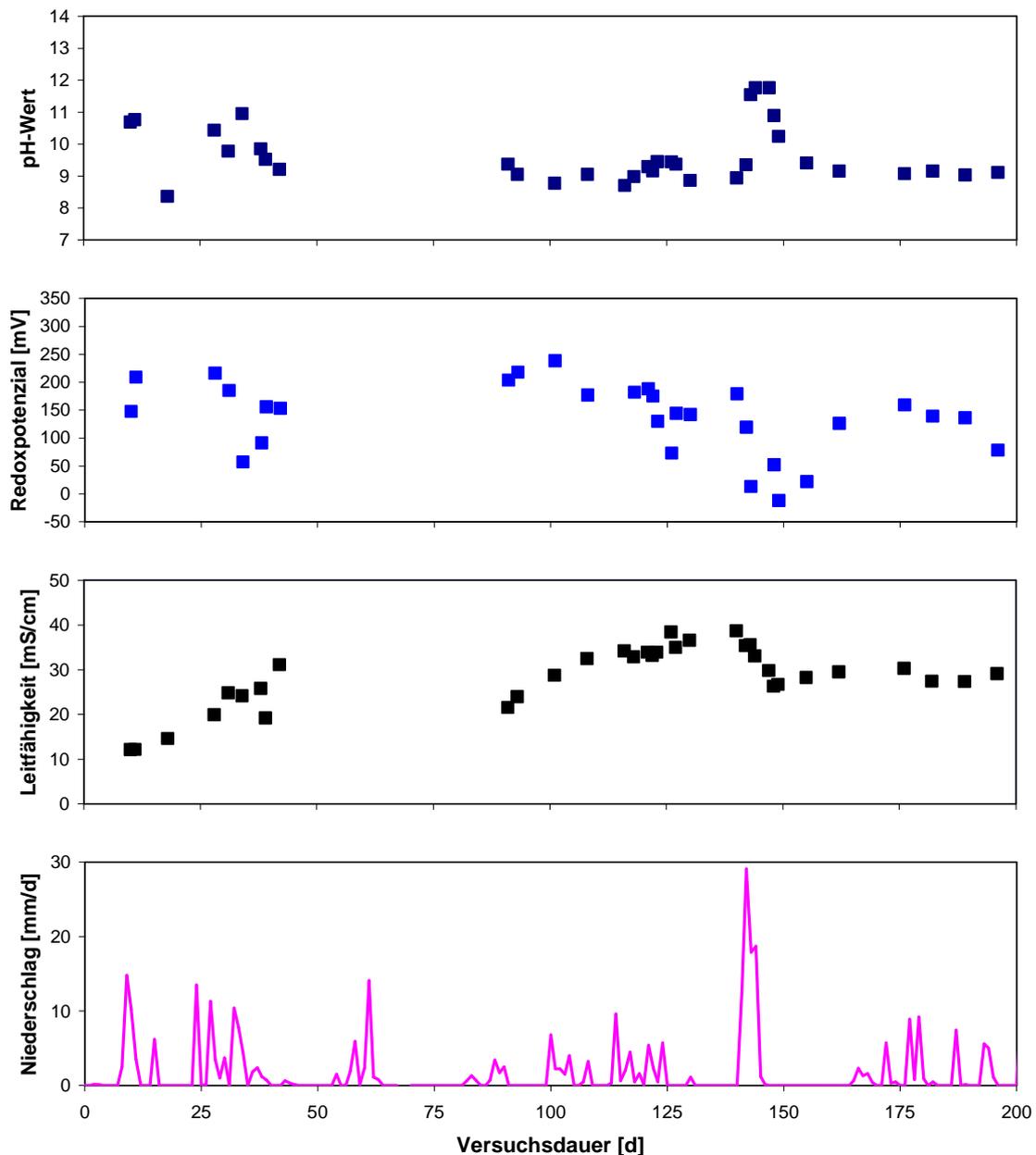


Abb. 23: Zeitlicher Verlauf von Niederschlagshöhe sowie von pH-Wert, Redoxpotenzial und elektrischer Leitfähigkeit im Sickerwasser des Freiflächenversuchs 2

Mit Ende der Frostperiode setzt sich dieser Trend fort, erreicht bei ca. 140 Tagen ein absolutes Maximum und pendelt sich im weiteren Verlauf auf ein konstantes Niveau von 30 mS/cm ein. Im Vergleich zu den Proben vor Beginn der Frostperiode weisen die ersten Sickerwässer nach Auftauen des Schlackekörpers geringere Leitfähigkeiten auf. Diese Beobachtung ist konsistent mit der während der Frostperiode in Form von Schnee niedergegangenen und gespeicherten Wassermasse. Diese führt nach der Frostperiode beim Auftauen zu einer Verdünnung der Salzfracht im Sickerwasser. Ratenlimitierte Stoffübergänge, die eine abrupte Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit nach der Frostperiode erwarten ließen (Verweilzeiterhöhung), sind während dieses Stadiums der Auslaugung von untergeordneter Bedeutung.

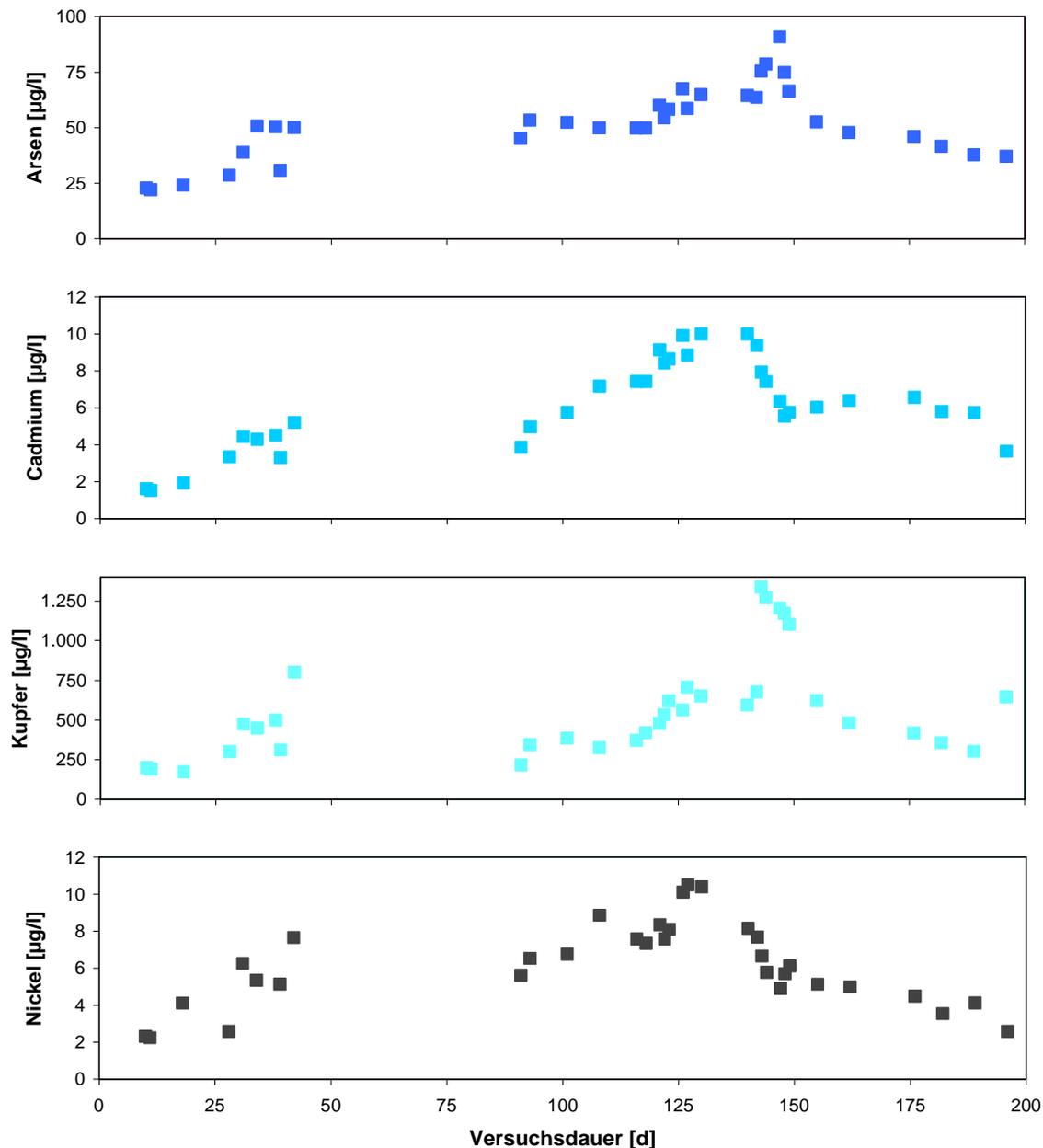


Abb. 24: Zeitlicher Verlauf ausgewählter anorganischer Schadstoffe im Sickerwasser des Freiflächenversuchs 2

Das Auslagungsverhalten anorganischer Schadstoffe ist am Beispiel ausgewählter Elemente in Abb. 24 wiedergegeben. Während das Konzentrationsniveau elementspezifisch ist, ähneln sich die Konzentrationsverläufe in etwa analog der zeitlichen Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit. Das zeigt, dass das Emissionsverhalten der Metalle keine Hinweise auf das Vorliegen ratenlimitierter Freisetzungsvorgänge liefert. Auslagungsexperimente im Labormaßstab belegen, dass die Sickerwasseremissionen aus MV-Schlacke anfänglich durch gleichgewichtsnaher Freisetzungsvorgänge kontrolliert werden und erst nach Austausch von 5 bis 10 Porenvolumina ein verweilzeitabhängiges Endniveau erreicht wird [63]. Mit dem aus der Wasserbilanz berechneten Wasserspeichervolumen von 1.070 l und der kumulativen Sickerwassermenge von 994 l ergibt sich, dass der wassergefüllte Porenraum des Schlackekörpers innerhalb von 200 Tagen ca. einmal ausgetauscht wurde. Demnach ist davon auszugehen, dass die Emissionen im Bilanzzeitraum von 200 Tagen zeitlich und örtlich im thermodynamischen Gleichgewicht erfolgen und eher durch die stochastischen Fließwege des Haufwerkswassers als durch dessen Verweilzeit geprägt werden.

