



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7025

**Einfluss geänderter Stoffströme
in der Abfallwirtschaft auf die
zukünftige Qualität und die
Verwertungsmöglichkeiten von
Müllverbrennungsschlacken**

G. Pfrang-Stotz, J. Reichelt
Institut für Technische Chemie

Januar 2005

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7025

Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft
auf die zukünftige Qualität und die
Verwertungsmöglichkeiten
von Müllverbrennungsschlacken

G. Pfrang-Stotz, J. Reichelt*

Institut für Technische Chemie

*Universität Karlsruhe,
Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
2005

Auftraggeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung
Forschungszentrum Jülich GmbH
PT Jülich-Außenstelle Berlin

Als Manuskript gedruckt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-070256

KURZFASSUNG

Da der Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von MV-Schlacken bisher weitgehend unbekannt war, wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes in 10 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik während des regulären Betriebes jeweils zwei Wochen anlagenspezifische Müllfraktionen in den Verbrennungsraum eingebracht und thermisch behandelt.

Zusätzlich wurden in drei Müllverbrennungsanlagen Mehrfachversuche mit unterschiedlichen Müllfraktionen durchgeführt, um den Einfluss eines wechselnden Müllinputs bei gleicher Verfahrenstechnik auf die MV-Schlackenqualität untersuchen zu können. In drei weiteren Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik wurden die frisch produzierten MV-Rohschlacken jeweils zwei Wochen permanent beprobt, um den kurzfristigen Einfluss des Müllinputs auf die MV-Schlackenqualität bestimmen zu können.

Eine Korrelation zwischen Müllzusammensetzung und den resultierenden mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften der MV-Schlacken führte zu folgenden Ergebnissen:

- Ein gleichbleibender Müllinput hat bei einer konstanten Fahrweise der Müllverbrennungsanlage einen homogenen Mineralbestand in den MV-Rohschlacken zur Folge.
- Kurzzeitige Schwankungen im Müllinput spiegeln sich in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der beprobten MV-Rohschlacken wider, wobei die Änderungen im Müllinput besonders deutlich in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Feinfraktion zum Ausdruck kommen, in der die für das Alterationsverhalten maßgeblichen Mineralphasen angereichert sind und damit die notwendige Ablagerungszeit bis zu einem bautechnischen Einsatz der MV-Schlacken steuert.
- Die thermische Behandlung der großen Müllfraktionen Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall und Gewerbeabfall führen zu vergleichbaren MV-Rohschlacken, während eine Mitverbrennung von Sonderfraktionen, wie z.B. Tiermehl und Sperrmüll, eine stärkere Auswirkung auf die Bildung der MV-Rohschlacken zeigt, die sich in einer unterschiedlichen mineralogischen Phasenzusammensetzung in der Feinfraktion der MV-Rohschlacken äußert.
- Eine unterschiedliche Verfahrenstechnik führt bei gleichbleibendem Müllinput zu MV-Schlacken unterschiedlicher Qualität.
- Während der Aufbereitung und Ablagerung der MV-Schlacken können aus unterschiedlichen MV-Rohschlacken aufgrund starker Homogenisierungseffekte und entsprechender Steuerung der Aufbereitungs- und Lagertechnik MV-Schlacken gleicher Qualität erzeugt werden.
- Die Vorgaben der technischen Regelwerke in Bezug auf die Umweltverträglichkeit und die Bautechnik werden erfüllt.

INFLUENCE OF CHANGING WASTE INPUT OF THE FUTURE QUALITY AND REUSE OF MSWI BOTTOM ASHES IN THE BUILDING INDUSTRY

ABSTRACT

At time the influence of the waste input of the quality and the reuse of MSWI bottom ashes as granular material for the building industry is unknown in a great extent. So in 10 MSWI power plants of different process technologies definite volumes of typical wastes of the respective plants are thermal treated for two weeks.

In three MSWI power plants additional experiments with different waste inputs are feasible to minimize the influence of the process technology. In three additional MSWI power plants samples of MSWI raw bottom ashes were taken permanently for a time of 2 weeks to get informations about short time influences of the waste input.

Within the framework of this research project the coherence between different waste fractions and the mineralogical, structural engineering and environmental relevant properties of processed and stored MSWI bottom ashes are investigated. The following results are recognizable:

- A homogenous waste input leads to a homogenous mineralogical composition of the MSWI bottom ashes.
- Short time variances leads to different mineralogical compositions especially in the finer coarse fraction of the MSWI bottom ashes, which is responsible for the alteration behaviour and the necessary storing time after that a using as granular material in road construction and earthworks is possible.
- The waste fractions domestic waste and industrial waste leads after thermal treatment to comparable mineralogical compositions of the MSWI bottom ashes whereas the co-combustion of special fractions exert a great influence in comparison.
- Influences of different process technologies are visible.
- During processing and storing of the MSWI bottom ashes there are effects of homogenization recognizable, which leads to comparable mineralogical, environmental and structural engineering properties.
- The technical and environmental requirements for using the MSWI bottom ashes as material in road construction and earthworks are complied.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Mineralogie	3
2.1.1	Mineralogische Phasenzusammensetzung von Müllverbrennungsschlacken	3
2.1.2	Alterationsverhalten und Raumbeständigkeit	3
2.2	Umweltverträglichkeit	9
2.2.1	Feststoffchemismus	9
2.2.2	Elutionsverhalten	11
2.3	Bautechnik	12
3	Untersuchungsumfang	14
3.1	Untersuchungsprogramm	14
3.2	Verfahrensparameter der Müllverbrennungsanlagen und Müllinput	14
3.3	Untersuchungsmethoden	16
3.3.1	Mineralogische Untersuchungen	16
3.3.2	Chemische Untersuchungen	16
3.3.3	Bautechnische Untersuchungen	17
4	Versuchsdurchführung	18
4.1	Auswahl der Müllverbrennungsanlagen	18
4.2	Thermische Behandlung des Müllinputs	18
4.3	Aufbereitung der MV-Rohschlacken zu MV-Schlacken	19
4.4	Probennahmeschema	19
5	Untersuchungsergebnisse	20
5.1	Permanentversuche	20
5.1.1	Permanentbeprobung der MV-Schlacken aus der MVA D	20
5.1.1.1	Probenahme während des Versuchsbetriebes	20
5.1.1.2	Mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken aus den Permanentversuchen	22
5.1.2	Permanentbeprobung der MV-Schlacken aus der MVA I	27
5.1.2.1	Probenahme während des Versuchsbetriebes	27
5.1.2.2	Mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken aus den Permanentversuchen	28
5.1.3	Permanentbeprobung der MV-Schlacken aus der MVA K	32
5.1.3.1	Probenahme während des Versuchsbetriebes	32
5.1.3.2	Mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken aus den Permanentversuchen	33

5.2	Großversuche	37
5.2.1	Anlage A	37
5.2.1.1	MV-Schlacke A-1 (Großversuch 1)	
5.2.1.1.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-1	39
5.2.1.1.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-1	43
5.2.1.1.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-1	49
5.2.1.2	MV-Schlacke A-2 (Großversuch 2)	53
5.2.1.2.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-2	53
5.2.1.2.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-2	57
5.2.1.2.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-2	63
5.2.1.3	MV-Schlacke A-3 (Großversuch 3)	65
5.2.1.3.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-3	65
5.2.1.3.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-3	69
5.2.1.3.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-3	75
5.2.2	Anlage B	79
5.2.2.1	MV-Schlacke B-1 (Großversuch 1)	81
5.2.2.1.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-1	81
5.2.2.1.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-1	85
5.2.2.1.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-1	91
5.2.2.2	MV-Schlacke B-2 (Großversuch 2)	95
5.2.2.2.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-2	95
5.2.2.2.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-2	99
5.2.2.2.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-2	105
5.2.3	Anlage C	109
5.2.3.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke C	111
5.2.3.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke C	115
5.2.3.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke C	121
5.2.4	Anlage D	125
5.2.4.1	MV-Schlacke D-1 (Großversuch 1)	127
5.2.4.1.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-1	127
5.2.4.1.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-1	131
5.2.4.1.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-1	137
5.2.4.2	MV-Schlacke D-2 (Großversuch 2)	141
5.2.4.2.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-2	141
5.2.4.2.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-2	145
5.2.4.2.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-2	151
5.2.4.3	MV-Schlacke D-3 (Großversuch 3)	155
5.2.4.3.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-3	155
5.2.4.3.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-3	159
5.2.4.3.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-3	165
5.2.5	Anlage E	169
5.2.5.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke E	171
5.2.5.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke E	175
5.2.5.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke E	181
5.2.6	Anlage F	185
5.2.6.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke F	187
5.2.6.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke F	191
5.2.6.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke F	197

5.2.7	Anlage G	201
5.2.7.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke G	203
5.2.7.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke G	207
5.2.7.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke G	213
5.2.8	Anlage H	217
5.2.8.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke H	219
5.2.8.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke H	223
5.2.8.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke H	229
5.2.9	Anlage I	233
5.2.9.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke I	235
5.2.9.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke I	239
5.2.9.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke I	245
5.2.10	Anlage J	249
5.2.10.1	Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke J	251
5.2.10.2	Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke J	255
5.2.10.3	Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke J	261
6	Bewertung der Untersuchungsergebnisse	265
6.1	Bewertung der Permanentversuche	265
6.2	Bewertung der Großversuche	269
6.2.1	Mineralogie	269
6.2.1.1	Mineralogie der MV-Rohschlacken und Müllinput	269
6.2.1.2	Alterationsverhalten und Raumbeständigkeit	274
6.2.2	Umweltverträglichkeit	280
6.2.2.1	DEV S4-Eluatuntersuchungen	280
6.2.2.2	Chemische Untersuchungen im Feststoff	285
6.2.2.3	Availability-Tests und Kolonnentests	287
6.2.3	Bautechnik	290
7	Vergleich der aktuell ermittelten Versuchsergebnisse mit vorliegenden Datensätzen	301
7.1	Umweltverträglichkeit	301
7.2	Bautechnik	304
8	Vergleich der Umweltverträglichkeit der MV-Schlacken mit anderen industriellen Nebenprodukten	306
9	Empfehlungen für die Praxis	308
10	Weiterer Forschungsbedarf	312
11	Zusammenfassung	314
Literatur		324

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Unterschiedliche Verläufe der für das Alterationsverhalten und für die Raumbeständigkeit maßgeblichen Mineralphasen während einer Ablagerungszeit von 3 Monaten	8
Abb. 2	Feststoffgehalte von MV-Schlacken, natürlichen Gesteinen und industriellen Nebenprodukten	10
Abb. 3	Verteilung der Schwermetalle auf die Feststoffströme bei der Rostfeuerung	10
Abb. 4	Versuchsablauf und Probenahmeschema	19
Abb. 5	Herstellung der Mischproben für die mineralogischen Untersuchungen während der Permanentversuche in der MVA D	22
Abb. 6	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und der Grobfraktion der MV-Rohschlacken D-2 aus dem Permanentversuch	23
Abb. 7	Änderungen der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Grob- und Feinfraktion der MV-Rohschlacken D-2 während der Permanentversuche	25
Abb. 8	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Rohschlacken D-2 und thermisch behandelten Müllmengen im Versuchszeitraum	26
Abb. 9	Herstellung der Mischproben für die Analyse während der Permanentversuche	27
Abb. 10	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und der Grobfraktion der MV-Rohschlacken I aus den Permanentversuchen	29
Abb. 11	Änderungen der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Grob- und Feinfraktion der MV-Rohschlacken I während der Permanentversuche	30
Abb. 12	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und thermisch behandelten Müllmengen während der Permanentversuche	31
Abb. 13	Herstellung der Mischproben für die mineralogischen Untersuchungen während der Permanentversuche in der MVA K	32
Abb. 14	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und der Grobfraktion der MV-Rohschlacken K aus den Permanentversuchen	34
Abb. 15	Änderungen der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Grob- und Feinfraktion der MV-Rohschlacken K während der Permanentversuche	35
Abb. 16	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und thermisch behandelten Müllmengen während der Permanentversuche in der MVA K	36
Abb. 17	Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA A	38
Abb. 18	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke A-1	41
Abb. 19	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke A-1	42
Abb. 20-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke A-1	45
Abb. 20-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke A-1	46
Abb. 21	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke aus der MVA A-1	47
Abb. 22	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke A-1	48
Abb. 23	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke A-1	51
Abb. 24	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke A-1	51
Abb. 25	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke A-1	52
Abb. 26	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Rohschlacken A-2	55
Abb. 27	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Rohschlacke A-2	56
Abb. 28-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Rohschlacke A-2	59
Abb. 28-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Rohschlacke A-2	60
Abb. 29	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Rohschlacke A-2	61
Abb. 30	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Rohschlacke A-2	62
Abb. 31	Korngrößenverteilung der MV-Rohschlacke A-2	64
Abb. 32	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacken A-3	67

Abb. 33	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke A-3	68
Abb. 34-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke A-3	71
Abb. 34-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke A-3	72
Abb. 35	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke A-3	73
Abb. 36	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke A-3	74
Abb. 37	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke A-3	77
Abb. 38	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke A-3	77
Abb. 39	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke A-3	78
Abb. 40	Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA B	80
Abb. 41	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraction der MV-Schlacken B-1	83
Abb. 42	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke B-1	84
Abb. 43-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke B-1	87
Abb. 43-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke B-1	88
Abb. 44	Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen der MV-Schlacke B-1	89
Abb. 45	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke B-1	90
Abb. 46	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke B-1	93
Abb. 47	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke B-1	93
Abb. 48	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke B-1	94
Abb. 49	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraction der MV-Schlacken B-2	97
Abb. 50	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke B-2	98
Abb. 51-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke B-2	101
Abb. 51-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke B-2	102
Abb. 52	Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen der MV-Schlacke B-2	103
Abb. 53	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke B-2	104
Abb. 54	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke B-2	107
Abb. 55	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke B-2	107
Abb. 56	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke B-2	108
Abb. 57	Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA C	110
Abb. 58	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraction der MV-Schlacken C	113
Abb. 59	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke C	114
Abb. 60-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke C	117
Abb. 60-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke C	118
Abb. 61	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke C	119
Abb. 62	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke C	120
Abb. 63	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke C	123
Abb. 64	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke C	123
Abb. 65	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke C	124
Abb. 66	Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA D	126
Abb. 67	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraction der MV-Schlacken D-1	129
Abb. 68	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke D-1	130
Abb. 69-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-1	133
Abb. 69-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-1	134
Abb. 70	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke D-1	135
Abb. 71	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke D-1	136

Abb. 72	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke D-1	139
Abb. 73	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke D-1	139
Abb. 74	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke D-1	140
Abb. 75	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraction der MV-Schlacken D-2	143
Abb. 76	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke D-2	144
Abb. 77-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-2	147
Abb. 77-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-2	148
Abb. 78	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke D-2	149
Abb. 79	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke D-2	150
Abb. 80	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke D-2	153
Abb. 81	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke D-2	153
Abb. 82	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke D-2	154
Abb. 83	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraction der MV-Schlacken D-3	157
Abb. 84	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke D-3	158
Abb. 85-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-3	161
Abb. 85-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-3	162
Abb. 86	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke D-3	163
Abb. 87	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke D-3	164
Abb. 88	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke D-3	167
Abb. 89	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke D-3	167
Abb. 90	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke D-3	168
Abb. 91	Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA E	170
Abb. 92	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraction der MV-Schlacken E	173
Abb. 93	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke E	174
Abb. 94-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke E	177
Abb. 94-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke E	178
Abb. 95	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke E	179
Abb. 96	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke E	180
Abb. 97	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke E	183
Abb. 98	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke E	183
Abb. 99	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke E	184
Abb. 100	Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA F	186
Abb. 101	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraction der MV-Schlacken F	189
Abb. 102	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke F	190
Abb. 103-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke F	193
Abb. 103-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke F	194
Abb. 104	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke F	195
Abb. 105	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke F	196
Abb. 106	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke F	199
Abb. 107	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke F	199
Abb. 108	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke F	200
Abb. 109	Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA G	202
Abb. 110	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraction der MV-Schlacken G	205
Abb. 111	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke G	206

Abb. 112-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke G	209
Abb. 112-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke G	210
Abb. 113	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke G	211
Abb. 114	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke G	212
Abb. 115	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke G	215
Abb. 116	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke G	215
Abb. 117	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke G	216
Abb. 118	Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA G	218
Abb. 119	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacken H	221
Abb. 120	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke H	222
Abb. 121-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke H	225
Abb. 121-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke H	226
Abb. 122	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke H	227
Abb. 123	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke H	228
Abb. 124	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke H	231
Abb. 125	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke H	231
Abb. 126	Proctorkurve und optimaler Wassergehalt der MV-Schlacke H	232
Abb. 127	Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA I	234
Abb. 128	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacken I	237
Abb. 129	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke I	238
Abb. 130-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke I	241
Abb. 130-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke I	242
Abb. 131	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke I	243
Abb. 132	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke I	244
Abb. 133	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke I	247
Abb. 134	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke I	247
Abb. 135	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke I	248
Abb. 136	Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA J	250
Abb. 137	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacken J	253
Abb. 138	Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke J	254
Abb. 139-a	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke J	257
Abb. 139-b	Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke J	258
Abb. 140	Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke J	259
Abb. 141	Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke J	260
Abb. 142	Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke J	263
Abb. 143	Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke J	263
Abb. 144	Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke J	264
Abb. 145	Vergleich der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Feinfraktionen	266
Abb. 146	Vergleich der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Grobfraktionen	267
Abb. 147	Vergleich der Müllfraktionen während der Permanentversuche D-2, I und K	268
Abb. 148	Vergleich Mineralogie der Feinfraktion der MV-Rohschlacken und Müllinput	272
Abb. 149	Vergleich Mineralogie der Grobfraktion der MV-Rohschlacken und Müllinput	273
Abb. 150-A	Alterationsverhalten der untersuchten MV-Schlacken A und B	277
Abb. 150-B	Alterationsverhalten der untersuchten MV-Schlacken C und D	278
Abb. 150-C	Alterationsverhalten der untersuchten MV-Schlacken E, F, G, H, I und J	279

Abb. 151-A	DEV S4-Eluatgehalte der untersuchten MV-Rohschlacken und der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken	283
Abb. 151-B	DEV S4-Eluatgehalte der untersuchten MV-Rohschlacken und der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken	284
Abb. 152	Feststoffgehalte der MV-Rohschlacken und der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken	286
Abb. 153	Untersuchungsergebnisse der Availability-Tests und der Feststoffuntersuchungen der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken	288
Abb. 154	Untersuchungsergebnisse des Kolonnentests der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken	289
Abb. 155	Korngrößenverteilungen der frisch produzierte MV-Rohschlacken	291
Abb. 156	Korngrößenverteilungen der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken	291
Abb. 157	Stoffliche Zusammensetzung der untersuchten MV-Schlacken	292
Abb. 158	Ergebnisse der Proctorversuche der untersuchten MV-Schlacken	293
Abb. 159	Wassergehalte der untersuchten MV-Schlacken	294
Abb. 160	Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel der untersuchten MV-Schlacken an der Prüfkörnung 8/16 mm	295
Abb. 161	Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel der untersuchten MV-Schlacken an der Gesamtkörnung	295
Abb. 162	Rohdichten und Schüttdichten der untersuchten MV-Schlacken	296
Abb. 163	Widerstand gegen Schlag der untersuchten MV-Schlacken	297
Abb. 164	Ergebnisse des Los-Angeles-Versuches	297
Abb. 165	Anteil an schlecht geformten Körnern der untersuchten MV-Schlacken	298
Abb. 166	Glühverluste der untersuchten MV-Schlacken	298
Abb. 167	Scherfestigkeit der untersuchten MV-Schlacken	299
Abb. 168	Wasserdurchlässigkeit der untersuchten MV-Schlacken	300
Abb. 169	Vergleich der Ergebnisse der DEV-S4-Eluatuntersuchungen der aktuell untersuchten MV-Schlacken (2002-2004) mit den MV-Schlacken aus den PWAB-Projekten (1994-1996)	303
Abb. 170	Vergleich der Sieblinienbereiche der aktuell untersuchten MV-Schlacken (2002-2004) mit den MV-Schlacken aus den PWAB-Projekten (1994-1996)	304
Abb. 171	Vergleich der Ergebnisse der Proctorversuche der aktuell untersuchten MV-Schlacken (2002-2004) mit den MV-Schlacken aus den PWAB-Projekten (1994-1996)	305
Abb. 172	Vergleich der bautechnischen Parameter der aktuell untersuchten MV-Schlacken (2002-2004) mit den MV-Schlacken aus den PWAB-Projekten (1994-1996)	305
Abb. 173	DEV S4-Eluatgehalte der untersuchten MV-Schlacken sowie verschiedener industrieller Nebenprodukte	307
Abb. 174	Optimierungspotentiale in einer Müllverbrennungsanlage	312

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Schwankungsbreiten der Schwermetalle (Feststoffgehalte) in MV-Schlacken aus 13 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik im Vergleich zu den mittleren Konzentrationen in der Erdkruste	11
Tab. 2	Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb	15
Tab. 3	Probenahmeschema für die Permanentbeprobung in der MVA D	21
Tab. 4	Probenahmeschema für die Permanentbeprobung in der MVA I	27
Tab. 5	Probenahmeschema für die Permanentbeprobung in der MVA K	32
Tab. 6	Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA A	37
Tab. 7	Müllzusammensetzung während der Großversuche	37
Tab. 8	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke A-1	39
Tab. 9	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke A-1	40
Tab. 10	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke A-1	52
Tab. 11	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke A-2	53
Tab. 12	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke A-2	54
Tab. 13	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke A-2	63
Tab. 14	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke A-3	65
Tab. 15	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke A-3	66
Tab. 16	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke A-3	78
Tab. 17	Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA B	79
Tab. 18	Müllzusammensetzung während der Großversuche	79
Tab. 19	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke B-1	81
Tab. 20	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke B-1	82
Tab. 21	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke B-1	94
Tab. 22	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke B-2	95
Tab. 23	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke B-2	96
Tab. 24	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke B-2	108
Tab. 25	Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA C	109
Tab. 26	Müllzusammensetzung während des Großversuches	109
Tab. 27	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke C	111
Tab. 28	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke C	112
Tab. 29	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke C	124
Tab. 30	Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA D	125
Tab. 31	Müllzusammensetzung während der Großversuche	125
Tab. 32	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke D-1	127
Tab. 33	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke D-1	128
Tab. 34	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke D-1	140
Tab. 35	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke D-2	141
Tab. 36	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke D-2	142
Tab. 37	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke D-2	154
Tab. 38	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke D-3	155
Tab. 39	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke D-3	156
Tab. 40	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke D-3	168
Tab. 41	Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA E	169
Tab. 42	Müllzusammensetzung während des Großversuches	169
Tab. 43	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke E	171
Tab. 44	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke E	172
Tab. 45	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke E	184
Tab. 46	Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA F	185
Tab. 47	Müllzusammensetzung während des Großversuches	185
Tab. 48	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke F	187
Tab. 49	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke F	188
Tab. 50	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke F	200
Tab. 51	Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA G	201
Tab. 52	Müllzusammensetzung während des Großversuches	201

Tab. 53	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke G	203
Tab. 54	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke G	204
Tab. 55	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke G	216
Tab. 56	Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA H	217
Tab. 57	Müllzusammensetzung während des Großversuches	217
Tab. 58	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke H	219
Tab. 59	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke H	220
Tab. 60	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke H	232
Tab. 61	Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA I	233
Tab. 62	Müllzusammensetzung während des Großversuches	233
Tab. 63	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke I	235
Tab. 64	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke I	236
Tab. 65	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke I	248
Tab. 66	Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA J	249
Tab. 67	Müllzusammensetzung während des Großversuches	249
Tab. 68	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke J	251
Tab. 69	Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke J	252
Tab. 70	Bautechnische Parameter der MV-Schlacke J	264
Tab. 71	Ausgewählte Schwermetallgehalte im Feststoff der untersuchten MV-Schlacken	285

1. EINLEITUNG

In der Bundesrepublik Deutschland fallen zur Zeit jährlich ca. 40 Mio. t Hausmüll an. Trotz aller politischen Appelle zur Müllvermeidung und Mülltrennung, sagen die Prognosen steigende Abfallmengen voraus [1]. Obwohl es erhebliche Bemühungen zur stofflichen Wiederverwertung gibt, müssen weiterhin ca. 20 Mio. t Hausmüll deponiert werden, rund 8 Mio. t werden in thermischen Abfallbehandlungsanlagen verbrannt, wobei ca. 3-4 Mio. t MV-Schlacken pro Jahr anfallen, die in größerem Umfang in Bereichen des Straßen- und Deponiebaus, entsprechend dem gültigen Regelwerk [2,3] sowie als Versatzmaterial unter Tage [4] verwertet werden, wobei die Verwertungsquote der MV-Schlacken zur Zeit bei ca. 60 % liegt.

Die Vorgaben der TA Siedlungsabfall [5], die eine Begrenzung des Gesamtkohlenstoffes (TOC) auf ≤ 3 Masse-% und des Glühverlustes auf ≤ 5 Masse-% als Indikator für den Mineralisierungsgrad eines Restabfalls für die zu deponierenden Reststoffe für die Deponieklasse II vorschreibt, führt spätestens im Jahr 2005 zum Verbot der Ablagerung von unbehandeltem Restmüll aus Hausmüll und hausmüllähnlichem Gewerbemüll. Damit wird der thermischen Abfallbehandlung eine noch weitaus größere Rolle zukommen als bisher. Die Vorgaben des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) [6], Abfälle in erster Linie zu vermeiden und in zweiter Linie stofflich zu verwerten oder zur Gewinnung von Energie zu nutzen, führen zukünftig zwangsläufig zu einer Änderung der stofflichen Zusammensetzung des zur energetischen Verwertung anstehenden Restmülls in Deutschland. Daraus ergeben sich ebenfalls zwangsläufig Veränderungen in den Eigenschaften der bei der thermischen Behandlung entstehenden Müllverbrennungsschlacken (MV-Schlacken) in den Bereichen Mineralogie, Umweltverträglichkeit, Langzeitverhalten und Bautechnik sowie in deren Verwertungsmöglichkeiten.

Da der Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die zukünftige Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von MV-Schlacken bisher weitgehend unbekannt ist, sollte im Rahmen dieses Forschungsprojektes, das vom Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe und dem Institut für Technische Chemie/Thermische Abfallbehandlung des Forschungszentrums Karlsruhe in Kooperation durchgeführt wurde, eine Korrelation zwischen Müllzusammensetzung und den resultierenden mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften der MV-Schlacken hergestellt werden, wobei folgende Zielsetzungen im Vordergrund standen:

- Den Einfluss einzelner Stoffgruppen des thermisch zu behandelnden Restmülls auf die Eigenschaften der MV-Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik zu untersuchen,
- eine Bewertung der aktuellen Schlackequalitäten und der damit verbundenen Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken durch eine Charakterisierung der frisch produzierten MV-Rohschlacken sowie der aufbereiteten und abgelagerten MV-Schlacken in den Bereichen Mineralogie (Phasenzusammensetzung, Alterationsverhalten, Reaktivität, Raumbeständigkeit), Umweltverträglichkeit (Feststoffchemismus, Elutionsverhalten, Prognose der Langzeitstabilität) und Bautechnik (Eignungsprüfungen für den Einsatz im Straßen und Erdbau) durchzuführen,
- eine mögliche Veränderung der mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften der MV-Schlacken, die im Rahmen dieses Projektes untersucht wurden, durch einen Vergleich mit Daten von MV-Schlacken aus 8 unterschiedlichen Müllverbrennungsanlagen, die aus den Jahren 1994-1996 vorliegen, aufzuzeigen,

- eine Einschätzung der Umweltverträglichkeit der MV-Schlacken durch einen Vergleich von umweltrelevanten Parametern an den untersuchten MV-Schlacken mit anderen in der Baupraxis eingesetzten industriellen Nebenprodukten vorzunehmen sowie
- Empfehlungen für Betreiber von Müllverbrennungsanlagen und Aufbereitungsanlagen von MV-Schlacken zur Verbesserung der MV-Schlackenqualität abzugeben, mit dem Ziel, eine nachhaltige Verwertung der MV-Schlacken als Baustoff im Bereich der Bauindustrie zu gewährleisten.

Die Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von MV-Schlacken werden von den mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften bestimmt, die im wesentlichen von der unterschiedlichen Zusammensetzung des Müllinputs, der jeweiligen Verfahrenstechnik bei der Rostfeuerung, der Art des Aufbereitungsprozesses und der Art und Dauer der Ablagerung beeinflusst werden. Das Untersuchungsprogramm wurde nach folgendem Schema ausgearbeitet:

- In 10 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik wurden jeweils bis zu zwei Wochen während des regulären Betriebes anlagenspezifische Müllfraktionen in den Verbrennungsraum eingebracht, unter definierten Verfahrensparametern thermisch behandelt und die entstandenen MV-Rohschlacken der jeweils angeschlossenen Aufbereitungsanlage zugeführt (Großversuche).
- In drei Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik wurden zusätzlich während des regulären Betriebes die frisch produzierten MV-Rohschlacken jeweils zwei Wochen in gleichen stündlichen Zeitabständen beprobt, um den kurzfristigen Einfluss des Müllinputs auf die Qualität der MV-Schlacken bestimmen zu können (Permanentversuche).
- Außerdem wurden in drei Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik während des regulären Betriebes Mehrfachversuche mit unterschiedlicher Müllzusammensetzung jeweils bis zu zwei Wochen durchgeführt, um den Einfluss des Müllinputs bei gleicher Verfahrenstechnik untersuchen zu können.
- Nach der Ausbringung der MV-Rohschlacken aus dem Nassentschlacker wurden diese in den angeschlossenen Aufbereitungsanlagen unter definierten Randbedingungen aufbereitet und in Halden von bis zu 300 t drei Monate abgelagert.
- Zur Charakterisierung des Alterationsverhaltens erfolgten die mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Untersuchungen an den frisch produzierten MV-Rohschlacken sowie an den aufbereiteten MV-Schlacken nach einer Ablagerungszeit von 2, 4, 8 und 12 Wochen.
- Anschließend wurde eine Bewertung der umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften auf der Basis derzeit gültiger Regelwerke durchgeführt.

2. GRUNDLAGEN

2.1 MINERALOGIE

2.1.1 Mineralogische Phasenzusammensetzung von Müllverbrennungsschlacken

Das differenzierte Materialverhalten von Müllverbrennungsschlacken geht zum einen auf den unterschiedlichen Müllinput, der durch verschiedene, vorangeschaltete Müllsammel- und Trennsysteme sowie von regionalen und saisonalen Einflüssen bestimmt wird, und zum anderen auf unterschiedliche Verfahrenstechniken bei der Rostfeuerung, wie z.B. Feuerraumgestaltung, Rostsystem, Gutbett-Temperatur, Druck- und Temperaturbedingungen im Feuerraum sowie auf das Nassentschlackersystem, zurück. Außerdem spielt die Art der Aufbereitung und die Ablagerungszeit der MV-Schlacken eine bedeutende Rolle für deren ökonomischen und ökologischen Einsatz als Material in Bereichen des Bauwesens.

Die MV-Schlacken bestehen aus Mineralphasen, die sich durch charakteristische chemische und physikalische Reaktionsmechanismen voneinander unterscheiden und als Träger der bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften angesehen werden. Um die Eigenschaften einer MV-Schlacke zu charakterisieren, muss ihr Mineralbestand identifiziert und das geochemische Verhalten analysiert werden.

Die Untersuchung von frisch produzierten MV-Rohschlacken und von aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik zeigt, dass MV-Schlacken hauptsächlich aus Silikaten, Oxiden und Carbonaten bestehen. Als Nebenbestandteile treten amorphe Glasphasen, verschiedene Eisenminerale und Feldspäte auf. Akzessorisch und in Spuren werden u. a. Metalle, Legierungen und die unterschiedlichsten Sulfate und Salze beobachtet [7].

Zur Charakterisierung der MV-Schlacken und zur Einordnung in bestehende Klassifikationsschemata wird der Mineralbestand unter Berücksichtigung der bautechnischen und umweltrelevanten Kornklassen korngößenabhängig untersucht, da erfahrungsgemäß eine Korngößenabhängigkeit des Mineralbestandes und des damit verbundenen Elutionsverhaltens besteht [8].

Im Feinkornanteil werden im allgemeinen die Sulfate, die in Abhängigkeit der jeweiligen Hydratationsstufe die Raumbeständigkeit mit beeinflussen sowie die Chloride, die in erster Linie die Salzfrachten steuern und die Schwermetalle anreichert. Ebenso treten in der Feinfraktion auch die Carbonate verstärkt auf, wobei der Calcit (CaCO_3) auf die Schlackenbestandteile verstärkt verfestigend wirkt und in dessen Kristallgitter einige Schwermetalle, wie z.B. Blei und Zink fest eingebunden werden können.

In der Grobfraktion dagegen werden vorwiegend die stabilen Silikate und Oxide angetroffen, die für die Stabilität einer MV-Schlacke verantwortlich sind und damit die mechanischen Eigenschaften beeinflussen, die für eine Verwendung der MV-Schlacken als Baustoff eine wesentliche Rolle spielen. Hierbei müssen in erster Linie die Neubildungen der Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) sowie des Oxides Magnetit (Fe_3O_4) berücksichtigt werden. Neben der Beurteilung des Schlackebildungspotentials dienen die Gehalte an Silikaten und Oxiden im Mineralbestand in Kombination mit den Anteilen an neu gebildeten Glasphasen zur Abschätzung von Gutbett-Temperaturen bei der Schlackenbildung [9].

2.1.2 Alterationsverhalten und Raumbeständigkeit

Gemäß den Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 2000) [2] müssen die MV-Schlacken vor einem bautechnischen Einsatz als Material für ungebundene und gebundene Schichten im Straßenoberbau drei Monate abgelagert werden.

Im Hinblick auf die bautechnischen Eigenschaften der MV-Schlacken ist der Parameter Raumbeständigkeit von besonderem Interesse, da er die Volumenkonstanz eines Baustoffes charakterisiert. Bei nicht ausreichender Raumbeständigkeit kann es in der Schlackematrix zu Treiberscheinungen kommen, die zu Bauwerksschäden führen. Diese Treiberscheinungen gehen auf Mineralreaktionen, die mit einer Volumenvergrößerung verbunden sind, zurück.

Das Regelwerk fordert, dass eine MV-Schlacke, die im Bauwesen eingesetzt wird, eine ausreichende Raumbeständigkeit aufweist. Im ergänzenden Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau Teil: Müllverbrennungssasche (MV-Asche) [17] wird unter dem Punkt 8.2 „Raumbeständigkeit“ aufgeführt: „MV-Aschen müssen ausreichende Raumbeständigkeit aufweisen. Ein Prüfverfahren für diesen Nachweis besteht noch nicht“. Im Hinblick auf eine Verbesserung der Raumbeständigkeit wird eine Ablagerung der MV-Schlacken von drei Monaten vorgeschrieben.

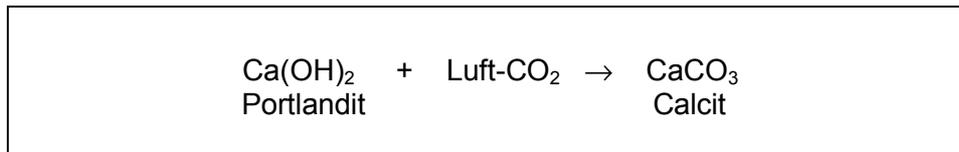
Die Mineralphasen der MV-Schlacken unterliegen Alterationsprozessen. Im Laufe der Ablagerung treten Hydratationsreaktionen, Verfestigungsreaktionen durch die Bildung von Calcit (CaCO_3), Sulfatreaktionen, Salzbildungsreaktionen, Reaktionen des Eisens und Aluminiums sowie Lösungsreaktionen auf, welche die bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften der MV-Schlacken bestimmen [10].

Die Alterationsreaktionen beginnen unmittelbar nach dem Austrag der MV-Rohschlacken aus dem Nassentschlacker und laufen verstärkt in den ersten Wochen der Ablagerung der MV-Schlacken ab. Nach einer bestimmten, für jede MV-Schlacke unterschiedlich langen Ablagerungszeit, sind die Alterationsreaktionen abgeschlossen und enden in einer stabilen, reaktionsträgen MV-Schlacke.

Die Untersuchungen von MV-Rohschlacken und MV-Schlacken aus 15 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik zeigen [10], dass das Alterationsverhalten und die Raumbeständigkeit von MV-Schlacken im wesentlichen von Carbonatisierungsreaktionen und Sulfatreaktionen gesteuert werden, da diese Mineralreaktionen mit Verfestigungsprozessen (Carbonatisierungsreaktion) bzw. Volumenveränderungen (Sulfatreaktion) verbunden sind:

Carbonatisierungsreaktion:

Während der Ablagerung der MV-Schlacken kommt es durch die Reaktion des Portlandits ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) mit dem Luft- CO_2 zur Bildung von Calcit (CaCO_3), der, insbesondere in der Feinfraktion, als Bindemittel und auf die Schlackebestandteile verfestigend wirkt. Diese Reaktion ist für die Stabilität der MV-Schlacken und damit für das Alterationsverhalten verantwortlich. Bei ausreichender Ablagerung kann von einer nahezu vollständigen Carbonatisierungsreaktion ausgegangen werden, die sich in einer stabilen, d.h. reaktionsträgen MV-Schlacke äußert.

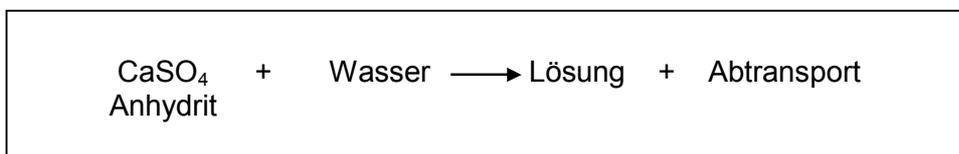


Bei einer optimalen Carbonatisierung der MV-Schlacken wird während der Ablagerungszeit eine deutliche Abnahme des Portlandits ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), verbunden mit einer Zunahme des Calcits (CaCO_3) festgestellt und die abgelagerten MV-Schlacken zeigen im Vergleich zu den MV-Rohschlacken meist einen deutlich höheren Carbonatanteil, der an den Intensitäten des Minerals Calcit (CaCO_3) im Röntgendiffraktogramm abgelesen werden kann. Neben einer Erhöhung der mechanischen Stabilität führt eine gesteigerte Carbonatisierung zu einem verstärkten Einbau und zu einer Fixierung von bestimmten Schwermetallen (z.B. Blei und Zink) im Kristallgitter des Carbonates Calcit (CaCO_3) [7,8]. Außerdem werden über die Carbonatisierungsreaktionen in hohem Maße die pH-Werte des umgebenden Milieus gesteuert.