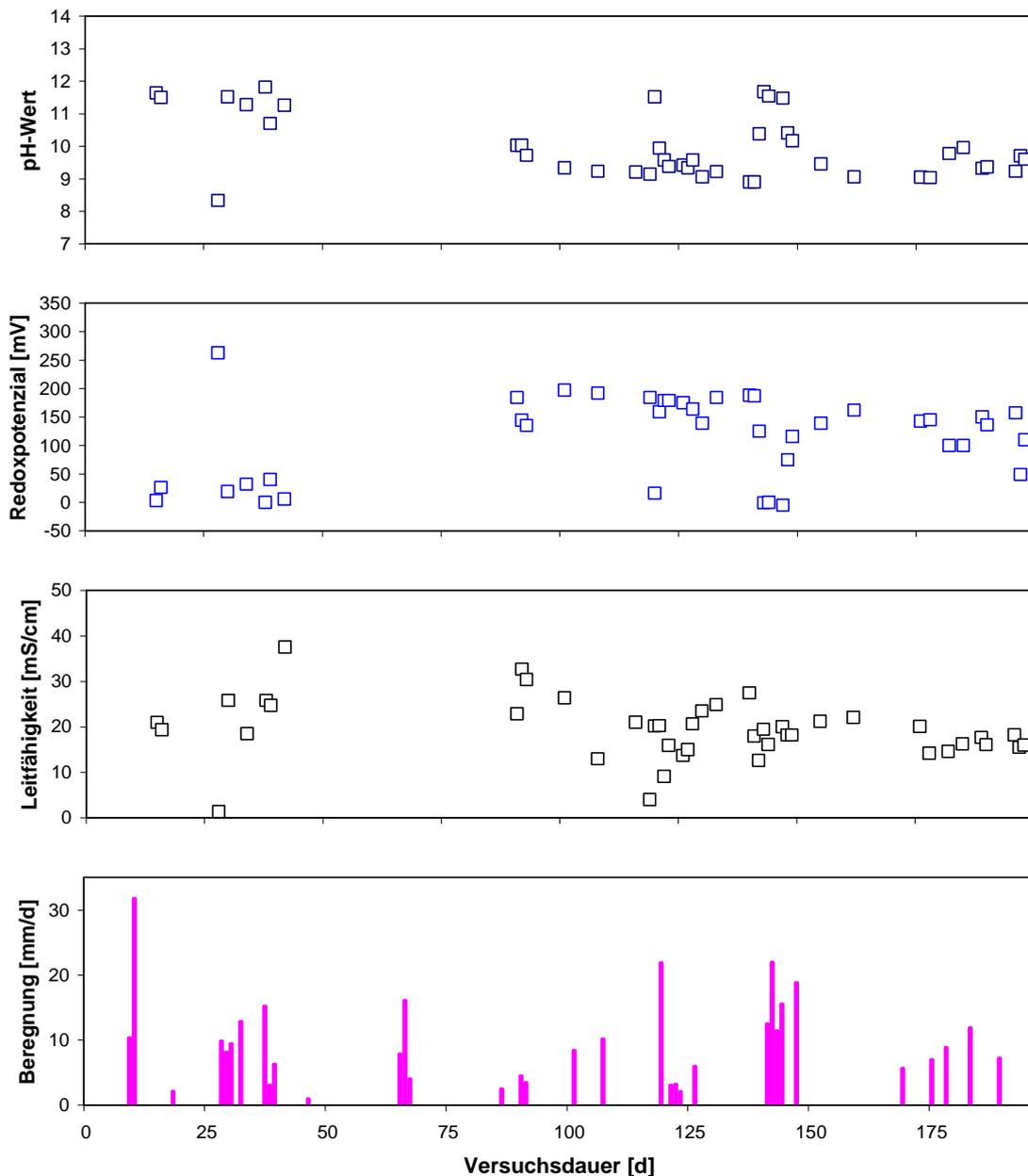


Abb. 25: Zeitlicher Verlauf von Beregnungshöhe sowie von pH-Wert, Redoxpotenzial und elektrischer Leitfähigkeit im Sickerwasser des Freiflächenversuchs 3

Im Vergleich zu den Konzentrationen der Eluate nach DIN DEV S4 wurden bei den Elementen Arsen, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink um ein bis zwei Größenordnungen höhere Sickerwasserkonzentrationen erreicht (vgl. Tab. 20). Dies ist konsistent mit dem deutlich größeren Feststoff/Lösungs-Verhältnis und bestätigt, dass die Konzentrationen im S4-Eluat nur bedingt zur Abschätzung von Sickerwasserkonzentrationen unter naturnahen Auslaugbedingungen herangezogen werden können.

Die Verläufe von pH-Wert, Redoxpotenzial und elektrischer Leitfähigkeit im Sickerwasser des Freiflächenversuchs 3 sind zusammen mit den Beregnungshöhen in Abb. 25 dargestellt. Vergleicht man die Messwerte der beiden Freiflächenversuche, so weisen die Messwerte des künstlich beregneten Feldes eine größere Streubreite auf. Wie im Freiflächenversuch 2 zeigen die pH-Werte infolge zunehmender Carbonatisierung eine Tendenz zu abnehmenden Werten. Der unter natürlichen Randbedingungen beobachtete Spitzenwert im Sickerwasser-pH nach 140 Tagen konnte unter den Bedingungen einer künstlichen Beregnung näherungsweise reproduziert werden.

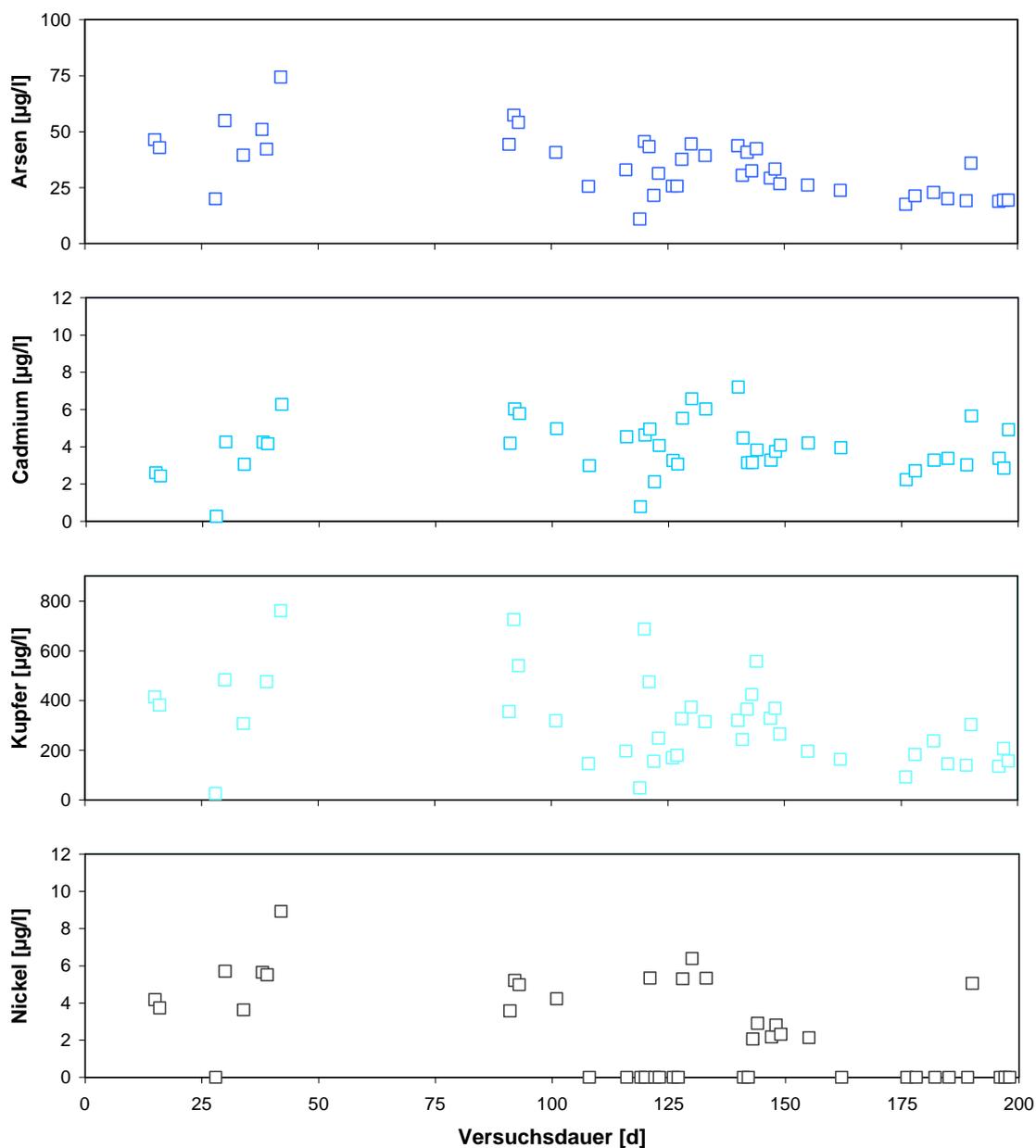


Abb. 26: Zeitlicher Verlauf ausgewählter anorganischer Schadstoffe im Sickerwasser des Freiflächenversuchs 3

Redoxpotenzial und elektrische Leitfähigkeit liegen im gleichen Wertebereich wie im Sickerwasser des Freiflächenversuchs 2, zeigen jedoch hinsichtlich der Lage von Minima und Maxima einen weniger ausgeprägten Verlauf.

Dieser Befund gilt ebenfalls für die in Abb. 26 gezeigten Auslaugkurven ausgewählter Elemente: während die Konzentrationsbereiche der einzelnen Schadstoffe mit den unter natürlichen Randbedingungen beobachteten Werten übereinstimmen (Ausnahme: Kupfer), zeigen die Zeitreihen eine stärkere Streuung.

Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten liegt in den unterschiedlichen Berechnungsweisen: während die Berechnungshöhen gemäß der täglichen kumulativen Niederschlagsmenge eingestellt wurden, wichen die Berechnungsintensitäten von den natürlichen Bedingungen ab. Hierdurch resultieren Infiltrationsraten, die im Freiflächenversuch 3 um bis zu eine Größenordnung höher sind als im Freiflächenversuch 2. Mit den hierdurch von Beregnungsereignis zu Beregnungsereignis variierenden Impulsintensitäten bilden sich unterschiedliche bodenhydraulische Gradienten und damit anders geartete Fließfelder im Haufwerk aus. Diese führen zu unterschiedlich effektiv durchströmten und damit im Stoffaustausch mit dem Haufwerkswasser stehenden Porenvolumina, woraus eine größere Streuung der Konzentrationen im Sickerwasser resultiert.

Die hohen pH-Werte der Sickerwässer begünstigen die Freisetzung wasserlöslicher organischer Verbindungen (dissolved organic carbon, DOC). Dies wird durch die Beobachtung bestätigt, dass trotz relativ geringer Gehalte an organischem Kohlenstoff in der MV-Schlacke DOC-Konzentrationen bis zu 350 mg/l erreicht wurden, die in der Größenordnung von DOC-Sickerwasseremissionen aus humusreichen Oberbodenhorizonten [64] liegen. Dieser Befund ist konsistent mit Daten von Dijkstra & Comans [65], die maximale DOC-Konzentrationen im Sickerwasser von MV-Schlacke von 1,2 g/l nennen. Durch Dissoziation von Phenol- und Carboxylgruppen der wasserlöslichen organischen Verbindungen kann DOC insbesondere bei basischen pH-Werten positiv geladene Schwermetalle komplexieren und damit deren Löslichkeit erhöhen. Besonders ausgeprägt ist der Einfluss des DOC auf die Mobilität und Löslichkeit von Kupfer. Die enge Korrelation der DOC- und Kupfer-Konzentrationen in den Sickerwässern der Freiflächenversuche 2 und 3 (vgl. Abb. 27) legt nahe, dass die initialen Spitzenkonzentrationen kationischer Schwermetalle durch die Komplexbildung mit DOC beeinflusst werden.

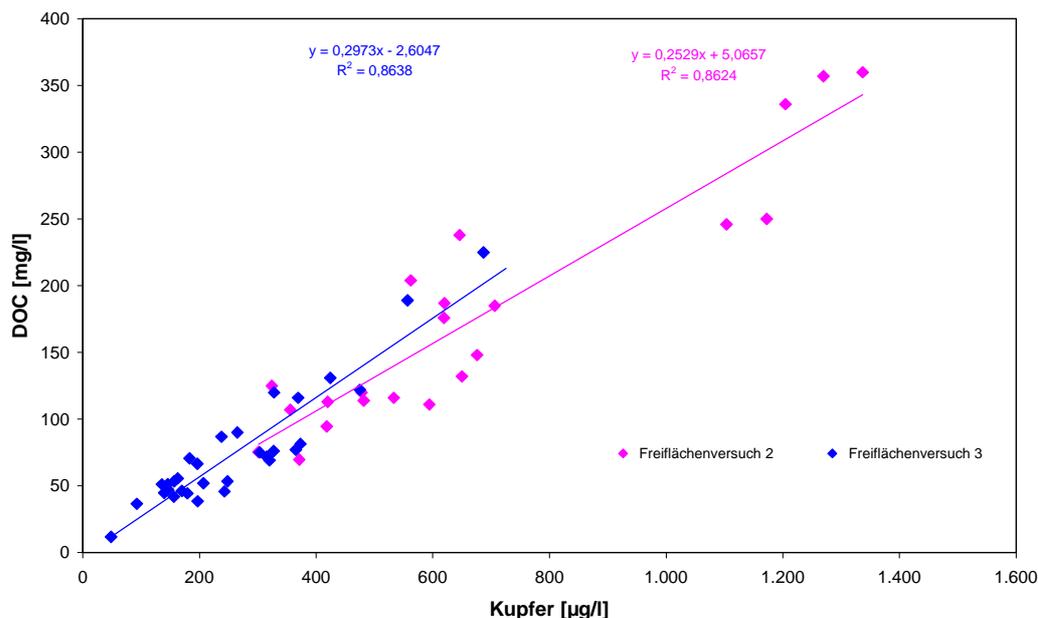


Abb. 27: Korrelation von Kupfer- und DOC-Konzentrationen im Sickerwasser der Freiflächenversuche 2 und 3

Bilanzierung des Schadstoffinventars

Die in die Verschalungssysteme einzubauenden Schlackemasse wurden anhand von 12 Proben charakterisiert. Aus den Analysen wurden die in beiden Versuchskörpern (offenes: 8.072,0 kg, abgedecktes Feld: 7.338,2 kg) enthaltenen Absolutmassen an Schwermetallen und Salzen berechnet; daneben wurde aus den Eluatanalysen o.g. Proben der nach dem DEV S4-Verfahren maximal mobilisierbare Anteil der jeweiligen Substanzen ermittelt. Der kumulative Stoffaustrag bezieht sich dabei auf den Zeitraum vom 29. Oktober 2001 bis 17. Mai 2002 und umfasst 200 Tage. Der mit dem Sickerwasseraustritt einhergehende Schadstoffaustrag wurde in Relation zum mobilisierbaren Anteil gem. DEV S4 gesetzt. Die Ergebnisse sind in Tab. 21 aufgelistet.