Sulfatreaktionen:

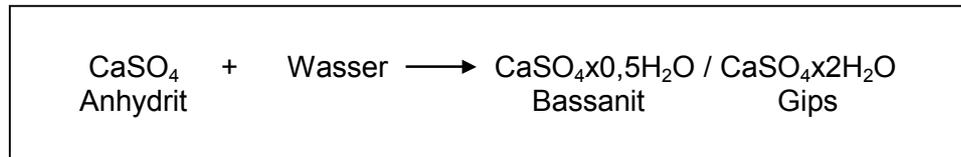
In den MV-Rohschlacken bestimmen die Gehalte des wasserfreien Anhydrits (CaSO_4) im wesentlichen das Sulfatpotential, das die Sulfatreaktionen während der Alteration der MV-Schlacken steuert. Anhydrit (CaSO_4) kann im Laufe der Ablagerung der MV-Schlacken aufgelöst oder zu wasserhaltigen Sulfatphasen umgewandelt werden, wobei diese Umwandlungen mit Volumenänderungen in der Schlackematrix verbunden sein können.

1. Anhydrit (CaSO_4) wird durch Lösung aus dem System ausgeführt.



Diese Reaktion ist für die Sulfatkonzentrationen der Porenwässer und somit für die Sulfatreaktionen, die die Raumbeständigkeit mit beeinflussen, in hohem Maße verantwortlich.

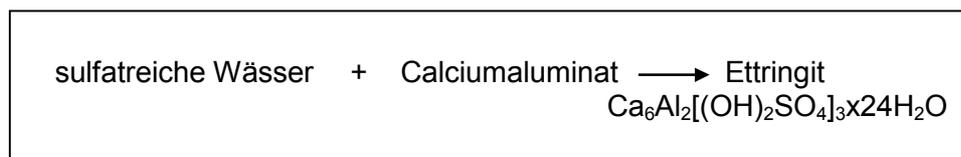
2. Anhydrit (CaSO_4) wandelt sich unter Wasseraufnahme in das Hemihydrat Bassanit ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) oder direkt in das Dihydrat Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) um.



Diese Reaktion führt in der Summe zu einer Volumenzunahme von maximal ca. 61 Vol.-%. Bestimmte Inhaltsstoffe, wie z.B. Natriumchlorid, Natriumsulfat, Kaliumsulfat, Kaliumchlorid, können diese Umwandlungsreaktionen beschleunigen und es kommt zu sofortigen Anhydrit-Gips-Umbildungen, wobei Schwelldrücke bis zu 1100 kg/cm² auftreten können („Salzsprengung“).

Der maximale Schwellbetrag hängt von der absoluten Anhydritmenge und der Wassermenge ab, wobei die Geschwindigkeit des Schwellvorganges von lokalen Anhydritanreicherungen, der Wasserzusammensetzung, der Umwandlung des Anhydrits durch den Einfluss leichtlöslicher Salze und der Permeabilität der Matrix gesteuert wird.

3. Primäre Ettringitbildung durch die Reaktion sulfatreicher Wässer mit Aluminiumkomponenten aus der MV-Schlacke.



Durch die Reaktion sulfatreicher Wässer mit Calcium-Aluminium-Komponenten aus der MV-Schlacke entsteht primär gebildeter Ettringit, der insbesondere während der Gelbildung durch Aufnahme von Wasser treibend wirken kann. Danach hat nur sekundär gebildeter Ettringit Einfluss auf die Raumbeständigkeit.

Bei einer optimalen Ablagerung der MV-Schlacken wird gleichzeitig neben einer guten Carbonatisierung eine Abnahme des wasserfreien Calciumsulfates Anhydrit (CaSO_4) durch Lösung oder zugunsten einer Bildung wasserhaltiger Calciumsulfatphasen, wie Bassanit ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) und/oder Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), festgestellt. Erst im weiteren Verlauf der Ablagerung entsteht teilweise Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$). Das Auftreten von Bassanit und/oder Gips sowie geringe Gehalte bzw. das Fehlen von Anhydrit sprechen für einen weit fortgeschrittenen Alterungsprozess der MV-Schlacken und es kann von einer reaktions-trägen MV-Schlacke ausgegangen werden, die eine, aus mineralogischer Sicht, gute Raumbeständigkeit aufweist.

Sind die beschriebenen Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen noch nicht ausreichend abgeschlossen, liegt eine noch reaktionsfreudige MV-Schlacke vor, und es kann bei einem zu frühen bautechnischen Einsatz der MV-Schlacken, der oft mit einer zusätzlichen Wasserzugabe verbunden ist, zu Treiberscheinungen kommen, die das Bauwerk schädigen können. Sind die beschriebenen Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen jedoch abgeschlossen, kann von einer reaktionsträgen MV-Schlacke ausgegangen werden, bei der im weiteren Verlauf der Ablagerung oder während eines bautechnischen Einsatzes keine weiteren Mineralreaktionen zu erwarten sind, die die Raumbeständigkeit negativ beeinflussen.

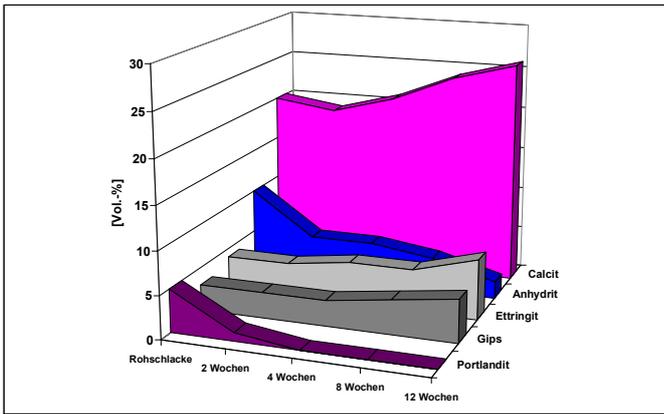
Während einer Ablagerungszeit von drei Monaten werden für eine vergleichende Bewertung der MV-Schlacken folgende Kriterien für die Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen zugrunde gelegt:

- **Gutes Carbonatisierungsverhalten:**
Während der Alteration nehmen die Calcitgehalte (CaCO_3) kontinuierlich zu und liegen in den MV-Schlacken nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten über den Calcitgehalten in den MV-Rohschlacken, wobei gleichzeitig im Mineralbestand der MV-Schlacken kein Portlandit (Ca(OH)_2) mehr nachgewiesen werden kann.
- **Verzögertes Carbonatisierungsverhalten:**
Während der Alteration nehmen die Calcitgehalte (CaCO_3) in den MV-Schlacken sowohl ab als auch zu und erreichen zu Beginn und am Ende der Ablagerung Werte, die auf einem vergleichbaren Niveau liegen.
- **Schlechtes Carbonatisierungsverhalten:**
Während der Alteration nehmen die Calcitgehalte (CaCO_3) kontinuierlich ab und liegen in den MV-Schlacken nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten unter den Calcitgehalten in den MV-Rohschlacken, wobei gleichzeitig der Portlandit (Ca(OH)_2) im Mineralbestand der MV-Schlacken nur sehr langsam abgebaut wird.
- **Reaktionsträge MV-Schlacken:**
Am Ende der Alteration werden im Mineralbestand der MV-Schlacken nur noch geringe oder keine Anhydritgehalte (CaSO_4) festgestellt, sodass weitere Sulfatreaktionen nur noch in geringem Umfang ablaufen können und daher die MV-Schlacken als ausreichend raumbeständig angesehen werden.
- **Reaktive MV-Schlacken:**
Am Ende der Alteration werden im Mineralbestand der MV-Schlacken noch deutliche Anhydritgehalte (CaSO_4) festgestellt, sodass mit weiteren Sulfatreaktionen gerechnet werden muss und daher die MV-Schlacken als nicht ausreichend raumbeständig angesehen werden.

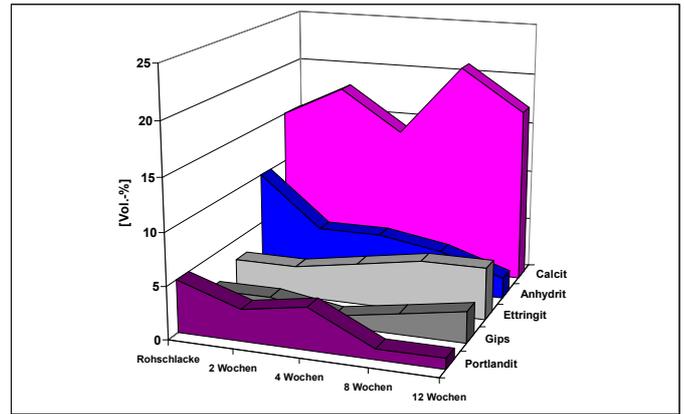
Calcitgehalte, die im Feinanteil während der gesamten Ablagerungszeit über 14 Vol.-% liegen, sprechen trotz mangelndem bzw. verzögertem Carbonatisierungsverhalten für eine stabile MV-Schlacke, die bei Baumaßnahmen eingesetzt werden kann, wenn gleichzeitig ausreichend abgeschlossene Sulfatreaktionen nachgewiesen werden.

Für die Beurteilung der Raumbeständigkeit von MV-Schlacken müssen demnach aus mineralogischer Sicht in erster Linie der Calcit (CaCO_3) und der Portlandit (Ca(OH)_2) sowie der Anhydrit (CaSO_4), der Bassanit ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), der Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und untergeordnet der Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) als Indexminerale im Mineralbestand der MV-Schlacken und/oder MV-Rohschlacken überprüft werden.

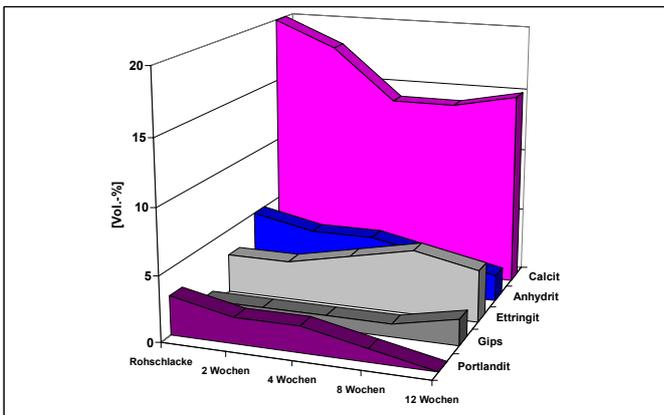
Die unterschiedlichen Verläufe der für das Alterationsverhalten und für die Raumbeständigkeit maßgeblichen Mineralphasen während einer Ablagerungszeit von 3 Monaten gehen aus Abb. 1 hervor [9].



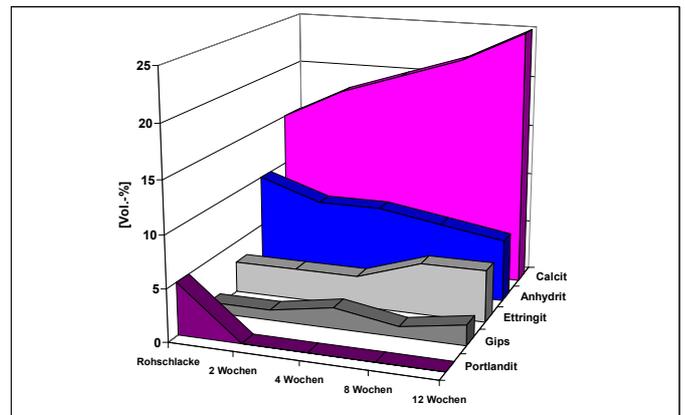
- gutes Carbonatisierungsverhalten
- ausreichend raumbeständig



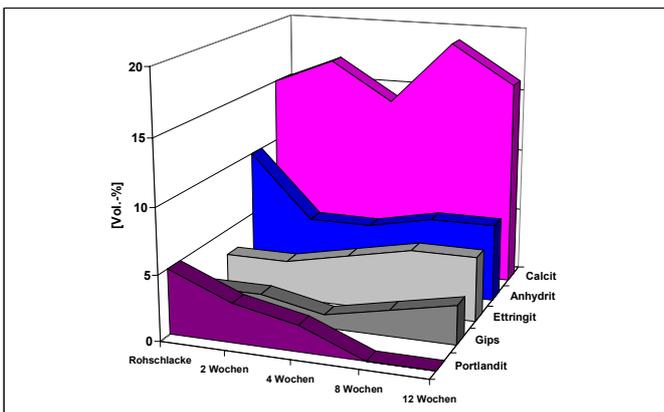
- verzögertes Carbonatisierungsverhalten
- ausreichend raumbeständig



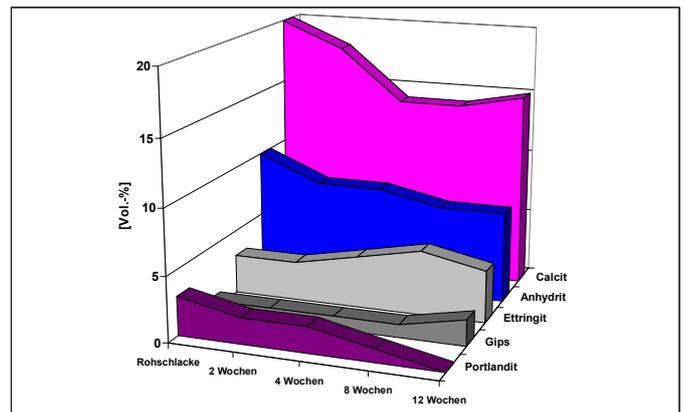
- mangelndes Carbonatisierungsverhalten
- ausreichend raumbeständig



- gutes Carbonatisierungsverhalten
- nicht ausreichend raumbeständig



- verzögertes Carbonatisierungsverhalten
- nicht ausreichend raumbeständig



- mangelndes Carbonatisierungsverhalten
- nicht ausreichend raumbeständig

 Calcit	CaCO_3
 Anhydrit	CaSO_4
 Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$

 Gips	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$
 Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$

Abb. 1 Unterschiedliche Verläufe der für das Alterationsverhalten und für die Raumbeständigkeit maßgeblichen Mineralphasen während einer Ablagerungszeit von 3 Monaten

2.2 UMWELTVERTRÄGLICHKEIT

2.2.1 Feststoffchemismus

Im Straßenbau werden neben natürlichen Mineralstoffen auch industrielle Nebenprodukte und Recyclingbaustoffe eingesetzt. Da die umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften eines Produktes maßgeblich von der chemischen Zusammensetzung und dem mineralogischen Aufbau eines Stoffes bestimmt werden, können mit Hilfe der Hauptelementzusammensetzung die zu erwartenden Eigenschaften eines Stoffes abgeschätzt werden. Gleichzeitig stellt die Kenntnis der Zusammensetzung der Hauptelemente die Basis für Materialverbesserungen dar.

Die chemische Feststoffanalyse zeigt, dass die MV-Schlacken aus den Hauptelementen Silizium, Aluminium, Eisen und Calcium zusammengesetzt sind. Daneben treten Magnesium, Titan, Kalium und Natrium auf. Im Spurenbereich werden Barium, Strontium, Rubidium, Mangan sowie die Schwermetalle Zink, Kupfer, Blei, Chrom, Nickel und Cadmium festgestellt. Danach ist die MV-Schlacke ein mit Eisen durchsetztes Calcium-Aluminium-Silikat. Als Anionen werden in erster Linie Chlorid und Sulfat nachgewiesen. Untergeordnet treten Fluorid und Phosphat auf.

Ein Vergleich der Hauptelementkonzentrationen von MV-Schlacken macht deutlich [7], dass die Oxidgehalte an Silizium, Calcium, Eisen und Aluminium großen Schwankungsbreiten unterworfen sind, die in erster Linie auf den unterschiedlichen Müllinput sowie auf Alterationsreaktionen zurückgeführt werden. Die Elemente Silizium, Calcium und Aluminium bauen die Mineralphasen auf, die den Hauptmineralbestand repräsentieren.

Die Hauptelementgehalte von MV-Schlacken weichen, wie auch die mineralogische Zusammensetzung, von den Werten natürlicher Gesteine und anderer industrieller Nebenprodukte, wie z.B. Eisenhüttenschlacken, ab (Abb.2). Während sich die MV-Schlacken von den sauren Magmatiten (z.B. Granit, Rhyolith) durch niedrigere SiO_2 - und höhere CaO-Gehalte unterscheiden, zeigen sie ähnliche Hauptelementgehalte wie basische Magmatite (z.B. Gabbro, Diabas, Basalt, Nephelinit). Allerdings sind die CaO-Gehalte in den MV-Schlacken, entsprechend dem Vergleich mit den sauren Magmatiten, höher. Bei den Hochofenschlacken werden im Vergleich zu den MV-Schlacken in erster Linie höhere CaO-Gehalte festgestellt, während die Stahlwerksschlacken neben den höheren CaO-Gehalten deutlich weniger SiO_2 aufweisen [11].

Die Verteilung der Schwermetalle auf die Feststoffströme ist bei der Rostfeuerung sehr unterschiedlich, wie aus Abb. 3 für die ausgewählten Metalle Cadmium, Blei, Eisen und Quecksilber hervorgeht. Sie liegen in den MV-Schlacken zum einen in metallischer Form oder in Legierungen vor, zum anderen können sie in stabile Silikate, Oxide und in die bei der Verbrennung neu gebildeten Glasphasen eingebaut sein. Daneben werden einige Schwermetalle, wie z.B. Blei und Zink im carbonatischen Bindemittel fixiert.

Im Vergleich zu den mittleren Konzentrationen in der Erdkruste zeigen die Schwermetalle eine außerordentliche Anreicherung in den MV-Schlacken. Dabei gehen die differierenden Schwankungsbreiten in den Feststoffgehalten in erster Linie auf den unterschiedlichen Müllinput sowie auf Alterationsreaktionen zurück (Tab. 1).

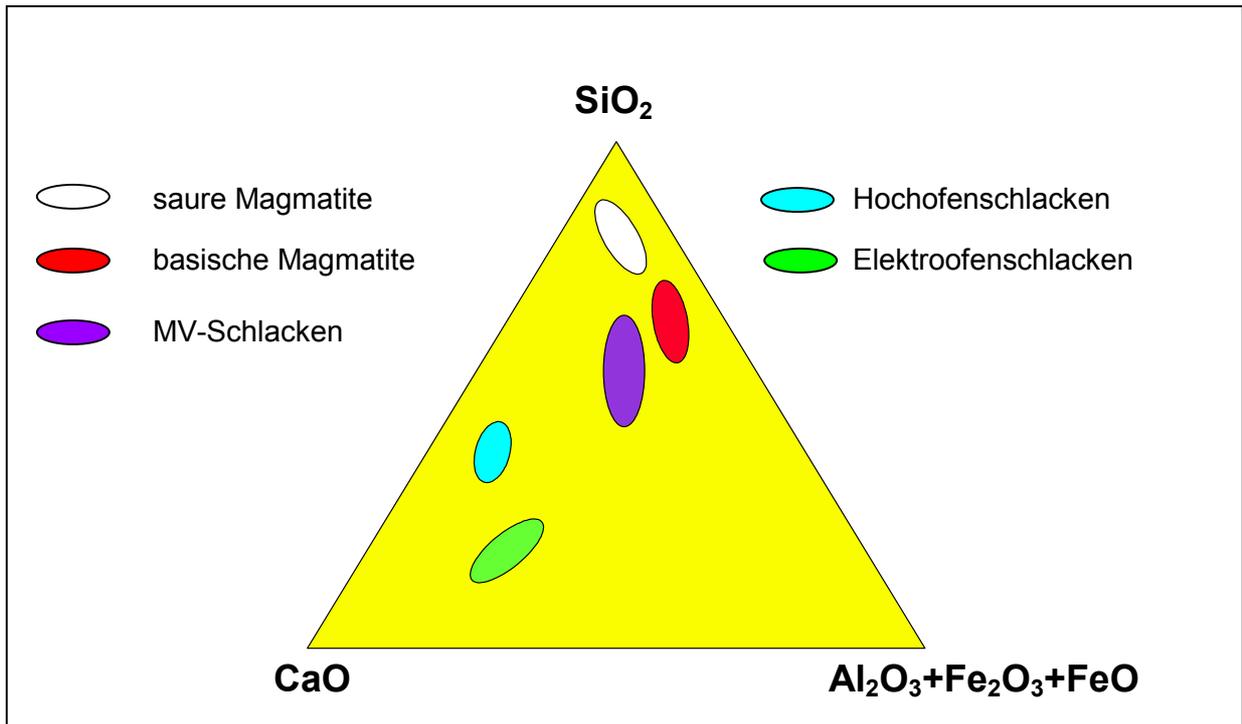


Abb. 2 Feststoffgehalte von MV-Schlacken, natürlichen Gesteinen und industriellen Nebenprodukten

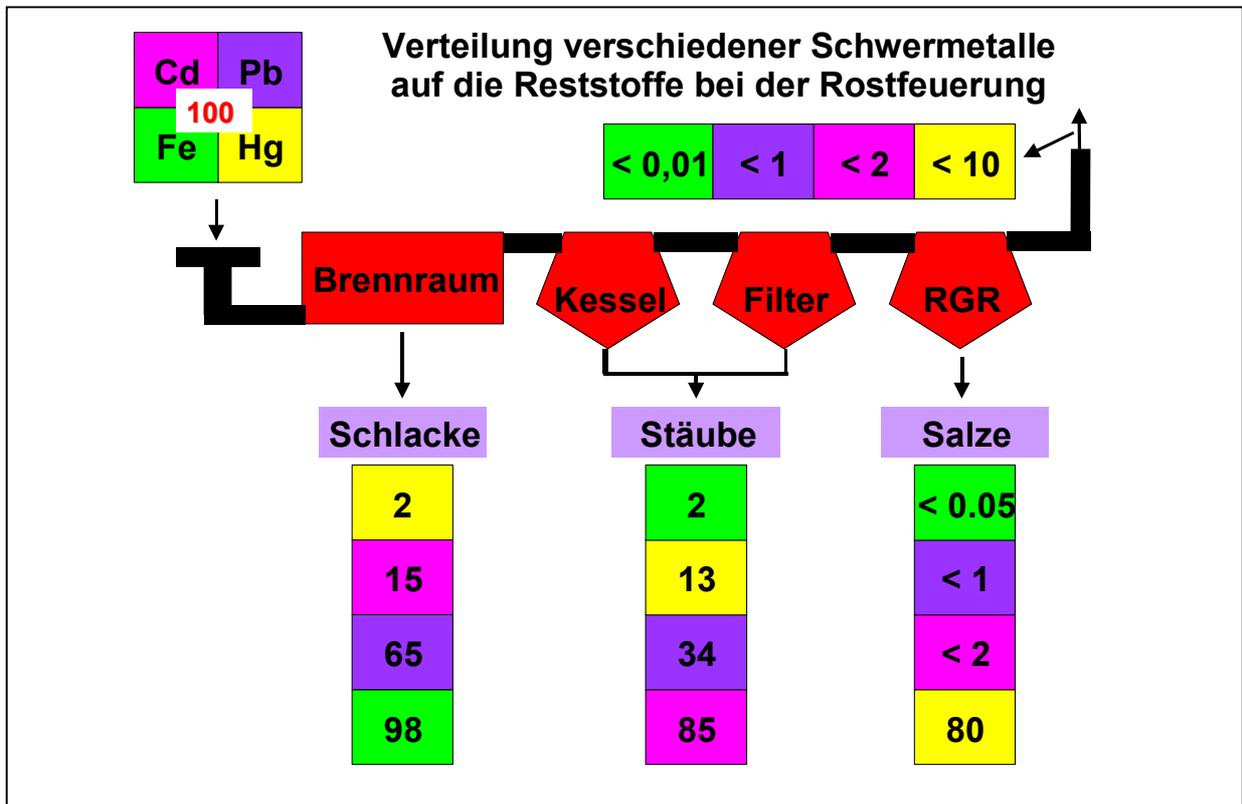


Abb. 3 Verteilung der Schwermetalle auf die Feststoffströme bei der Rostfeuerung

Tab. 1 Schwankungsbreiten der Schwermetalle (Feststoffgehalte) in MV-Schlacken aus 13 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik im Vergleich zu den mittleren Konzentrationen in der Erdkruste [8]

	MV-Schlacke ppm	Erdkruste ppm
Zink	1.795 bis 5.255	70
Kupfer	1.245 bis 5.823	60
Blei	1.108 bis 3.900	14
Chrom	295 bis 1.617	6
Nickel	90 bis 260	2,4

2.2.2 Elutionsverhalten

Wichtiger als die gesamte, potentielle Schadstoffkonzentration (Gesamtchemismus) einer MV-Schlacke hinsichtlich der Umweltbelastung ist die Untersuchung der Mobilität der Schadstoffe aus den Mineralphasen, die Träger des betreffenden Elementes sind. Die Inhaltstoffe im Eluat, insbesondere die mobilisierbaren Schwermetalle werden je nach Bindungsart mehr oder weniger stabil in das Kristallgitter der unterschiedlichen Mineralphasen eingebaut, so dass eine mögliche Auslaugbarkeit, neben den physikalisch-chemischen Milieubedingungen, entscheidend von den vorliegenden Mineralphasen beeinflusst wird.

Das physikalisch-chemische Auslaugverhalten von MV-Schlacken ist von der zur Verfügung stehenden Wassermenge, dem pH-Wert des Sickerwassers, dem Puffervermögen und der Alkalinität des umgebenden Milieus, dem Adsorptionsvermögen und der Ionenaustauschkapazität abhängig.

DEV S4-TEST

Für die Verwertung oder die Zuordnung einzelner Reststoffe zu bestimmten Deponieklassen wird in Deutschland für das Elutionsverhalten der Elutionstest DEV S4 [12] als genormtes Testverfahren herangezogen, der Qualitätsunterschiede zwischen ähnlichen Materialien aufzeigt und so als Entscheidungsbasis für unterschiedliche Verwertungs- oder Ablagerungsoptionen dient.

Ein Vergleich der DEV S4-Eluatuntersuchungen von MV-Rohschlacken und aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken zeigt eine starke Reduktion der Schwermetallgehalte (z.B. Pb, Zn), während das Elutionspotential von Sulfat und/oder Chlorid größeren Schwankungen unterliegt [13]. Während bestimmte Schwermetalle, wie z.B. Blei und Zink in

das Kristallgitter des Carbonates Calcit (CaCO_3) fest eingebaut werden, gehen die Schwankungen der Sulfatgehalte auf mineralogische Umwandlungsprozesse, in denen im Laufe der Ablagerung Sulfatphasen mit unterschiedlichen Löslichkeitsprodukten (Anhydrit, Bassanit, Gips, Ettringit) entstehen, zurück, während die Chloridgehalte lediglich durch reine Lösungsreaktionen gesteuert werden.

Ein Vergleich der DEV S4-Eluatgehalte mit den Zuordnungswerten der LAGA [3] und den Grenzwerten der TL Min-StB 2000 [2] zeigt [7], dass die meisten MV-Schlacken die Kriterien für einen Sekundärbaustoff in definierten Anwendungsbereichen im Bereich der Bauindustrie (z.B. als gebundenes und ungebundenes Material im Bereich des Straßenbaus und Erdbaus) erfüllen und nur vereinzelt Überschreitungen der Grenzwerte festgestellt werden. Trotzdem treten bei unterschiedlichen MV-Schlacken Qualitätsunterschiede bezüglich der Umweltverträglichkeit auf [10].

Da das Elutionsverhalten der MV-Schlacken entscheidend von der Bindungsart der Schwermetalle in den betreffenden Mineralphasen abhängig ist, spielt neben der Zusammensetzung des Müllinputs, der das Ausgangsmaterial für die sich auf dem Rost bildenden Mineralphasen darstellt, auch die Verfahrenstechnik der Müllverbrennungsanlage eine bedeutende Rolle, da eine Erhöhung der Gutbett-Temperatur und eine Verlängerung der Verweilzeit auf dem Verbrennungsrost zu einer gesteigerten Bildung stabiler Silikate, Oxide und Glasphasen führt, in denen die Schwermetalle dauerhaft fixiert werden können.

Kolonntest

Der Kolonntest wurde in den Niederlanden zur Charakterisierung von Rückständen aus der Kohle- und Abfallverbrennung entwickelt und erlaubt eine Charakterisierung des Elutionsverhaltens über kurze bis mittelfristige Zeiträume (ca. 50 bis 100 Jahre) [14].

Availability-Test (Verfügbarkeitstest)

Der Availability-Test (Verfügbarkeitstest) wurde in den Niederlanden entwickelt und ermittelt bei einem pH-Wert von 4 (eingestellt durch Salpetersäurezugabe) die Eluierbarkeit der Metalle aus fein gemahlene Proben, da unter natürlichen Bedingungen ein pH-Wert von 4 in einem Gewässer etwa die Grenze der erreichbaren Acidität darstellt [15]. Der Test beseitigt alle Einflüsse einer eventuellen Diffusionskontrolle. Der gefundene Wert für ein Element wird dessen verfügbarer Anteil genannt und gibt eine Vorstellung davon, welche Menge dieses Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann. Demnach charakterisiert der Availability-Test den chemisch fixierten Anteil des Elements und kann daher als gutes Maß für die chemischen Änderungen im Falle von Behandlungsmaßnahmen betrachtet werden. Für die Anionen wird dieser Test bei deren maximaler Löslichkeit bei einem pH-Wert von 7 durchgeführt.

2.3 BAUTECHNIK

Bei einer Verwendung der MV-Schlacken im Straßenbau müssen die bautechnischen Anforderungen erfüllt und ihre Umweltverträglichkeit gewährleistet sein. Im Bereich des Straßenbaus werden MV-Schlacken, die einer Güteüberwachung unterliegen, als Baumaterial eingesetzt. Die Güteüberwachung setzt sich, nach Erstellung eines Eignungsnachweises, aus einer regelmäßigen Eigenüberwachung des Produzenten und der Fremdüberwachung durch ein unabhängiges Prüfinstitut zusammen, mit dem Ziel, die bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften der MV-Schlacken entsprechend den Vorgaben der einzuhaltenden technischen Regelwerke (z.B. TL Min-StB 2000 [2]) im Hinblick auf eine Qualitätskontrolle zu prüfen und gleichbleibende Qualitätsanforderungen zu gewährleisten.

Die Sieblinien von aufbereiteten MV-Schlacken haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen. Für den Einsatz im klassifizierten Straßenbau als ungebebundenes Material, müssen die Anforderungen an die Korngrößenverteilung eingehalten werden, damit die geforderte Verdichtbarkeit gewährleistet werden kann und die Verkehrslasten aufgenommen bzw. in den Untergrund abgeleitet werden können. Die Grenzwerte für Frostschutz- und Schottertragschichten gemäß ZTVT-StB 95 [16] werden zwischen 0,063 und 2 mm von den meisten MV-Schlacken eingehalten; ab einer Korngröße von ca. 5 mm verlaufen die Sieblinien häufig über der zugrunde gelegten Soll-Linie. Aufgrund ihrer Korngrößenverteilung ist es möglich, unter Beachtung eventuell erforderlicher Sieblinienkorrekturen, die MV-Schlacken für bestimmte Anwendungsbereiche als ungebundenes Material im Straßenbau zu verwenden.

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacken liegen gemäß den Erfahrungen des Merkblattes [17] zwischen 1,5 und 1,9 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen 11 und 19 Gew.%. Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacken, die sich auch in der Baupraxis zeigt.

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ gibt über das Frostverhalten eines Materials Auskunft, das einer 10maligen Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung ausgesetzt wird. Während die Anforderungen für spezielle Einsatzgebiete im Straßenbau für das Gesamtgemisch der MV-Schlacken meistens erfüllt werden, zeigt sich jedoch bei einem Vergleich mit dem Frostwiderstand von natürlichen Gesteinen, dass die Materialeigenschaften von natürlichen Mineralstoffen nicht erreicht werden können.

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung zeigen, dass auch hier die stoffspezifischen Anforderungen von MV-Schlacken eingehalten werden, jedoch die mechanische Widerstandsfähigkeit von natürlichen Gesteinen ebenfalls nicht erreicht wird [7].

Die Ursache für die geringere Widerstandsfähigkeit der MV-Schlacken gegen eine Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung sowie die im Vergleich zu natürlichen Mineralstoffen geringere Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, gehen in erster Linie auf die relativ schwache Kornbindung, die teilweise hohe Porosität sowie auf die Anwesenheit bautechnisch nicht stabiler Mineralphasen, wie z.B. Sulfate und Chloride, in den MV-Schlacken zurück. Ein hoher Gehalt an stabilen Silikaten und Oxiden wirkt sich positiv auf die bautechnischen Eigenschaften aus, während hohe Salz- und Sulfatgehalte die Stabilität der MV-Schlacken negativ beeinflussen. Demnach wirkt sich ein hoher Versinterungsgrad festigkeitsfördernd auf die MV-Schlacken aus, wobei häufig ein direkter Zusammenhang zwischen erhöhtem Versinterungsgrad und erhöhtem Anteil von silikatischen Mineralphasen, wie z.B. Gehlenit und Äkermanit, besteht [7].

3. UNTERSUCHUNGSUMFANG

3.1 UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

Die Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von MV-Schlacken werden von den mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften bestimmt, die im wesentlichen von der unterschiedlichen Zusammensetzung des Müllinputs, der jeweiligen Verfahrenstechnik bei der Rostfeuerung, der Art des Aufbereitungsprozesses und der Art und Dauer der Ablagerung beeinflusst werden. Das Untersuchungsprogramm richtete sich nach den Vorgaben der Untersuchungsziele und wurde nach folgendem Schema ausgearbeitet:

- In 10 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik wurden jeweils bis zu zwei Wochen während des regulären Betriebes anlagenspezifische Müllfraktionen in den Verbrennungsraum eingebracht und unter definierten Verfahrensparametern thermisch behandelt.
- In drei Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik wurden während des regulären Betriebes die frisch produzierten MV-Rohschlacken jeweils zwei Wochen in gleichen stündlichen Zeitabständen beprobt, um den kurzfristigen Einfluss des Müllinputs auf die Qualität der MV-Schlacken bestimmen zu können.
- Zusätzlich wurden in drei Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik während des regulären Betriebes Mehrfachversuche mit unterschiedlicher Müllzusammensetzung jeweils bis zu zwei Wochen durchgeführt, um den Einfluss des Müllinputs bei gleicher Verfahrenstechnik untersuchen zu können.
- Nach der Ausbringung der MV-Rohschlacken aus dem Nassentschlacker wurden diese in den angeschlossenen Aufbereitungsanlagen unter definierten Randbedingungen aufbereitet und in Halden von bis zu 300 t drei Monate abgelagert.
- Die mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Untersuchungen erfolgten zur Charakterisierung des Alterationsverhaltens an den frisch produzierten MV-Rohschlacken sowie an den aufbereiteten MV-Schlacken nach einer Ablagerungszeit von 2, 4, 8 und 12 Wochen.

3.2 VERFAHRENSPARAMETER DER MÜLLVERBRENNUNGSANLAGEN UND MÜLLINPUT

In 10 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik wurden anlagenspezifische Müllzusammensetzungen thermisch behandelt und die entstandenen MV-Rohschlacken in den angeschlossenen Aufbereitungsanlagen definiert zu MV-Schlacken aufbereitet und anschließend drei Monate abgelagert, wobei in drei Müllverbrennungsanlagen Permanentbeprobungen der MV-Rohschlacken sowie in drei Müllverbrennungsanlagen Mehrfachversuche durchgeführt wurden.

Die wichtigsten Verfahrensparameter der untersuchten Müllverbrennungsanlagen und die jeweiligen Müllfraktionen, die während des Regelbetriebes in den einzelnen Müllverbrennungsanlagen thermisch behandelt wurden sowie die unterschiedliche Aufbereitungstechnik der jeweiligen Aufbereitungsanlage gehen aus Tab. 2 hervor.

Tab. 2 Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb

Anlage	A	B	C	D	E
Rostsystem	Vorschubrost	Walzenrost	Vorschubrost	Walzenrost	Rückschubrost
Durchsatz [t/a]	290.000	200.000	92.000	150.000	154.000
Linien	4	3	1	3	2
Feuerung	Mittel-Gleichstrom	Gleichstrom	Mittelstrom	Gleichstrom	Natur-Umlauf Dampferzeuger
Heizwert [kJ/kg]	11.000	10.000	11.000	10.800	11.000
Abfallart					
Hausmüll	x	x	x	x	x
Gewerbeabfall	x	x	x	x	x
Sperrmüll	x	x		x	x
Sonstiges	(Tiermehl)				
Schlackeanfall [t/a]	83.000	56.500	20.800	45.000	43.000
Aufbereitung					
Siebvorgänge	1	mehrere	mehrere	1	mehrere
FE-Abtrennung	x	x	x	x	x
NE-Abtrennung		x	x		x
Ort	Freiland	eingehaust	eingehaust	Freiland	eingehaust
Lagerung	Freiland	Freiland	Freiland	Freiland	Freiland

Anlage	F	G	H	I	J	K
Rostsystem	Treppen-Vorschubrost	Vorschubrost	Gegenlauf-Überschubrost	Vorschubrost	Vorschubrost	Vorschubrost
Durchsatz [t/a]	280.000	350.000	56.000	193.820	307.000	148.500
Linien	3	2	1	2	2	3
Feuerung	Mittelstrom	Mittelstrom	Gegenstrom	Mittelstrom	Mittelstrom	Mittelstrom
Heizwert [kJ/kg]	10.500	9.500	11.400	9.737	9.700	10.195
Abfallart						
Hausmüll	x	x	x	x	x	x
Gewerbeabfall	x	x	x	x	x	x
Sperrmüll	x	x	x	x	x	x
Sonstiges		(Tiermehl)	Klärschlamm			Klärschlamm
Schlackeanfall [t/a]	75.000	104.000	12.600	44.660	72.000	41.000
Aufbereitung						
Siebvorgänge	1	mehrere	1	mehrere	mehrere	
FE-Abtrennung	x	x	x	x	x	
NE-Abtrennung		x		x	x	
Ort	Freiland	eingehaust	Freiland	eingehaust	eingehaust	
Lagerung	Freiland	Freiland	Freiland	eingehaust	eingehaust	

3.3 UNTERSUCHUNGSMETHODEN

3.3.1 Mineralogische Untersuchungen

Die mineralogischen Untersuchungen wurden sowohl an der Feinfraktion als auch an der Grobfraktion der MV-Schlacken durchgeführt und werden für die Bestimmung des qualitativen und quantitativen Mineralbestandes sowie für die Bestimmung des Versinterungs- und Carbonatisierungsgrades herangezogen. Außerdem können anhand charakteristischer Mineralphasen das Alterationsverhalten und die Raumbeständigkeit bewertet werden.

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Proben wurde mit Hilfe eines Röntgendiffraktometers (Typ D 500 der Fa. Siemens) qualitativ sowie halbquantitativ bestimmt (Phasenanalyse mit Pulveraufnahmen, in: Minerals: Mineral Powder Diffraction File. Data Book and Search Manuals Group Data Book, JCPDS). Die röntgenographischen Pulveraufnahmen wurden in einem Winkelbereich 2θ von 3° bis 63° mit einer Messgeschwindigkeit von $1^\circ/\text{min}$. mit einer $\text{CuK}\alpha$ -Strahlung der Wellenlänge $0,15405 \text{ nm}$ gemessen.

3.3.2 Chemische Untersuchungen

- **Feststoffchemie**

Die Feststoffanalyse dient, neben der Bestimmung der Spurenelemente und Schwermetallgehalte, auch zur geochemischen Einordnung der MV-Schlacken in bestehende Standarddiagramme sowie zur Einstufung der MV-Schlacken in die Klassifikationschemata relevanter Regelwerke. Die Feststoffgehalte wurden mit folgenden Analysemethoden bestimmt:

- Röntgenfluoreszenzanalyse
- Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse
- naßchemische Untersuchungsmethoden
- Ionenchromatographie

- **DEV S4-Eluatuntersuchungen**

Die Einordnung des Elutionspotentials von MV-Schlacken entsprechend der gesetzlichen Regelwerke erfolgt in Deutschland anhand des Elutionstests DEV S4 [12], der eine vergleichende Bewertung des Elutionspotentials mit Laugungswerten anderer industrieller Nebenprodukte, wie z.B. Bauschutt-Recyclingmaterialien, Nebengesteine der Steinkohle, Rückstände der Braun- und Steinkohlefeuerung, Eisen- und Stahlwerksschlacken, erlaubt.

Der DEV S4-Test ist ein Laugungstest, der bei keinem festen pH-Wert durchgeführt wird. Die Probe wird 24 Stunden in destilliertem Wasser mit einem Flüssigkeit : Feststoff-Verhältnis von 10 geschüttelt und anhand folgender Untersuchungsmethoden bestimmt:

- DEV S4-Laugungstest nach DIN 38414, Teil 4 [12]
- Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse
- naßchemische Untersuchungsmethoden
- Ionenchromatographie

- **Bewertung des Langzeitverhaltens**

Das Langzeitverhalten der MV-Schlacken wurde mit Hilfe der folgenden niederländischen Tests bestimmt:

- a) **Kolonntest** [14] zur Charakterisierung des Elutionsverhaltens über kurze bis mittelfristige Zeiträume (ca. 50 bis 100 Jahre). Als Elutionsmittel wird destilliertes Wasser verwendet, das mit Salpetersäure auf einen pH-Wert von 4 eingestellt wird. Beim Kolonnen-test werden zunehmende Volumina von Wasser durch eine mit dem Testmaterial gefüllte Kolonne geschickt. Die mehrfache Beprobung mit Analyse des Eluates resultiert in einer zeitlichen Auflösung des Elutionsvorganges. Die bei einer Flüssigkeit : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge erlaubt eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 bis 100 Jahre.
- b) **Availability-Test** (Verfügbarkeitstest) [15], der eine Vorstellung davon gibt, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case Betrachtung). Bei diesem Verfahren wird eine Suspension kontinuierlich mit Säure oder Lauge titriert, bis ein bestimmter pH-Wert erreicht ist. Eine Reagenzlösung mit bestimmter Konzentration wird langsam zu der zu bestimmenden Flüssigkeit bis zur Erreichung eines bestimmten pH-Wertes zugetropft. Aus dem Verbrauch des Titrators kann der Gehalt der untersuchten Lösung an bestimmten Stoffen berechnet werden.

Für diese Laugungstests wurden folgende Untersuchungsmethoden verwendet:

- Kolonntest nach NEN 7345 [14]
- Availability-Test (Verfügbarkeitstest) nach NEN 7341 [15]
- Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse
- naßchemische Untersuchungsmethoden
- Ionenchromatographie

3.3.3 Bautechnische Untersuchungen

Die bautechnischen Untersuchungen richten sich nach den Vorgaben der TL Min-StB 2000 [2] für eine Verwendung von MV-Schlacken im Straßenbau und des Merkblattes über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau, Teil: MV-Schlacke [17]. Daneben wurden zusätzlich relevante Parameter für einen Einsatz der MV-Schlacken im Deponebereich geprüft. Dazu wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Stoffliche Zusammensetzung nach Merkblatt [17]
- Korngrößenverteilung nach DIN 52 098 [18]
- Kornform nach DIN 52 114 [19]
- Wassergehalt nach DIN 18 121, Teil 1 [20]
- Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel nach DIN 52 104 [21]
- Widerstand gegen mechanische Beanspruchung nach DIN 52 115 [22]
- Rohdichte nach DIN 52 102 [23]
- Schüttdichte nach DIN 52 110 [24]
- Proctordichte und optimaler Wassergehalt nach DIN 18 127 [25]
- Scherfestigkeit [26]
- Wasserdurchlässigkeit [27]

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

4.1 AUSWAHL DER MÜLLVERBRENNUNGSANLAGEN

Um den Einfluss der Müllzusammensetzung auf die Schlackequalität aufzuzeigen, wurden die durchzuführenden mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Prüfungen an MV-Schlacken aus 10 Müllverbrennungsanlagen durchgeführt, die folgende Anforderungen erfüllten:

- Kenntnis der Zusammensetzung des Müllinputs, da die volumenbezogenen Anteile dieser Stoffgruppe in den jeweiligen Müllverbrennungsanlagen aufgrund der vorgeschalteten regionalen Müllsammel- und Trennsysteme der Entsorgungsgebiete differieren.
- Möglichkeit der Durchführung von Mehrfachversuchen mit unterschiedlichem Müllinput in drei Müllverbrennungsanlagen bei gleichbleibender Fahrweise der Müllverbrennungsanlage.
- Möglichkeit zur permanenten Beprobung der MV-Rohschlacken unmittelbar nach deren Produktion in drei Müllverbrennungsanlagen.
- Kenntnis der mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften der MV-Schlacken aus den Jahren 1994-1996 zum Vergleich der aktuellen Ergebnisse mit den bereits ermittelten Kenndaten (Voraussetzung: möglichst unveränderte Verfahrenstechnik seit der Beprobung 1994-1996).

4.2 THERMISCHE BEHANDLUNG DES MÜLLINPUTS

Die unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung des Müllinputs der einzelnen Müllverbrennungsanlagen charakterisiert jeweils „definierte großtechnische Versuchsgemische“, die im weiteren Versuchsablauf thermisch behandelt wurden.

In den ausgewählten Müllverbrennungsanlagen wurden definierte Volumina anlagenspezifischer Müllfraktionen in den Brennraum eingebracht und unter den Bedingungen des Regelbetriebes thermisch behandelt. Um die erforderliche MV-Rohschlackenmenge für die Alterationsversuche von bis zu 300 t zu produzieren, wurden jeweils bis zu zwei Wochen Müllmengen bis zu 800 t unter gleichbleibenden verfahrenstechnischen Randbedingungen der Verbrennung zugeführt.

Anschließend wurden die MV-Rohschlacken in den angeschlossenen Aufbereitungsanlagen zu bautechnisch einsetzbaren Baustoffen aufbereitet.

4.3 AUFBEREITUNG DER MV-ROHSCHLACKEN ZU MV-SCHLACKEN

Damit die Müllverbrennungsschlacken in Bereichen des Bauwesens eingesetzt werden können, müssen sie gemäß der einschlägigen Regelwerke [2,3] einer Aufbereitung mit einer anschließenden dreimonatigen Ablagerung unterzogen werden. Die Aufbereitung in bautechnisch verwertbare Fraktionen (z.B. 0/32 mm) besteht in der Regel aus einer Siebung und einer FE-Metallabscheidung. In einigen Aufbereitungsanlagen wird eine zusätzliche NE-Abscheidung sowie in bestimmten Fällen eine Windsichtung zur Reduktion der Feinfraktion durchgeführt.

Während der dreimonatigen Ablagerung der MV-Schlacken kommt es infolge mineralogisch-chemischer Reaktionen zu einer Stabilisierung der umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften und zu einer Verbesserung der Raumbeständigkeit [9].

Aufgrund der großen Bedeutung der Aufbereitung/Lagerung für die umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften der MV-Schlacken, erfolgte die Aufbereitung der MV-Rohschlacken, die in den Großversuchen produziert wurden, zu den bautechnisch einsetzbaren MV-Schlacken jeweils unter den Verfahrensbedingungen des Regelbetriebes der betreffenden Aufbereitungsanlage. Die Mindestmenge an aufbereiteten MV-Schlacken, die jeweils einer dreimonatigen separaten Ablagerung unterzogen wurden, betrug mit Ausnahme eines Versuches mindestens 150 t bis 300 t.

4.4. PROBENNAHMESCHEMA

Die Probenahme für die mineralogischen, chemischen und bautechnischen Untersuchungen erfolgte in der Regel an der frisch produzierten MV-Rohschlacke sowie an der aufbereiteten MV-Schlacke nach einer Ablagerungszeit von 2, 4, 8 und 12 Wochen (Abb. 4).

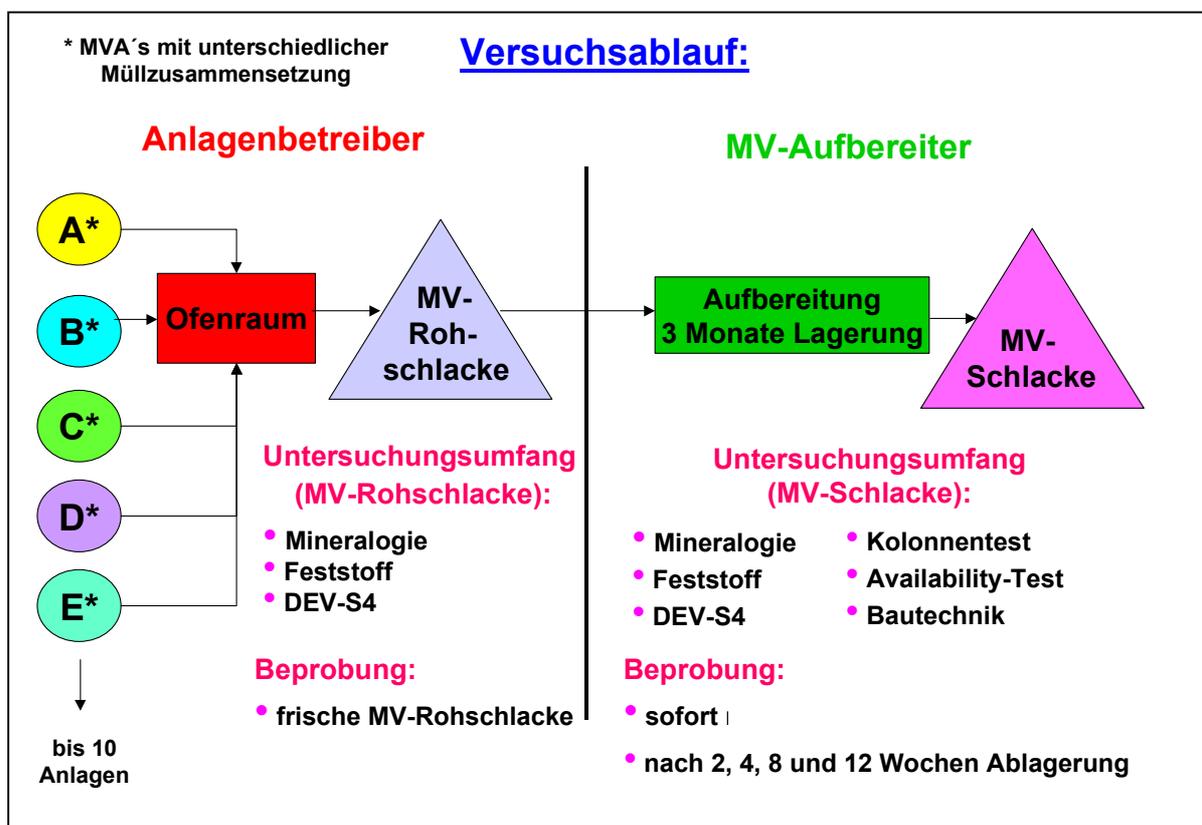


Abb. 4 Versuchsablauf und Probennahmeschema

Dazu wurde die jeweilige MV-Schlackenhalde an mehreren Stellen mit Hilfe eines Radladers geöffnet und umgemischt, um den Einfluss eines geschichteten Haldenaufbaus, der durch die Haldenaufschüttung entstehen kann, zu minimieren. Anschließend wurde die Halde an den betreffenden Stellen bis zu einer Schichthöhe von ca. 50 cm bis 1 m flächig mit dem Radlader ausgebreitet.

Die Entnahme der Einzelproben erfolgte mit Hilfe einer Schaufel, wobei die Probennahmepunkte flächig über die ausgebreitete Fläche festgelegt und 8 Mischproben von ca. 200 kg gezogen wurden.

Bei einer Anlage (MVA J) erfolgte die Probennahme aus verfahrenstechnischen Gründen mit Hilfe eines in die Versuchshalde fest installierten Rohres. Mit dieser Vorgehensweise sollte gewährleistet werden, dass die einzelnen Probennahmen jeweils an der gleichen Stelle in der Haldenmitte vorgenommen werden konnten.

Die Probenteilung und Aufbereitung der Mischproben zu Laborproben erfolgte in Anlehnung an die Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA 20 [3], LAGA PN 98 [28]) unter Beachtung der EN 932-2 [29] sowie unter Einbeziehung der Erfahrungswerte des Instituts für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe.

5. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

5.1 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE DER PERMANENTVERSUCHE

In den drei Müllverbrennungsanlagen D, I und K wurden während des regulären Betriebes permanent MV-Rohschlacken, entsprechend der jeweiligen Probennahmepläne, im Rohschlackebunker beprobt.

Das Ziel der Permanentversuche war, durch eine genau festgelegte, ständige Beprobung der frisch produzierten MV-Rohschlacken im Rohschlackebunker, kurzfristige Schwankungen in der Schlackequalität festzustellen, um einen direkten Bezug zum Einfluss des Müllinputs auf die Schlackequalität zu erhalten.

Motivation für die Permanentversuche war die Vermeidung von Homogenisierungseffekten, die durch die Vermischung von MV-Rohschlacken bzw. MV-Schlacken unterschiedlicher Qualität bei der Produktion der großtechnisch hergestellten Versuchsgemische (> 150 t) durch die Vermischung der MV-Rohschlacken im Rohschlackebunker, dem Transport zur Aufbereitungsanlage, der Lagerung der MV-Rohschlacken im Vorlager, während des Aufbereitungsprozesses (Siebung, Metallabscheidung) und der anschließenden Nachlagerung der aufbereiteten MV-Schlacken auftreten.

Während somit die Großversuche die Eigenschaften von homogenen Schlackenholden aus einem größeren Produktionszeitraum (1 bis 2 Wochen) abbilden, können mit den Permanentbeprobungen kurzfristige Qualitätsschwankungen der MV-Rohschlacken während der Produktion erfasst werden.

5.1.1 Permanentbeprobung der MV-Schlacken aus der MVA D

Parallel zur Produktion des großtechnischen Versuchsgemisches (MV-Schlacke D-2), wurden während des Betriebes ständig MV-Rohschlackenproben aus dem Rohschlackebunker gezogen und mineralogisch analysiert.

5.1.1.1 Probennahme während des Versuchsbetriebes

Die permanente Beprobung von MV-Rohschlacken im Schlackebunker der MVA D während des Versuchsbetriebes geht aus Tab. 3 und Abb. 5 hervor, wobei jeweils alle 2 Stunden MV-Rohschlacken mit dem Greifer aus dem Schlackebunker entnommen und 3 Teilproben zu einer Durchschnittsprobe vereinigt wurden.

Tab. 3 Probennahmeschema für die Permanentversuche in der MVA D

	Mo	Di	Mi	Do	Fr		Mo	Di	Mi
	15.07.02	16.07.02	17.07.02	18.07.02	19.07.02		22.07.02	23.07.02	24.07.02
"Halde 1"	12.00	8.00	8.00	8.00	8.00		12.00	8.00	8.00
	14.00	10.00	10.00	10.00	10.00		14.00	10.00	10.00
	16.00	12.00	12.00	12.00	12.00		16.00	12.00	12.00
"Halde 2"	18.00	14.00	14.00	14.00	14.00		18.00	14.00	14.00
	20.00	16.00	16.00	16.00	16.00		20.00	16.00	16.00
	22.00	18.00	18.00	18.00	18.00		22.00	18.00	18.00
"Halde 3"	24.00	20.00	20.00	20.00	20.00		24.00	20.00	20.00
	2.00	22.00	22.00	22.00	22.00		2.00	22.00	22.00
	4.00	24.00	24.00	24.00	24.00		4.00	24.00	24.00

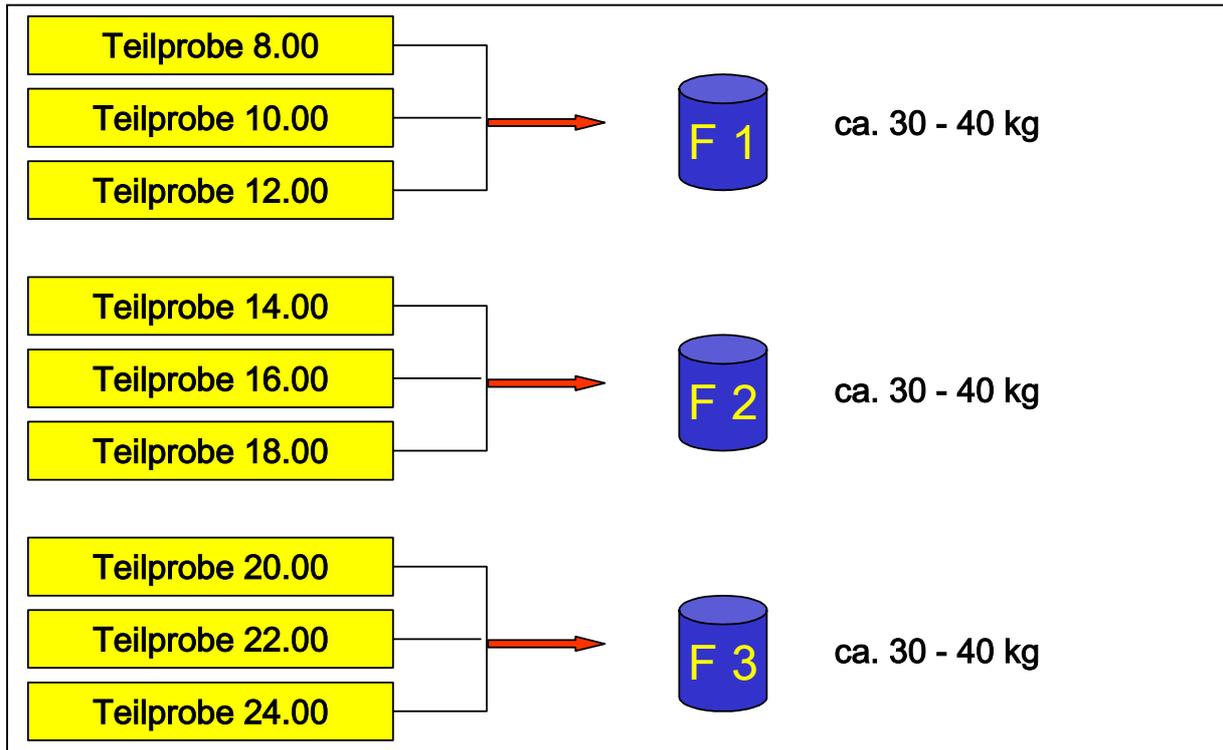


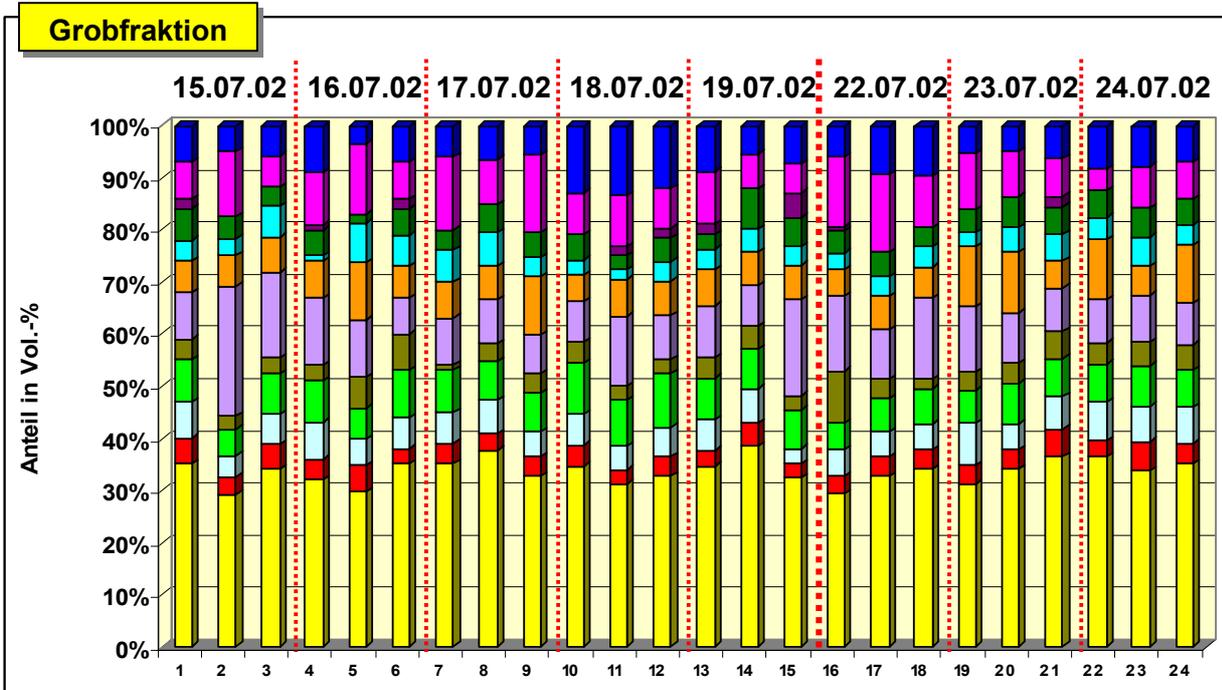
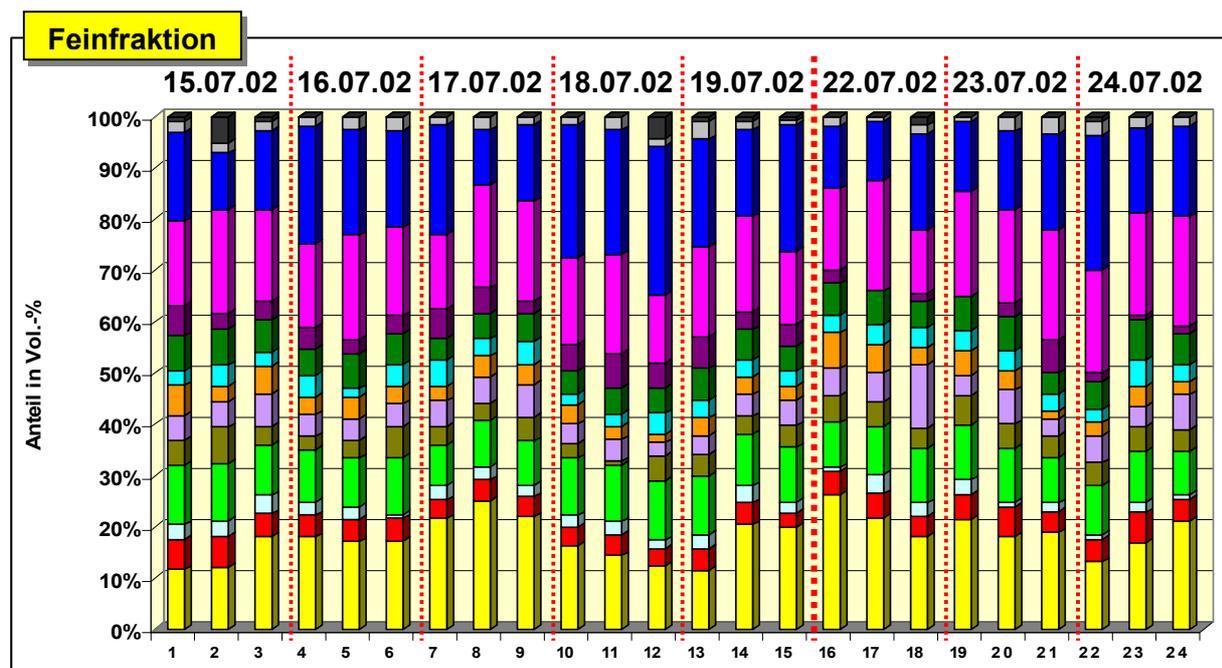
Abb. 5 Herstellung der Mischproben für die mineralogischen Untersuchungen während der Permanentversuche in der MVA D

5.1.1.2 Mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken aus den Permanentversuchen

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und Grobfraktion der MV-Rohschlacken gehen aus Abb. 6 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten.

Im Feinanteil der MV-Rohschlacken stellen das Oxid Quarz (SiO_2), das Carbonat Calcit (CaCO_3) und das Sulfat Anhydrit (CaSO_4) die mineralogischen Hauptphasen dar, während die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) und Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie die Sulfate Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) und Gips ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) auf.

In der Grobfraktion der MV-Rohschlacken stellen das Oxid Quarz (SiO_2) und in einer Probe das Silikat Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) die alleinigen Hauptphasen dar, während die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), das Carbonat Calcit (CaCO_3) und das Sulfat Anhydrit (CaSO_4) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) und das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) auf.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$		
■ Magnetit	Fe_3O_4	<u>Hydroxide:</u>	
		■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Åkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$		
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	<u>Sulfate:</u>	
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$
		■ Gips	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$

Abb. 6 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und der Grobfraktion der MV-Rohschlacken D-2 aus dem Permanentversuch

Die Untersuchungen der MV-Rohschlacken im Rahmen der Permanentversuche zeigen:

- In der Grob- und Feinfraktion treten deutliche Unterschiede in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken auf, wobei in der Grobfraktion vorwiegend die für die mechanischen Eigenschaften einer MV-Schlacke verantwortlichen Oxide und Silikate angetroffen werden, während in der Feinfraktion die für das Alterationsverhalten und für die Raumbeständigkeit einer MV-Schlacke zuständigen Carbonate und Sulfate angereichert sind (Abb. 7).
- Aufgrund der mineralogischen Haupt- und Nebenphasen der MV-Rohschlacken kann der Untersuchungszeitraum in 3 Bereiche (1. Bereich: 15.-17.07.02; 2. Bereich: 18.-19.07.02; 3. Bereich: 22.-24.07.02) eingeteilt werden, wobei
 - im ersten und im dritten Bereich in der Grobfraktion die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($\text{Na,Ca}[Al(Al,Si)-Si_2O_8]$) sowie das Carbonat Calcit (CaCO_3) deutlich angereichert sind, während im mittleren Bereich ein starkes Ansteigen des Calciumsulfates Anhydrit (CaSO_4) und untergeordnet des Silikates Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) festgestellt wird und
 - in der Feinfraktion das sehr starke Ansteigen des Sulfates Anhydrit (CaSO_4) sowie das schwache Ansteigen des Silikates Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) im zweiten Bereich noch deutlicher zum Ausdruck kommt. Die starken Schwankungen des Quarzgehaltes (SiO_2) sind nicht genetisch bedingt, sondern gehen auf die Quarzrelikte aus der Grobfraktion zurück, in der Quarz die dominierende Hauptphase darstellt (Abb. 7).
- Neben der Grundlast, die aus Hausmüll, gemischtem Material und Sperrmüll zusammengesetzt ist, wurden im 1. Bereich nicht kompostierbare Fraktionen von Kompostierungsanlagen mitverbrannt, die im 2. Bereich fehlen. Anstelle der BKW-Reste wurden hier Industrieschlämme mitverbrannt. Im 3. Bereich war der Anteil an Hausmüll im Verhältnis zu den anderen Müllfraktionen am größten und es wurden nur geringe Anteile an Industrieschlämmen und nicht kompostierbaren Fraktionen von Kompostierungsanlagen thermisch behandelt. Ein Vergleich des Müllinputs mit den bei der Verbrennung entstandenen Mineralphasen lässt einen sehr deutlichen Zusammenhang zwischen den drei Bereichen unterschiedlicher mineralogischer Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken und den unterschiedlichen Müllmengen und Müllzusammensetzungen erkennen (Abb. 8).
- Die thermische Behandlung von unterschiedlich zusammengesetzten Müllmengen spiegelt sich in einer differenzierten mineralogischen Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken wider, wobei besonders die höheren Gehalte von Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($\text{Na,Ca}[Al(Al,Si)-Si_2O_8]$) im 1. und 3. Bereich des Untersuchungszeitraumes auffallen. Da diese Mineralphasen (Feldspäte) in Böden angereichert sind, deuten sie somit die Mitverbrennung von nicht kompostierbaren Resten aus Kompostierungsanlagen an. Die Mitverbrennung von Industrieschlämmen, die besonders im mittleren Bereich des Untersuchungszeitraumes deutlich wird, ist, neben den höheren Gehalten von Anhydrit (CaSO_4), auch durch höhere Gehalte von Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) gekennzeichnet, einem Mineral, das im vorliegenden Fall auf Gutbett-Temperaturen von ca. 900 - 950°C hinweist.
- Wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, wird die Qualität der MV-Rohschlacken neben der Grundlast (Hausmüll, gemischte Abfälle), auch von mengenmäßig untergeordneten Sonderfraktionen bestimmt. Während die Grundlast das silikatisch-oxidische Schlackengerüst definiert, führt die Mitverbrennung von Industrieschlämmen und BKW-Resten zu kurzzeitig erkennbaren Veränderungen in der Schlackequalität, die sich in Schwankungen der temperaturempfindlicheren Sulfat- und Carbonatphasen im Mineralbestand äußert, die für das Alterationsverhalten jedoch eine entscheidende Rolle spielen.

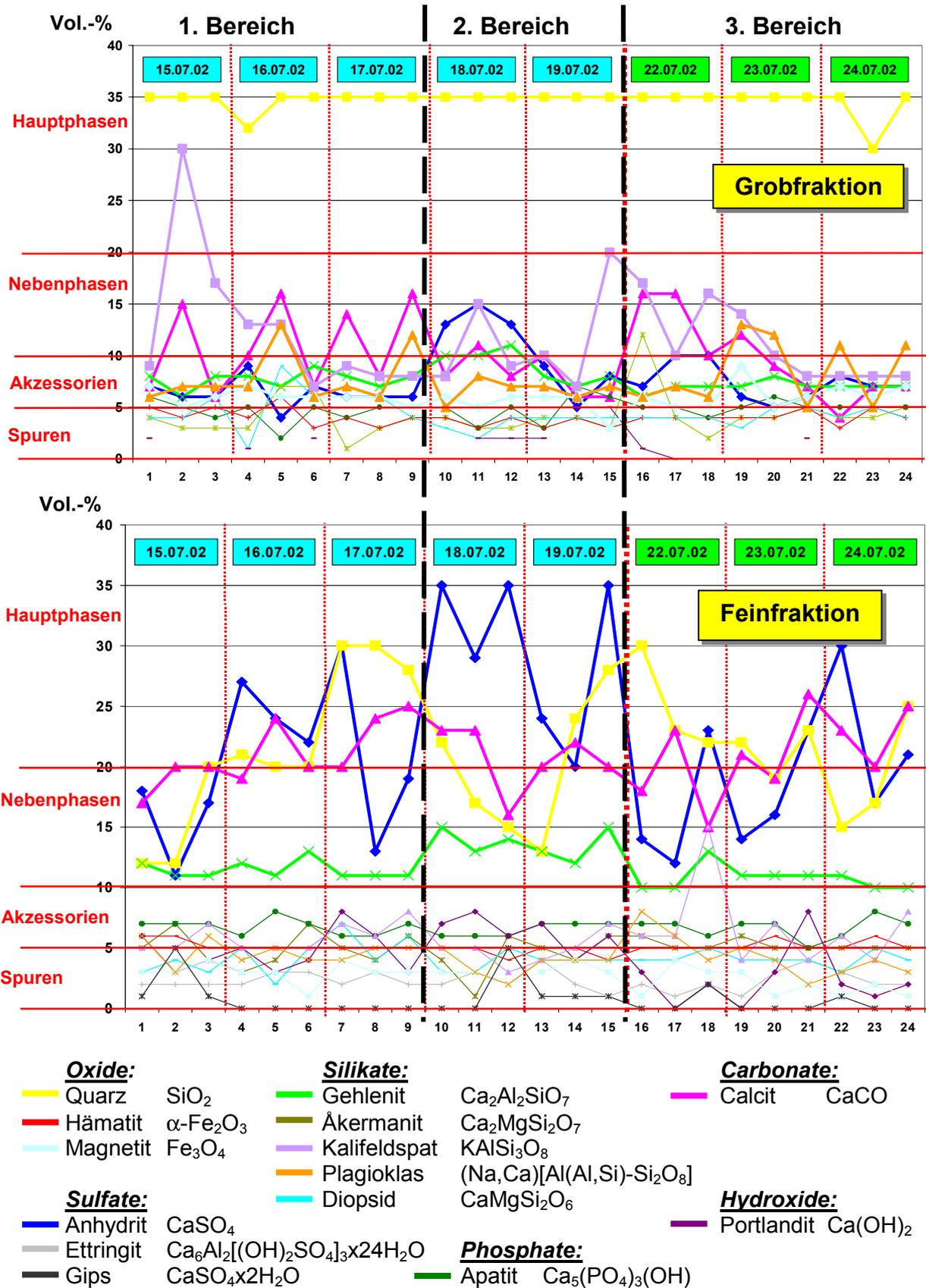


Abb. 7 Änderungen der mineralogische Phasenzusammensetzung der Grob- und Feinfraktion der MV-Rohschlacken D-2 während der Permanentversuche

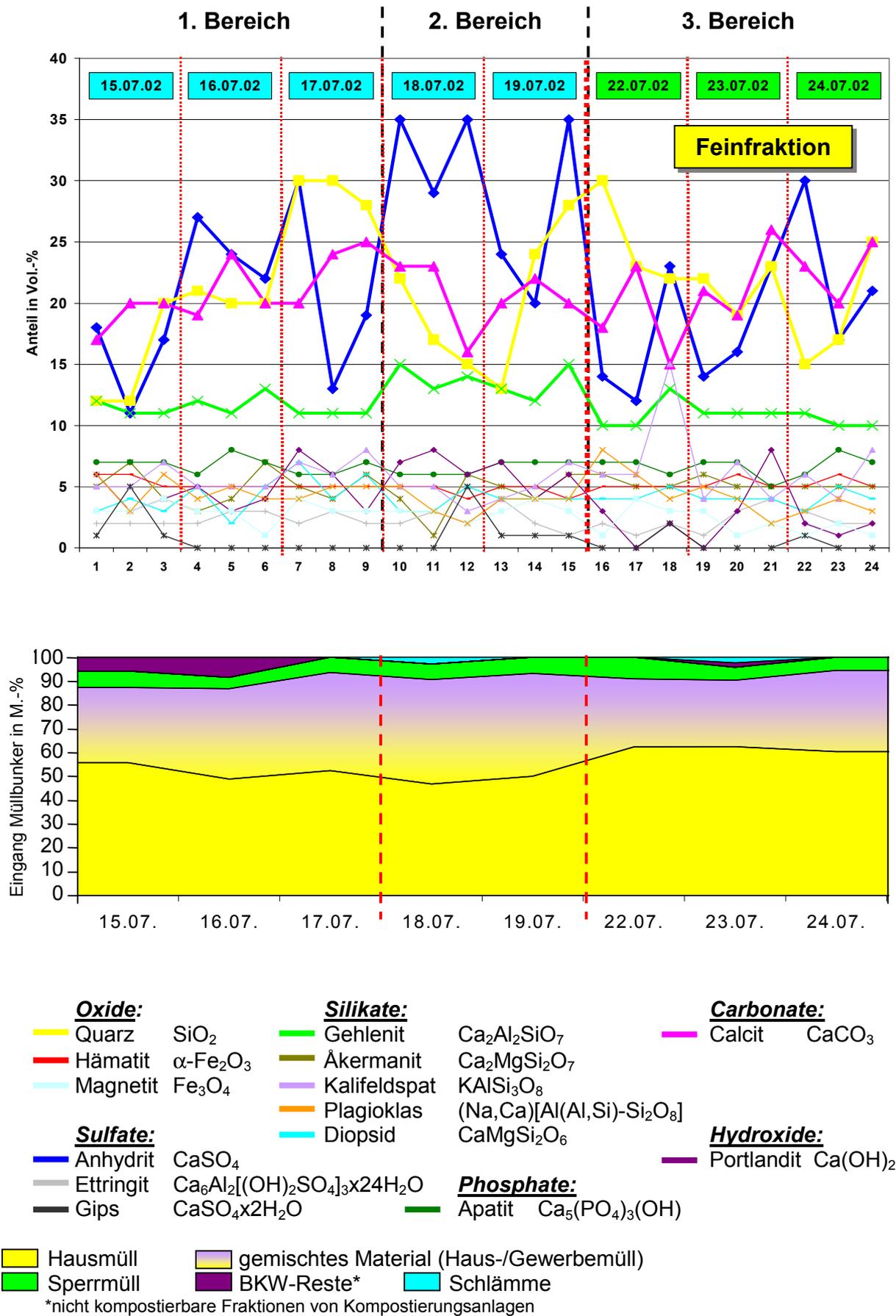


Abb. 8 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Rohschlacken D-2 und thermisch behandelte Müllmengen im Versuchszeitraum

5.1.2 Permanentbeprobung der MV-Rohschlacken aus der MVA I

Parallel zur Produktion der MV-Rohschlacke I für den Großversuch, die über einen Versuchszeitraum von 8 Tagen produziert wurde, wurden aus der laufenden Schlackenproduktion permanent MV-Rohschlackenproben aus dem Schlackebunker gezogen und mineralogisch analysiert.

5.1.2.1 Probennahme während des Versuchsbetriebes

Die permanente Rohschlackenbeprobung im Schlackebunker der MVA I während des Versuchszeitraumes von 13 Tagen geht aus Tab. 4 und Abb. 9 hervor, wobei jeweils alle 2 Stunden Schlacken aus der laufenden Produktion mit dem Greifer aus dem Schlackebunker entnommen und 3 Teilproben zu einer Durchschnittsprobe vereinigt wurden.

Tab. 4 Probennahmeschema für die Permanentversuche in der MVA I

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	28.4	29.4	2.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5
Halde 1	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	12.00	8.00	8.00	8.00	8.00	12.00	8.00	8.00
	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	14.00	10.00	10.00	10.00	10.00	14.00	10.00	10.00
	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	16.00	12.00	12.00	12.00	12.00	16.00	12.00	12.00
Halde 2	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	18.00	14.00	14.00	14.00	14.00	18.00	14.00	14.00
	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	20.00	16.00	16.00	16.00	16.00	20.00	16.00	16.00
	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	22.00	18.00	18.00	18.00	18.00	22.00	18.00	18.00
Halde 3	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	24.00	20.00	20.00	20.00	20.00	24.00	20.00	20.00
	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	2.00	22.00	22.00	22.00	22.00	2.00	22.00	22.00
	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	4.00	24.00	24.00	24.00	24.00	4.00	24.00	24.00

Die Probennahme und die Aufbereitung der Teilproben zu Tagesmischproben erfolgte entsprechend dem Schema auf Abb. 9.