Tab. 21: Vergleich der in den Haufwerken (Freiflächenversuche 2 und 3) enthaltenen Schwermetall- und Salzmassen mit den eluierbaren Gehalten nach DIN DEV S4

	Gesamtmasse [g]		mobilisierbare Masse (DEV S4)		
			absolut [g]		relativ [‰]
	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 2	Versuch 3	
Arsen	241	219	0,20	0,18	0,83
Blei	9.506	8.642	2,55	2,32	0,27
Cadmium	87	79	0,02	0,02	0,24
Chrom	4.668	4.243	2,76	2,51	0,59
Kupfer	19.360	19.790	3,33	3,03	0,17
Nickel	1.147	1.043	0,32	0,29	0,28
Zink	35.690	32.450	3,89	3,53	0,11
Chlor/Chlorid	68.130	61.940	^{*)} 28.950	^{*)} 26.310	420
Schwefel/Sulfat	87.290	79.350	^{**)} 2.900	^{**)} 2.640	11

^{*)} Messwert Chlorid

^{**)} Messwert Sulfat

Für die Schwermetalle ergibt sich aus dem Vergleich der Gesamtmassen mit den gem. DIN DEV S4 mobilisierbaren Gehalten, dass unter den gewählten Versuchsbedingungen für eine substanzspezifische Freisetzung in die Wasserphase maximal ein Promille des Schadstoffinventars zur Verfügung steht (Mobilisierbarkeit: Arsen > Chrom > Nickel > Blei > Cadmium > Kupfer > Zink). Dies bestätigt eine weitgehende Inertisierung umweltrelevanter Inhaltsstoffe in der Schlackematrix. Demgegenüber werden die Anionen Chlorid und Sulfat stark mobilisiert und erreichen im Fall von Chlorid nahezu die Hälfte des Gesamtgehalts.

Die mit dem Sickerwasser ausgetragenen kumulativen Schadstoffmassen sind in Tab. 22 zu dem nach DIN DEV S4 mobilisierbaren Anteil ins Verhältnis gesetzt, um eine Abschätzung der bei unterschiedlicher Versuchsdurchführung (statische vs. dynamischer Auslaugung, natürlicher Niederschlag vs. künstlicher Beregnung) in den Wasserpfad emittierbaren Schadstofffrachten zu erhalten.

Im Vergleich zu den nach DIN DEV S4 mobilisierbaren Schadstoffgehalten ist der kumulative Austrag mit dem Sickerwasser deutlich geringer und erreicht im Fall der Schwermetalle Arsen und Cadmium maximal ca. 25 %. Dies unterscheidet sich von der Beobachtung z.T. deutlich höherer Konzentrationen im Sickerwasser der Freiflächenversuche 2 und 3. Berücksichtigt man die unter-

schiedlichen Feststoff/Lösungs-Verhältnisse (DIN DEV S4 1:10, Schlackekörper im Bilanzzeitraum 8:1), so ergibt sich, dass für eine gemeinsame Bezugsbasis prinzipiell längere Experimente erforderlich wären. Dennoch erlaubt die Frachtenberechnung aus den Analysenwerten nach DIN DEV S4 eine konservative Abschätzung der mittelfristig aus Schlackehaufwerken emittierbaren Massen. Der Vergleich der mit dem Sickerwasser ausgetragenen Schadstoffmassen aus beiden Versuchsfeldern zeigt, dass die Gesamtemissionen in der gleichen Größenordnung liegen; d.h. beide Haufwerke verhalten sich trotz unterschiedlicher (physikalischer) Randbedingungen weitestgehend ähnlich.

Tab. 22: Vergleich der aus den Haufwerken (Freiflächenversuche 2 und 3) kumulativ ausgetragenen Schwermetall- und Salzmassen mit den eluierbaren Gehalten nach DIN DEV S4

	mobilisierbare Masse (DEV S4) [g]	ausgetragene Masse	
		absolut [g]	relativ bez. (DEV S4) [%]
Versuch 2			
Arsen	0,20	0,050	24,8
Blei	2,55	0,004	0,2
Cadmium	0,02	0,005	23,5
Chrom	2,76	0,251	9,1
Kupfer	3,33	0,526	15,8
Nickel	0,32	0,008	2,5
Zink	3,89	0,177	4,6
Chlorid	28.950	8.680	30,0
Sulfat	2.900	549	18,9
	mobilisierbare Masse (DEV S4) [g]	ausgetragene Masse	
		absolut [g]	relativ bez. (DEV S4) [%]
Versuch 3			
Arsen	0,18	0,042	23,1
Blei	2,32	0,007	0,3
Cadmium	0,02	0,004	20,5
Chrom	2,51	0,265	10,5
Kupfer	3,03	0,396	13,1
Nickel	0,29	0,004	1,5
Zink	3,53	0,306	8,7
Chlorid	26.310	6.800	25,8
Sulfat	2.640	488	18,5

Dies kommt auch in der Reihenfolge der emittierten Schadstoffmassen zum Ausdruck (Mobilisierbarkeit: Arsen > Cadmium > Kupfer > Zink > Nickel > Blei). Der Unterschied der Berechnungsarten {natürlich, künstlich (Impulsberechnung)} und damit der zwischen den im Schüttgut wirkenden Fließgradienten schlägt sich auf die Sickerwasseremissionen kaum durch. Vielmehr spiegelt die Streuung der integralen Messwerte im Sickerwasser die Heterogenität der Schlackekörper wider. Dies bestätigt die Interpretation der Konzentration-Zeit-Reihen im Sinne einer gleichgewichtsnahen Auslaugung der Feststoffe.

Da die Versuche fortgesetzt werden, sind abschließende Analysen zur Auslaugbarkeit nach DIN DEV S4 in Abgleich mit dem Untersuchungsprogramm von Freiflächenversuch 1 erst nach dem Rückbau möglich.

5.7 Eindimensionale Simulation des Wasser- und Wärmetransportes im Schlackefeld

Die experimentell ermittelten Daten wurden mit Simulationsergebnissen zum Wasser- und Wärmetransport im Schlackekörper verglichen, um zu überprüfen, inwieweit bestehende Modellvorstellungen und implementierte Transportkoeffizienten das reale Prozessgeschehen beschreiben. Dazu wurde das Softwarepaket HYDRUS 2D [66] eingesetzt.

Das Softwarepaket HYDRUS 2D erlaubt eine zweidimensional instationäre Simulation von Wasser-, Stoff- und Wärmetransportvorgängen in porösen Medien.

In erster Näherung erfolgte die Modellierung aufgrund des gewählten Versuchsaufbaus (Minimierung von Randeinflüssen: Verhältnis Breite zu Partikeldurchmesser $B/d_p \approx 300 \gg 1$, Verhältnis Länge zu Partikeldurchmesser $L/d_p \approx 750 \gg 1$; flächenproportionale Berechnung) eindimensional instationär. Der Wasser- und Wärmetransport ist in dem o.g. Programmpaket als Einphasenmodell formuliert. Hierbei wird die Massenerhaltung durch die eindimensionale Richards-Gleichung (Gl. 1), der Wärmetransport durch die Konvektions-Dispersionsgleichung (Gl. 2) beschrieben.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} \pm S = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\Theta) \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial K(\Theta)}{\partial x} \quad (1)$$

Θ : volumetrischer Wassergehalt [L^3L^{-3}]; t : Zeit [T]; S : Quell-/Senken-Term für Wasser Zu-/Abfluss [$L^3L^{-3}T^{-1}$]; x : Raumkoordinate [L]; $D(\Theta)$: Diffusivität [L^2T^{-1}]; $K(\Theta)$: hydraulische Leitfähigkeit [LT^{-1}]

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} + C_w q \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(\Theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (2)$$

C_v, C_w : volumetrische Wärmekapazität (Produkt aus Dichte und spez. Wärmekapazität) des porösen Mediums sowie der Wasserphase [$ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$]; T : Temperatur [K]; t : Zeit [T]; q : Darcy-Geschwindigkeit [LT^{-1}]; x : Raumkoordinate [L]; $\lambda(\Theta)$: effektive Wärmeleitfähigkeit des Bodens [$MLT^{-3}K^{-1}$]

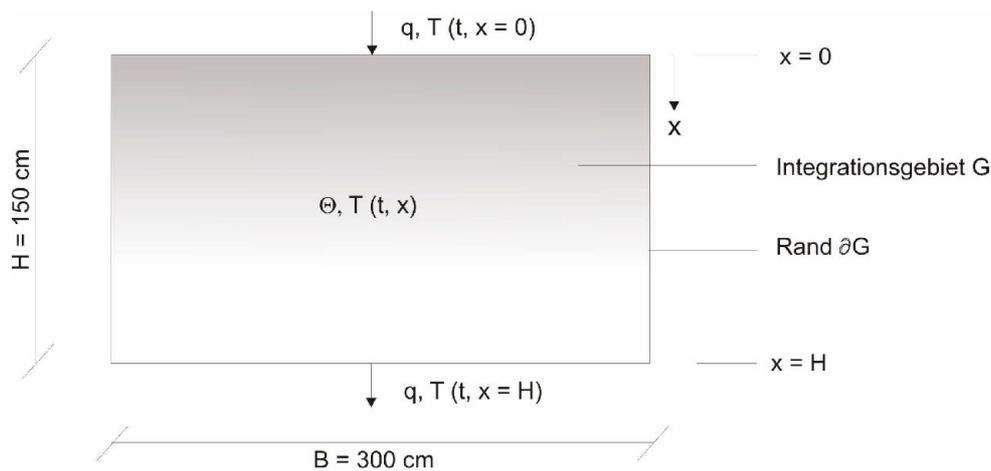


Abb. 28: Randbedingungen zur Lösung der Gleichungen (1) und (2)

Die von der lokalen Zusammensetzung des betrachteten Bodenvolumenelements (Anteile von Festsubstanz, Wasser und Luft) abhängige Wärmekapazität des porösen Mediums wurde mit dem additiven Ansatz nach de Vries (vgl. Gl. 8) berechnet.

Das gekoppelte partielle Differenzialgleichungs-System wird simultan unter Einsatz des Crank-Nicholson-Verfahrens numerisch gelöst. Zur Lösung des Gleichungssystems ist entsprechend der Gleichungsstruktur eine gewisse Zahl von Anfangs- und Randbedingungen notwendig, um das konkrete physikalische Problem mathematisch abzubilden.

Der beim Einbau der Schlacke bestimmte Wassergehalt und die Umgebungstemperatur wurden tiefenunabhängig als Anfangsbedingungen formuliert:

$$\Theta(t = 0, x) = \text{const.}$$

$$T(t = 0, x) = T_U(t = 0) = \text{const.}$$

Als „obere“ Randbedingung ($x = 0$) wurde die tägliche Niederschlagshöhe $P(t)$ (Flussrandbedingung) bzw. die gemessene Umgebungstemperatur $T_U(t)$ vorgegeben:

$$q(t, x = 0) = P(t) = K(\Theta) - D(\Theta) \left. \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right|_{x=0^+}$$

$$T(t, x = 0) = T_U(t)$$

Diese Typ 1 (Dirichlet-)Temperaturrandbedingung hat den Nachteil, keinen Wärmestrom über die Systemgrenzen ∂G zuzulassen, sondern man unterstellt, dass die Oberflächentemperatur identisch der Umgebungstemperatur ist. Eine physikalisch konsistentere Formulierung wäre durch eine Typ 3 (Cauchy-)Randbedingung gegeben, bei der der Wärmeaustausch des Haufwerks mit der Umgebungsluft am Integrationsrand ∂G ($x = 0^+$) über folgende Gleichung formuliert wird:

$$-I(\Theta) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0^+} = a(T_U - T_{x=0^-}) \quad (3)$$

Bei der Simulation wurde diese Beziehung nicht genutzt, da für den Wärmeübergangskoeffizienten α im gegebenen Anwendungsfall kein funktionaler Zusammenhang zu den einschlägigen Kennzahlen (Nußelt-Zahl als Funktion der Reynolds-, Prandtl-, Rayleigh-Zahl etc.) bekannt ist.