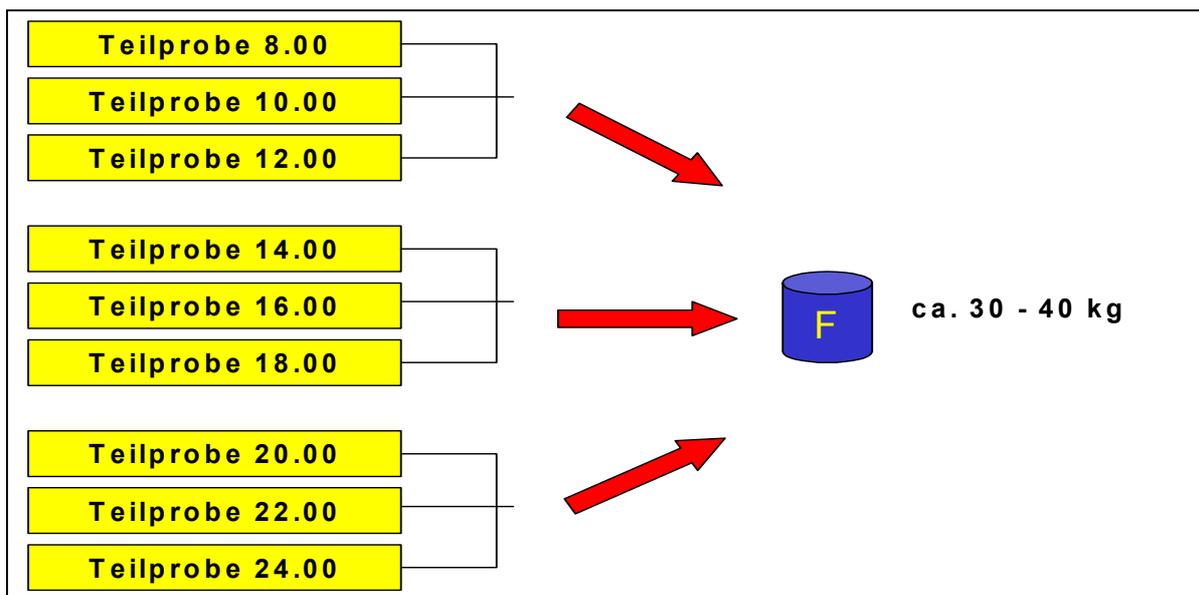


Abb. 9 Herstellung der Mischproben für die Analysen während der Permanentversuche

5.1.2.2 Mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken aus den Permanentversuchen

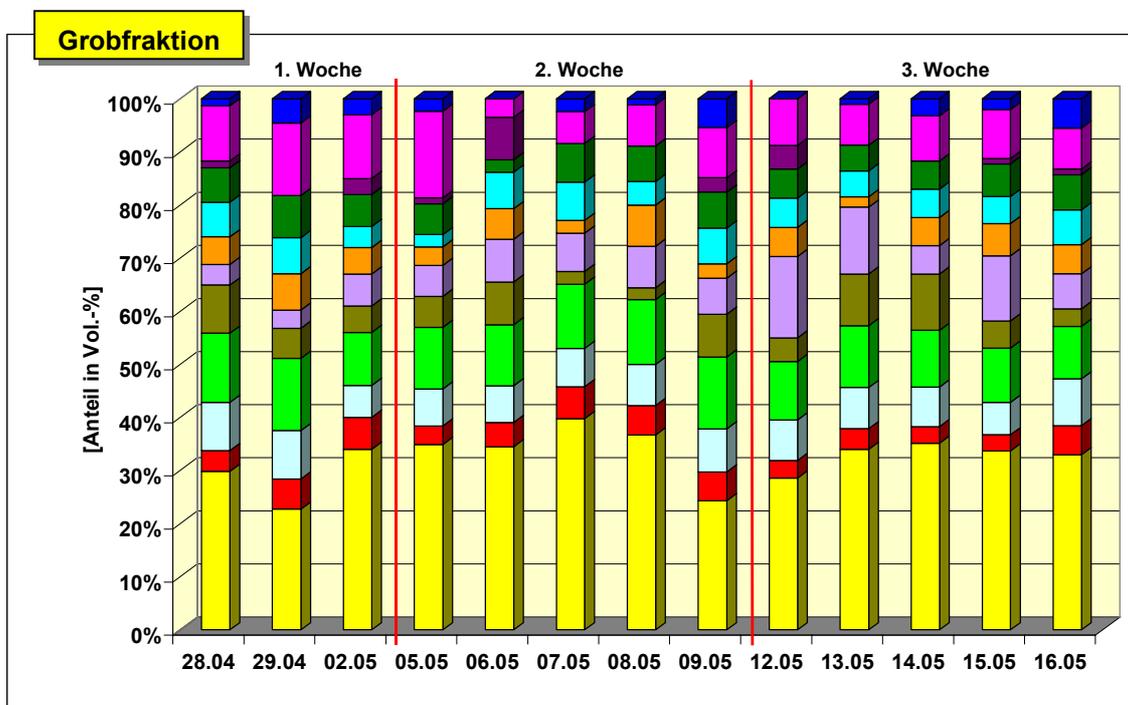
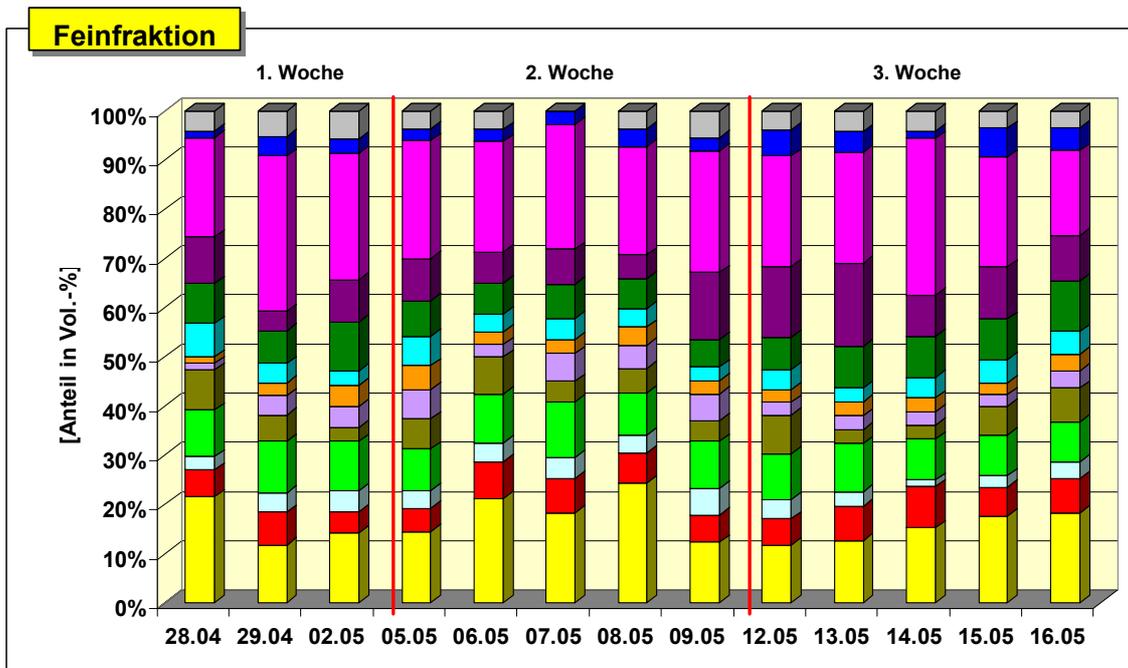
Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und der Grobfraktion der MV-Rohschlacken gehen aus Abb. 10 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten.

Im Feinanteil der MV-Rohschlacken stellen das Oxid Quarz (SiO_2) und das Carbonat Calcit (CaCO_3) die mineralogischen Hauptphasen und Nebenphasen dar. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie die Sulfate Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) und Gips ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) auf.

In der Grobfraktion der MV-Rohschlacken stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die Hauptphase dar, während die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) und teilweise Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) das Carbonat Calcit (CaCO_3), das Sulfat Anhydrit (CaSO_4) und das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) auf.

Die Untersuchungen der MV-Rohschlacken im Rahmen der Permanentversuche zeigen:

- In der Grob- und Feinfraktion treten deutliche Unterschiede in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken auf, wobei in der Grobfraktion die Oxide und Silikate verstärkt auftreten, während in der Feinfraktion die Sulfate angereichert sind (Abb. 10).
- Im Mineralbestand der MV-Rohschlacken werden in der Grobfraktion im Bereich der Haupt- und Nebenphasen keine größeren Schwankungen festgestellt. Die unterschiedlichen Quarzgehalte (SiO_2) stellen Relikte aus dem Müllinput dar und sind nicht als Neubildungen auf dem Verbrennungsrost entstanden. Die akzessorisch auftretenden Mineralphasen Calcit (CaCO_3) und Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) zeigen in der ersten bzw. dritten Versuchswoche geringe Anreicherungen (Abb. 11).
- Die Homogenität im Mineralbestand wird besonders in der Feinfraktion deutlich. Auch hier können nur geringe Schwankungsbreiten erkannt werden, die an den leichten Anreicherungen von Anhydrit (CaSO_4) in der ersten und dritten Versuchswoche zu erkennen sind. Die Schwankungsbreiten bei Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gehen nicht direkt auf den Müllinput, sondern auf Hydratationsreaktionen im Nassentschlacker zurück (Abb. 12).
- Der aufgegebene Müllinput war im Versuchszeitraum im wesentlichen aus Hausmüll und Gewerbeabfall sowie aus geringen Mengen an Sperrmüll zusammengesetzt. Die relativ homogene Müllzusammensetzung spiegelt sich auch in der mineralogischen Phasenzusammensetzung wider, da auch hier nur geringe Schwankungen zu erkennen sind. Die leichten Anreicherungen von Anhydrit in der Feinfraktion können möglicherweise auf den gering erhöhten Gewerbemüllanteil zurückgeführt werden.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$		
■ Magnetit	Fe_3O_4	<u>Hydroxide:</u>	
		■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Åkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$		
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	<u>Sulfate:</u>	
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
		■ Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Abb. 10 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und der Grobfraktion der MV-Rohschlacken I aus den Permantversuchen

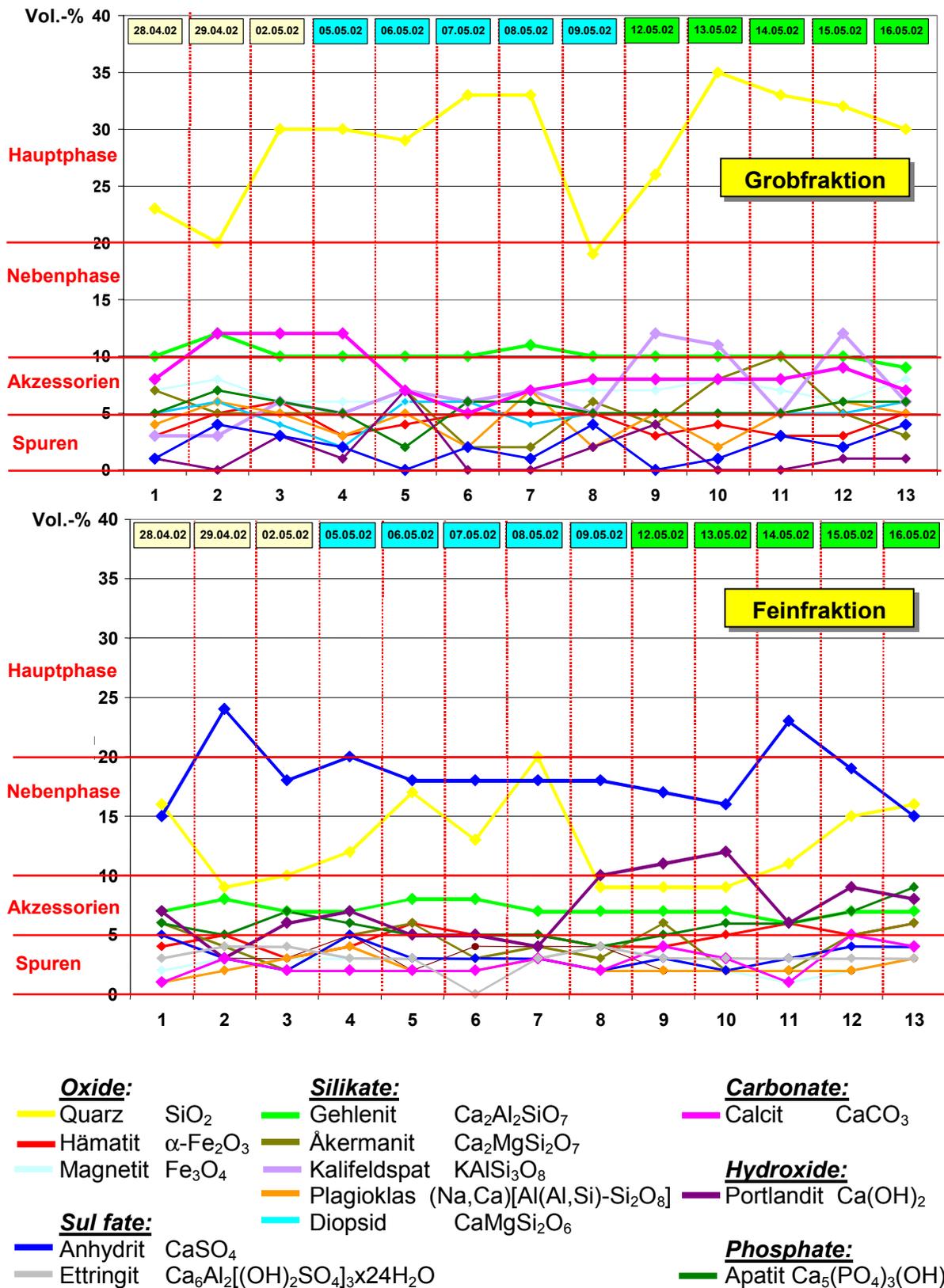


Abb. 11 Änderungen der mineralogische Phasenzusammensetzung der Grob- und Feinfraktion der MV-Rohschlacken I während der Permanentversuche

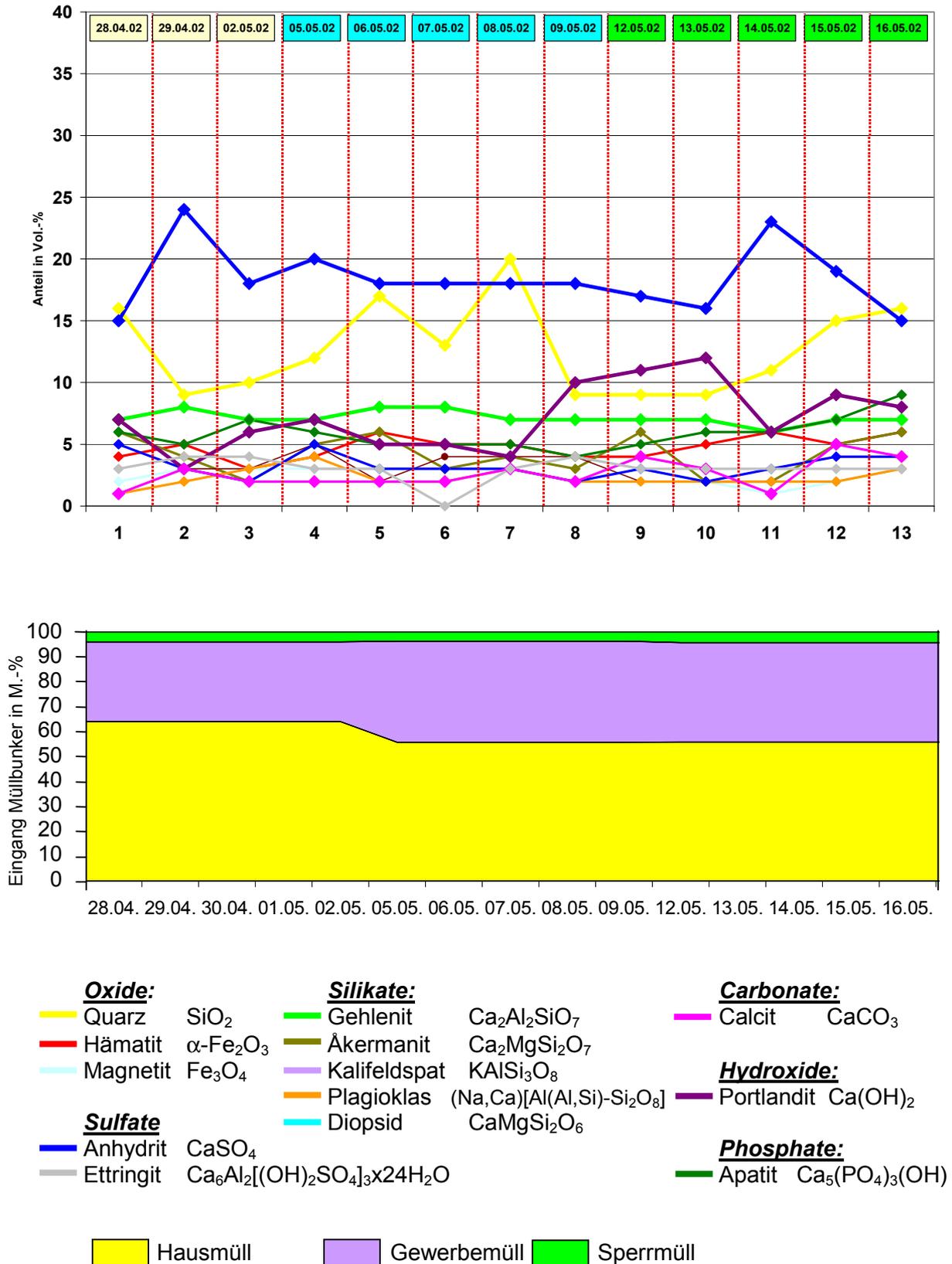


Abb. 12 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und thermisch behandelte Müllmengen während der Permanentversuche

5.1.3 Permanentbeprobung der MV-Schlacken aus der MVA K

Aus der laufenden Produktion der MV-Rohschlacken wurden im Zeitraum von 2 Wochen permanent Proben aus dem Rohschlackebunker gezogen und mineralogisch analysiert. Ein Großversuch mit den MV-Schlacken aus dem MVA K konnte aus verfahrenstechnischen Gründen nicht durchgeführt werden.

5.1.3.1 Probennahme während des Versuchsbetriebes

Die permanente Rohschlackenbeprobung im Schlackebunker der MVA K während des Versuchsbetriebes geht aus Tab. 5 und Abb. 13 hervor, wobei jeweils alle 2 Stunden MV-Rohschlacken mit dem Greifer aus dem Schlackebunker entnommen und 3 Teilproben zu einer Mischprobe vereinigt wurden.

Tab. 5 Probennahmeschema für die Permanentversuche in der MVA K

	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag		Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
	21.10.02	22.10.02	23.10.02	24.10.02	25.10.02		28.10.02	29.10.02	30.10.02	31.10.02	01.11.02
Fass 1	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00		8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00		10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00		12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Fass 2	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00		14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00		16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00		18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
Fass 3	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00		20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00		22.00	22.00	22.00	22.00	22.00
	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00		24.00	24.00	24.00	24.00	24.00

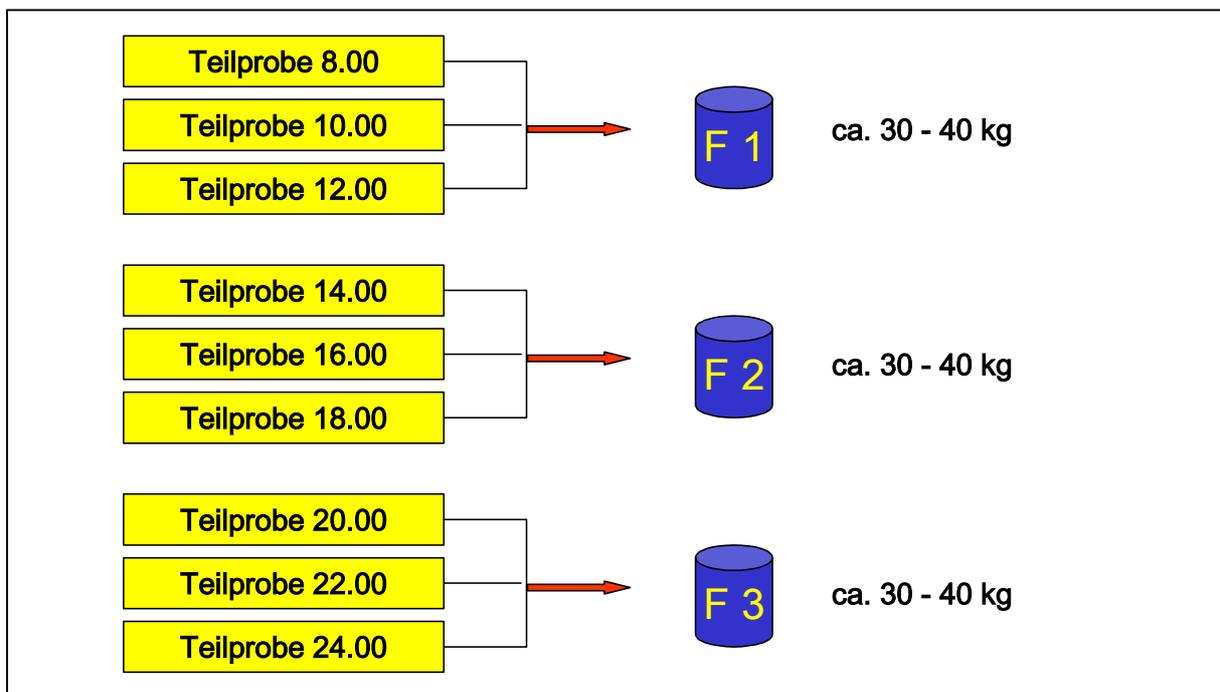


Abb. 13 Herstellung der Mischproben für die mineralogischen Untersuchungen während der Permanentversuche in der MVA K

5.1.3.2 Mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken aus den Permanentversuchen

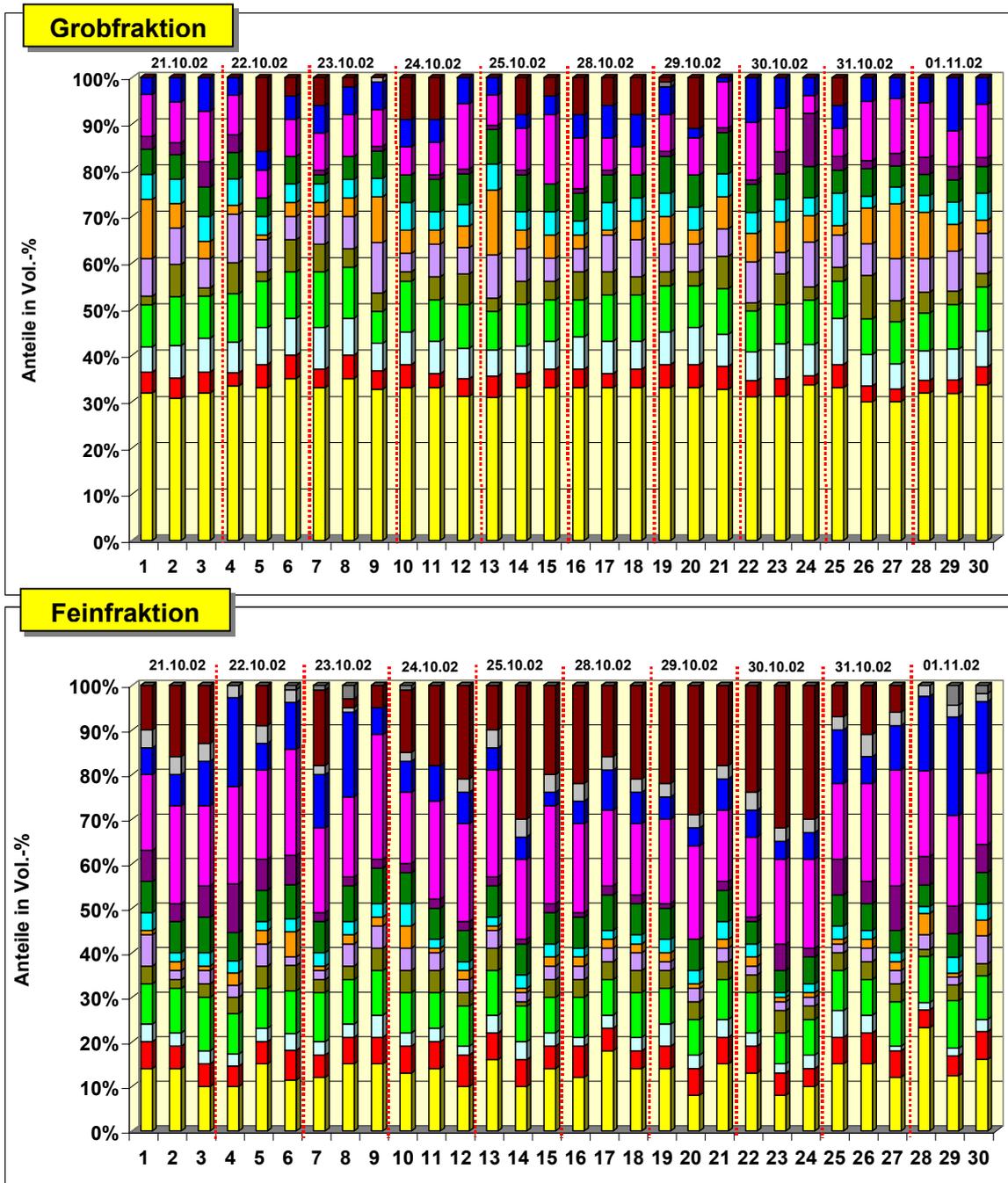
Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und der Grobfraktion der MV-Rohschlacken gehen aus Abb. 14, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten.

Im Feinanteil der MV-Schlacken stellen das Carbonat Calcit (CaCO_3) und teilweise das Sulfat Anhydrit (CaSO_4) die mineralogischen Hauptphasen dar, während die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) und das Oxid Quarz (SiO_2) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Quarz (SiO_2), Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) auf.

In der Grobfraktion der MV-Rohschlacken stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die alleinige Hauptphase dar, während die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) und das Carbonat Calcit (CaCO_3) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Sulfat Anhydrit (CaSO_4) und das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) auf.

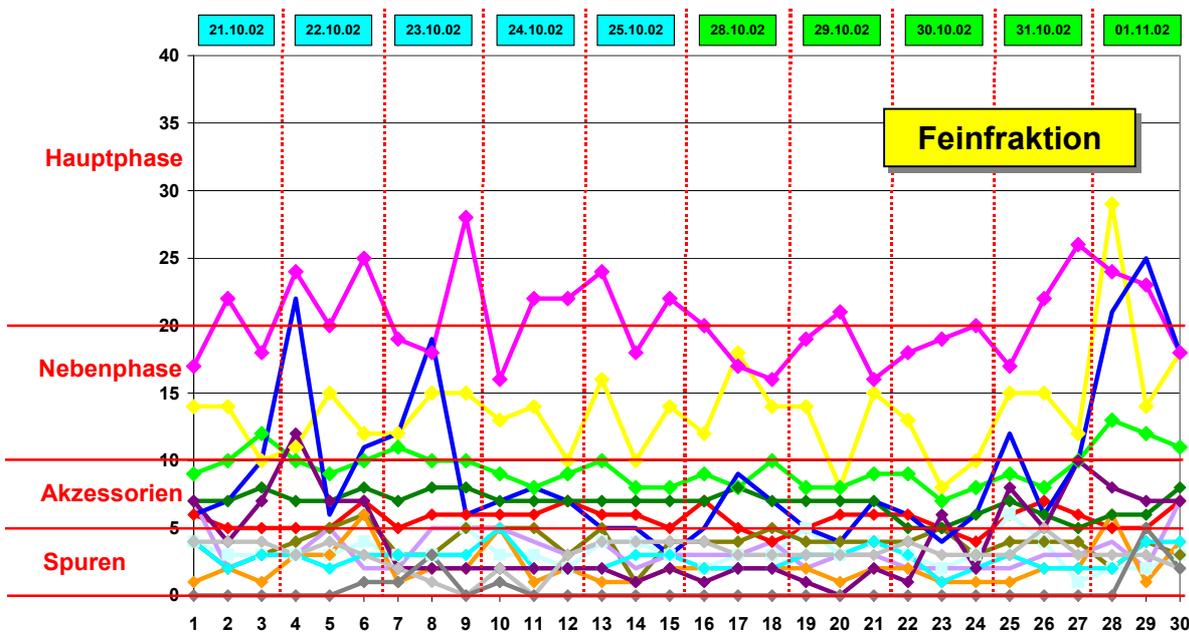
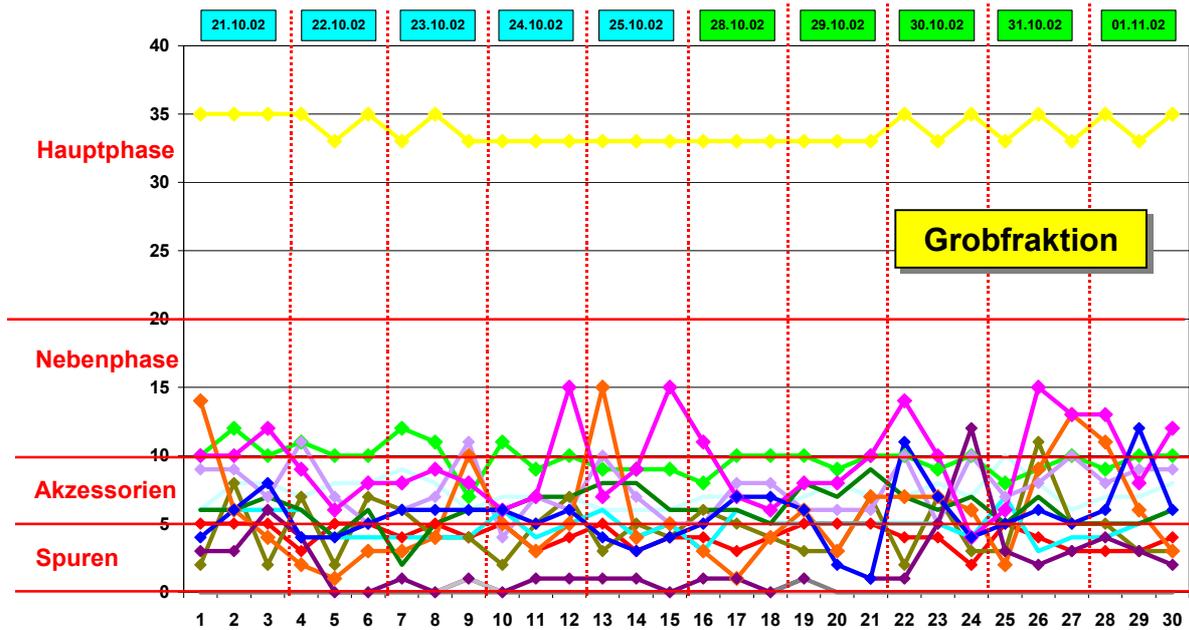
Die Untersuchungen der MV-Rohschlacken im Rahmen der Permanentversuche zeigen:

- In der Grob- und Feinfraktion treten deutliche Unterschiede in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken auf, wobei in der Grobfraktion Oxide und Silikate verstärkt auftreten, während in der Feinfraktion die Sulfate und Carbonate angereichert sind (Abb. 14).
- Im Mineralbestand der MV-Rohschlacken werden in der Grobfraktion im Bereich der Silikat- und Oxidphasen keine größeren Schwankungen festgestellt. Nur vereinzelt treten höhere Gehalte an Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) auf. Die zumeist akzessorisch auftretenden Mineralphasen Calcit (CaCO_3) und Anhydrit KAlSi_3O_8 zeigen nur vereinzelt Anreicherungen (Abb. 15).
- Die Homogenität der MV-Rohschlacken wird besonders im Mineralbestand der Feinfraktion deutlich. Auch hier werden bei den unterschiedlichen Mineralphasen nur geringe Schwankungsbreiten festgestellt. Lediglich das Sulfat Anhydrit (CaSO_4) tritt bei dem Versuchsbeginn und bei dem Versuchsende verstärkt auf. (Abb. 15).
- Der aufgegebene Müllinput war während des Versuchszeitraumes im wesentlichen aus Hausmüll und Gewerbeabfall zusammengesetzt. Nur in sehr geringen Mengen wurde nicht genau zu definierendes Material mitverbrannt („sonstiges Material“). Die relativ homogene Müllzusammensetzung spiegelt sich auch in der mineralogischen Phasenzusammensetzung wider, da auch hier nur geringe Schwankungsbreiten zu erkennen sind. Die Anreicherungen von Anhydrit (CaSO_4) in der Feinfraktion zu Versuchsbeginn können möglicherweise auf einen erhöhten Anteil an Gewerbemüll im Müllbunker zurückgeführt werden. Am Ende der Versuchskampagne (01.11.02) kam es betriebsbedingt zu einer Umstellung der Fahrweise, die geänderte Verbrennungsbedingungen auf dem Rost zur Folge hatte (Abb. 16).



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO ₂	■ Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)
■ Hämatit	α-Fe ₂ O ₃	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe ₃ O ₄	■ Portlandit	Ca(OH) ₂
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	■ Calcit	CaCO ₃
■ Äkermanit	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi ₃ O ₈	■ Anhydrit	CaSO ₄
■ Plagioklas	(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	■ Ettringit	Ca ₆ Al ₂ [(OH) ₂ SO ₄] ₃ ·24H ₂ O
■ Diopsid	CaMgSi ₂ O ₆		

Abb. 14 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und der Grobfraktion der MV-Rohschlacken K aus den Permanentversuchen



<u>Oxide:</u>		<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
— Quartz	SiO ₂	— Gehlenit	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	— Calcit	CaCO ₃
— Hämatit	α-Fe ₂ O ₃	— Åkermanit	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	<u>Hydroxide:</u>	
— Magnetit	Fe ₃ O ₄	— Kalifeldspat	KAlSi ₃ O ₈	— Portlandit	Ca(OH) ₂
<u>Sulfate:</u>		— Plagioklas	(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	<u>Phosphate:</u>	
— Anhydrit	CaSO ₄	— Diopsid	CaMgSi ₂ O ₆	— Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)
— Ettringit	Ca ₆ Al ₂ [(OH) ₂ SO ₄] ₃ x24H ₂ O				
— Gips	CaSO ₄ x2H ₂ O				

Abb. 15 Änderungen der mineralogische Phasenzusammensetzung der Grob- und Feinfraktion der MV-Rohschlacken K während der Permanentversuche

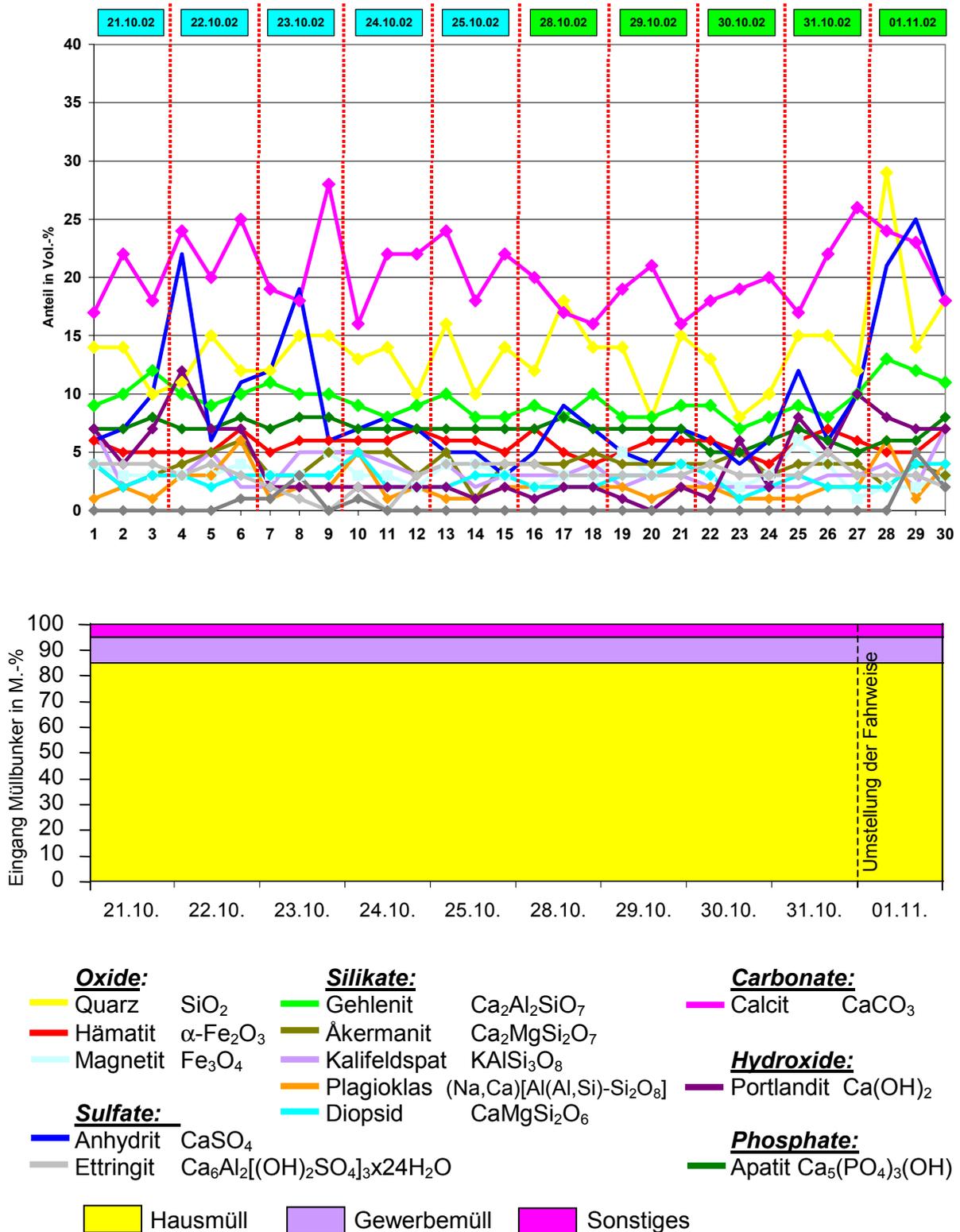


Abb. 16 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion und thermisch behandelte Müllmengen während der Permanentversuche in der MVA K

5.2 GROSSVERSUCHE

5.2.1 ANLAGE A

In der MVA A wurden drei Großversuche (MV-Schlacken A-1, A-2 und A-3) mit jeweils unterschiedlichem Müllinput durchgeführt, um den Einfluss der verfahrenstechnischen Randbedingungen auf das Versuchsergebnis zu minimieren.

- **Verfahrenstechnik der Müllverbrennungsanlage A**

Die verfahrenstechnischen Parameter der Müllverbrennungsanlage A gehen aus Tab. 6 hervor. Die untersuchten Schlackeproben stammen aus einem Kessel mit Vorschubrost und Mittelstromfeuerung.

Tab. 6 Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA A

Verfahrensparameter der MVA A	
Rostsystem	Vorschubrost
Durchsatz [t/a]	290.000
Linien	4
Feuerung	Mittelstrom / Gleichstrom
Heizwert [kJ/kg]	11.000
Abfallarten	Hausmüll
	Gewerbeabfall
	Sperrmüll
	Sonstiges: Tiermehl
Schlackeanfall [t/a]	83.000

- **Müllinput**

In drei Versuchsreihen wurden folgende Müllzusammensetzungen großtechnisch thermisch behandelt (Tab. 7):

Tab. 7 Müllzusammensetzungen während der Großversuche

Müllzusammensetzungen während der Großversuche in der MVA A in M.-%				
Versuch	Hausmüll	Gewerbeabfall	Tiermehl	Sonstiges
A-1	81,8	11,9	4,6	1,7
A-2	81,3	11,6	4,5	2,6
A-3	87,8	10,8	-	1,4

- **Aufbereitungstechnik der MV-Schlacken**

Die in der Müllverbrennungsanlage A produzierten MV-Rohschlacken werden per LKW zur angeschlossenen Schlackenaufbereitungsanlage transportiert. Nach einer Vorlagerung von ca. 2 Wochen zur Reduktion des Feuchtegehaltes werden die MV-Rohschlacken zu MV-Schlacken aufbereitet. Die Vorlagerung, die Aufbereitung sowie die Nachlagerung finden im Freien statt.

Die Aufbereitungsanlage verfügt über einen Aufgabebunker für die MV-Rohschlacke, ein Rüttelsieb der Maschenweite 40 mm, sowie je einen Trommel- und Überbandmagneten zur Separierung der Eisenmetalle. Grobe Störstoffe werden auf dem Rüttelsieb von Hand aus der MV-Schlacke ausgesondert.

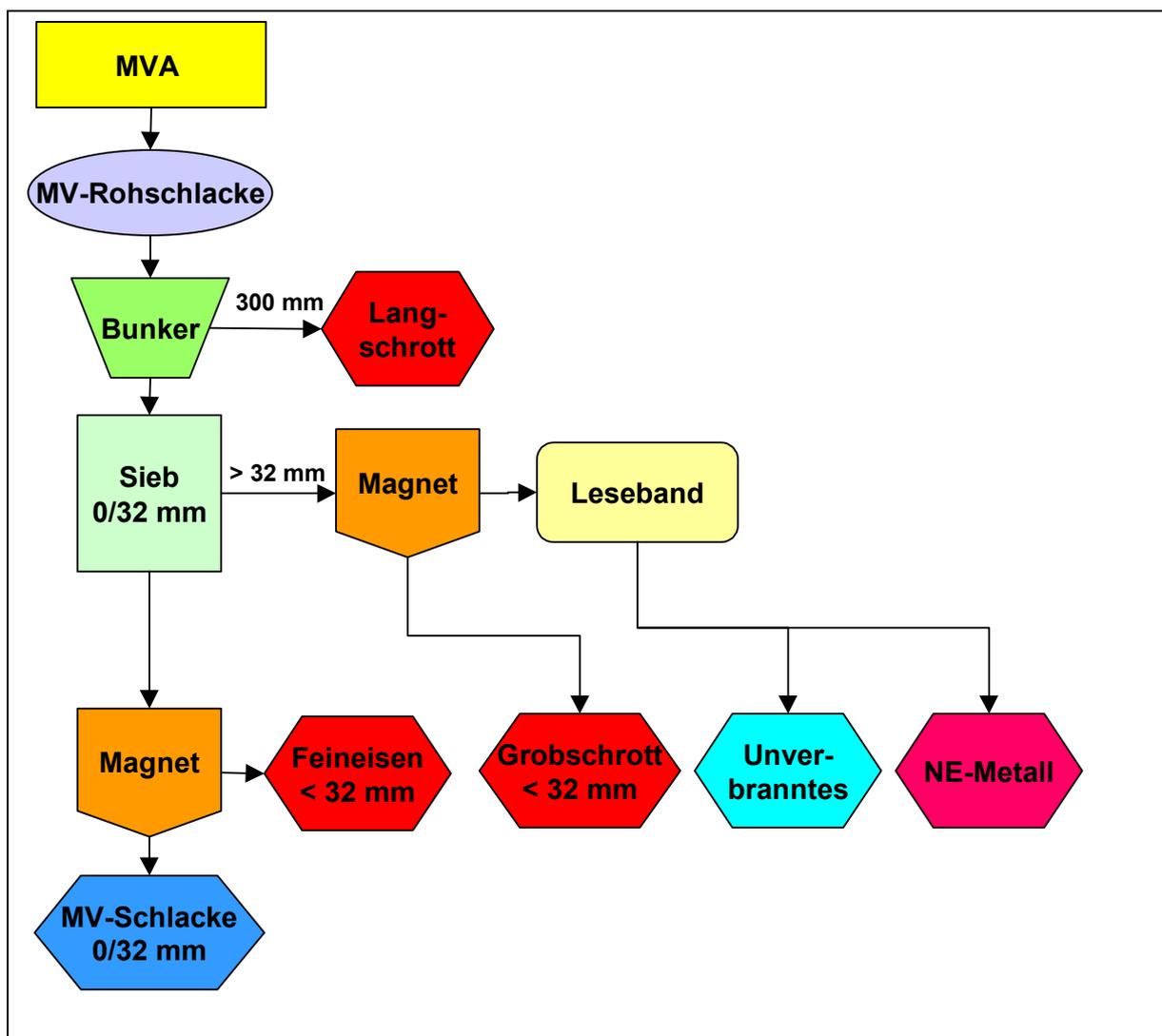


Abb. 17 Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA A

Die aufbereitete MV-Schlacke unterliegt der Güteüberwachung gemäß RG Min-StB 93 [30] und wird im Straßenbau und Deponiebau verwertet.

5.2.1.1 MV-Schlacke A-1 (Großversuch 1)

5.2.1.1.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-1

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke geht aus Tab. 8, die der Grobfraktion aus Tab. 9 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 18).

Im Feinanteil der MV-Schlacke stellen das Carbonat Calcit (CaCO_3) und teilweise das Oxid Quarz (SiO_2) die mineralogischen Hauptphasen dar, während das Sulfat Anhydrit (CaSO_4) und das Silikat Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Åkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) auf.

Tab. 8 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke A-1

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Åkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase/Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Hauptphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	Gips	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

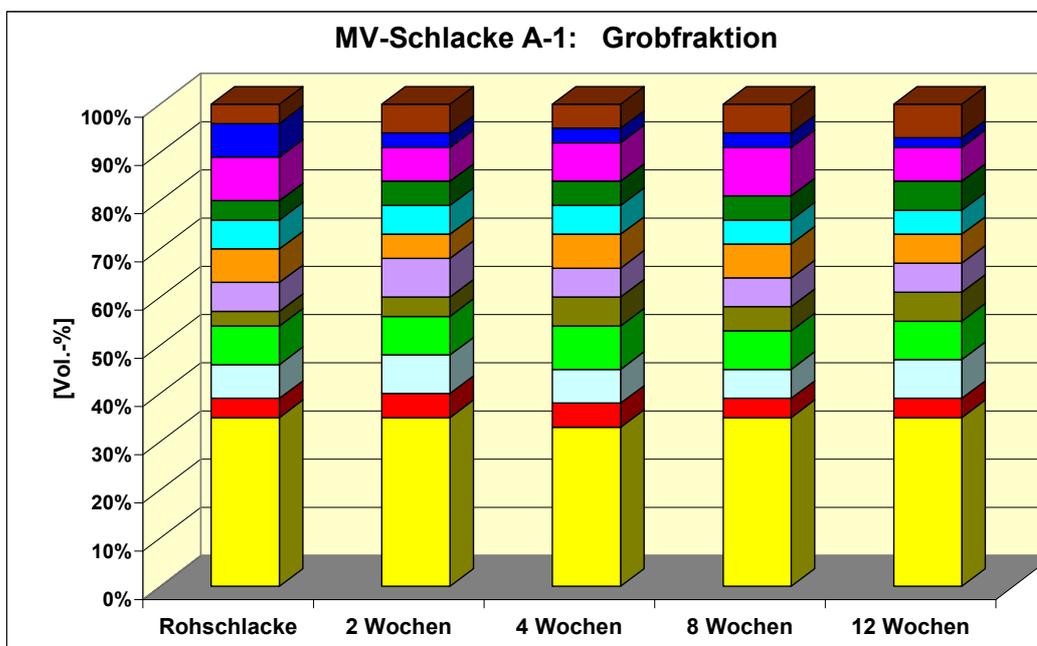
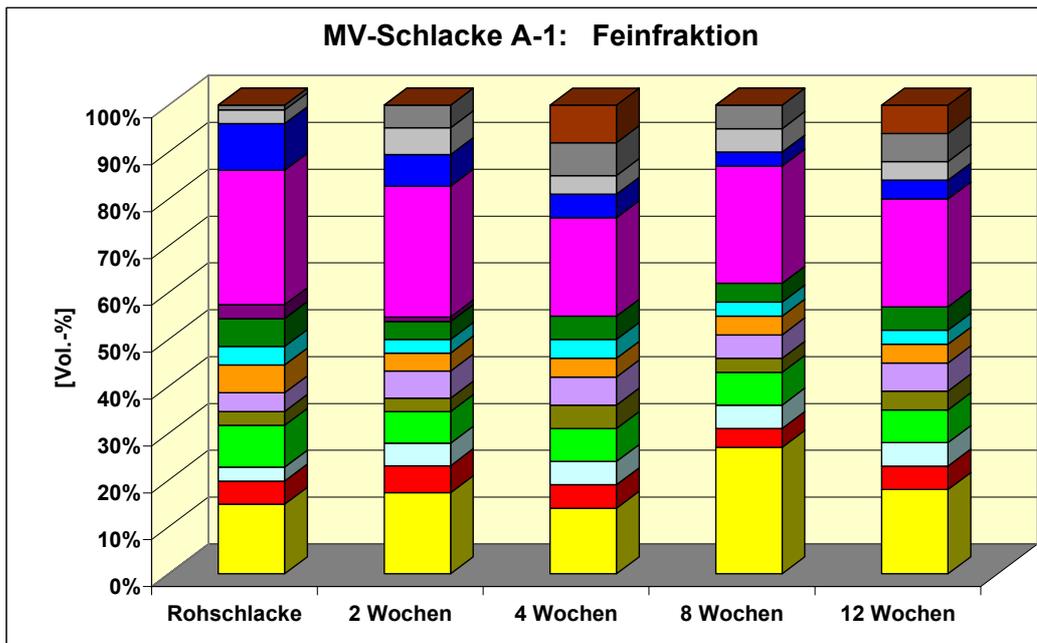
In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die alleinige Hauptphase dar. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$), Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), das Carbonat Calcit (CaCO_3), das Sulfat Anhydrit (CaSO_4), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) und das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) auf.

Tab. 9 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke A-1

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Akzessorie	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke A-1 handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO_2), sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut und daher als typische Durchläuferminerale angesehen werden. Das Hydroxid Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker, während das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker und das Carbonat Calcit (CaCO_3) im Laufe der Ablagerung zusätzlich durch die Reaktion von Portlandit mit dem Luft- CO_2 gebildet werden.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe_3O_4	■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Äkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
■ <u>neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 18 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke A-1

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke A-1 folgendes festgestellt (Abb. 19):

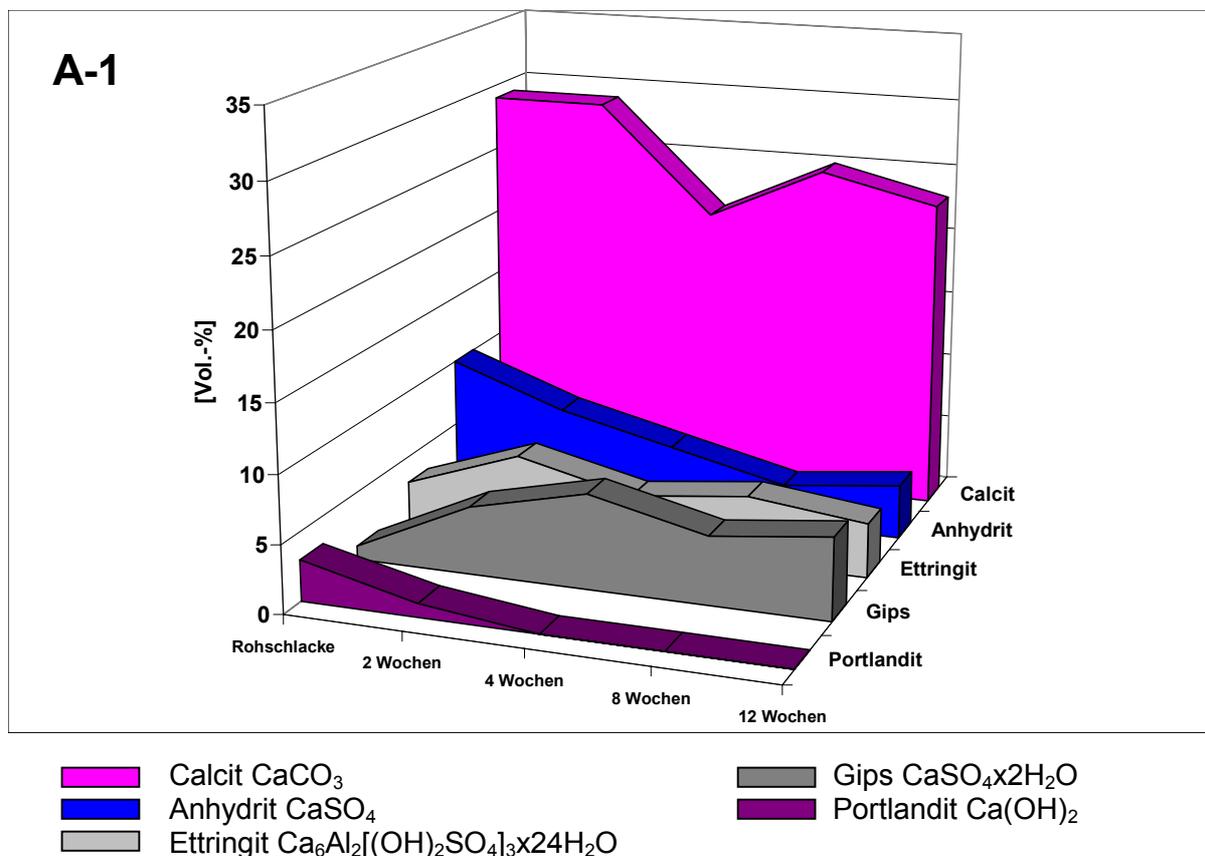


Abb. 19 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke A-1

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Schlacke A-1 eine deutliche Abnahme des Portlandits ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), wobei in der MV-Schlacke nach einer Ablagerungszeit von 4 Wochen kein Portlandit mehr detektiert werden kann. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO_3) gesteuert wird, lässt keine ausgeprägten Alterationsreaktionen im Verlaufe der Ablagerung erkennen, da keine Zunahme des Calcits festgestellt werden kann. Die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke A-1 weist sogar deutlich geringere Calcitgehalte als die frisch produzierte MV-Rohschlacke auf und deutet somit ein mangelndes Carbonatisierungsvermögen an.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO_4), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, nimmt in der untersuchten MV-Schlacke A-1 während der Ablagerungszeit von 12 Wochen deutlich ab. Die MV-Schlacke kann zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung bezüglich der Sulfatreaktionen als reaktionsträge und damit als ausreichend raumbeständig eingestuft werden, da weitere Sulfatreaktionen nur noch in geringem Umfang erwartet werden.
- Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) zeigen zu Beginn der Ablagerung eine sehr starke Zunahme. Nach einer Ablagerungszeit von ca. 4 Wochen nehmen die Gips- und Ettringitgehalte jedoch leicht ab und verbleiben danach auf einem hohen Niveau.

Die MV-Schlacke A-1 weist zwar per Definition ein mangelndes Carbonatisierungsverhalten auf, jedoch liegen die Calcitgehalte in Bereichen (> 14 Vol.-%), die für eine bautechnisch

stabile MV-Schlacke sprechen. Da auch die Sulfatreaktionen nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen nahezu abgeschlossen sind, kann die MV-Schlacke A-1 im mineralogischen Sinne als raumbeständig eingestuft werden.

5.2.1.1.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-1

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke A-1 zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 20-a und 20-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit geringfügig von pH 12,4 auf 11,2 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit fallen während der Ablagerungszeit von 2 Wochen von ca. 300 mS/m auf 100 mS/m und bleiben danach auf demselben Niveau. Sie liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Die Zinkwerte zeigen nach zwei Wochen Ablagerungszeit eine starke Abnahme von ca. 100 µg/l auf ca. 20 µg/l und unterschreiten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l deutlich.
- Die Bleiwerte der MV-Schlacke nehmen in den DEV S4-Eluaten nach einer Ablagerungszeit von 2 Wochen von ca. 1.200 µg/l auf ca. 100 µg/l ab und liegen nach einer Ablagerungszeit von 8 Wochen unterhalb der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden somit von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.
- Die Kupferwerte schwanken zwischen ca. 50 und 100 µg/l und zeigen während der Ablagerung keine Tendenz. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden eingehalten.
- Die Chromgehalte liegen in einem Bereich von ca. 15 bis 40 µg/l ohne eine eindeutige Tendenz aufzuweisen. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 200 µg/l bzw. 50 µg/l werden eingehalten.
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Nickel und Quecksilber liegen nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid variieren zwischen ca. 70 mg/l und 100 mg/l und zeigen folglich keine Reduktion während der Ablagerungszeit. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l werden unterschritten.
- Die Sulfatwerte nehmen während der Ablagerungszeit geringfügig von ca. 50 auf 100 mg/l zu, halten jedoch die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l ein.

Eine zusammenfassende Bewertung der Eluatergebnisse gemäß DEV S4 zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 [2] von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten werden und somit aus Sicht der Umweltverträglichkeit eine Verwertung entsprechend den Vorgaben der Regelwerke erfolgen kann.

- **Chemische Untersuchungen im Feststoff**

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 21 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke A-1 eingehalten.

- **Langzeitstabilität**

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 22 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnen-tests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnen-tests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle, Chloride und Sulfate abgeschätzt werden.

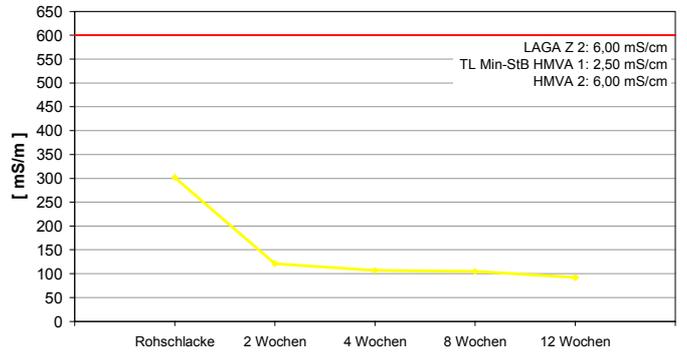
Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil der betrachteten Schwermetalle Zink, Blei und Kupfer weitaus höher ist, als derjenige von Nickel und Chrom, jedoch die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnen-tests in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit von Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid. Allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnen-tests, dass die eluierbaren Mengen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungsvorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

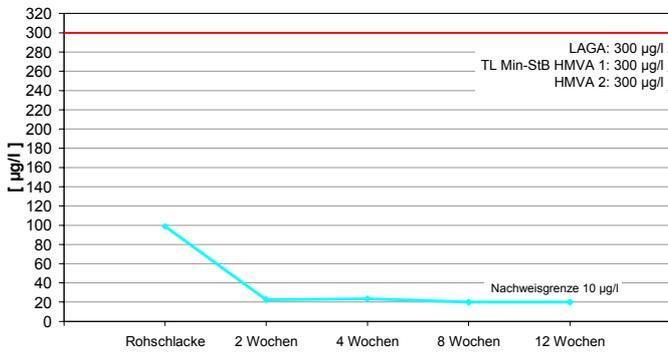
DEV S4-Test: pH-Wert



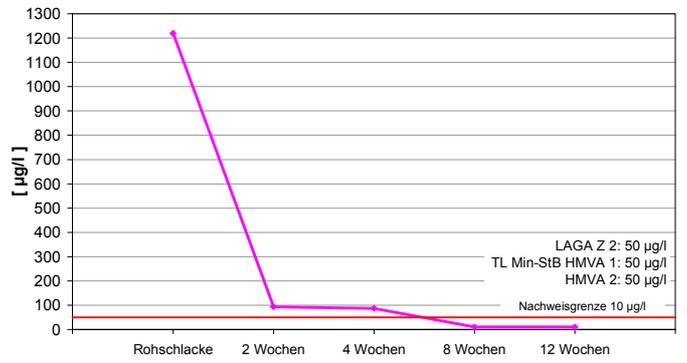
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



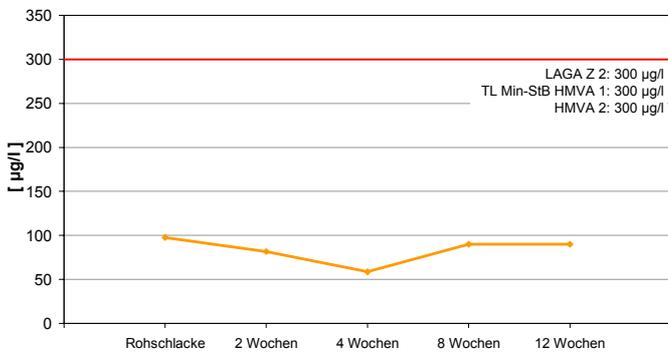
DEV S4-Test: Zink



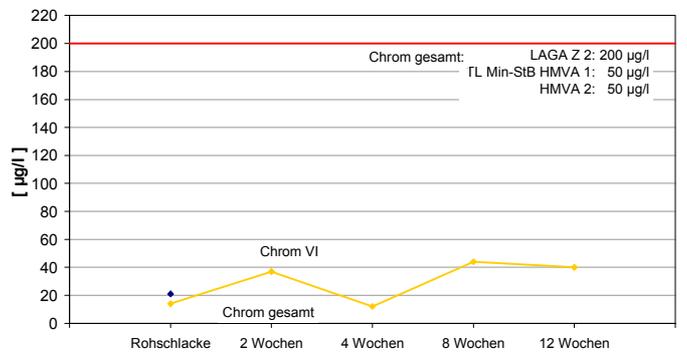
DEV S4-Test: Blei



DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

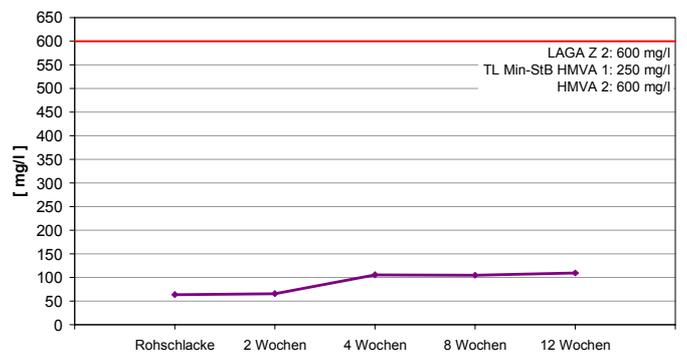
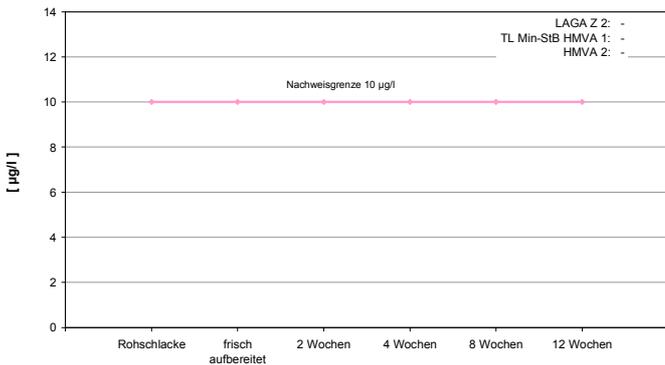


Abb. 20-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke A-1

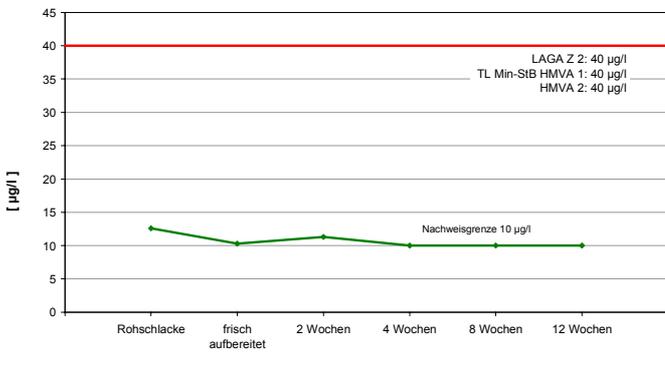
DEV S4-Test: Arsen



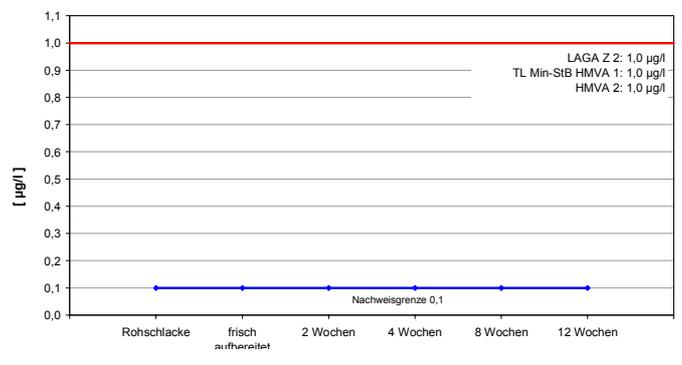
DEV S4-Test: Cadmium



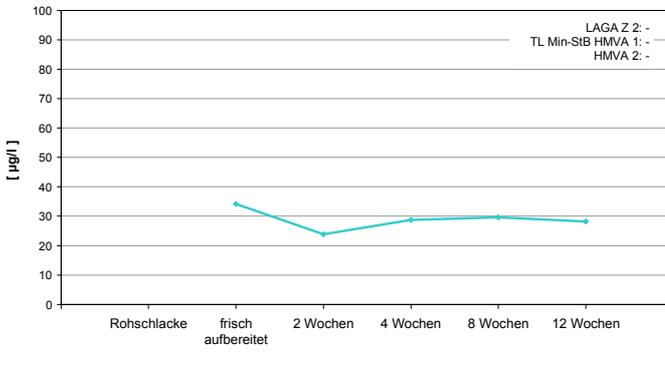
DEV S4-Test: Nickel



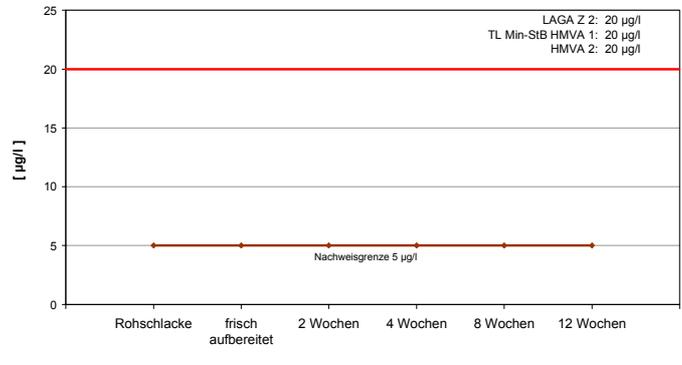
DEV S4-Test: Quecksilber



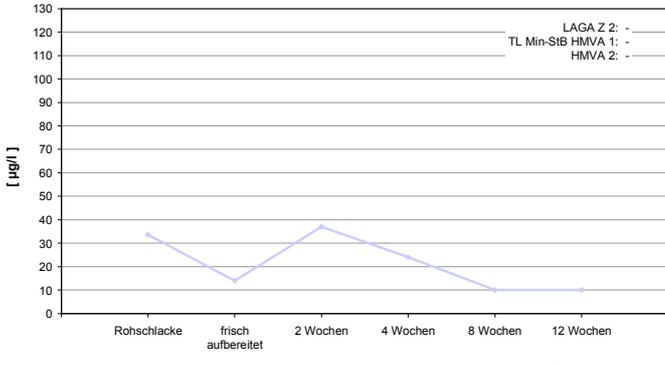
DEV S4-Test: Phenolindex



DEV S4-Test: Cyanid



DEV S4-Test: AOX



DEV S4-Test: DOC

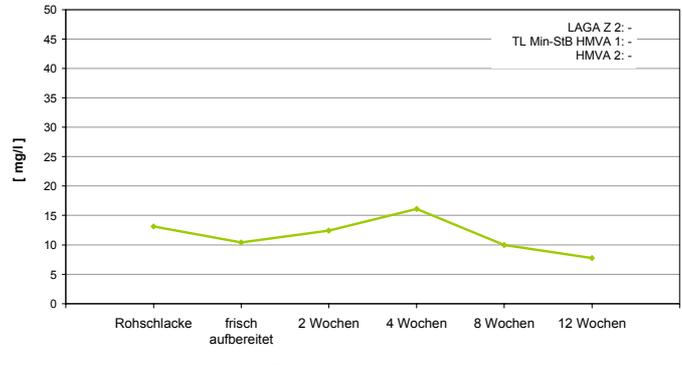


Abb. 20-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke A-1

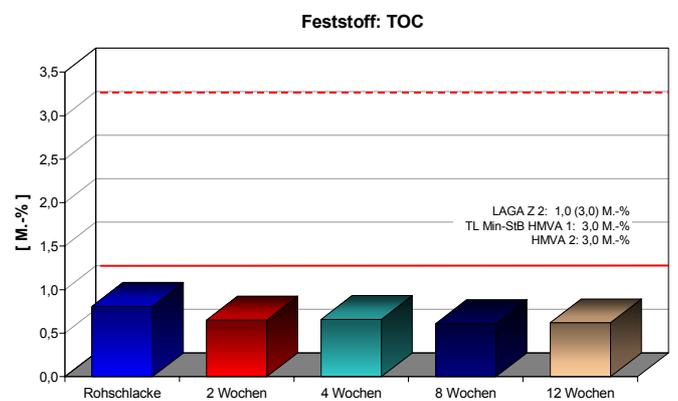
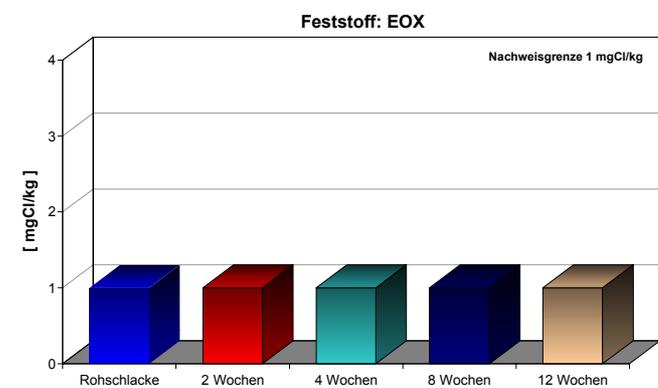
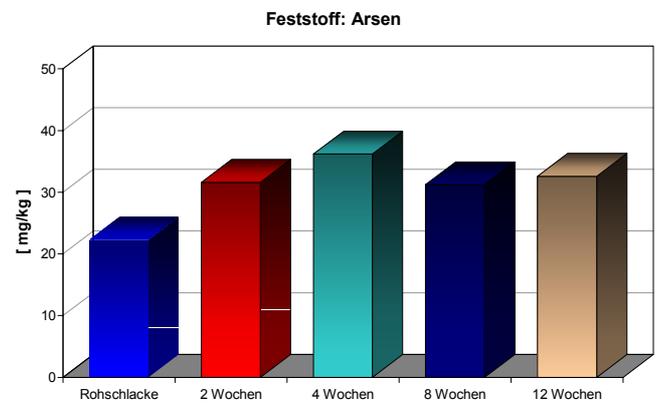
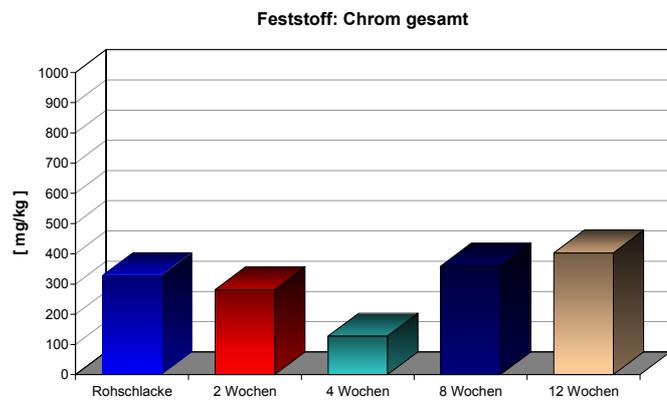
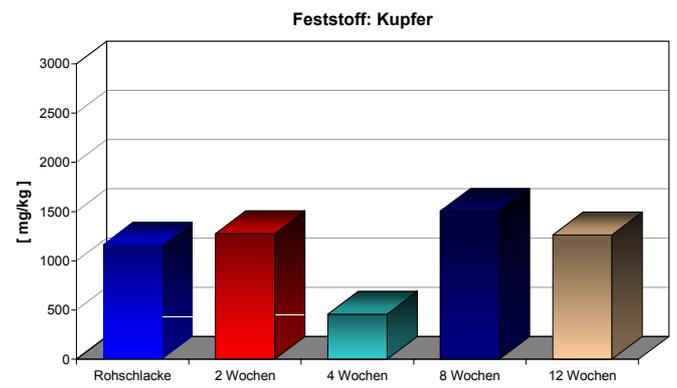
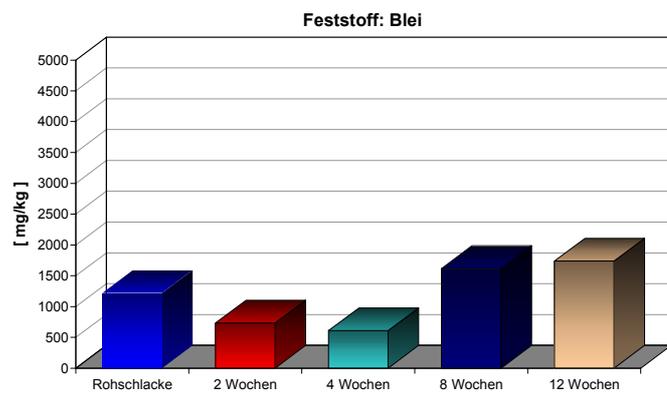
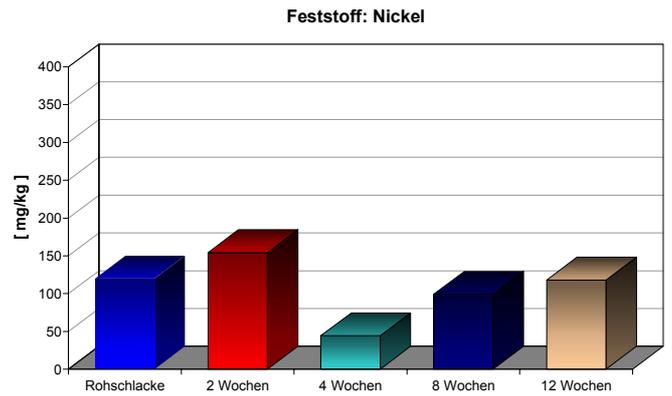
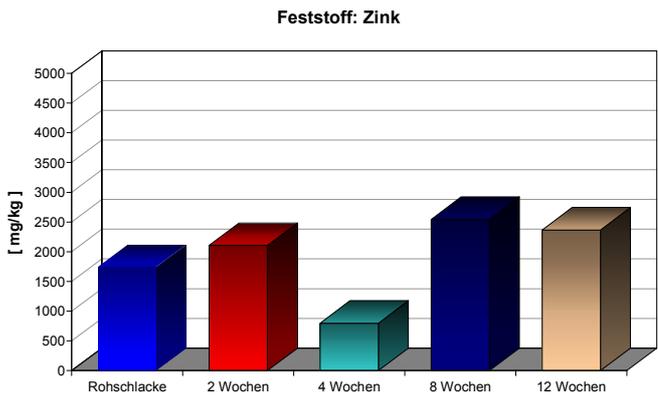