Als „untere“ Randbedingung ($x = H$) wurde für den Wasserfluss eine Lysimeter-Randbedingung formuliert; ein Fluss tritt über den unteren ∂G Rand erst dann auf, wenn im untersten Kompartiment des Haufwerks der Sättigungswassergehalt Θ_s erreicht wird. Beim Wärmetransport wurde davon ausgegangen, dass keine Wärme über den unteren Rand (Adiabasie) fließt.

$$q(t, x = H) = 0 \quad \forall \Theta < \Theta_s$$

$$q(t, x = H) = K \quad \forall \Theta = \Theta_s$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=H} = 0$$

Die Parametereingabe erfolgt bei HYDRUS 2D über die in Abb. 29 dargestellte Bedienoberfläche („Pre-processing-Menü“).

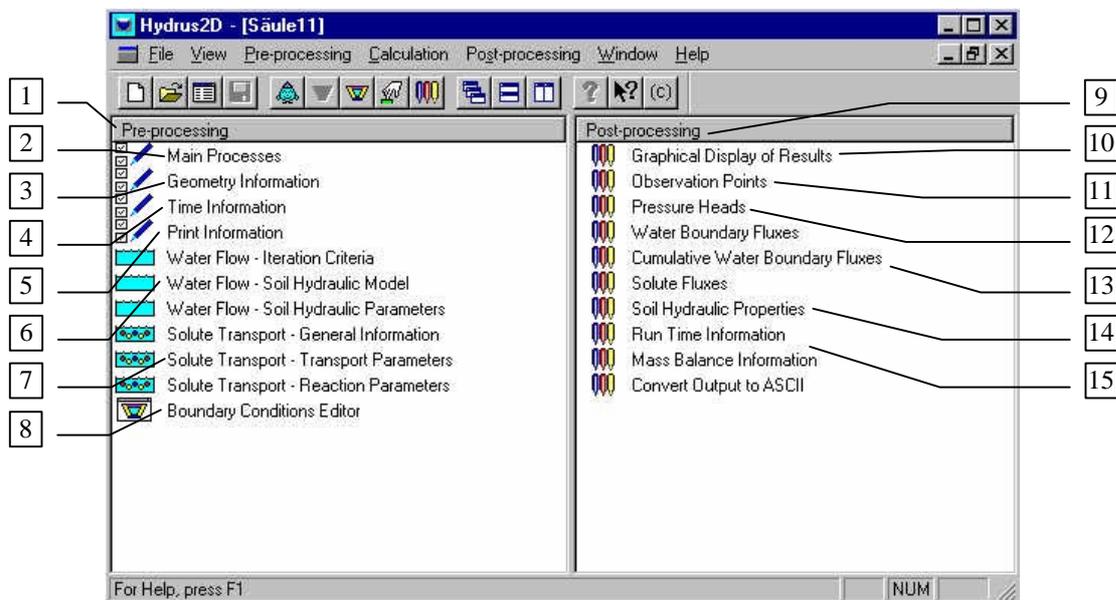


Abb. 29: Ein-/Ausgabeoberfläche des Programms HYDRUS 2D für die Simulation von Wasser- und Stofftransport; analog für Wärmetransport

Die im „Pre-processing-Menü“ (1) festzulegenden Eingangsdaten sind:

- (2) die Definition des Transportproblems (Wasser-, Stoff-, Wärmetransport),
- (3) die Geometrie des Integrationsgebiets inkl. Festlegung des Gitternetzes,
- (4) der Berechnungszeitraum,
- (5) die Angaben zum Ausgabeformat der berechneten Größen,

- (6) für den Wassertransport: Iterationskriterien, Formulierung der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsfunktion, die Koeffizienten der Wassergehalts-Saugspannungscharakteristik,
- (7) für den Stofftransport: Iterationskriterien, Definition des Dispersionskoeffizienten Reaktionskonstanten und Stoffübergangskoeffizienten {wenn unter (2) Stofftransport gewählt wurde},
- (8) sowie die Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen.

Die im „Post-processing-Menü“ (9) angezeigten Ergebnisdaten für den Wasser- und Stofftransport umfassen:

- (10) die graphische Darstellung der Ergebnisse an allen Gitterpunkten, die graphische Darstellung der Ergebnisse an allen Gitterpunkten,
- (11) die Druck-, Wassergehalts- und Konzentrationsverläufe an ausgewählten Gitterpunkten,
- (12) sowie Informationen über die Entwicklung der Wasserspannung,
- (13) die differentiellen und integralen Wasser- und Stoffflüsse,
- (14) die hydraulischen Bodeneigenschaften,
- (15) die Angaben zur numerischen Stabilität.

5.7.1 Simulation der Wasserverteilung im Schlackekörper

Eingangsdaten für Massenbilanz

Um die Wasserspeicherung und die ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktion für die MV-Schlacke zu parametrisieren, wurde die Wasserspannungskurve (pF-WG-Beziehung) durch sukzessive Entwässerung einer zuvor gesättigten Schlackeprobe bei zunehmender Saugspannung ermittelt. An die Messwerte wurde die van Genuchten-Funktion [67, Gl. (4)] angepasst.

$$\Theta = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{\left[1 + (\alpha \cdot \Psi)^n\right]^{1-(1/n)}} \quad (4)$$

Θ : Wassergehalt [L^3L^{-3}] bei Wasserspannung Ψ [$ML^{-1}T^{-2}$]; Θ_r : Residualwassergehalt [L^3L^{-3}];
 Θ_s : Sättigungswassergehalt [L^3L^{-3}]; α : Formparameter [LT^2M^{-1}]; n : Formparameter [L^3L^{-3}]

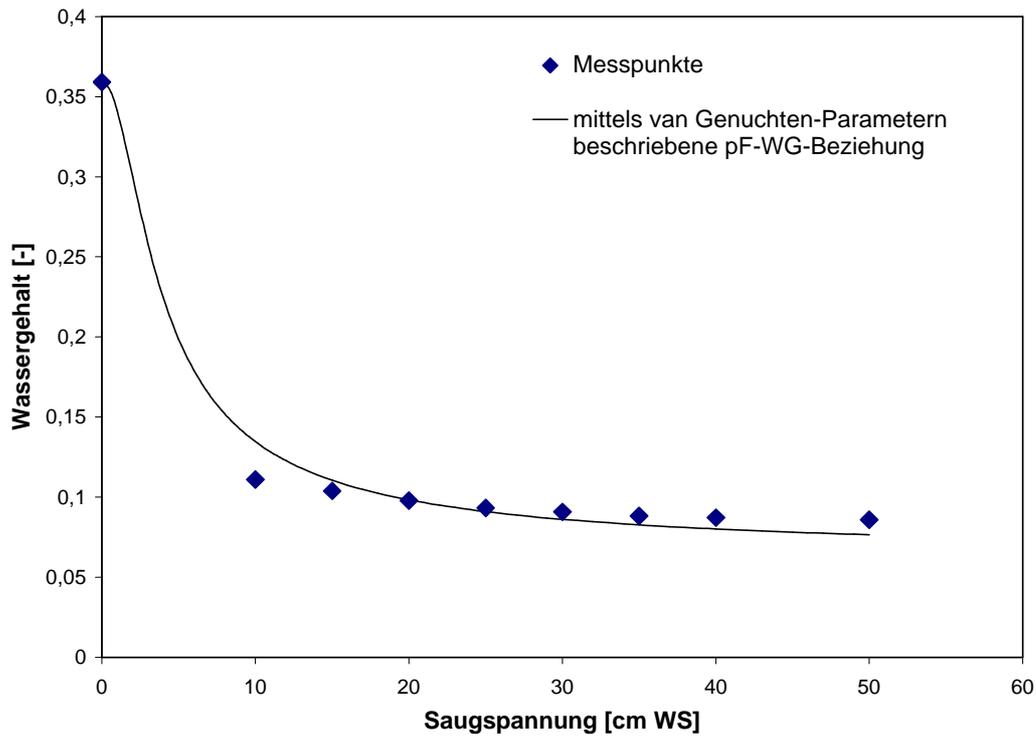


Abb. 30: Gemessene Wasserspannungskurve der eingesetzten MV-Schlacke und Anpassung durch die van Genuchten-Funktion

Eine Übersicht über die verwendeten Eingangsdaten zur Simulation des Wasserhaushalts gibt Tab. 23.

Tab. 23: Eingangsdaten zur Simulation der Wassergehaltsverteilung im Schlackekörper

Parameter	Einheit	Wert	
Höhe des Schlackefeldes	mm	1.500	
Ausgangswassergehalte im Schlackefeld zu Simulationsbeginn in einer Tiefe von	0 - 500 mm	%	14,8
	500 - 1.000 mm	%	15,4
	1.000 - 1.500 mm	%	15,1
van Genuchten-Parameter	Residualwassergehalt Θ_r	--	0,025
	Sättigungswassergehalt Θ_s	--	0,49
	Formparameter α	mm/(d ² mg)	0,0805
	n	--	2,059
gesättigte Leitfähigkeit	K_s	mm/d	$2,0736 \cdot 10^7$
Darcy-Geschwindigkeit (Infiltrationsrate)		mm/d	meteorologische Randbedingung
Bilanzzeitraum 150 Tage		--	29.10.01 - 27.03.02

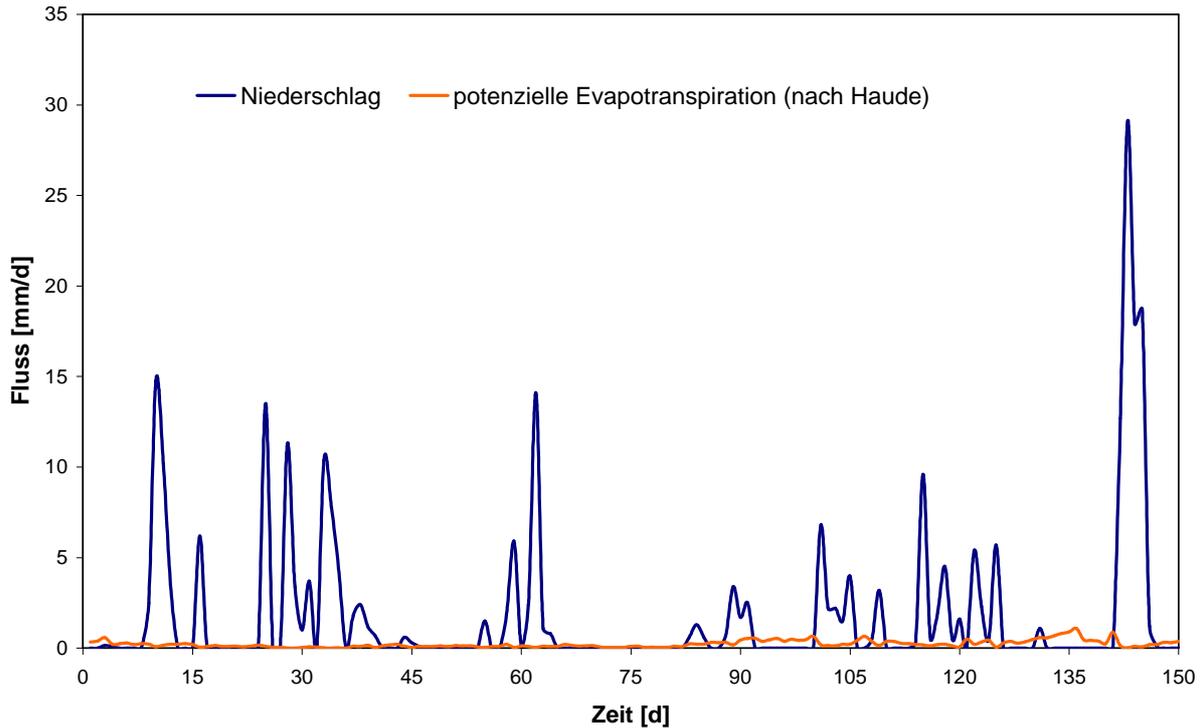


Abb. 31: Gemessene Niederschlagsmenge im Vergleich zur potenziellen Evapotranspiration an der Oberfläche des Schlackekörpers („obere“ Randbedingung für Simulation)

Unter der Annahme, dass sich die Oberfläche des Schlackekörpers bez. der Wasserflüsse zur Atmosphäre (Evaporation) wie eine Brachfläche verhält, wurde die potenzielle Evaporation für Brache nach Haude berechnet (vgl. Abb. 31). Die potenzielle Evapotranspiration ist die Verdunstung, die sich aus der Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre für Wasserdampf ohne Berücksichtigung der tatsächlich verfügbaren Wassermenge ergibt [68].