Abb. 21 Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke aus der MVA A-1

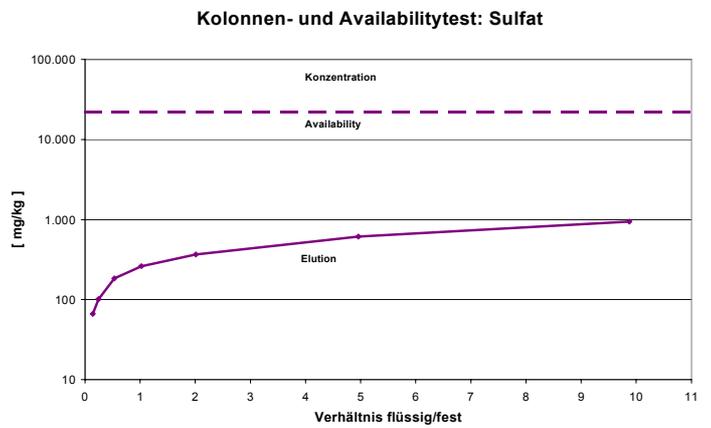
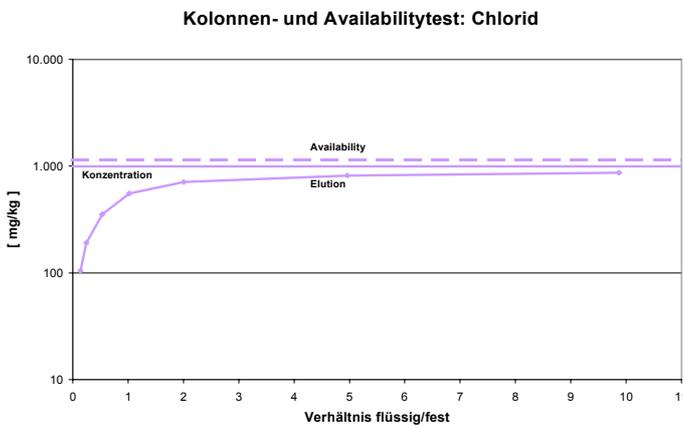
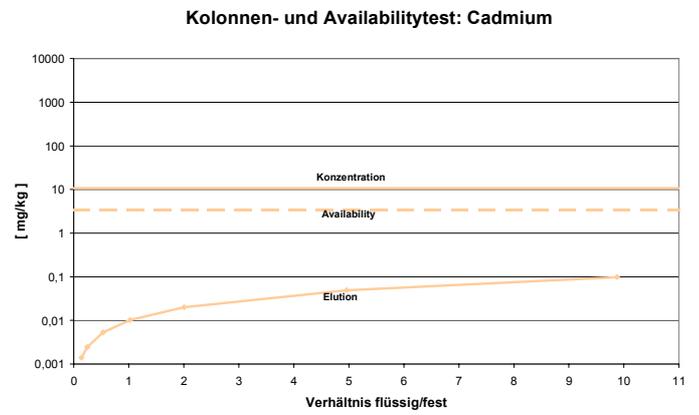
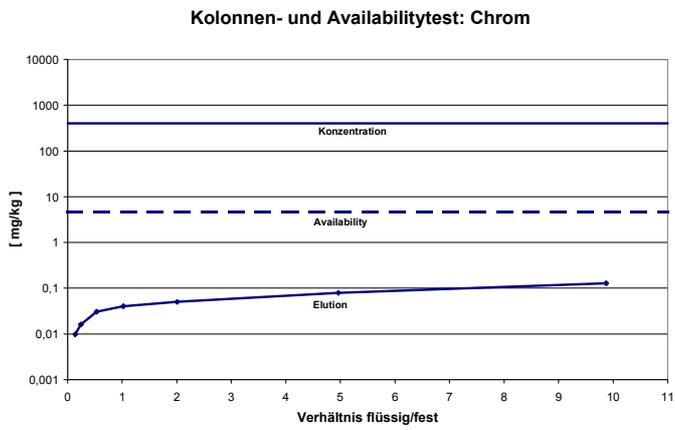
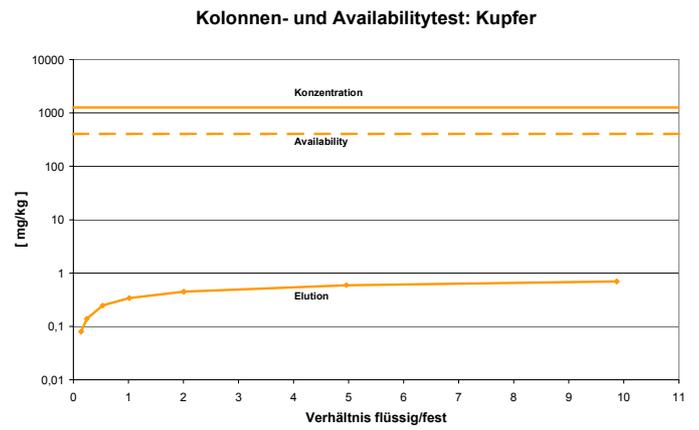
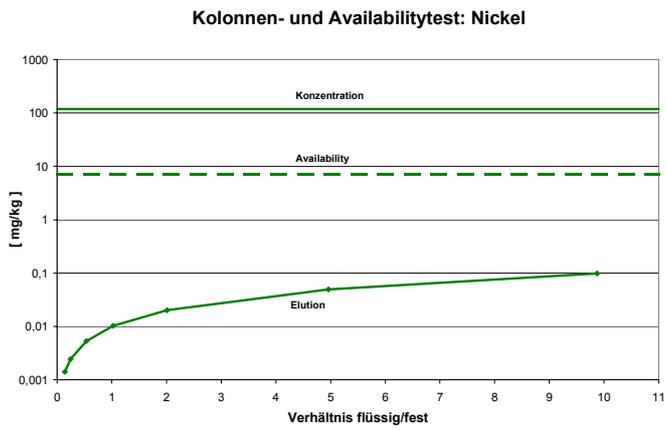
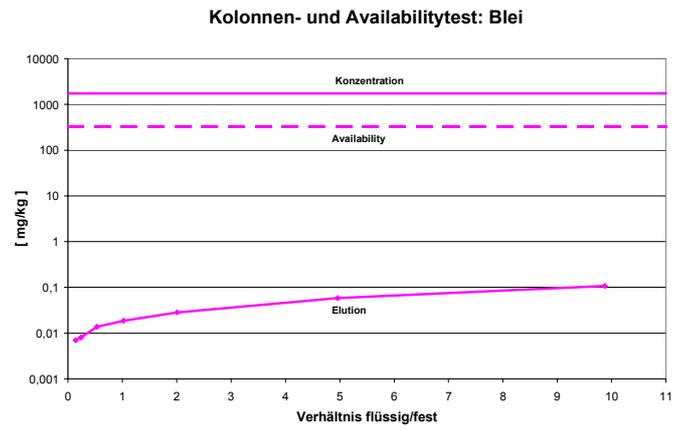
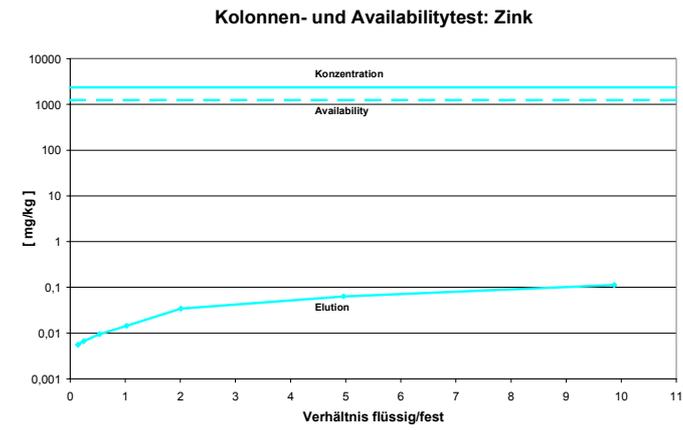


Abb. 22 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke A-1

5.2.1.1.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-1

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] beruht. Darüber hinaus erfolgen zusätzliche Untersuchungen, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken im Bereich des Deponiebaus und Erdbaus abschätzen zu können. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften einer drei Monate abgelagerten MV-Schlacke für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke A-1 gehen aus Abb. 23 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Während der Alteration wird bei der MV-Schlacke A-1 eine Tendenz zur Kornverfeinerung festgestellt.
- Nach der Aufbereitung liegen die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacke in einem sehr engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 5 mm die untersuchte MV-Schlacke A-1 oberhalb der Grenzsieblinien liegt, d.h. einen zu geringen Anteil an Grobkorn aufweisen.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke A-1 geht aus Abb. 24 hervor. Ein Vergleich der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 40 bis 47 M.-%) der stofflichen Zusammensetzung.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material ($\leq 0,5$ M.-%) werden von der MV-Schlacke A-1 eingehalten (Ist-Werte: 0,1 bis 0,2 M.-%), während der maximal erlaubte Metallanteil von 5,0 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke mit 5,8 M.-% überschritten wird.

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke liegen zwischen ca. 1,62 und 1,68 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 15 und 17 M.-% (Abb. 25). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke A-1, die sich auch in der Baupraxis zeigt.

- **Wassergehalt**

Der Wassergehalt der frisch produzierten MV-Rohschlacke liegt bei 22,8 M.-% und schwankt nach der Aufbereitung zwischen 17,3 und 19,8 M.-% (Tab. 10). Während der Ablagerung der MV-Schlacke A-1 konnte der Wassergehalt nicht reduziert werden, wobei jedoch beachtet werden muss, dass die Lagerung der aufbereiteten MV-Schlacke im Freiland erfolgte und somit der natürliche Niederschlag direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte einwirken konnte.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,55 g/cm³ und 2,69 g/cm³ und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 10). Die große Schwankungsbreite geht auf die stark unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke (z.B. Anteile an Metallen) zurück.

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfungen „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde an den Gesamtkörnungen durchgeführt. Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke A-1 eingehalten (Ist-Werte: 4,8 bis 8,2 M.-%) (Tab. 10).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“, als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, sind sehr homogen und liegen zwischen 37,4 und 38,8 M.-% (Tab. 10). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke A-1 erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Die Anteile an schlecht geformten Körnern liegen zwischen 16,4 und 21,5 M.-%, womit die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden (Tab. 10).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 0,56 und 0,9 M.-%. Anforderungen an den Parameter Glühverlust gemäß TL Min-StB 2000 bestehen nicht (Tab. 10).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke A-1, bis auf eine geringe Überschreitung des Parameters „Metallanteile“, eingehalten werden.

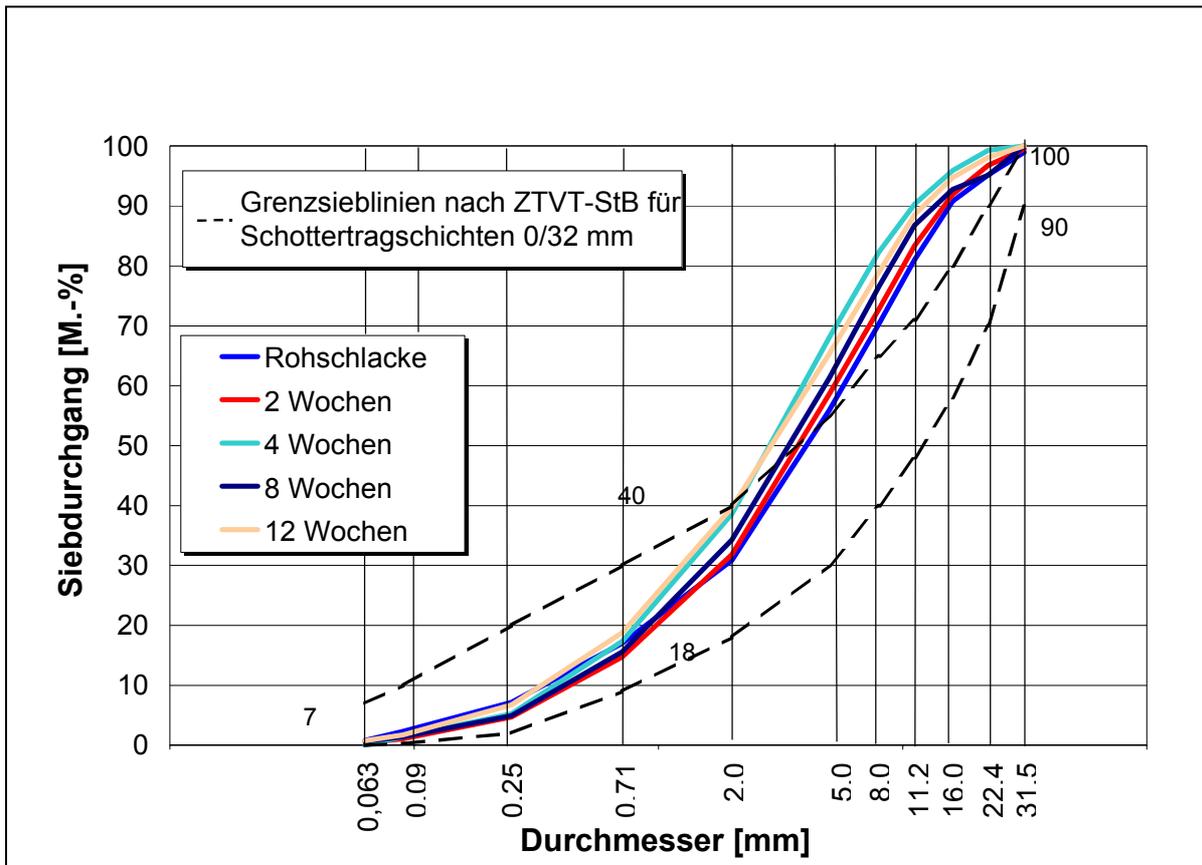


Abb. 23 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke A-1

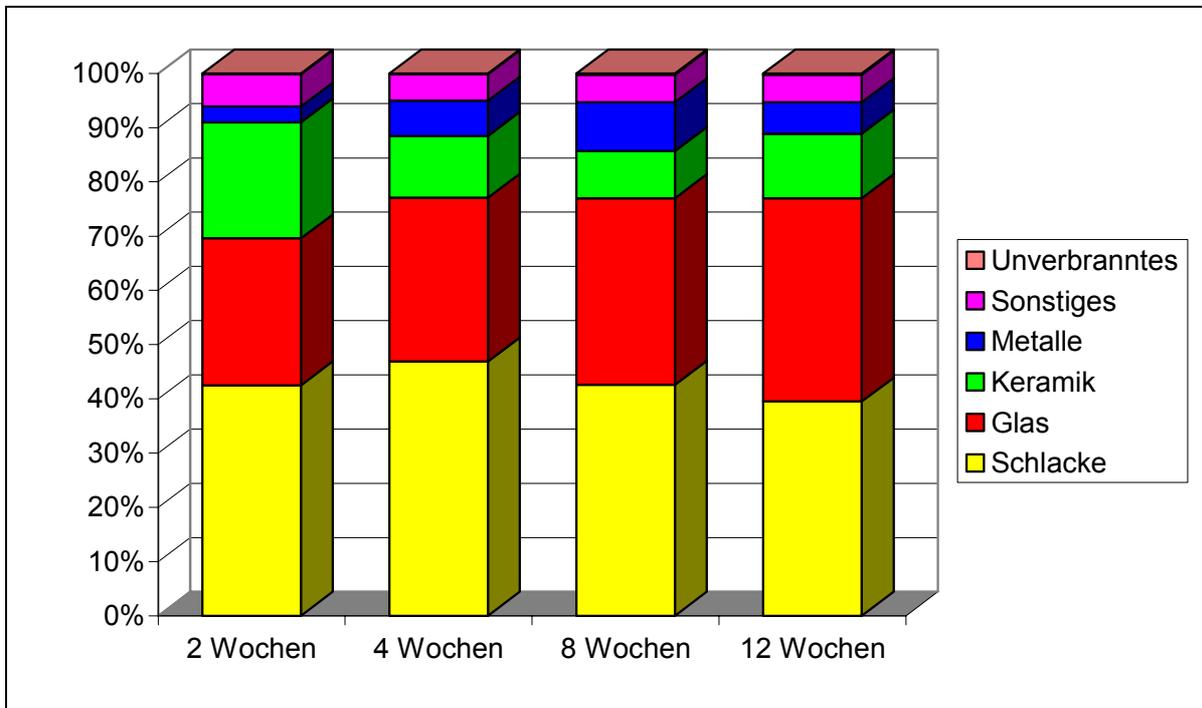


Abb. 24 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke A-1

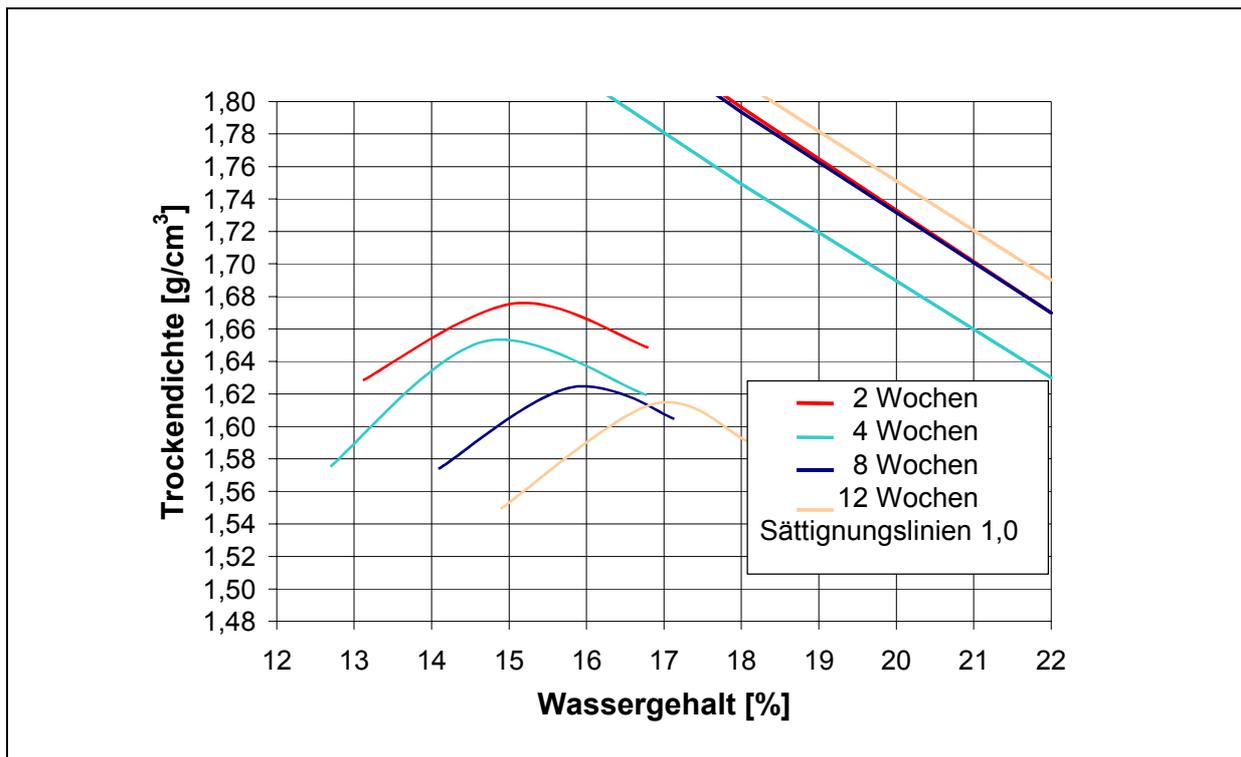


Abb. 25 Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke A-1

Tab. 10 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke A-1

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	17,3	18,1	17,8	19,8	
Rohdichte	g/cm ³	2,655	2,553	2,649	2,69	
Schüttdichte	g/cm ³	1,183	1,187	1,176	1,18	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	4,9	8,2	5,7	4,8	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	38,8	37,4	38,6	38,5	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	19,7	16,4	17,3	21,5	50
Glühverlust	M.-%	1,3	2,1	1,6	3,6	

5.2.1.2 MV-Rohschlacke A-2 (Großversuch 2)

5.2.1.2.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Rohschlacke A-2

Aufgrund verfahrenstechnischer Schwierigkeiten der Aufbereitungsanlage zum Zeitpunkt der Schlackenproduktion konnte die MV-Rohschlacke A-2 nicht zur MV-Schlacke aufbereitet werden. Die Alterationsversuche konnten daher nur an MV-Rohschlacken durchgeführt werden. Weiterhin erfolgte die Ablagerung lediglich in Form einer kleinen Halde von ca. 50 t.

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Rohschlacke geht aus Tab. 11, die der Grobfraktion aus Tab. 12 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 26).

Im Feinanteil der MV-Rohschlacke stellt das Carbonat Calcit (CaCO_3) die alleinige Hauptphase dar, während das Oxid Quarz (SiO_2) als Nebenphase auftritt. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie die Sulfate Anhydrit (CaSO_4), Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) auf.

Tab. 11 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Rohschlacke A-2

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Hauptphase/Nebenphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Gips	Spuren	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphasen</u>		Nebenphase/Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

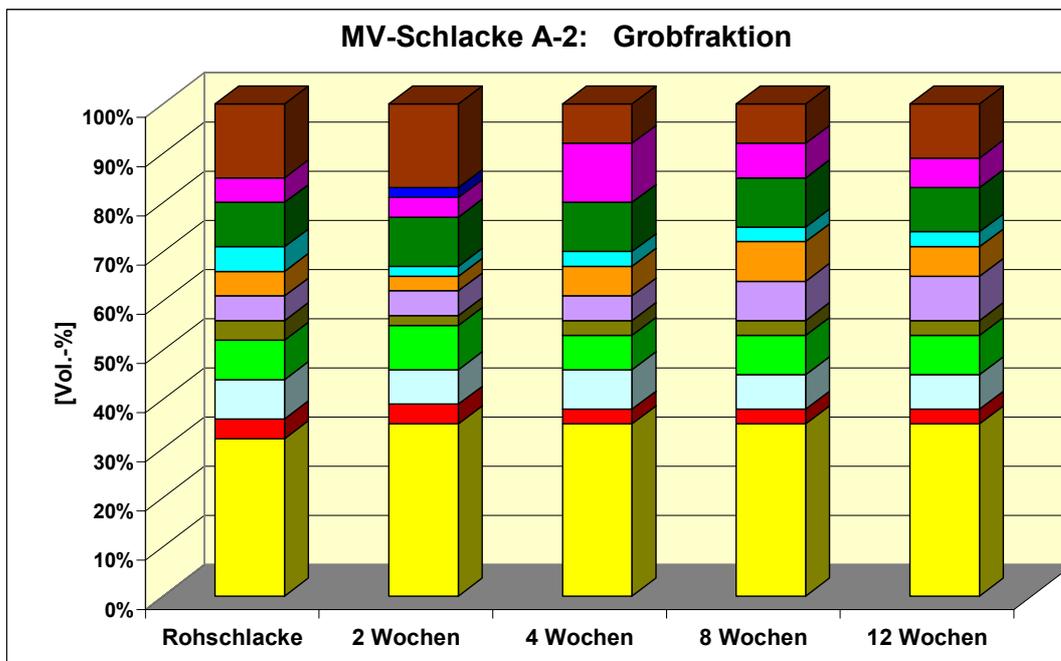
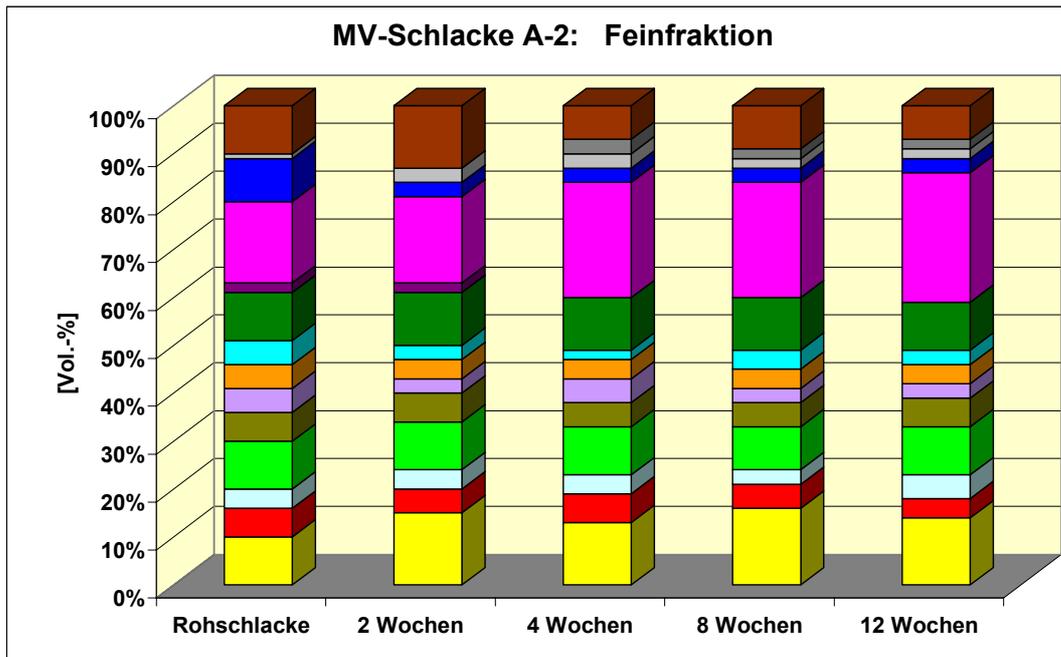
In der Grobfraktion der MV-Rohschlacke stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die alleinige Hauptphase dar. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$), Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), das Carbonat Calcit (CaCO_3), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) und das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) auf.

Tab. 12 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Rohschlacke A-2

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphasen</u>		Nebenphase/Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Rohschlacke A-2 handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen Quarz (SiO_2), sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) hingegen wird sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker und das Carbonat Calcit (CaCO_3) im Laufe der Ablagerung zusätzlich durch die Reaktion von Portlandit mit dem Luft- CO_2 gebildet.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO ₂	■ Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)
■ Hämatit	α-Fe ₂ O ₃	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe ₃ O ₄	■ Portlandit	Ca(OH) ₂
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	■ Calcit	CaCO ₃
■ Äkermanit	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi ₃ O ₈	■ Anhydrit	CaSO ₄
■ Plagioklas	(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	■ Gips	CaSO ₄ ·2H ₂ O
■ Diopsid	CaMgSi ₂ O ₆	■ Ettringit	Ca ₆ Al ₂ [(OH) ₂ SO ₄] ₃ ·24H ₂ O
■ <u>neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 26 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Rohschlacken A-2

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (gewöhnlich MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Rohschlacke A-2 folgendes festgestellt (Abb. 27):

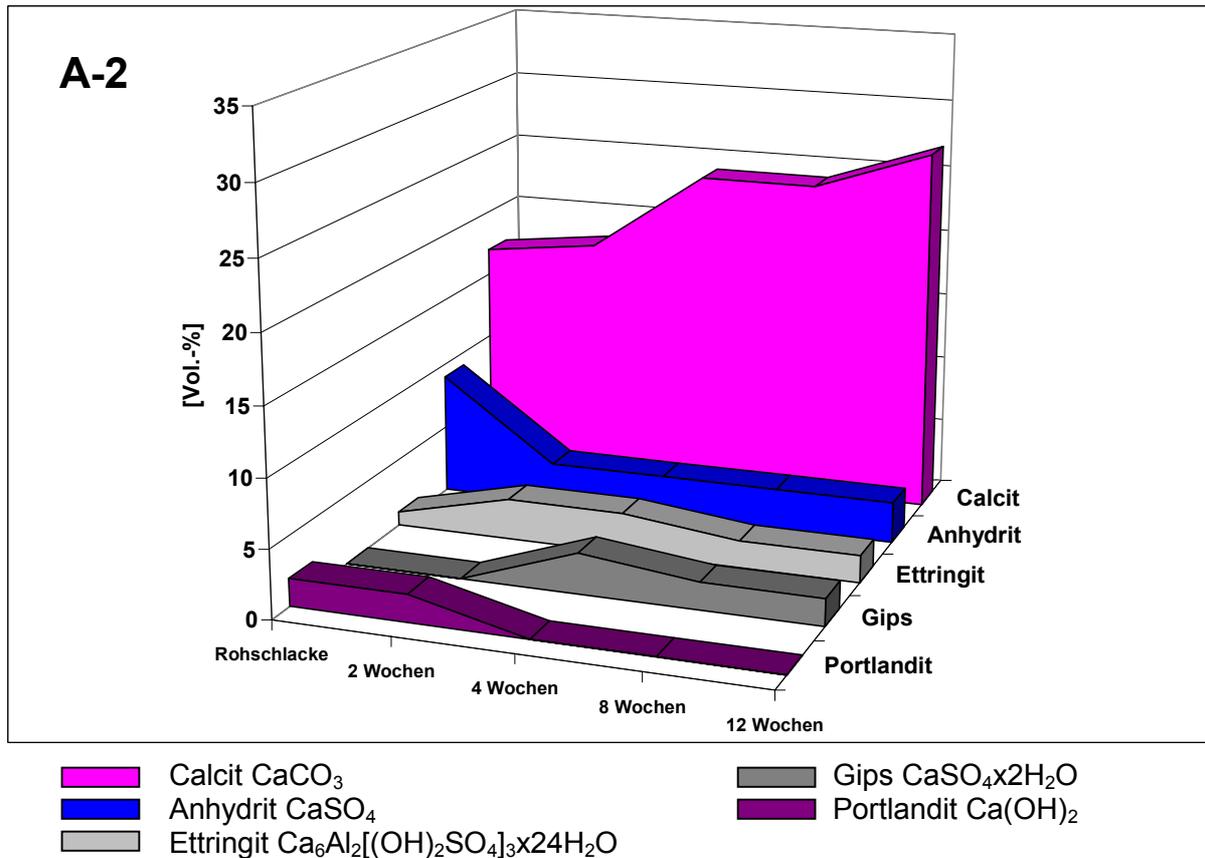


Abb. 27 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Rohschlacke A-2

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Rohschlacke A-2 eine deutliche Abnahme des Portlandits (Ca(OH)₂), wobei nach einer Ablagerungszeit von 4 Wochen kein Portlandit mehr detektiert werden kann. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO₃) gesteuert wird, lässt ausgeprägte Alterationsreaktionen im Verlaufe der Ablagerung erkennen, da eine deutliche Zunahme des Calcits festgestellt werden kann. Die drei Monate abgelagerte MV-Rohschlacke A-2 weist somit ein ausgeprägtes Carbonatisierungsvermögen auf.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO₄), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, nimmt in den untersuchten MV-Rohschlacke A-2 bereits nach einer Ablagerungszeit von 2 Wochen deutlich ab und verbleibt anschließend auf einem niedrigen Niveau. Die geringen Gehalte des Anhydrits in der drei Monate abgelagerten MV-Rohschlacke A-2 zeigt einen weit fortgeschrittenen Alterungsprozess an, wobei nur noch geringe Sulfatreaktionen erwartet werden. Daher kann die abgelagerte MV-Rohschlacke aus mineralogischer Sicht als raumbeständig eingestuft werden.
- Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃x24H₂O) und Gips (CaSO₄x2H₂O) zeigen nach einer Ablagerung von 2 bzw. 4 Wochen eine deutliche Zunahme und verbleiben danach auf einem vergleichbaren Niveau.

Da bei der MV-Rohschlacke A-2 nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen sowohl ein ausreichendes Carbonatisierungsverhalten als auch nahezu abgeschlossene Sulfatreaktionen

festgestellt werden, kann sie nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen als wenig reaktiv und somit, aus mineralogischer Sicht, als ausreichend raumbeständig eingestuft werden.

5.2.1.2.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Rohschlacke A-2

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Rohschlacke A-2 wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Rohschlacke A-2 zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 28-a und 28-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit geringfügig von pH 12,2 auf 11,5 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000.
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit nehmen während der Ablagerungszeit von 4 Wochen sehr stark von ca. 350 mS/m auf 100 mS/m ab und bleiben danach auf demselben Niveau. Sie liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Die Zinkwerte zeigen nach vier Wochen Ablagerungszeit eine starke Abnahme von ca. 150 µg/l auf ca. 20 µg/l und unterschreiten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l sehr deutlich.
- Die Bleiwerte der MV-Rohschlacke steigen in den DEV S4-Eluaten nach einer Ablagerungszeit von 2 Wochen von ca. 720 µg/l auf ca. 1.100 µg/l. Allerdings fallen sie nach einer Ablagerungszeit von 8 Wochen wieder sehr stark auf Werte unterhalb der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l ab. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden von der drei Monate abgelagerten MV-Rohschlacke eingehalten.
- Die Kupferwerte weisen während der ersten 4 Wochen der Ablagerung einen starken Anstieg von ca. 60 auf 360 µg/l auf und fallen nach der dreimonatigen Ablagerung auf 250 µg/l ab. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden von der drei Monate abgelagerten MV-Rohschlacke eingehalten.
- Die Chromgehalte (gesamt) schwanken während der Ablagerung in einem Bereich von ca. 20 bis 70 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 200 µg/l bzw. 50 µg/l werden von der drei Monate abgelagerten MV-Rohschlacke eingehalten.
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Nickel und Quecksilber liegen nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid variieren zwischen ca. 60 mg/l und 80 mg/l und zeigen somit keine Reduktion während der Ablagerungszeit. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 [2] von 250 µg/l werden unterschritten.
- Die Sulfatwerte zeigen stark variierende Werte zwischen 450 mg/l nach 2 Wochen und 150 mg/l in der drei Monate abgelagerten MV-Rohschlacke, halten jedoch die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l ein.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse [12] zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] von der drei Monate abgelagerten MV-Rohschlacke eingehalten werden.

- **Chemische Untersuchungen im Feststoff**

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 29 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Rohschlacke A-2 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Der Grenzwert für den Parameter TOC wird für die drei Monate abgelagerte MV-Rohschlacke A-2 eingehalten, während der Grenzwert für den Parameter EOX nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten leicht überschritten wird.

- **Langzeitstabilität**

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Rohschlacke gehen aus Abb. 30 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

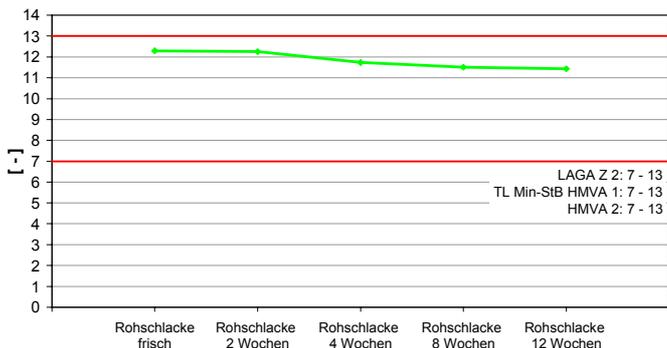
Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnen-tests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnen-tests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle, der Chloride und Sulfate abgeschätzt werden.

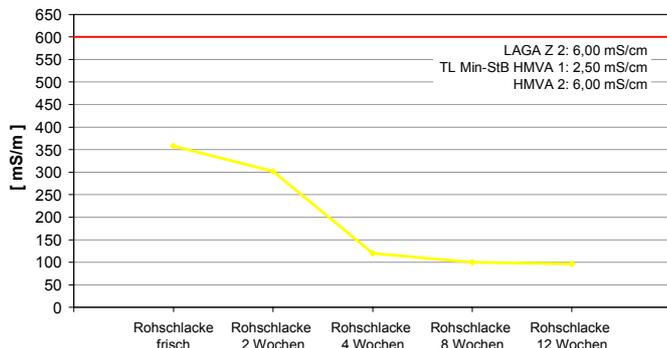
Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil des Schwermetalles Zink weitaus höher ist als derjenige von Blei, Kupfer, Nickel und Chrom, die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnen-tests jedoch in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit von Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid, allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnen-tests, dass die eluierbaren Mengen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungsvorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

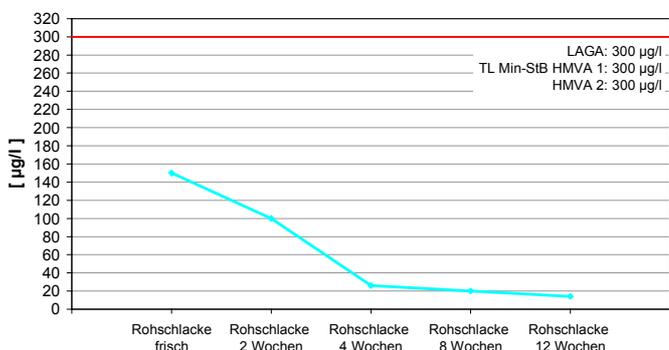
DEV S4-Test: pH-Wert



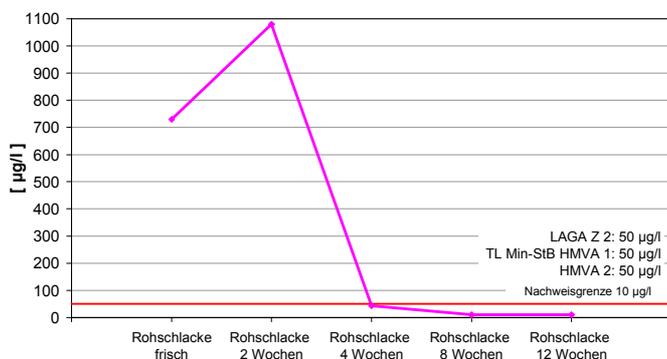
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



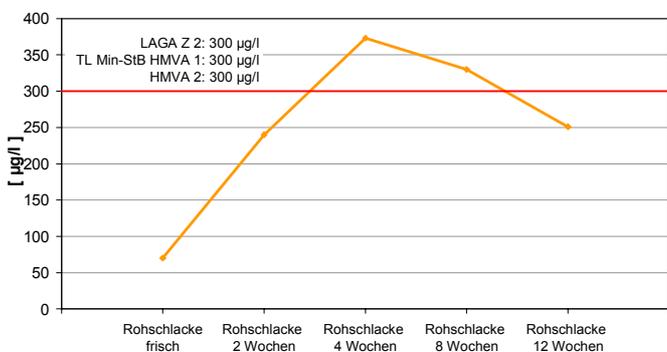
DEV S4-Test: Zink



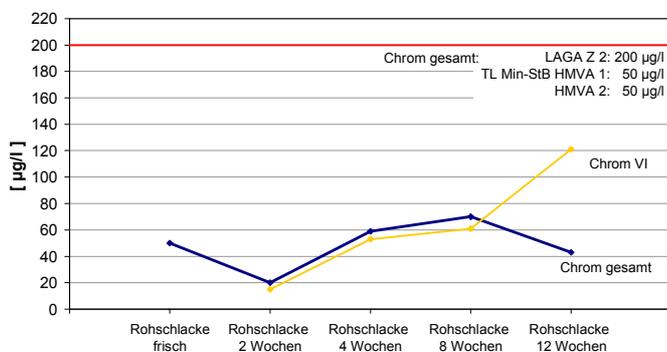
DEV S4-Test: Blei



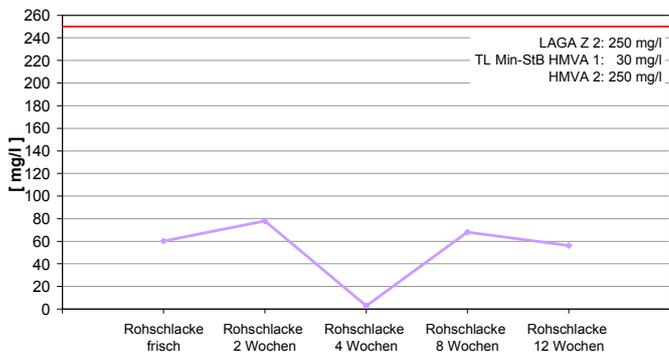
DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

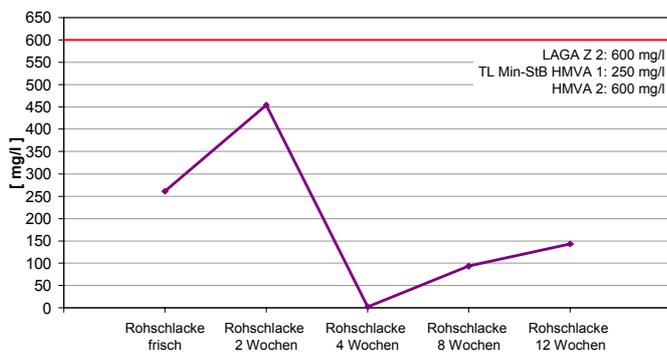


Abb. 28-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Rohschlacke A-2

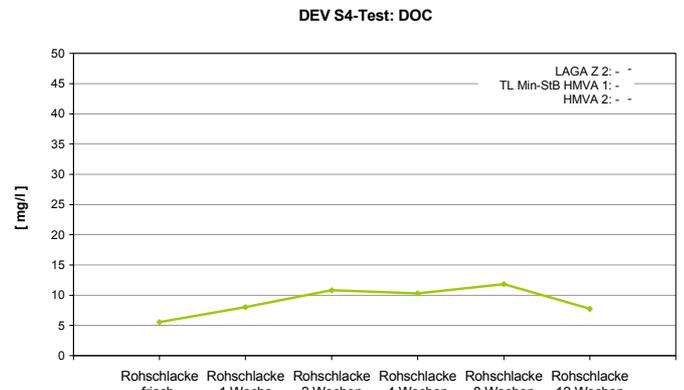
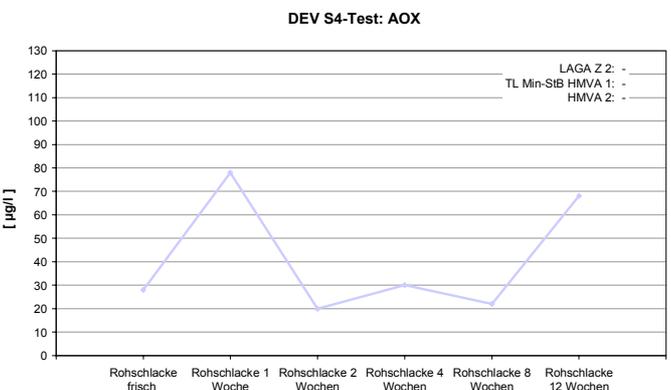
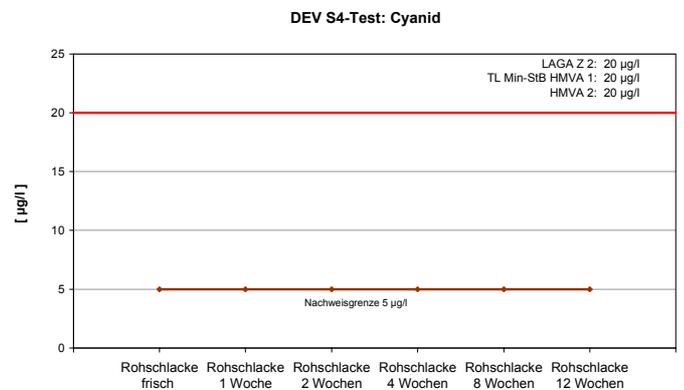
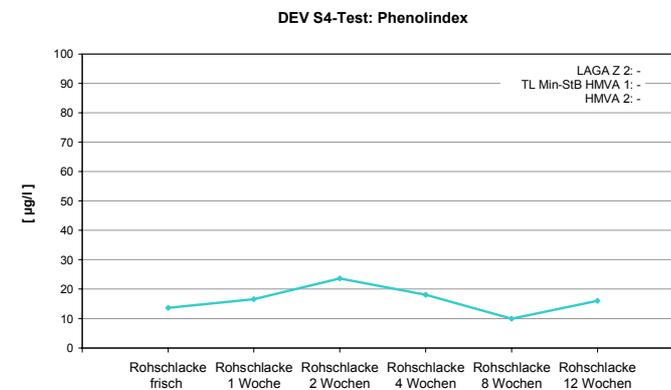
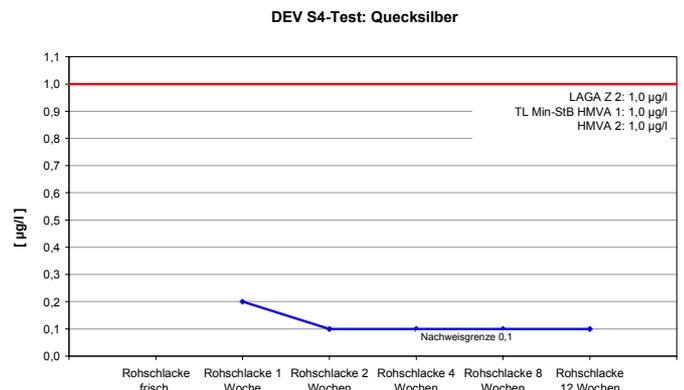
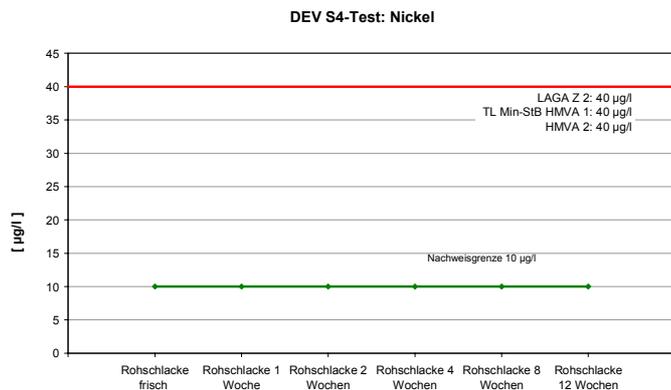
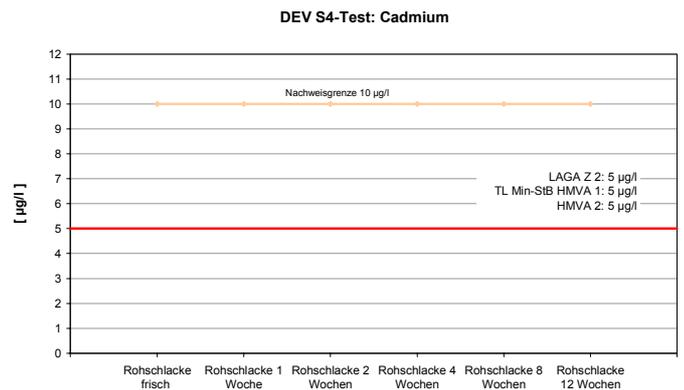
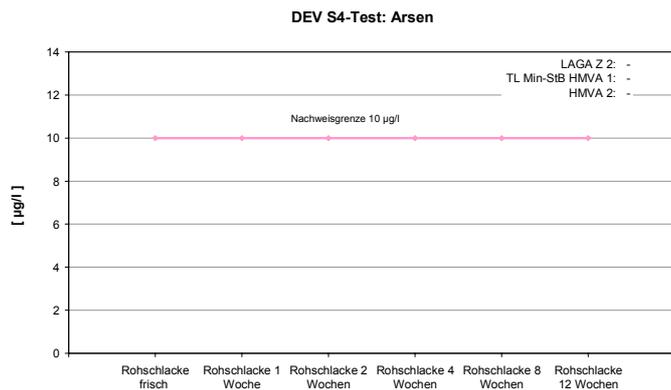


Abb. 28-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Rohschlacke A-2

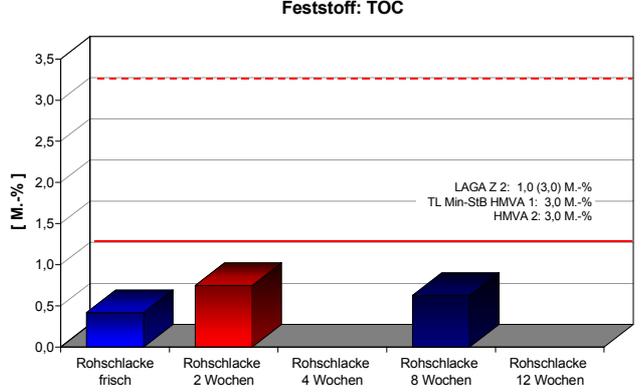
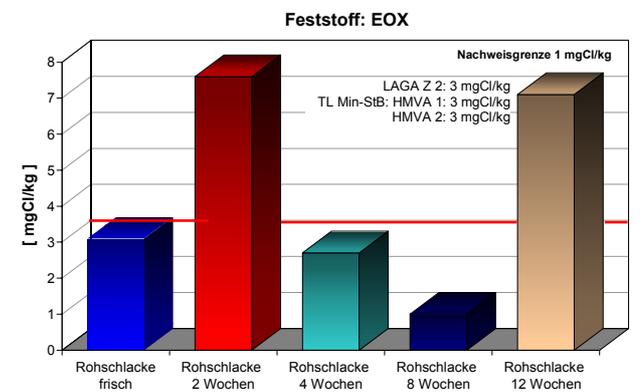
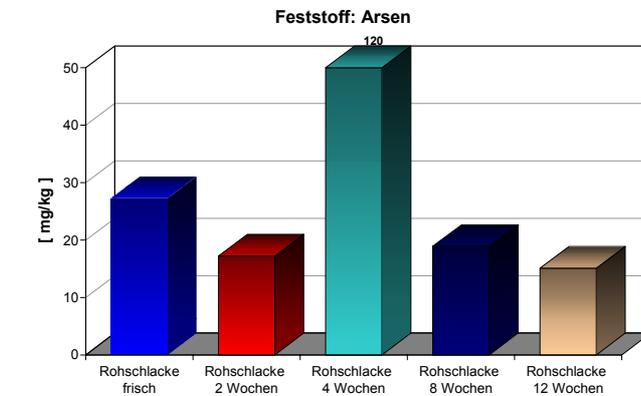
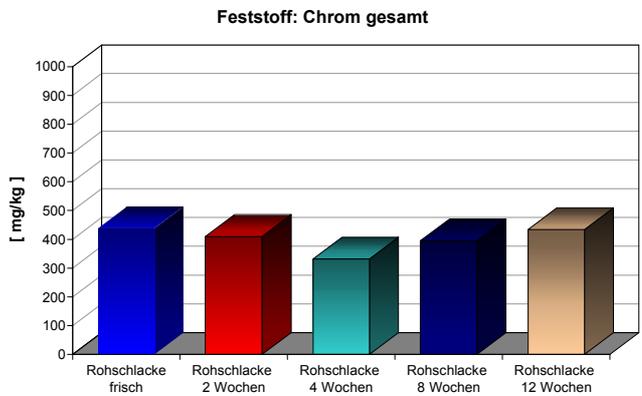
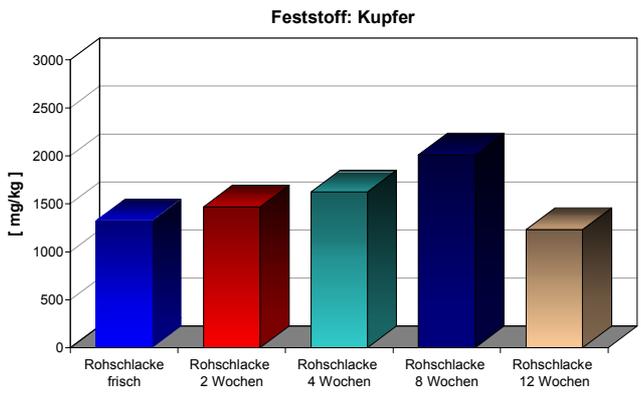
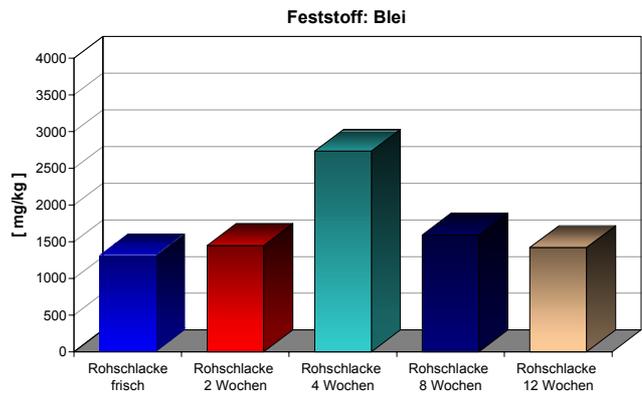
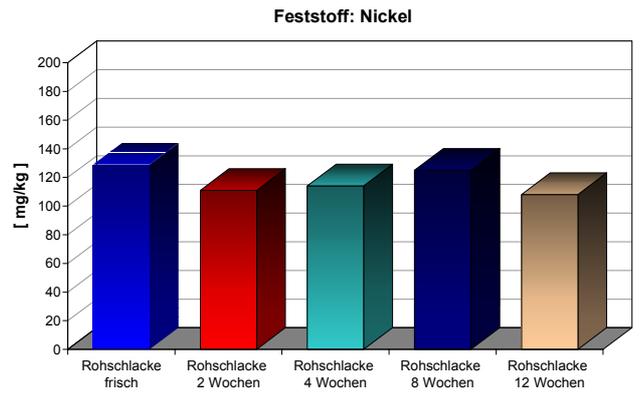
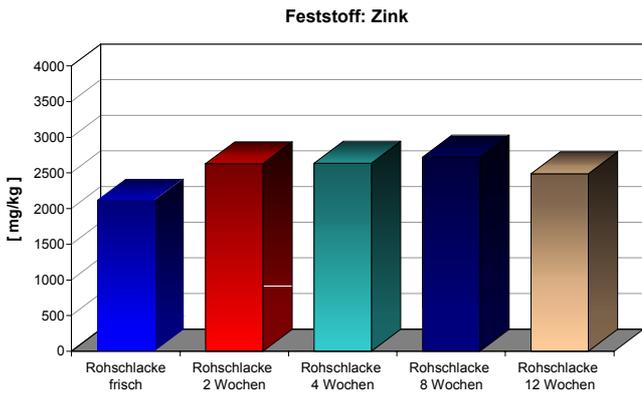
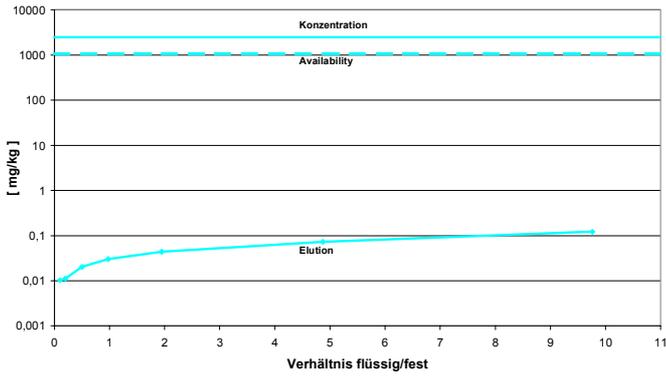
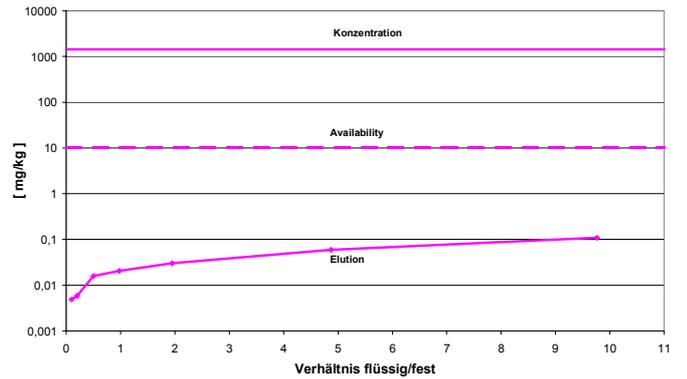


Abb. 29 Feststoffgehalte der untersuchten MV-Rohschlacke A-2

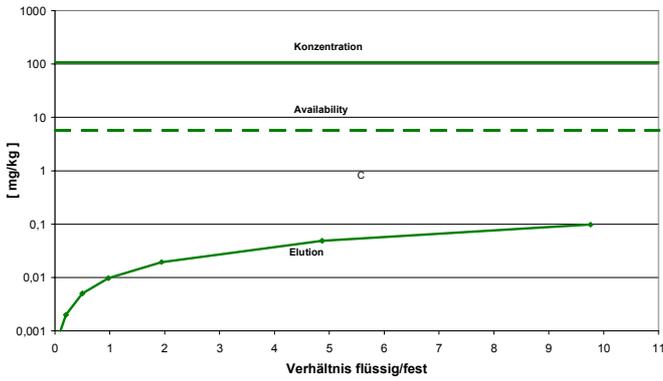
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



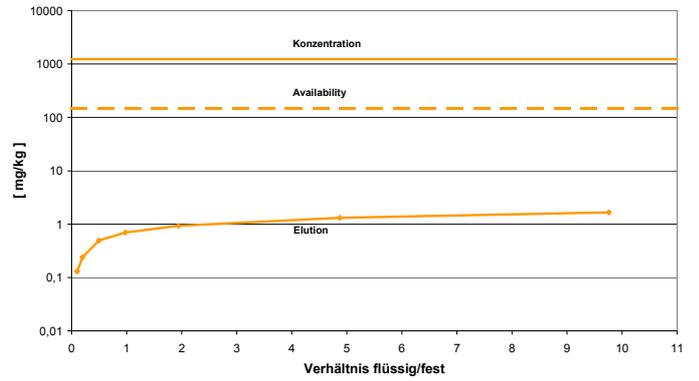
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



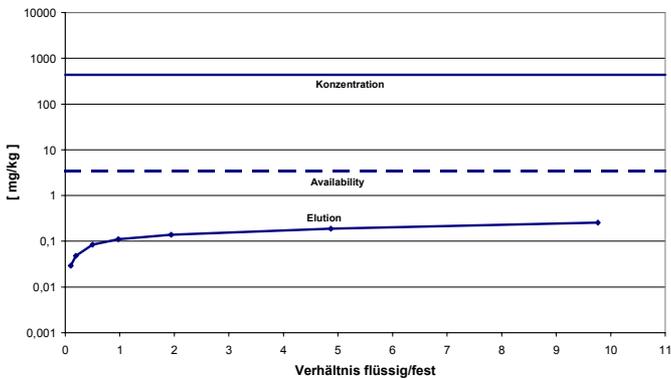
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



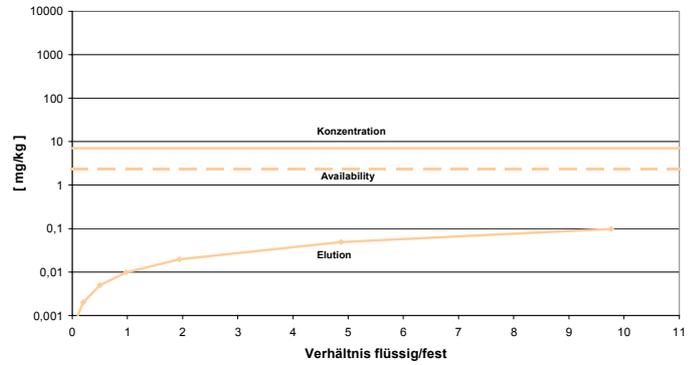
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



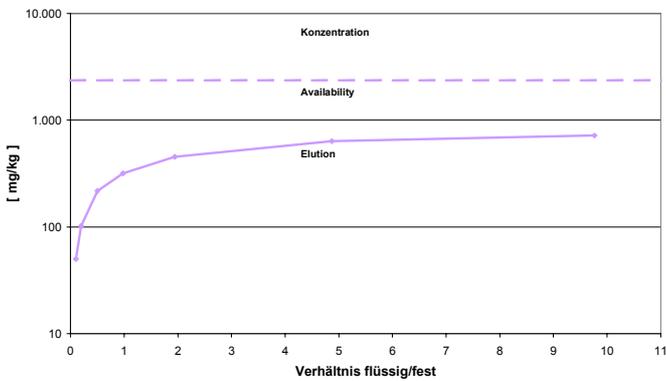
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

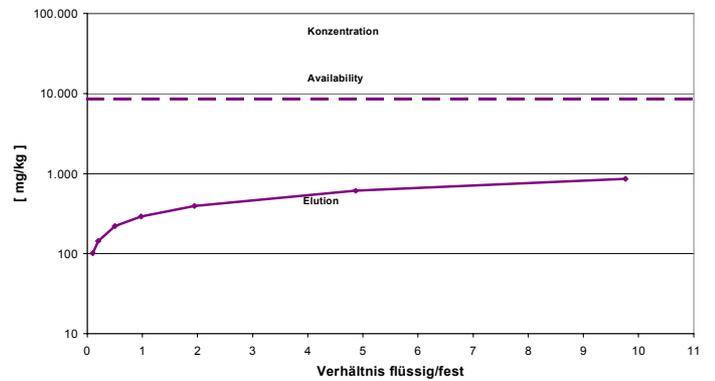


Abb. 30 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Rohschlacke A-2

5.2.1.2.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Rohschlacke A-2

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen wurde auf die Parameter Korngrößenverteilung, Wassergehalt und Glühverlust beschränkt, da es sich um nicht aufbereitete MV-Rohschlacke handelt. Weiterführende Parameter zur bautechnischen Einordnung entsprechend dem Regelwerk (TL Min-StB [2]) können nur an aufbereiteten MV-Schlacken bestimmt werden.

- **Korngrößenverteilung**

Die Korngrößenverteilung der MV-Rohschlacke A-2 geht aus Abb. 31 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen der MV-Rohschlacke A-2 zeigt, dass während der Alteration eine Tendenz zur Kornverfeinerung erkennbar ist und die Sieblinien die Gestalt von weitgestuften, sandigen Kiesen aufweisen.

- **Wassergehalte**

Die Wassergehalte schwanken zwischen 11,3 und 13,8 M.-%. Eine merkliche Reduktion der Wassergehalte während der Ablagerung erfolgt bei der MV-Rohschlacke A-2 nicht. Während der Ablagerung der MV-Rohschlacke A-2 konnten die Wassergehalte nicht reduziert werden, wobei jedoch beachtet werden muss, dass die Lagerung der MV-Rohschlacke A-2 im Freiland erfolgte und somit der natürliche Niederschlag direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte einwirken konnte (Tab. 13).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 0,54 M.-% und 1,45 M.-%. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass es sich um nicht aufbereitete MV-Rohschlacken handelt, die höhere Anteile an Überkorn und nicht verbrannten Anteilen aufweisen, was zu höheren Werten für den Parameter Glühverlust führt (Tab. 13).

Tab. 13 Bautechnische Parameter der MV-Rohschlacke A-2

Parameter	Einheit	frisch	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen
Wassergehalt	M.-%	13,8	13,9	13,1	11,3	12,3
Glühverlust	M.-%	0,54	0,94	1,12	1,35	1,45

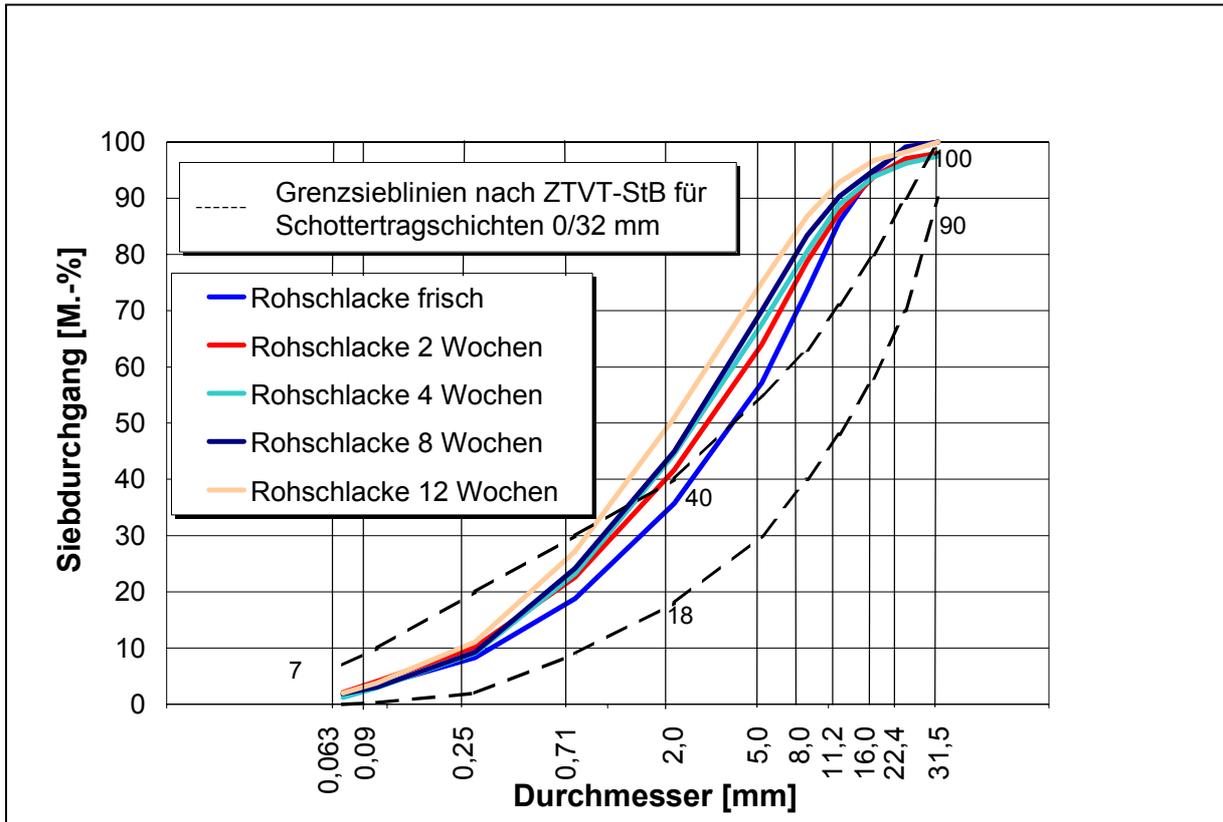


Abb. 31 Korngrößenverteilung der MV-Rohschlacke A-2

5.2.1.3 MV-Schlacke A-3 (Großversuch 3)

5.2.1.3.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-3

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke A-3 geht aus Tab. 14, die der Grobfraktion aus Tab. 15 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 32).

Im Feinanteil der MV-Schlacke A-3 stellen das Carbonat Calcit (CaCO_3) und teilweise das Oxid Quarz (SiO_2) die mineralogischen Hauptphasen dar, während zum Teil das Sulfat Anhydrit (CaSO_4) und das Silikat Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sowie die Sulfate Anhydrit (CaSO_4), Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) auf.

Tab. 14 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke A-3

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase/Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Hauptphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Nebenphase/Spuren	Neubildung
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Gips	Spuren	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
neu gebildete Glasphase		Spuren	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

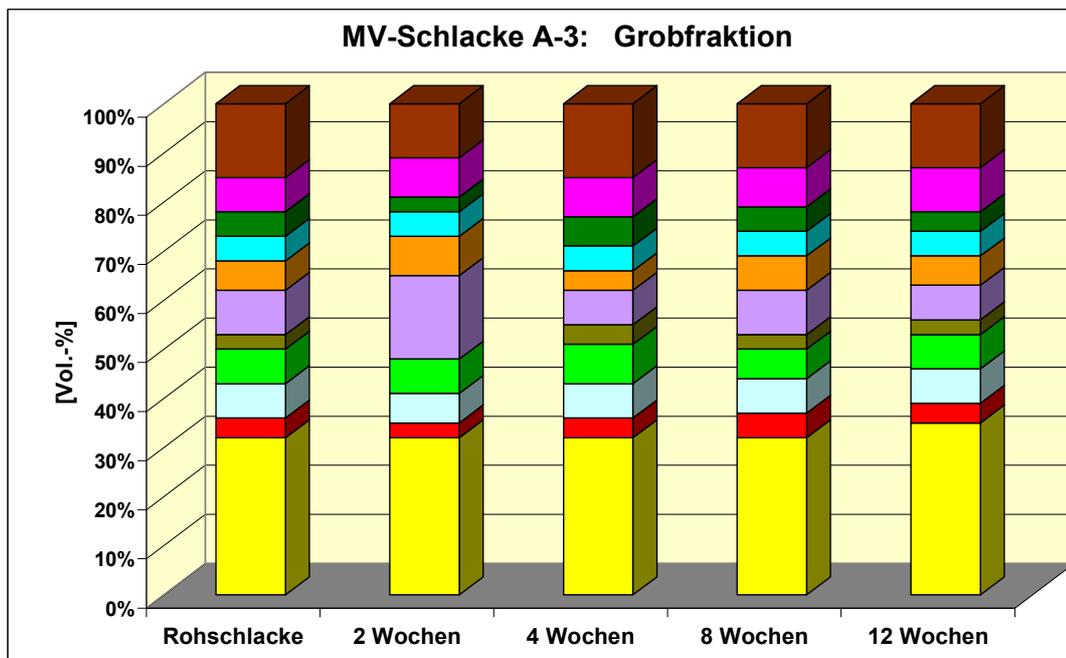
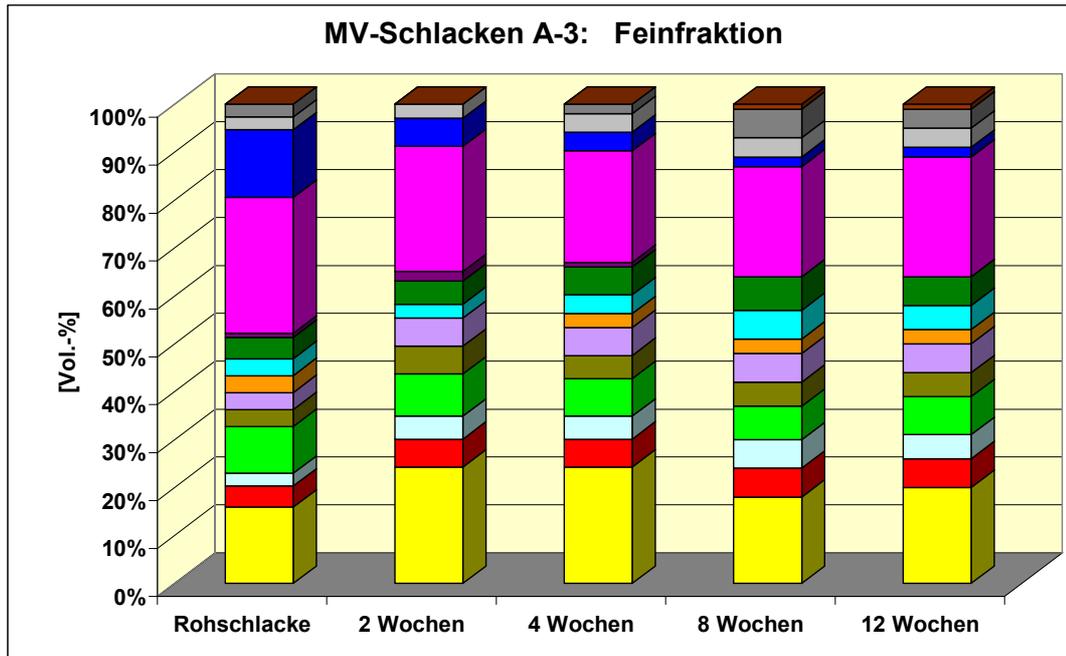
In der Grobfraktion der MV-Schlacke A-3 stellt das Oxid Quarz (SiO₂) die alleinige Hauptphase dar, während die neu gebildete Glasphase als Nebenphase auftritt. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Kalifeldspat (KAlSi₃O₈), Gehlenit (Ca₂Al₂SiO₇), Plagioklas (Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si₂O₈], Äkermanit (Ca₂MgSi₂O₇) und Diopsid (CaMgSi₂O₆), das Carbonat Calcit (CaCO₃), die Oxide Magnetit (Fe₃O₄) und Hämatit (α-Fe₂O₃) und das Phosphat Apatit (Ca₅(PO₄)₃(OH)) auf.

Tab. 15 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke A-3

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi ₃ O ₈	Kalifeldspat	Nebenphase/Akzessorie	Durchläufer
(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	Plagioklas	Akzessorie	Durchläufer
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	Äkermanit	Akzessorie	Neubildung
CaMgSi ₂ O ₆	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO ₂	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe ₃ O ₄	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
α-Fe ₂ O ₃	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO ₃	Calcit	Akzessorie	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke A-3 handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO₂), sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi₃O₈) und Plagioklas (Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si₂O₈] dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit Ca(OH)₂ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·x24H₂O) hingegen wird sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker und das Carbonat Calcit (CaCO₃) im Laufe der Ablagerung und zusätzlich durch die Reaktion von Portlandit mit dem Luft-CO₂ gebildet.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe_3O_4	■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Äkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
■ <u>neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 32 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der Schlacke A-3

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke A-3 folgendes festgestellt (Abb. 33):

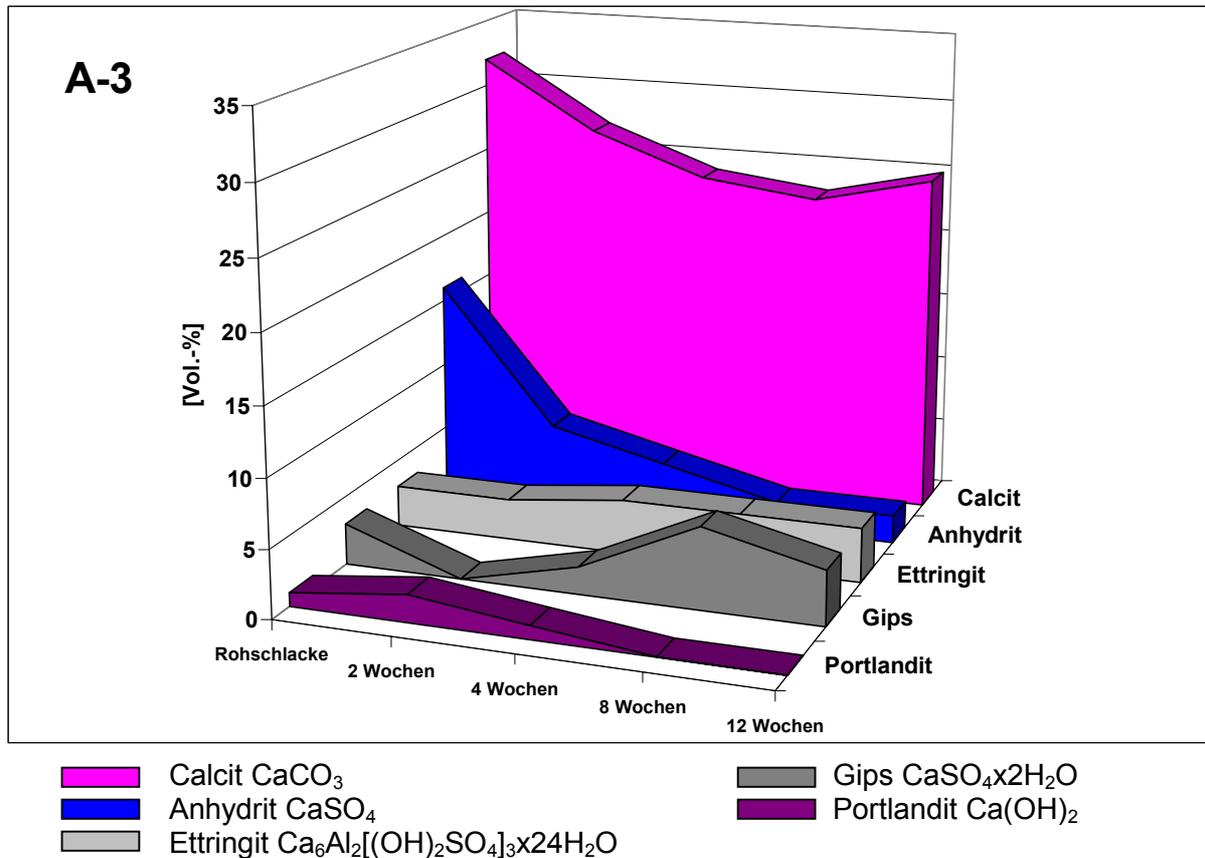


Abb. 33 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke A-3

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Schlacke A-3 bis zu einer Ablagerungszeit von 4 Wochen einen sehr geringen Portlanditgehalt (Ca(OH)₂) im Mineralbestand. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO₃) gesteuert wird, lässt keine ausgeprägten Alterationsreaktionen im Verlaufe der Ablagerung erkennen, da keine Zunahme des Calcits festgestellt werden kann. Die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke A-3 weist sogar deutlich geringere Calcitgehalte als die frisch produzierte MV-Rohschlacke auf und deutet somit ein mangelndes Carbonatisierungsvermögen an.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO₄), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, nimmt in der untersuchten MV-Schlacke nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen deutlich ab. Die geringen Gehalte des Anhydrits in der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke A-3 zeigen einen weit fortgeschrittenen Alterungsprozess an und anhand der Sulfatreaktionen kann die MV-Schlacke A-3 als reaktionsträge und damit als ausreichend raumbeständig eingestuft werden, da nur noch geringe Sulfatreaktionen erwartet werden.
- Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) tritt bereits in der MV-Rohschlacke auf und steigt während der weiteren Ablagerungszeit nur noch sehr gering an.
- Gips (CaSO₄·2H₂O) wird ebenfalls bereits in der MV-Rohschlacke in geringen Mengen festgestellt und erreicht in der 8 und 12 Wochen abgelagerten MV-Schlacke deutlich höhere Gehalte.

Die MV-Schlacke A-3 weist zwar per Definition ein mangelndes Carbonatisierungsverhalten auf, jedoch liegen die Calcitgehalte in Bereichen (> 14 Vol.-%), die für eine bautechnisch stabile MV-Schlacke sprechen. Da auch die Sulfatreaktionen nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen abgeschlossen sind, kann die MV-Schlacke A-3 im mineralogischen Sinne als raumbeständig eingestuft werden.

5.2.1.3.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-3

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke A-3 zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (s. Abb. 34-a und 34-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit geringfügig von pH 12,2 auf 11,6 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit fallen während der Ablagerungszeit von 4 Wochen von ca. 300 mS/m auf 100 mS/m und bleiben danach auf demselben Niveau. Sie liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Die Zinkwerte zeigen nach einer Ablagerungszeit von vier Wochen eine starke Abnahme von ca. 140 µg/l auf ca. 20 µg/l und unterschreiten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l sehr deutlich.
- Die Bleiwerte der MV-Schlacke liegen in den ersten zwei Wochen der Ablagerung bei ca. 750 µg/l und fallen dann unter die gerätespezifische Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden somit von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke deutlich unterschritten.
- Die Kupferwerte schwanken, mit Ausnahme der 2 Wochen abgelagerten MV-Schlacke zwischen ca. 70 und 90 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden eingehalten.
- Die Chromgehalte liegen in einem Bereich von ca. 40 bis 60 µg/l. Der Zuordnungswert der LAGA von 200 µg/l wird von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten, während der Grenzwert der TL Min-StB 2000 von 50 µg/l von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke überschritten wird (Ist-Wert: 60 µg/l).
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Cadmium, Nickel und Quecksilber liegen nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid variieren lediglich zwischen ca. 60 mg/l und 70 mg/l und zeigen somit keine Reduktion während der Ablagerungszeit. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l werden unterschritten.
- Die Sulfatwerte nehmen während der Ablagerung von ca. 50 auf 120 mg/l zu, halten jedoch die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l ein.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse [12] zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke, bis auf die Überschreitung des Grenzwertes von Chrom gemäß TL Min-StB 2000 [2], eingehalten werden.

- **Chemische Untersuchungen im Feststoff**

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 35 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke A-3 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Der Grenzwert für den Parameter TOC wird in der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke A-3 eingehalten, während der Parameter EOX nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten deutlich überschritten wird.