Die potenzielle Evapotranspiration wurde aus den Messdaten der Wetterstation nach Haude gemäß Gl. 5 berechnet.

$$ETP = f_i \cdot (e_s - e_a) \quad (5)$$

ETP: potenzielle Evapotranspiration [LT^{-1}]; f_i : Haude-Faktor (f_i (für Brache) = 0,1350 [LT^2M^{-1}]);
 e_s : Sättigungsdampfdruck um 14:00 Uhr [$MT^{-1}L^{-2}$]; e_a : aktueller Dampfdruck um 14:00 Uhr [$MT^{-1}L^{-2}$]

Die Abb. 31 zeigt, dass für den Simulationszeitraum (Winterhalbjahr) der Wasserfluss aus dem Schlackekörper an die Atmosphäre im Vergleich zu den Zuflüssen über den Niederschlag sehr gering ist.

Ergebnisse der Simulation und Vergleich mit Messdaten

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messdaten der Feuchtesensoren (TDR-Sonden) ist in Abb. 32 dargestellt.

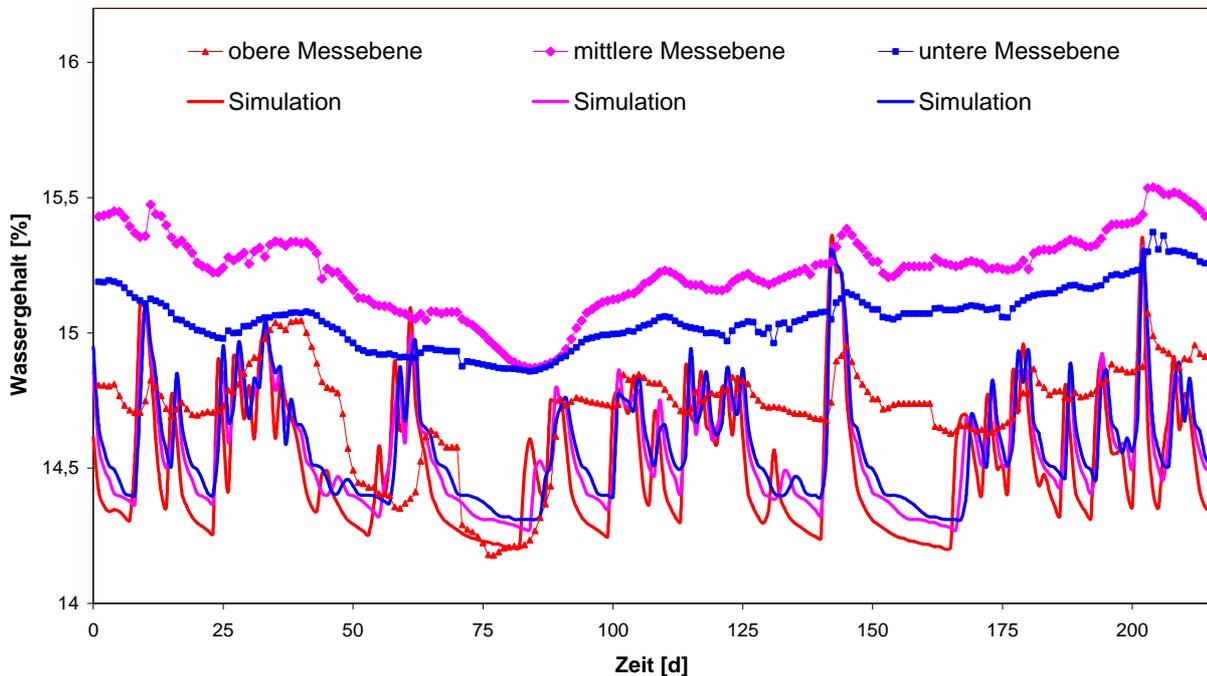


Abb. 32: Vergleich der Simulationsergebnisse ($K_s = 2,0736 \cdot 10^7$ mm/d) mit realen Messdaten

Die gesättigte Leitfähigkeit (K_s -Wert) der Schlacke bei Proctordichte liegt nach den Messungen des Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München in einem Bereich von $1,77 \cdot 10^3$ bis $2,34 \cdot 10^3$ mm/d.

Trotz der beim Versuchsaufbau angestrebten maximalen Einbaudichte mittels Rüttelplatte konnte die o.g. Proctordichte im Haufwerk nur zu 83 % erreicht werden. Dies entspricht aufgrund der Schwierigkeiten einer exakten Wassergehaltseinstellung vor Ort durchaus den praxisüblichen Bedingungen.

Aufgrund der sich aus der Kozeny-Gleichung [69] ergebenden Proportionalität der gesättigten Wasserleitfähigkeit zu Porosität und Porenform ($K_s \sim \epsilon^3 C$; C: Formfaktor) ist bei Verdichtung ein Rückgang der Wasserdurchlässigkeit um mehrere Größenordnungen möglich. Deshalb ist anzunehmen, dass die hydraulische Leitfähigkeit im Schlackefeld unter den bestehenden Einbaubedingungen deutlich höher liegt als die bei Proctordichte ermittelte.

Aus diesem Grund wurden die in die Simulation eingehenden K_s -Werte variiert. Bei einem K_s -Wert von $2 \cdot 10^7$ mm/d (vgl. Abb. 32) wurde mit Abweichungen von 1 % gegenüber den gemessenen Wassergehalten die beste Übereinstimmung erzielt. Mit dem gewählten Parametersatz war es darüber hinaus möglich, den zeitlichen Verlauf der Wassergehalte in der obersten Messebene (Wassergehaltzunahmen als Folge von Niederschlagsereignissen) befriedigend zu beschreiben.

Um die Simulation soweit wie möglich auf unabhängig bestimmte Koeffizienten zu stützen, wurde auf eine weitere Modellkalibrierung verzichtet. Somit zeigt die Abweichung zwischen den modellierten und gemessenen Wassergehaltsganglinien, dass bez. des Prozessverständnisses im Zusammenhang mit dem Wassertransport in Schlackekörpern derzeit noch Lücken bestehen.

5.7.2 Simulation des Wärmetransports im Schlackekörper

Eingangsdaten für Wärmebilanz

Die effektive Wärmeleitfähigkeit $\lambda(\Theta)$ des Haufwerks ist eine Funktion der Leitfähigkeit des Feststoffs und der Wasserphase. Aufgrund zeitvarianter Anteile dieser Phasen im Haufwerk (Wasserspeicherung) ist die Wärmeleitfähigkeit der Schüttung zeitabhängig (Koppelung von Wasser- und Wärmetransport). Die thermische (Ruh-)Leitfähigkeit λ_0 des porösen Mediums (Fest- und flüssige Phase) wurde nach Gl. (6) berechnet.

$$I_o(\Theta) = b_1 + b_2 \Theta + b_3 \Theta^{0,5} \quad (6)$$

b_1, b_2, b_3 : empirische Parameter [$\text{MLT}^{-3}\text{K}^{-1}$]; Θ : lokaler Wassergehalt [L^3L^{-3}]

Die effektive Wärmeleitfähigkeit wird unter Berücksichtigung der additiven Beiträge von Wasserströmung (Makrodispersivität) und thermischer (Ruh-)Leitfähigkeit [66] beschrieben.

$$I(\Theta) = I_o(\Theta) + \beta C_w q \quad (7)$$

λ_0 : thermische (Ruh-)Leitfähigkeit, β : thermische Dispersivität [L] ;
 C_w : volumetrische Wärmekapazität von Wasser [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}\text{K}^{-1}$];
 q : Darcy-Geschwindigkeit [LT^{-1}]

Die volumetrische Wärmekapazität C des Haufwerks in Gl. 2 wurde gem. Gl. (8) berechnet

$$C(\Theta) = C_n(1 - \Theta) + C_w \Theta \quad (8)$$

C : volumetrische Wärmekapazität [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}\text{K}^{-1}$]; Θ : Wassergehalt [L^3L^{-3}]
 C_n, C_w : volumetrische Wärmekapazität des Feststoffs und des Wassers [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}\text{K}^{-1}$]

Die Eingangsdaten zur Simulation des Wassertransportes wurden beibehalten und für den Wärmetransport um die in Tab. 24 aufgeführten Parameter ergänzt.

Tab. 24: Eingangsdaten zur Simulation des Wärmetransportes

Parameter		Einheit	Wert
Anteil der festen Phase (1 - e)		-	0,64
thermische Dispersivität	β	mm	50
Koeffizienten der thermischen Leitfähigkeitsfunktion	b_1	W/(m · K)	$2,4296 \cdot 10^{-4}$
	b_2	W/(m · K)	$3,93 \cdot 10^{-4}$
	b_3	W/(m · K)	$1,534 \cdot 10^{-3}$
volumetrische Wärmekapazität der festen Phase^{*)}	C_n	J/(m ³ · K)	1.933
volumetrische Wärmekapazität der Flüssigphase^{**)}	C_w	J/(m ³ · K)	4.191

^{*)} Wärmekapazität von Kiesbeton [70]

^{**)} Wärmekapazität von Wasser bei 20° C [70]

Als „obere“ Randbedingung wurde der gemessene Verlauf der Umgebungstemperatur vorgegeben (vgl. Abb. 33).

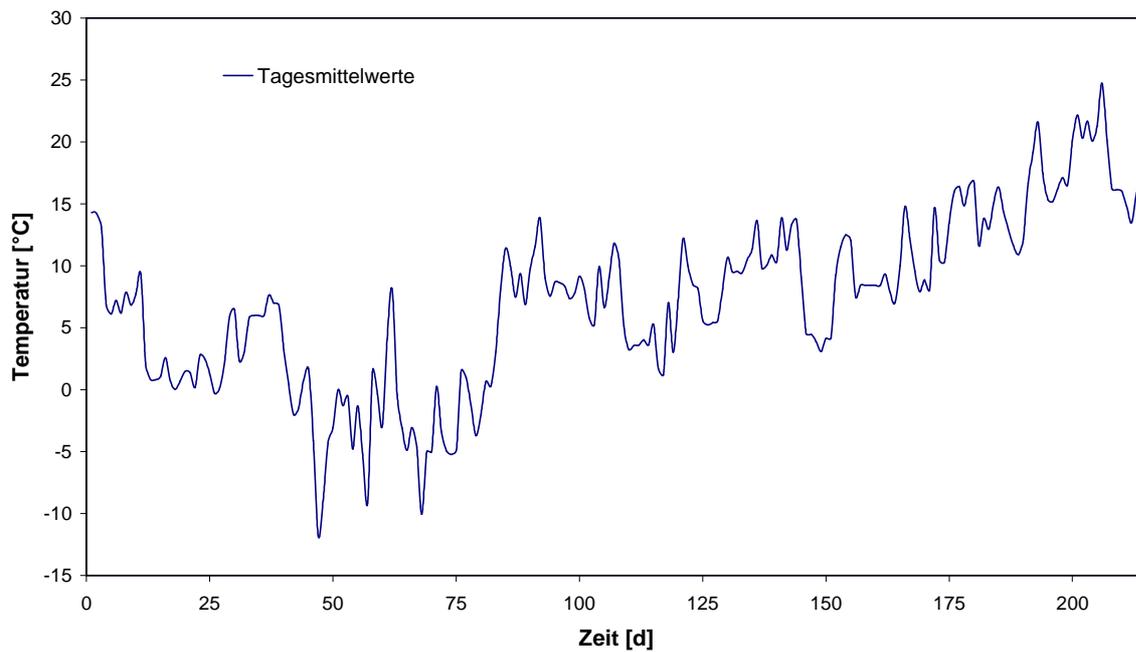


Abb. 33: Gemessene Umgebungstemperatur im Zeitraum vom 29. Oktober 2001 bis 31. Mai 2002

Ergebnisse der Simulation und Vergleich mit Messdaten

Die Simulationsergebnisse zum Wärmetransport sind in Abb. 34, dargestellt. Die Kurvenverläufe beziehen sich auf die eingebauten Temperatursonden in der oberen, mittleren und unteren Lage bzw. auf die Gitterpunkte.

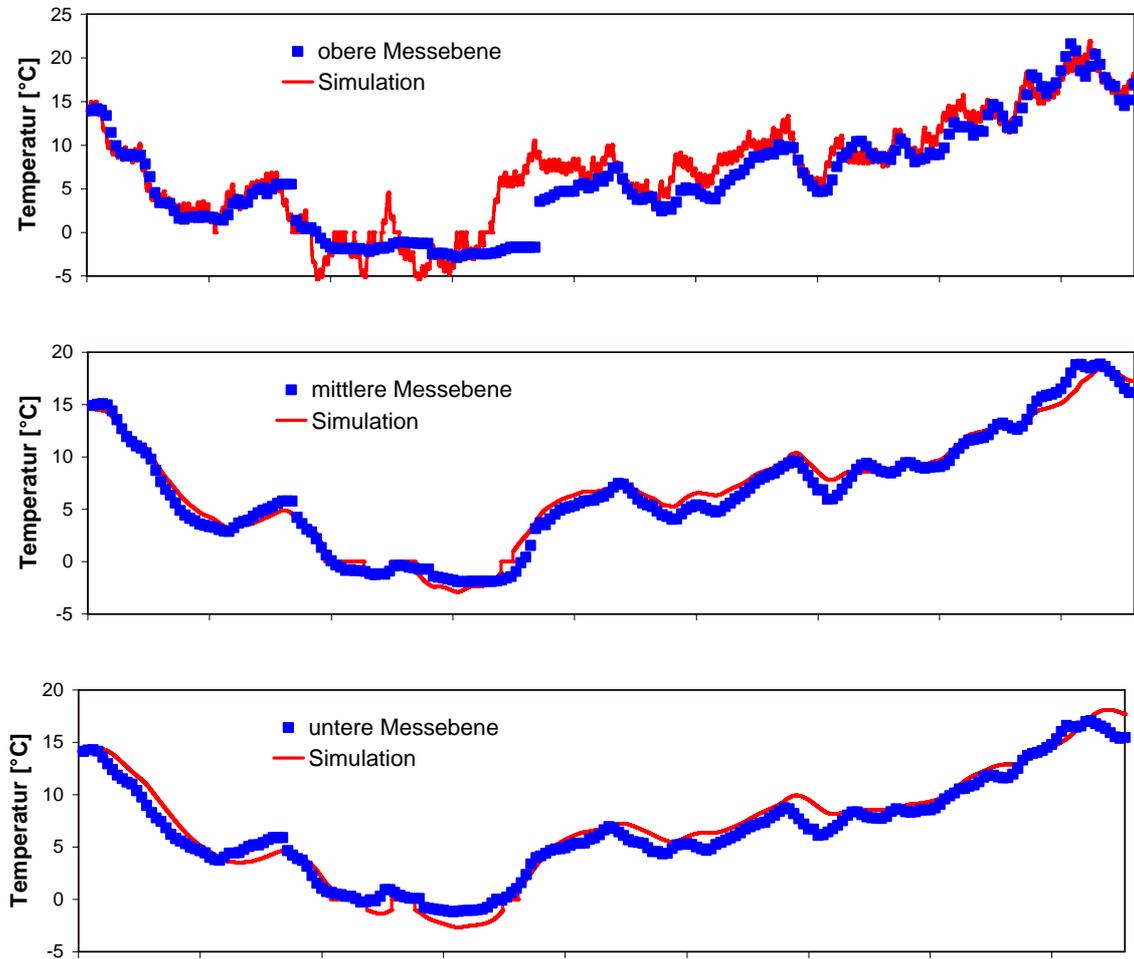


Abb. 34: Realer und simulierter Temperaturverlauf in der oberen, mittleren und unteren Messebene

Der Temperaturverlauf der Simulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den realen Daten. Somit wäre der Einsatz des vorhandenen Modells zur Vorhersage der Temperaturverteilung im Schlackekörper geeignet.

5.8 Luft-/Wasserverteilung im Porenraum von MV-Schlacke

In unserem Auftrag wurden am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen MV-Schlacken (Kornfraktion 0/8 mm) bei unterschiedlichen Wassergehalten und Verdichtungsgraden mit dem Röntgen-Computertomographie-Verfahren (CT) zerstörungsfrei untersucht.

Das Ziel der Untersuchungen war die Analyse der Veränderungen der Porenstruktur und der Porenanteile von Schlackeproben bei steigendem Verdichtungsgrad. Daneben wurde der mittels CT bestimmte Porenraum mit den rechnerischen Volumenanteilen aus Rein- und Rohdichten verglichen.

Dazu wurden von Becker [71] und Gallmeister [72] folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Verhalten bei Proctorverdichtung nach DIN 18 127 [73],
- Aufnahme von Computer-Tomogrammen von je fünf Prüfkörpern aus den Proctorversuchen und einem Einzelkorn der Schlacke-Grobfraktion.

Im Mittelpunkt der Auswertung standen die

- Visualisierung der Poren- und Aggregatstruktur der proctorverdichteten Schlacke in einzelnen Schichtebenen,
- dreidimensionale Darstellung der Porenstruktur,
- Berechnung des prozentualen Porenanteils der Prüfkörper und die
- Ermittlung der Porengrößenverteilung.

5.8.1 Vorgehensweise

Miniatur-Proctorgerät

Für die CT-Untersuchungen sind Probenkörper von max. 40 mm Durchmesser erforderlich. Die sonst übliche Präparation, z.B. durch Herausstechen oder Abschälen der Proben, ist bei MV-Schlacke nicht möglich. Deshalb wurde ein Miniatur-Proctorgerät zur Herstellung der Prüfkörper entwickelt [71].

Das Proctorgerät nach DIN 18 127 wurde so verkleinert, dass technisch verdichtete Prüfkörper in einer CT-geeigneten Größe (Höhe: 60 mm; Durchmesser: 36 mm) hergestellt werden konnten. Um die Prüfkörper ohne weiteren Bearbeitungsschritt in den Computertomographen einbauen zu können, wird in den Miniatur-Proctortopf ein Kunststoffzylinder eingesetzt und die Schlacke darin verdichtet. Der Zylinder von 32 mm Durchmesser und 57 mm Höhe wurde mit der präparierten Probe direkt in das CT-Gerät eingebaut. Die Kalibrierung und stichprobenartige Überprüfung der Messwerte des Miniatur-Proctorgeräts erfolgte anhand von Proctorversuchen nach DIN 18 127.

Proctorversuche

Zur Ermittlung der Proctordichte wurden insgesamt 5 Versuchsreihen à 5 bzw. 6 Wassergehaltsstufen (Wassergehaltsinkremente zwischen 1 und 3 Mass.-%) durchgeführt. Hierbei wurde zunächst das gut durchmischte Probenmaterial (ca. 2.000 g) gleichmäßig durchfeuchtet. Nach einer Einwirkzeit von 10 Minuten wurde der DIN-Proctortopf in drei Lagen befüllt, verdichtet und gewogen. Aliquots der Probenmischung wurden zur Durchführung der Miniatur-Proctorversuche verwendet.

Die Ergebnisse der Proctorversuche nach DIN sind in Tab. 25 aufgeführt. Die Wassergehalte bei Proctordichte schwanken zwischen 23,3 und 27,3 Mass.-%, die dazugehörigen Dichten sind mit Werten zwischen 1,36 und 1,57 g/cm³ als relativ gering einzustufen und liegen in etwa im Bereich der in den Freiflächenversuchen erzielten Schüttdichten.

Tab. 25: Ergebnisse der Proctorversuchsreihen

	Reihe 1	Reihe 2	Reihe 3	Reihe 4	Reihe 5
Wassergehalt [Mass.-%]	27,3	23,3	23,7	24,7	24,5
Proctordichte [g/cm³]	1,41	1,39	1,36	1,53	1,57

Computer-Tomographie

Mit der Röntgen-Computertomographie werden die inneren Strukturen dreidimensionaler Objekte sichtbar. Dazu wird die Probe in verschiedenen Höhen über den gesamten Winkelbereich gescannt. Aus den detektierten Strahlungsintensitäten wird das Tomogramm berechnet. Diese zweidimensionalen Schichtbilder zeigen je nach Dichteverteilung im Probeninneren unterschiedliche Grauwertbereiche. Hierbei ist die Grauwertskala umgekehrt proportional zur Dichte. Mit einer entsprechenden Software können Grauwertbereiche für Volumenelemente bis zu einer Kantenlänge von 0,1 mm aufgelöst und die Porengrößenverteilung berechnet werden. Diese Auflösung erfasst bez. des Feststoffanteils anteilig die Sandfraktion (0,063 bis 2 mm) sowie die Wasser- und Luftanteile in weiten Grobporen (> 0,05 mm). Innerhalb dieser Grenzen besteht die Möglichkeit, die räumliche Orientierung von Porenstrukturen zu visualisieren.

5.8.2 Luft-/Wasserverteilung im Kornverband

Die CT-Untersuchungen erfolgten im Anschluss an die Präparation der Proctor-Proben. Die Prüfkörper wurden in 54 Ebenen in einem Abstand von 1 mm mit einem Fächerstrahl alle 1° 4' 17" gescannt und einer Grauwertanalyse auf einer Skala von 0 bis 60 Einheiten unterworfen.

Tab. 26: Mit CT bestimmte sowie aus Kenndaten ermittelte Porenraumanteile der Proben aus den Proctorversuchen Reihe 4 und 5 bezogen auf das Gesamtvolumen. Die grau hinterlegten Daten markieren jeweils die Versuche, bei denen die Proctordichte erzielt wurde (vgl. Tab. 25)

Versuch	mittlere Volumenanteile gem. CT [%]				Kennwerte der Schüttung		Volumenanteile berechnet aus Dichte und Wassergehalt [%]			
	Wasser	Luft	Luft/Wasser	gesamt	Wassergehalt [Mass.-%]	Dichte [g/cm ³]	Wasser	Luft	gesamt	
4	V1	22,2	1,2	8,7	32,1	20,6	1,33	27,4	25,6	53,0
	V2	22,3	1,6	9,9	33,8	21,1	1,34	28,3	24,3	52,6
	V3	20,6	1,6	9,3	31,5	22,2	1,36	30,2	21,7	51,9
	V4	18,1	1,7	7,5	27,3	24,8	1,38	34,2	17,0	51,2
5	V1	27,1	0,6	7,4	35,1	17,7	1,33	23,5	29,5	53,0
	V2	22,1	0,8	7,8	30,7	21,8	1,32	28,8	25,5	53,3
	V3	23,9	0,7	7,1	31,7	22,6	1,33	30,1	22,9	53,0
	V4	17,9	1,9	8,9	28,7	23,3	1,36	31,7	20,2	51,9
	V5	22,7	0,9	7,6	31,2	23,9	1,36	32,5	19,4	51,9
	V6	22,8	0,6	6,3	29,7	25,9	1,34	34,7	17,9	52,6

Bis zum Erreichen der Proctordichte nahm das Gesamtporenvolumen (Graustufeneinheiten 2 bis 16) von 32 % auf 31,5 % bzw. von 35,1 % auf minimal 29,7 % ab (Tab. 26).

Obwohl Aliquots des gleichen Schlackeprobe in den Proctortopf eingebaut wurden, zeigen insbesondere die mit CT ermittelten Porenanteile von Reihe 5 eine deutliche Streuung, die eine signifikante Veränderung der luft-, luft/wasser - und wassergefüllten Porenbereiche nicht erkennen lässt. Für die aus Dichten und Wassergehalten ermittelten Porenanteile ergibt sich bei allen Versuchsreihen ein ausgeprägter Trend zu wachsenden Anteilen wassergefüllter und rückläufigen Anteilen luftgefüllter Poren mit zunehmender Verdichtung. Dieser gegensätzliche Befund zeigt, dass sich die Veränderungen der Porenraumanteile vorwiegend im Meso- und Mikroporenbereich (mit CT nicht abbildbar) abspielen.

Die Kalibrierung der Grauwertzuordnung wurde mittels Luft, Wasser sowie eines trockenen Prüfkörpers vorgenommen. Für den mit Luft gefüllten Zylinder ergeben sich Grauwerte von 0 bis 9, für den mit Wasser gefüllten Werte von 6 bis 16 und für den trockenen Prüfkörper Werte von 0 bis 12 Einheiten. Zur Vermeidung von Artefakten wurde der Graustufenbereich von 0 bis 2 Einheiten ausgeblendet.

Aus der Grauwertanalyse wurden die Anteile von Poren ($\geq 0,1$ mm) schichtweise quantifiziert und in luft-, luft/wasser- und vollständig wassergefüllte Poren klassifiziert (vgl. Abb. 36). Die Volumenanteile der einzelnen Porenklassen wurden durch Mittelung der überlappenden Grauwertbereiche erhalten.

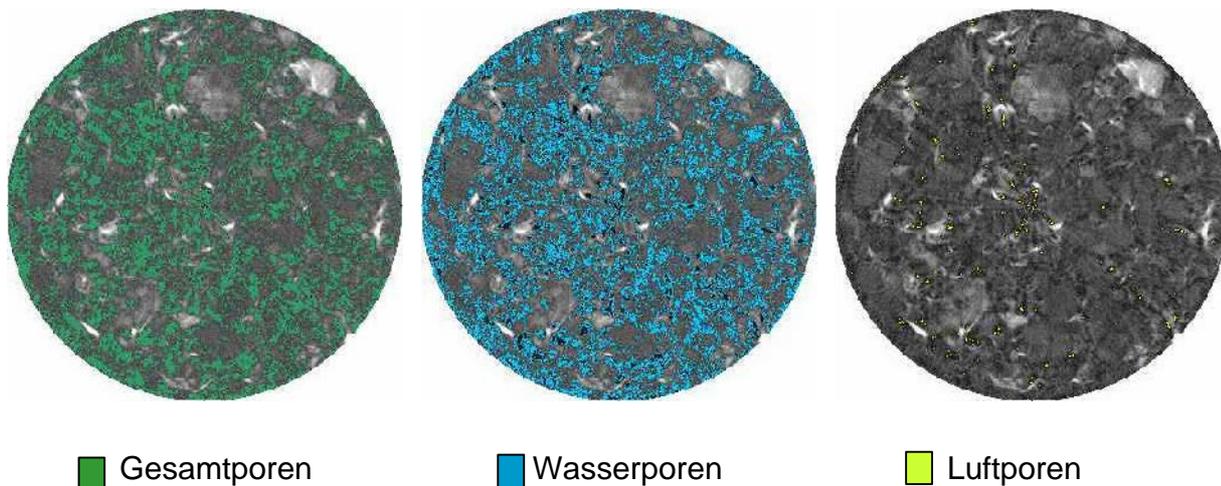


Abb. 35: Visualisierung der mittels CT bestimmten Gesamt-, Wasser- und Luftporen bei Proctordichte {Versuch 5 (V5)}

In Abb. 36 sind beispielhaft die Porenraumanteile der einzelnen Scanebenen (x-Achse) bei Proctordichte dargestellt. Man erkennt deutlich den schichtweisen Aufbau des Probenkörpers in Folge der schrittweisen Verdichtung. Diese Diskontinuitäten belegen, dass der zu verdichtende Schlackekörper sich bei Belastung nicht wie ein elastischer Körper verhält, sondern ein komplexes rheologisches Verhalten besitzt. Dieses Phänomen wird an der Verteilung der luft- und wassergefüllten Poren deutlich und ist ebenfalls in der Visualisierung der dreidimensionalen Porenverteilung (Abb. 37) zu erkennen.

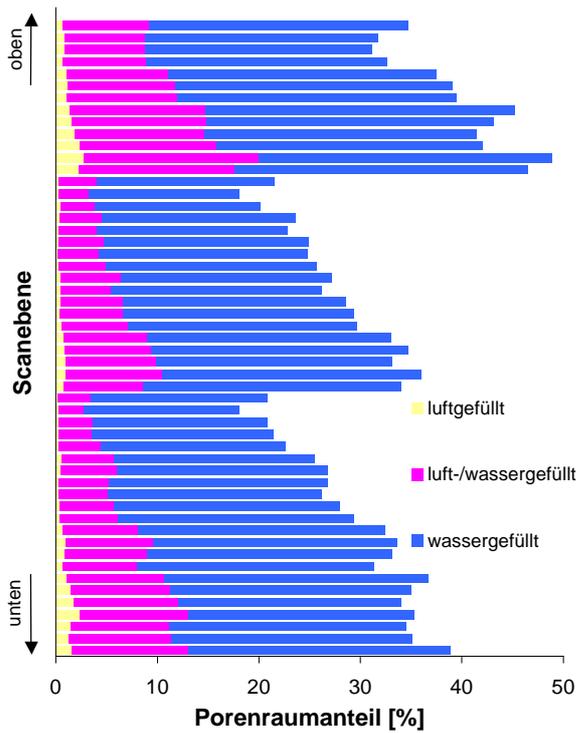


Abb. 36: Mittels CT bestimmte Verteilung der Porenraumanteile Luft, Luft/Wasser und Wasser bei Proctordichte {Reihe 5 (V5)} entlang des zylindrischen Prüfkörpers



Abb. 37: Zweidimensionale Darstellung der dreidimensionalen Luftporenverteilung im Prüfkörper bei Proctordichte {Reihe 5 (V5)}

5.8.3 Luft-/Wasserverteilung im Einzelkorn

Ein Großkorn der MV-Schlacke mit Kantenlängen von 3 x 3,5 x 2,8 cm³ wurde bei unterschiedlicher Wassersättigung in vier Schritten mit Hilfe der CT analysiert.

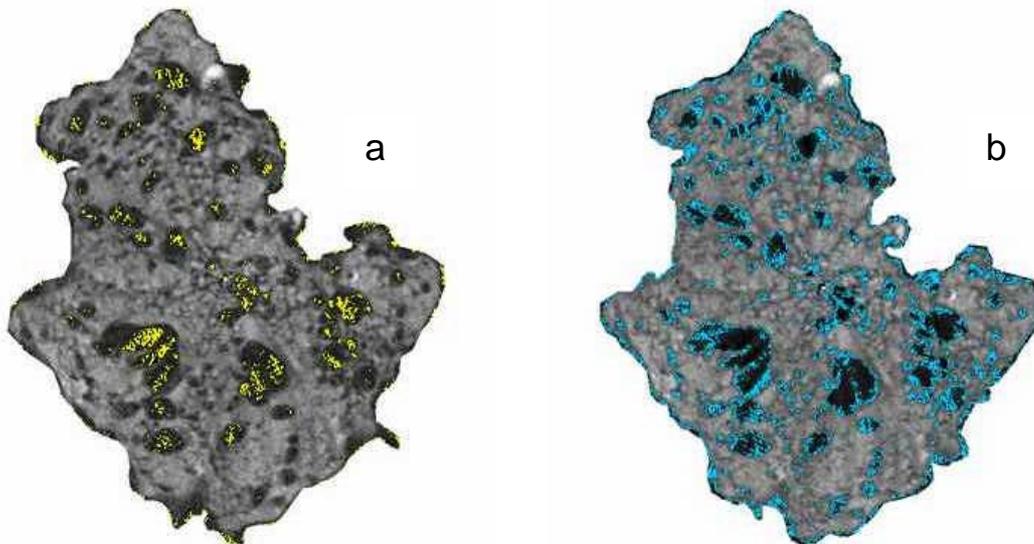


Abb. 38: Luft- {(a) gelb eingefärbt)} und wassergefüllte {(b) blau eingefärbt)} Bereiche in einem MV-Schlackekorn nach 88 Stunden Verweilzeit im Wasserbad

Hierzu wurde das Großkorn nach unterschiedlichen Verweilzeiten im Wasserbad (1, 17 und 88 h) gescannt. Für die CT-Analyse wurde das Großkorn in dem o.g. Kunststoffzylinder fixiert. Die das unregelmäßig geformte Korn umgebende Luft führt zu einer Überschätzung des Luftporenraums der Probe. Daher ist nur eine halbquantitative Auswertung dieser Versuchsreihe möglich.

Die luft- und wassergefüllten Bereiche des Großkorns nach einer Verweilzeit von 88 h im Wasserbad sind in Abb. 38 wiedergegeben. Es zeigt sich, dass insgesamt während des Versuchs Wasser im einstelligen Prozentbereich aufgenommen wurde. Aufgrund eines relativ hohen geschlossenenporigen Anteils bleiben wesentliche Volumenanteile mit Luft gefüllt bzw. sind nur von einem Haftwasserfilm umgeben. Daher wurde nach 88 h Verweilzeit im Wasserbad ein Wassergehalt von lediglich 6,1 Mass.-% erreicht. Die Wasseraufnahme erfolgte überwiegend innerhalb der ersten Stunden, wobei der Maximalwert zu $\frac{3}{4}$ erreicht wurde. Während der Benetzung des Kornes beim Eintauchen in die Flüssigkeit wirken bei Vernachlässigung des hydrostatischen Drucks die unterschiedlichen Beiträge von Grenzflächen-, Kapillar- sowie Adhäsions- und Kohäsionskräften. Die rasche Annäherung an den Maximalwassergehalt zeigt, dass das treibende Gefälle aus den genannten Potenzialkräften erschöpft ist.

Im Hinblick auf den Stoffübergang fest-flüssig bedeutet die insgesamt geringe Wasseraufnahme, dass selbst unter Submersionsbedingungen nur ein geringer Teil der gesamten Feststoffoberfläche im direkten Austausch mit der flüssigen Phase steht. Dies ist konsistent mit der im Zuge der Auslaugung beobachteten Koexistenz spontaner und zeitabhängiger Stoffübergänge.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz:
Abfallwirtschaft - Hausmüll in Bayern - Bilanzen 2000. Augsburg, 2001
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau:
ZTVT-StB 94, Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, 1997
- [3] Knorr, W.; Hentschel, B.; Marb, C.; Schädel, S.; Swerev, M.; Vierle, O.; Lay, J.-P.:
Rückstände aus der Müllverbrennung - Chancen für eine stoffliche Verwertung von Aschen und Schlacken. Initiativen zum Umweltschutz 13. Hrsg.: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1999
- [4] Thomé-Kozmiensky, K.J.:
Thermische Abfallbehandlung. 2. Auflage,
EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik,
Berlin, 1994, 1081 S.
- [5] Lichtensteiger, T.:
Müllschlacken aus petrologischer Sicht.
Geowissenschaften 14 (1996), S. 173 - 179
- [6] Reimann, D.O.:
Menge, Beschaffenheit und Verwertungsmöglichkeiten von MV-Schlacke - Gesamtübersicht.
In: Beihefte zu Müll und Abfall 31 (1994), S. 30 - 37
- [7] Schneider, J.; Pfrang-Stotz, G.; Kössel, H.:
Charakterisierung von MV-Schlacken.
In: Beihefte zu Müll und Abfall 31 (1994), S. 38 - 43
- [8] Klein, R.; Speiser, C.; Baumann, T.; Niessner, R.:
Exothermer Stoffumsatz in MVA-Schlackedeponien.
Abschlussbericht, Lehrstuhl für Hydrochemie, Hydrogeologie und Umweltanalytik, TU München, 1999
- [9] Pfrang-Stotz, G.; Schneider, J.:
Comparative studies of waste incineration bottom ashes from various grate and firing systems, conducted with respect to mineralogical and geochemical methods of examination.
Waste Management & Research 13 (1995), S. 273 - 292
- [10] Speiser, C.:
Exothermer Stoffumsatz in MVA-Schlackedeponien: Mineralogische und Geochemische Charakterisierung von Müllverbrennungsschlacken, Stoff- und Wärmebilanz.
Dissertation, Lehrstuhl für Hydrochemie, Hydrogeologie und Umweltanalytik, TU München, 2001
- [11] Kirby, C.S.; Rimstidt, J.D.:
Mineralogy and surface properties of municipal solid waste ash.
Environ. Sci. Technol. 27 (1993), S. 652 - 660
- [12] Schneider, J.; Pfrang-Stotz, G.; Kössel, H.:
Charakterisierung von MV-Schlacken.
In: Beihefte zu Müll und Abfall 31 (1994), S. 38 - 43
- [13] Mamet, C.:
Mineralogische Phasenuntersuchung und Bewertung von naßchemischen und röntgenspektrometrischen Analysen am Beispiel von Hausmüllverbrennungsschlacken.
Diplomarbeit, Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre, RWTH Aachen, 1991
- [14] Johnson, A.:
Das Langzeitverhalten von Müllschlacke im Hinblick auf die Mobilität von Schwermetallen und Salzen.
In: Beihefte zu Müll und Abfall 31 (1994), S. 92 - 95
- [15] Reichelt, J.:
Mineralogische Aspekte bautechnischer und umweltrelevanter Eigenschaften von Müllverbrennungsschlacken.
Dissertation, Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Heft 47, 1996

- [16] Lichtensteiger, T.; Zeltner, C.:
Petrographische Eigenschaften/Langzeitverhalten.
In: Emissionsabschätzung für Kehrichtschlacke (Projekt EKESA). Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kt. Zürich, Zürich, 1992, S. 27 - 41 u. S. 94 - 102
- [17] Bambauer, H.U.; Gebhard, G.; Holzapfel, Th.; Krause, Ch.; Willner, G.:
Schadstoffimmobilisierung in Stabilisaten aus Braunkohleaschen und REA-Produkten, I.: Mineralreaktionen und Gefügeentwicklung; Chlorid-Fixierung.
Fortschr. Miner. 66 (1988), S. 253 - 279
- [18] Kersten, M.:
Emissionspotential einer Schlackenmonodeponie/Schwermetalle im Sickerwasser von Müllverbrennungsschlacken - ein langfristiges Umweltgefährdungspotential.
Geowissenschaften 14 (1996), S. 180 - 185
- [19] Neubauer, J.:
Realisierung des Deponiekonzeptes der „Inneren Barriere“ für Rauchgasreinigungsrückstände aus Müllverbrennungsanlagen.
Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1992
- [20] Auer, S.:
Bindung umweltrelevanter Ionen in Ettringit und in Schichtstrukturen vom Typus TCAH.
Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1992.
- [21] Ghorab, H.J.:
Thermische und chemische Stabilität der Calciumaluminatsulfathydrate.
Dissertation, Fakultät für Bergbau und Hüttenwesen, RWTH Aachen, 1979
- [22] Belevi, H.; Stämpfli, D.M.; Baccini, P.:
Chemical behaviour of municipal solid waste incineration bottom ash in monofills.
Waste Management & Research 10 (1992), S. 153 - 167
- [23] Kräuchi, P.; Olschewski, A.; Gubler, A.; Lichtensteiger, T.:
Müllverbrennungsschlacke als Wegbaumaterial: Schadstoffauswaschung aus Forstwegen.
Wasser und Boden 11 (1995), S. 49 - 53
- [24] Meima, J.A.; Comans, R.N.J.S.:
The leaching of trace elements from municipal solid waste incinerator bottom ash at different stages of weathering.
Applied Geochemistry 14 (1999), S. 159 - 171
- [25] Johnson, A.; Lichtensteiger, T.:
Chemische und petrographische Eigenschaften von Kehrichtschlacken: Wie stabil sind Kehrichtschlacken.
In: EAWAG Jahresbericht, Dübendorf, Schweiz, 1991, S. 27 - 28
- [26] Lahl, U.; Struth, R.:
Verwertung von Müllverbrennungsschlacken aus der Sicht des Grundwasserschutzes.
Vom Wasser 80 (1993), S. 341 - 355
- [27] Hentschel, B.:
Vergleichende mineralogische und chemische Untersuchungen an Rostschlacken aus Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung - Alterungsverhalten und Einfluss der Anlagebetriebsweise.
Dissertation, RWTH Aachen, 1998
- [28] DIN 38 414 Teil 4: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Schlamm und Sedimente (Gruppe S): Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4), Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: Oktober 1984
- [29] Hirschmann, G.; Förstner, U.:
Langfristiges Deponieverhalten von Müllverbrennungsschlacken.
Verbundvorhaben Deponiekörper, bmb+f Projekträgerschaft Abfallwirtschaft und Altlastensanierung im Umweltbundesamt, Berlin,
Tagungsband zum 2. Statusseminar am 4. und 5. Februar 1997 in Wuppertal
- [30] Johnson, C.A.; Brandenberger, S.; Baccini, P.:
Acid neutralizing capacity of municipal waste incinerator bottom ash.
Environ. Sci. Technol. 29 (1995), S. 142 - 147

- [31] Pfrang-Stotz, G.; Reichelt, J.:
Müllverbrennungsschlacken - Mineralogie, Elutionsverhalten und technische Eigenschaften.
Baustoff Recycling & Deponietechnik 2 (1996), S. 5 - 8
- [32] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau:
TL Min-StB 2000 Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau.
FGSV Verlag, Köln, FGSV-Nr. 613, 2000
- [33] Johnke, B.:
Schlackeverwertung und -entsorgung unter Beachtung der Vorgaben gesetzlicher und technischer Regelungen.
In: Beihefte zu Müll und Abfall 31 (1994), S. 200 - 205
- [34] Krass, K.; Pitschak, S.:
Stoffliche und bautechnische Charakterisierung von Wirbelschichtaschen für den Einsatz in hydraulisch gebundenen Schichten im Straßenbau.
VGB Kraftwerkstechnik 77 (1997), S. 230 - 235
- [35] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Sonderaufgaben:
ZTVT-StB 95, Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau.
FGSV Verlag, Köln, FGSV-Nr: 999, 1998
- [36] Kluge, G.; Saalfeld, H.; Dannecker, W.:
Untersuchungen des Langzeitverhaltens von Müllverbrennungsschlacken beim Einsatz im Straßenbau.
Forschungsbericht 103 03 006, Umweltbundesamt, Berlin, 1979
- [37] Kurth, N.:
Erfahrungen beim Einsatz von Müllverbrennungsschlacke und Recyclingprodukten im Straßen- und Wegebau.
Straße und Autobahn 4 (1985), S. 154 - 158
- [38] Tillmanns, W.:
Bauwerksschäden infolge Verwendung von Hausmüllverbrennungsschlacke (HMV-Asche) am Beispiel von zwei Gewerbeobjekten im Raum Köln.
Workshop Verbrennungsrückstände der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, 2000, S. 115 - 121
- [39] LAGA:
Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall Nr. 19: Merkblatt über die Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle vom 1. März 1994.
Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1994
- [40] Anonym:
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG), BGBl. I (1994), S. 2705
- [41] Anonym:
TA Siedlungsabfall: Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall), Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14. Mai 1993, BAnz. Nr. 99a
- [42] LAGA:
Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall Nr. 20/1: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln vom 1. März 1994.
Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1994
- [43] Johnson, C.A.; Brandenberger, S.; Baccini, P.:
Acid neutralizing capacity of municipal waste incinerator bottom ash.
Environ. Sci. Technol. 29 (1995), S. 142 - 147
- [44] Lahl, U.:
Verwertung von MVA-Schlacken durch Optimierung konventioneller Aufbereitung, Teil II.
Müll und Abfall 9 (1992), S. 619 - 633
- [45] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau:
Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau, Müllverbrennungsschlacke (MV-Asche), 1986
- [46] Homepage des Bayerischen Geologischen Landesamts:
http://www.geologie.bayern.de/shop/gla4_1_1.asp

- [47] Hentschel, B.; Launer, M.; Gebser, V.:
Verwertung von Rostschlacken aus der thermischen Abfallbehandlung im Rahmen von Bauvorhaben: geotechnische und umweltrelevante Eigenschaften des Schlackekörpers unter den in der Verwertungspraxis gängigen Einbaubedingungen, Zwischenbericht zum 1.11.2000.
Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Abfalltechnikum Augsburg, Augsburg 2000
- [48] DIN 38 414 Teil 2 (1985): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Schlamm und Sedimente (Gruppe S):
Bestimmung des Wassergehaltes und des Trockenrückstandes bzw. der Trockensubstanz (S 2).
Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: November 1985
- [49] DIN 18 123: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben: Bestimmung der Korngrößenverteilung.
Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: November 1996
- [50] DIN 38 414 Teil 3 (1985): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Schlamm und Sedimente (Gruppe S):
Bestimmung des Glührückstandes und des Glührverlustes der Trockenmasse eines Schlammes (S 3).
Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: November 1985
- [51] Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung - AbfAbIV) vom 20. Februar 2001.
BGBl I (2001), S. 305
- [52] DIN 18 196: Erd- und Grundbau, Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.
Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: Januar 1988
- [53] DIN 38 414 Teil 7 (1983): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Schlamm und Sedimente (Gruppe S): Aufschluß mit Königswasser zur nachfolgenden Bestimmung des säurelöslichen Anteils von Metallen (S 7), Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: Januar 1983
- [54] DIN 38 404 Teil 5 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C):
Bestimmung des pH-Wertes (C 5).
Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: Januar 1984
- [55] DIN 38 404 Teil 8 (1985): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C):
Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (C 8).
Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: September 1985
- [56] DIN 38 409 Teil 1 (1987): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H):
Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtrationstrockenrückstandes und des Glührückstandes (H 1).
Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: Januar 1987
- [57] DIN EN ISO 10304-1: Wasserbeschaffenheit:
Bestimmung der gelösten Anionen Fluorid, Chlorid, Nitrit, Orthophosphat, Bromid, Nitrat und Sulfat mittels Ionenchromatographie.
Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: April 1995
- [58] DIN 38 404 Teil 6:
Bestimmung der Redoxspannung.
Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: April 1984
- [59] DIN 66 131 (1993): Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach Brunauer, Emmett und Teller (BET), Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: Juli 1993
- [60] Floss, R.:
Kommentar zu Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. ZTVE-StB 94. Kirschbaum Verlag, Bonn, 1997
- [61] Homepage des Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft:
http://www.bayern.de/lfw/daten/zahlen/k_zahlen.htm
- [62] Scheffer, F.; Schachtschabel, P.:
Lehrbuch der Bodenkunde.
Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1998, 494 S.

- [63] Marb, C.; Müller, S.; Weigand, H.; Argut, I.; Glögle, R.:
Auslaugverhalten von Reststoffen und kontaminierten Böden, Zwischenbericht zum 31.12.2001.
Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Josef-Vogl-Technikum, Augsburg 2002
- [64] Guggenberger, G.:
Eigenschaften und Dynamik gelöster organischer Substanzen (DOM) auf unterschiedlich immissionsbe-
lasteten Fichtenstandorten.
Bayreuther Bodenkundliche Berichte, 26 (1992) 164 S.
- [65] Dijkstra, J.; Comans, R.:
Reactive Transport Modelling of Organic Leaching in Column Tests: „A Priori“ Predication of Release Ra-
tes Based on Material Properties.
Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Proceedings of the 1st International Workshop on Groundwater
Risk Assessment at Contaminated Sites, GRACOS, TGA C61, 2002, S. 24 - 31
- [66] Šimunek, J.; Sejna, M.; van Genuchten, M.Th.:
The Hydrus-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and mu-
ltiple solutes in variably-saturated media. Version 2.0. User's manual.
U.S. Salinity Laboratory [Hrsg.], Riverside, 1999, 235 S.
- [67] Van Genuchten, M.Th.:
A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.
Soil Sci. Soc. Am. J. 44 (1980), S. 892 - 898
- [68] Hölting, B.:
Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie.
Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1980, 439 S.
- [69] Kutilek, M.; Nielsen, D.R.:
Soil Hydrology.
Catena Verlag, Cremlingen, 1994, 370 S.
- [70] Grigull, U.; Sandner, H.:
Wärmeleitung.
Springer Verlag, Berlin, 1979, 158 S.
- [71] Becker, C.:
Untersuchung der Porenstruktur von Müllverbrennungsschlacke mit der Röntgen-
Computertomographie.
Bericht (unveröff.) des Lehrstuhls für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen, an das Bay-
erische Landesamt für Umweltschutz, 2000
- [72] Gallmeister, K.:
Untersuchung von Müllverbrennungsschlacke mittels Röntgen-Computertomographie.
Bericht (unveröff.) des Lehrstuhls für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen, an das Bay-
erische Landesamt für Umweltschutz, 2002
- [73] DIN 18 127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Proctorversuch.
Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: November 1990