- **Langzeitstabilität**

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 36 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

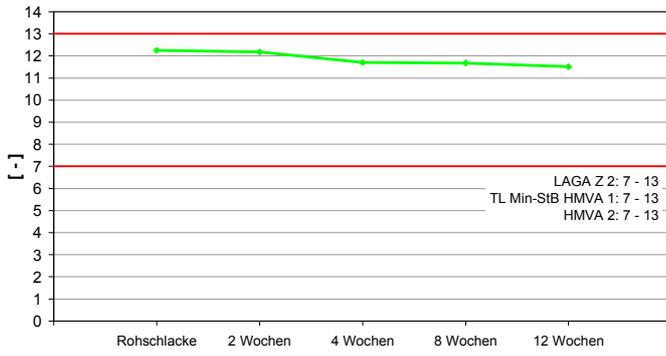
Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnen-tests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnen-tests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle, der Chloride und Sulfate abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil des Schwermetalles Zink über Blei und Kupfer sowie weitaus höher als der höchst mögliche verfügbare Anteil von Nickel, Chrom und Cadmium liegt, die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnen-tests jedoch in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit von Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid, allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnen-tests, dass die eluierbaren Mengen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschvorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

DEV S4-Test: pH-Wert



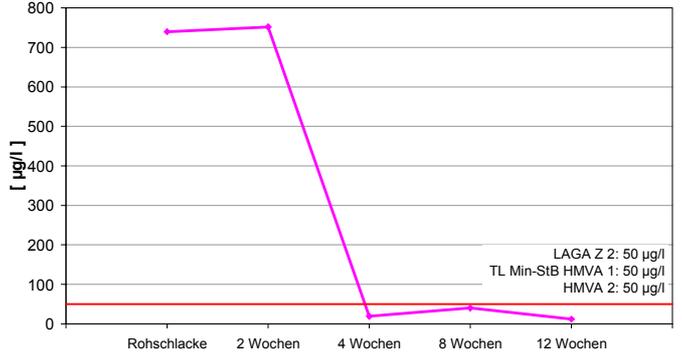
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



DEV S4-Test: Zink



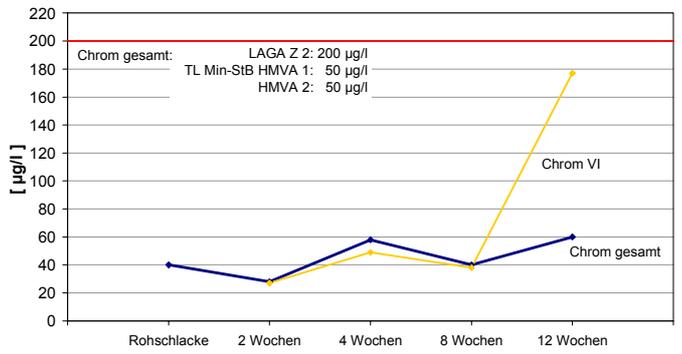
DEV S4-Test: Blei



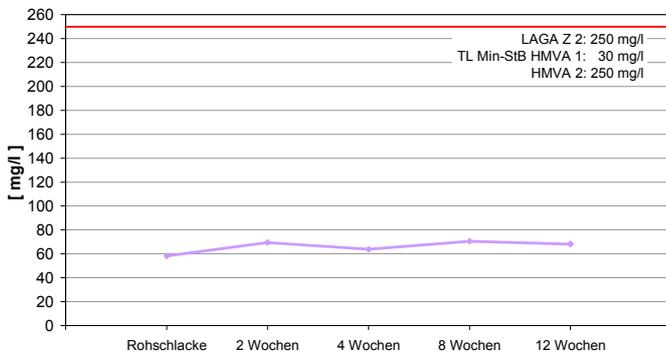
DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

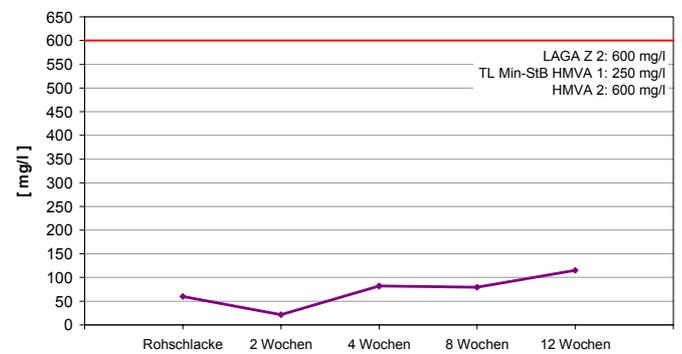


Abb. 34-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke A-3

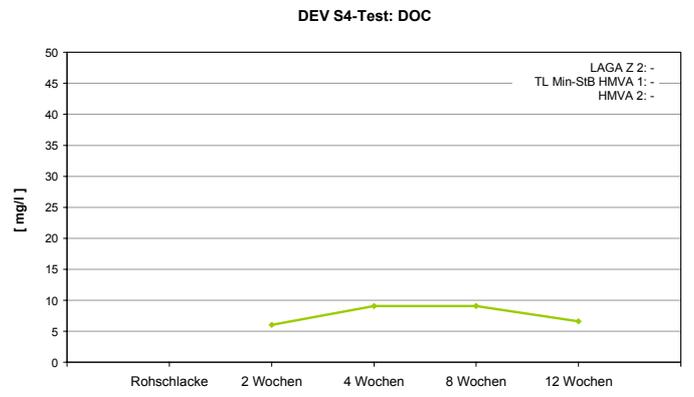
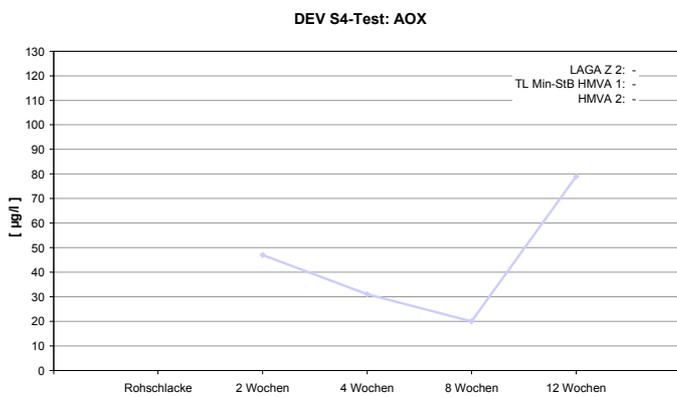
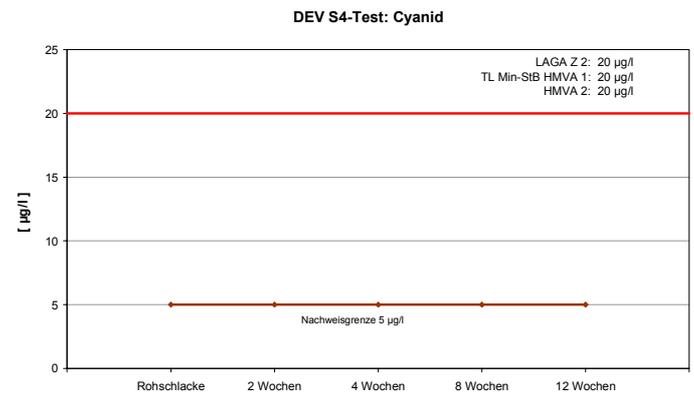
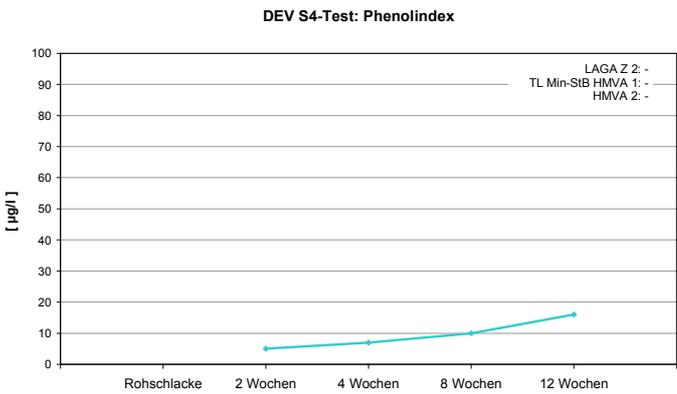
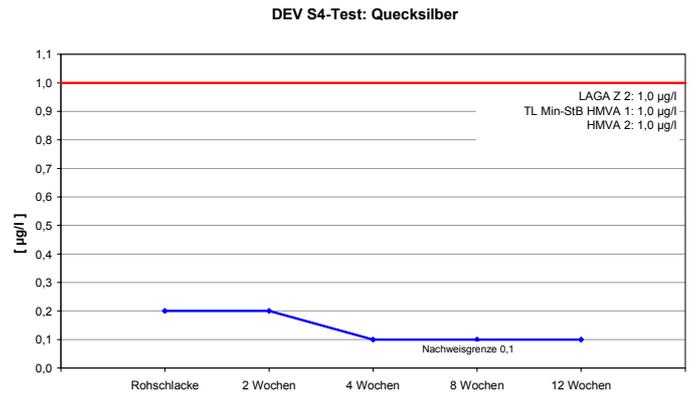
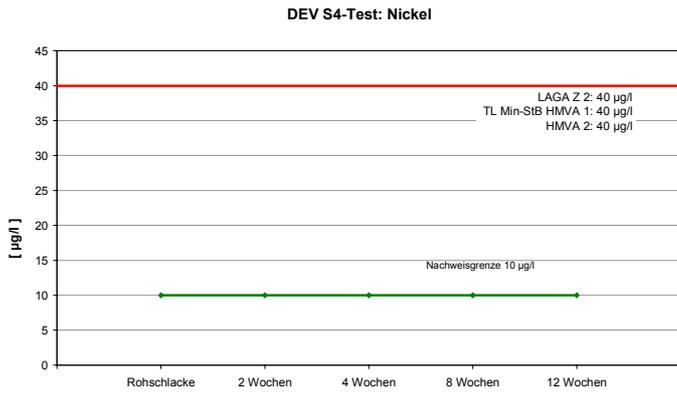
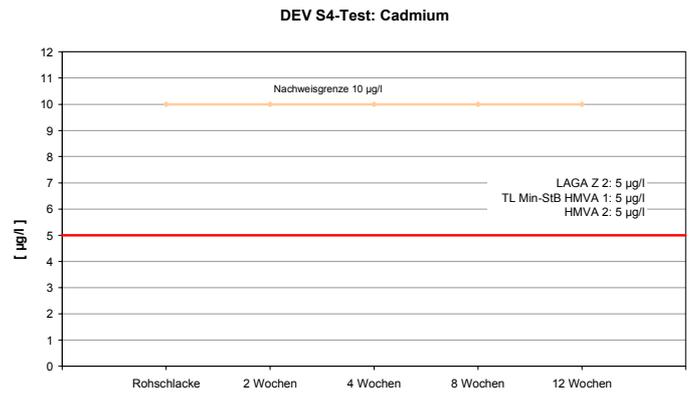
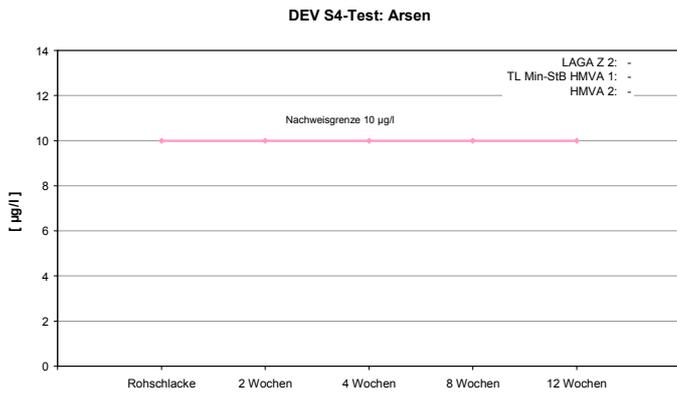


Abb. 34-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke A-3

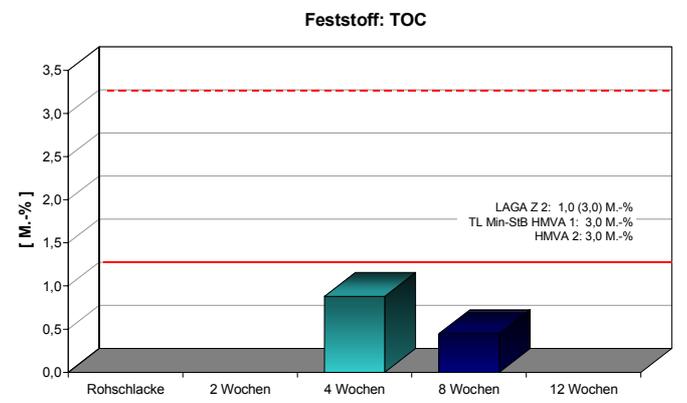
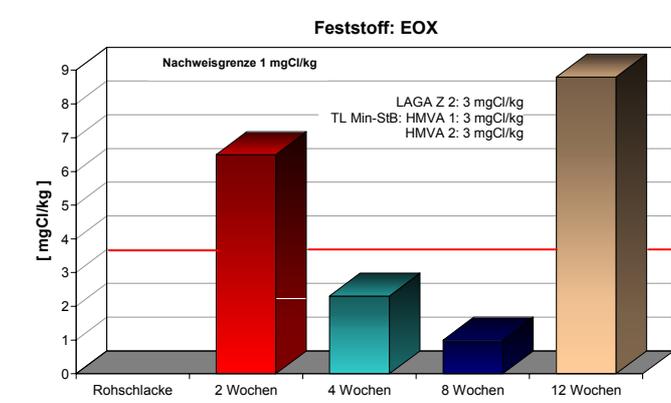
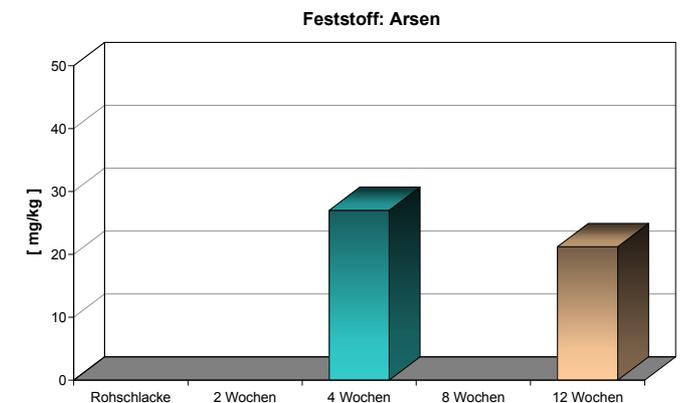
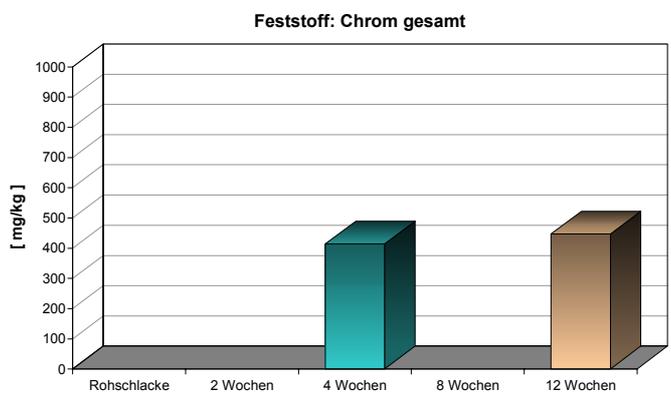
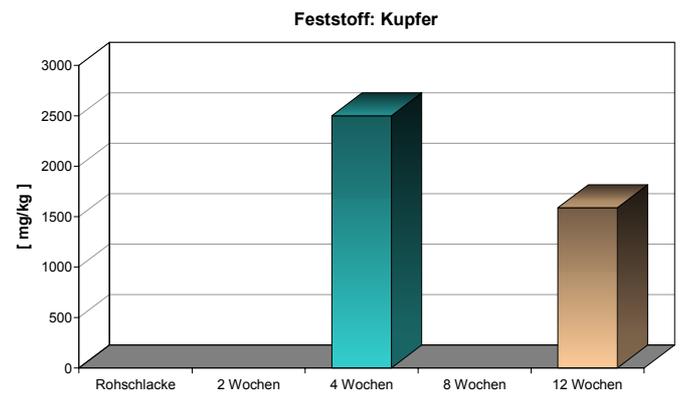
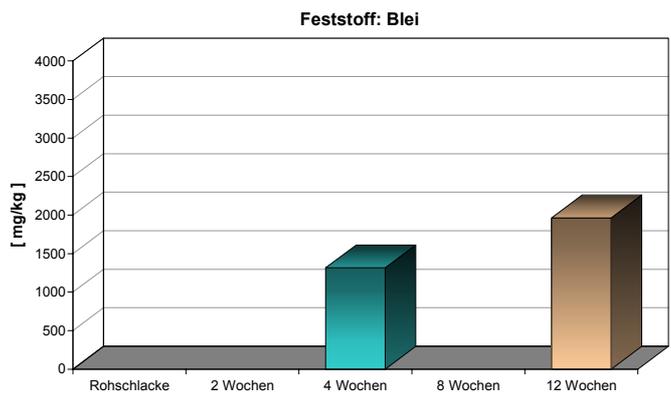
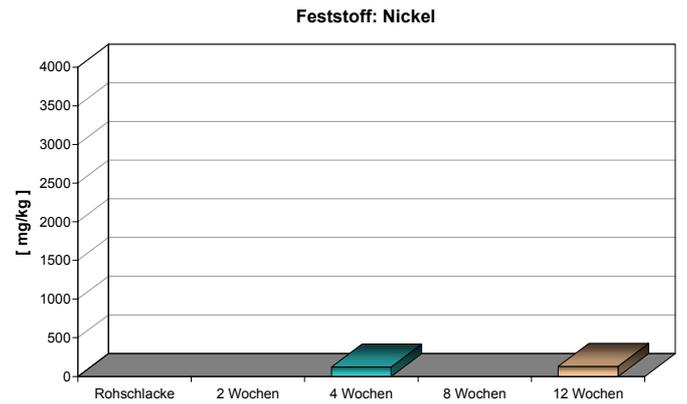
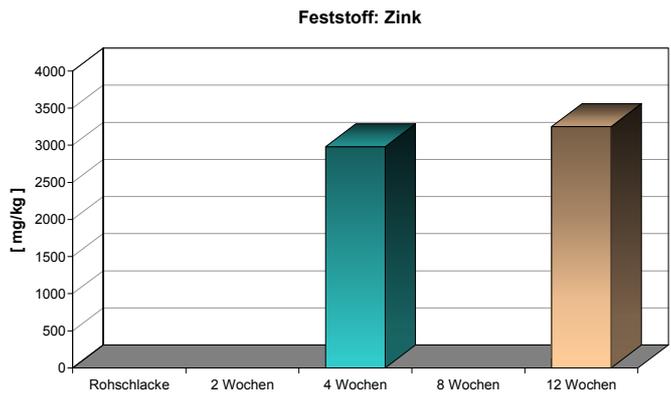
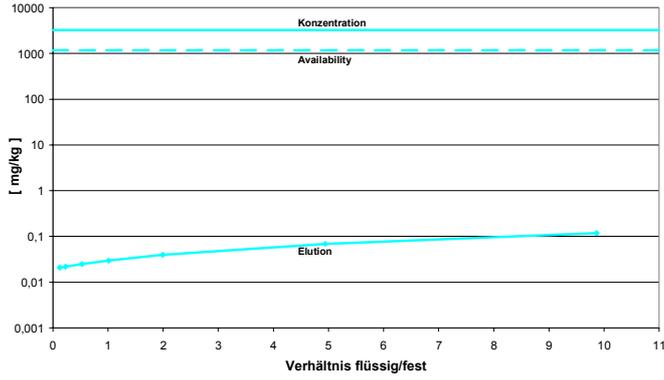
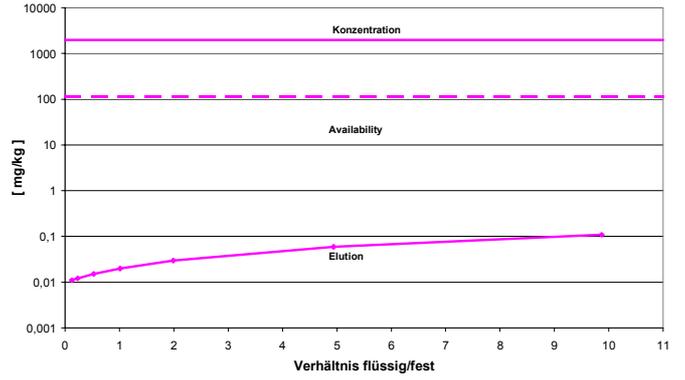


Abb. 35 Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke A-3

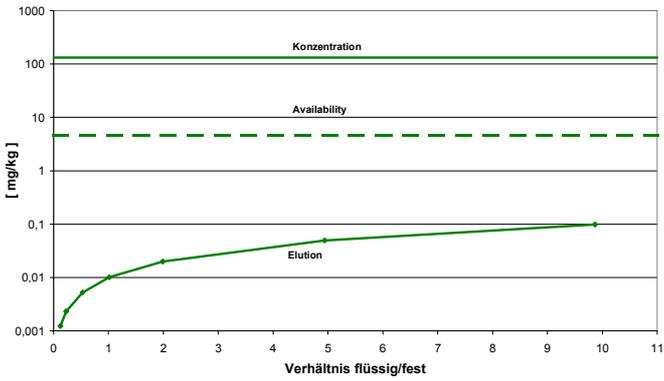
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



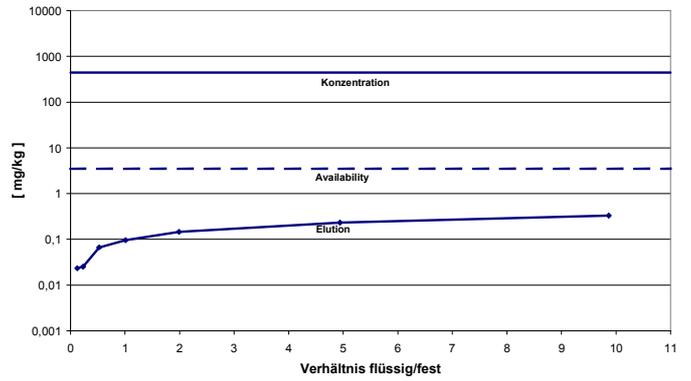
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



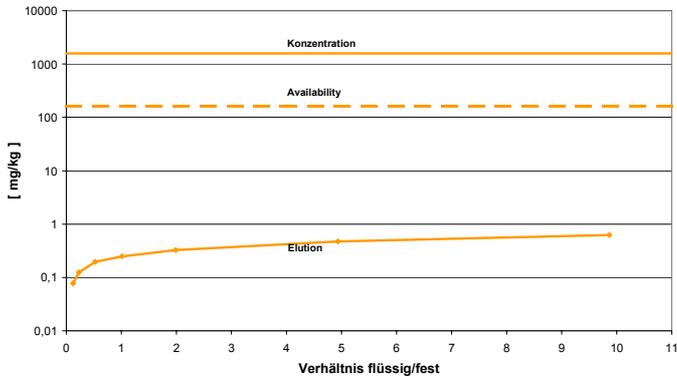
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



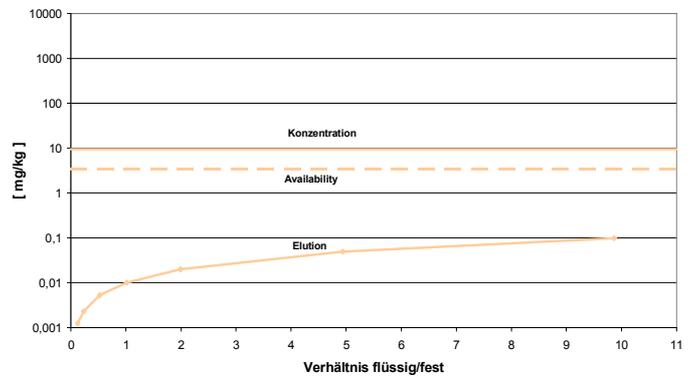
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



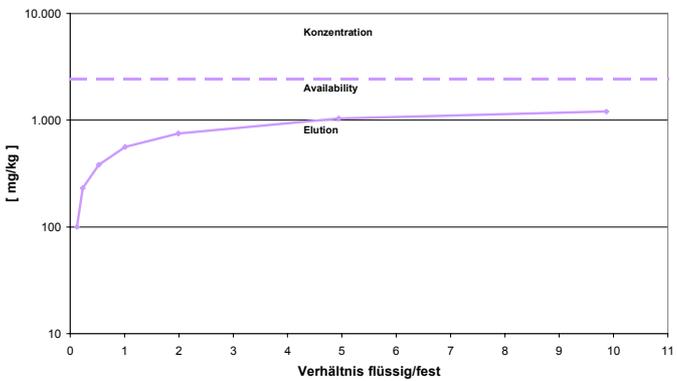
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

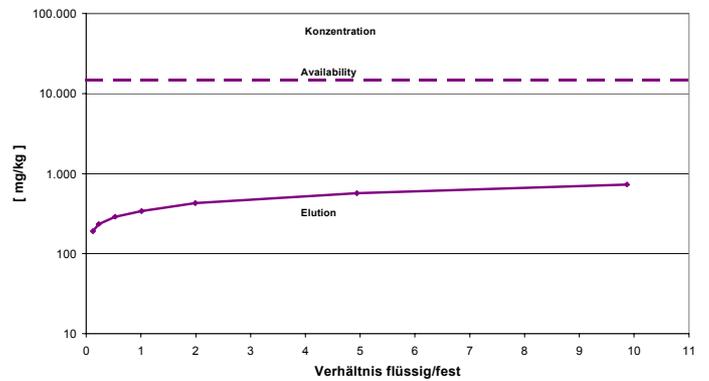


Abb. 36 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke A-3

5.2.1.3.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke A-3

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] beruht. Darüber hinaus erfolgen zusätzliche Untersuchungen, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken im Bereich des Deponiebaues und Erdbaues abzuschätzen zu können. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften einer drei Monate abgelagerten MV-Schlacke für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke A-3 gehen aus Abb. 37 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Im Vergleich mit den aufbereiteten MV-Schlacke A-3 weist die MV-Rohschlacke A-3 einen deutlich höheren Anteil an der Grobfraction auf.
- Nach der Aufbereitung liegen die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacke A-3 in einem sehr engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke A-3 haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 5 mm die untersuchte MV-Schlacke oberhalb der Grenzsieblinien liegt, d.h. einen zu niedrigen Gehalt an Grobkorn aufweisen.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke A-3 geht aus Abb. 38 hervor. Ein Vergleich der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 64,0 bis 70,5 M.-%) der makroskopischen stofflichen Bestandteile.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ M.-% werden von der MV-Schlacke A-3 eingehalten, ebenfalls unter Einbeziehung der Toleranz von 5% relativ der maximal erlaubte Metallanteil von 5,0 M.-%.

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke liegen zwischen ca. 1,62 und 1,67 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 16,1 und 16,8 M.-% (Abb. 39). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke A-3, die sich auch in der Baupraxis zeigt.

- **Wassergehalt**

Der festgestellte Wassergehalt der frisch produzierten MV-Rohschlacke liegt bei 11,5 M.-% und schwankt nach der Aufbereitung zwischen 11,8 und 12,8 M.-% (Tab. 16). Während der Ablagerung der MV-Schlacke A-3 konnten die Wassergehalte nicht reduziert werden, wobei jedoch beachtet werden muss, dass die Lagerung der aufbereiteten MV-Schlacke im Freiland erfolgte, und somit der natürliche Niederschlag direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte einwirken konnte.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,667 g/cm³ und 2,723 g/cm³ und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 16). Die große Schwankungsbreite geht auf die stark unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke (z.B. Anteile an Metallen) zurück.

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm ≤ 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 13,1 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke nicht erfüllt.

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde dann gemäß Regelwerk zusätzlich an der Gesamtkörnung durchgeführt. Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke A-3 eingehalten (Tab. 16).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, sind sehr homogen und liegen zwischen 38,1 und 38,7 M.-% (Tab. 16). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke A-3 erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Die Anteile an schlecht geformten Körnern liegen zwischen 12,5 und 15,8 M.-%, womit die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden (Tab. 16).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 0,9 und 1,5 M.-%. Anforderungen an den Parameter Glühverlust gemäß der TL Min-StB 2000 bestehen nicht (Tab. 16).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate alten MV-Schlacke A-3 eingehalten werden. Ein Einsatz ist somit aus bautechnischer Sicht möglich.

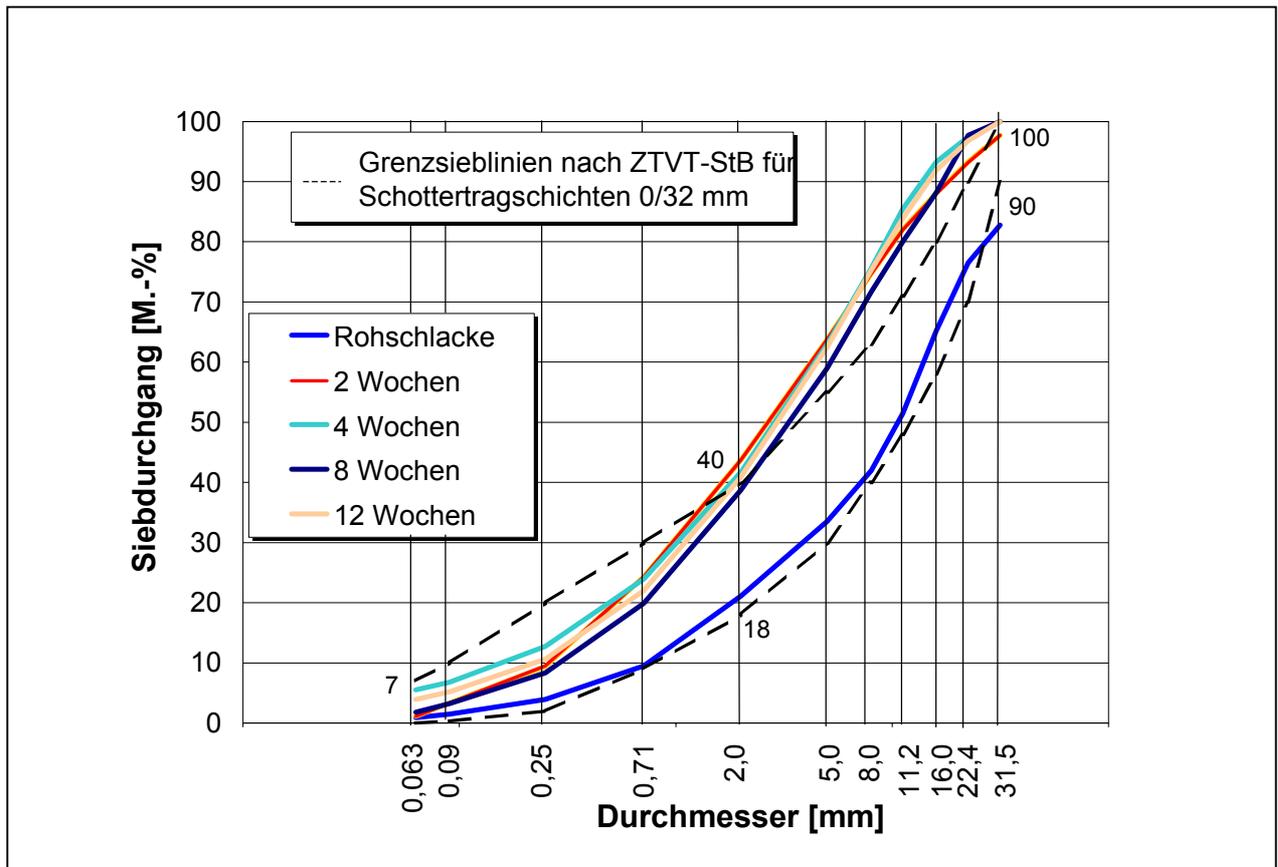


Abb. 37 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke A-3

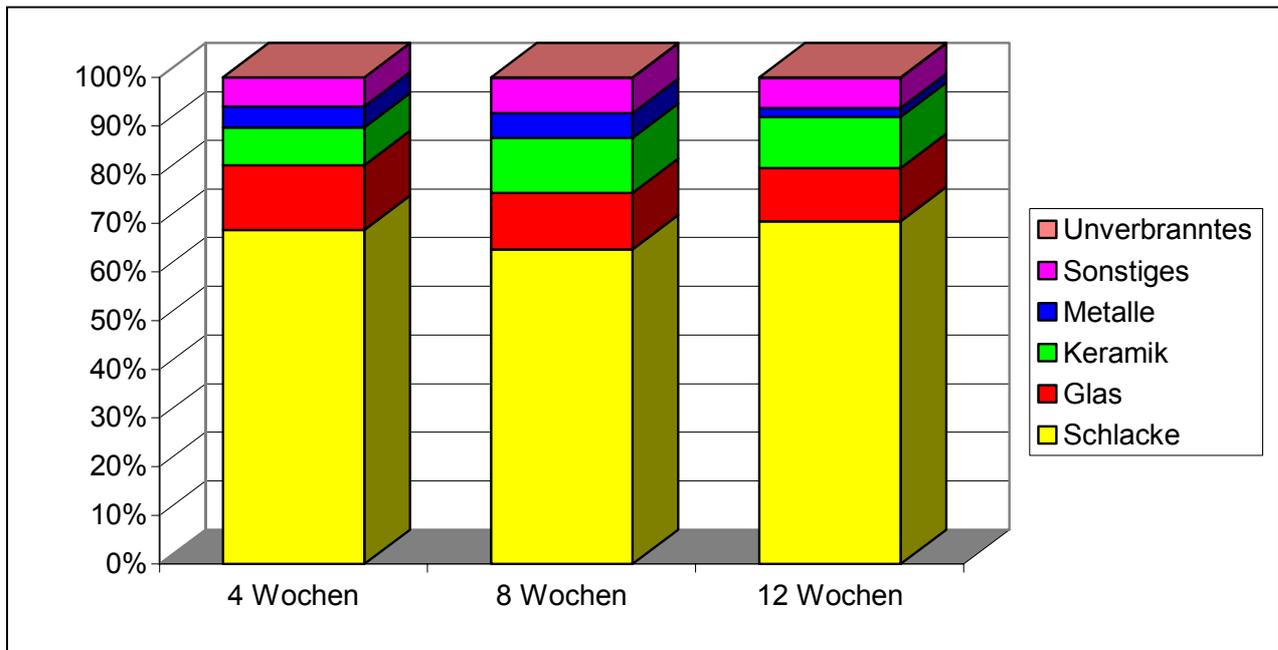


Abb. 38 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke A-3

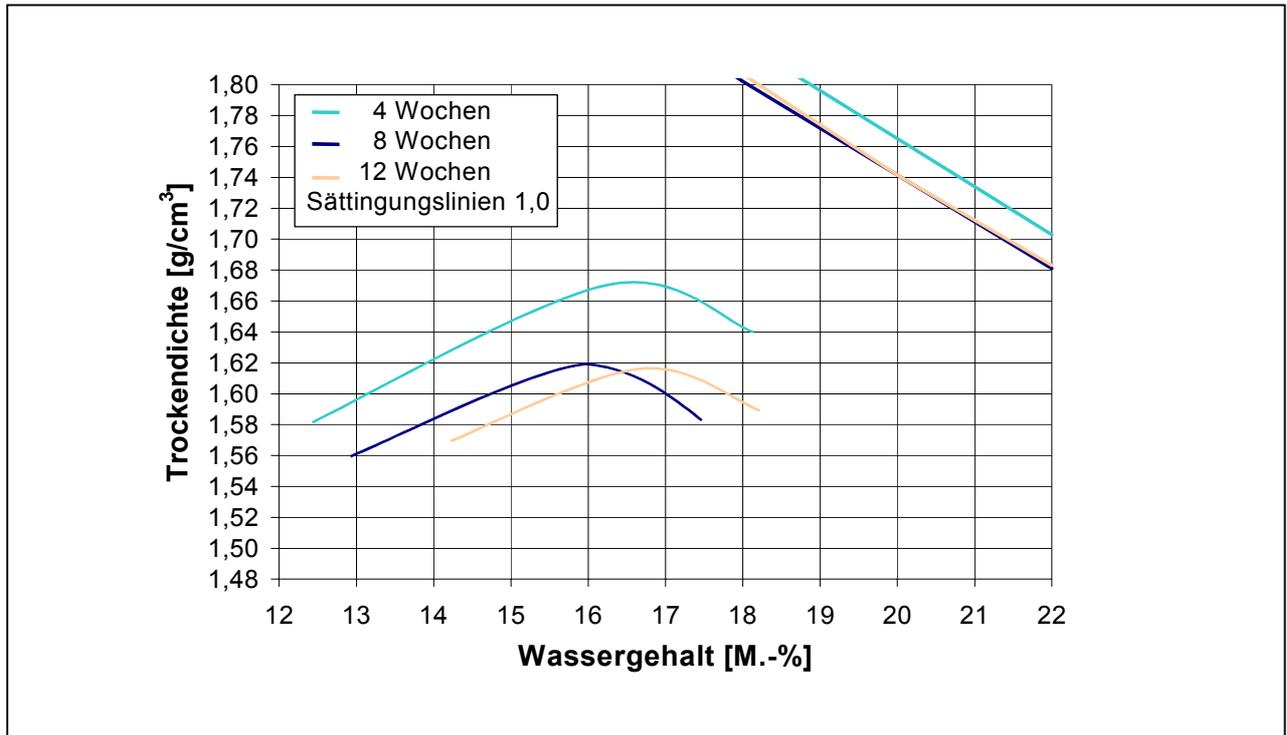


Abb. 39 Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke A-3

Tab. 16 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke A-3

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	12,6	12,8	12,5	11,8	
Rohdichte	g/cm ³	n.b.	2,723	2,667	2,673	
Schüttdichte	g/cm ³	n.b.	1,214	1,221	1,225	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16)	< 5 mm < 0,71mm M.-%	n.b.	n.b.	7,2 3,3	13,1 4,8	3,0 (5,0) 2,5
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	n.b.	3,8	6,0	5,2	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	n.b.	n.b.	38,1	38,7	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	n.b.	n.b.	13,7	12,5	50
Glühverlust	M.-%	0,9	1,4	1,5	1,5	

5.2.2 ANLAGE B

In der MVA B wurden zwei Großversuche (MV-Schlacken B-1, B-2) mit jeweils unterschiedlichem Müllinput durchgeführt, um den Einfluss der verfahrenstechnischen Randbedingungen auf das Versuchsergebnis zu minimieren.

- **Verfahrenstechnik der Müllverbrennungsanlage B**

Die verfahrenstechnischen Parameter der Müllverbrennungsanlage B gehen aus Tab. 17 hervor. Die untersuchten Schlackeproben stammen aus einem Kessel mit Walzenrost und Gleichstromfeuerung.

Tab. 17 Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA B

Verfahrensparameter der MVA B	
Rostsystem	Walzenrost
Durchsatz [t/a]	200.000
Linien	3
Feuerung	Gleichstrom
Heizwert [kJ/kg]	10.000
Abfallarten	Hausmüll
	Gewerbeabfall
	Sperrmüll
Schlackeanfall [t/a]	56.500

- **Müllinput**

In zwei Versuchsreihen wurden folgende Müllzusammensetzungen großtechnisch thermisch behandelt (Tab. 18).

Tab. 18 Müllzusammensetzungen während der Großversuche

Müllzusammensetzung der großtechnischen Versuchsgemische in der MVA B in M.-%				
Versuch	Hausmüll	Gewerbeabfall	Sperrmüll	Sonstiges
B-1	93,1	5,3	1,1	0,5
B-2	88,4	10,0	0,9	0,7

- **Aufbereitungstechnik der MV-Schlacken**

Die in der Müllverbrennungsanlage B produzierten MV-Rohschlacken werden per LKW zu einem Zwischenlager gebracht und von dort mit dem Schiff zur angeschlossenen Schlackenaufbereitungsanlage transportiert. Nach einer feuchteabhängigen Zwischenlagerung zur Reduktion des Feuchtegehalts werden die MV-Rohschlacken zu MV-Schlacken aufbereitet. Durch diese Verfahrensweise sind die MV-Rohschlacken ca. 2 Wochen alt und mehrmals umgeschichtet, bevor sie zu MV-Schlacken aufbereitet werden. Die Vorlagerung sowie die Nachlagerung finden im Freien statt. Die Aufbereitungsanlage ist eingehaust und verfügt über einen Rost zur Entfernung grober Störstoffe und Langschrott, verschiedene Siebanlagen sowie eine Nichteisen- und Eisenabscheidung (Trommel- und Überbandmagneten).

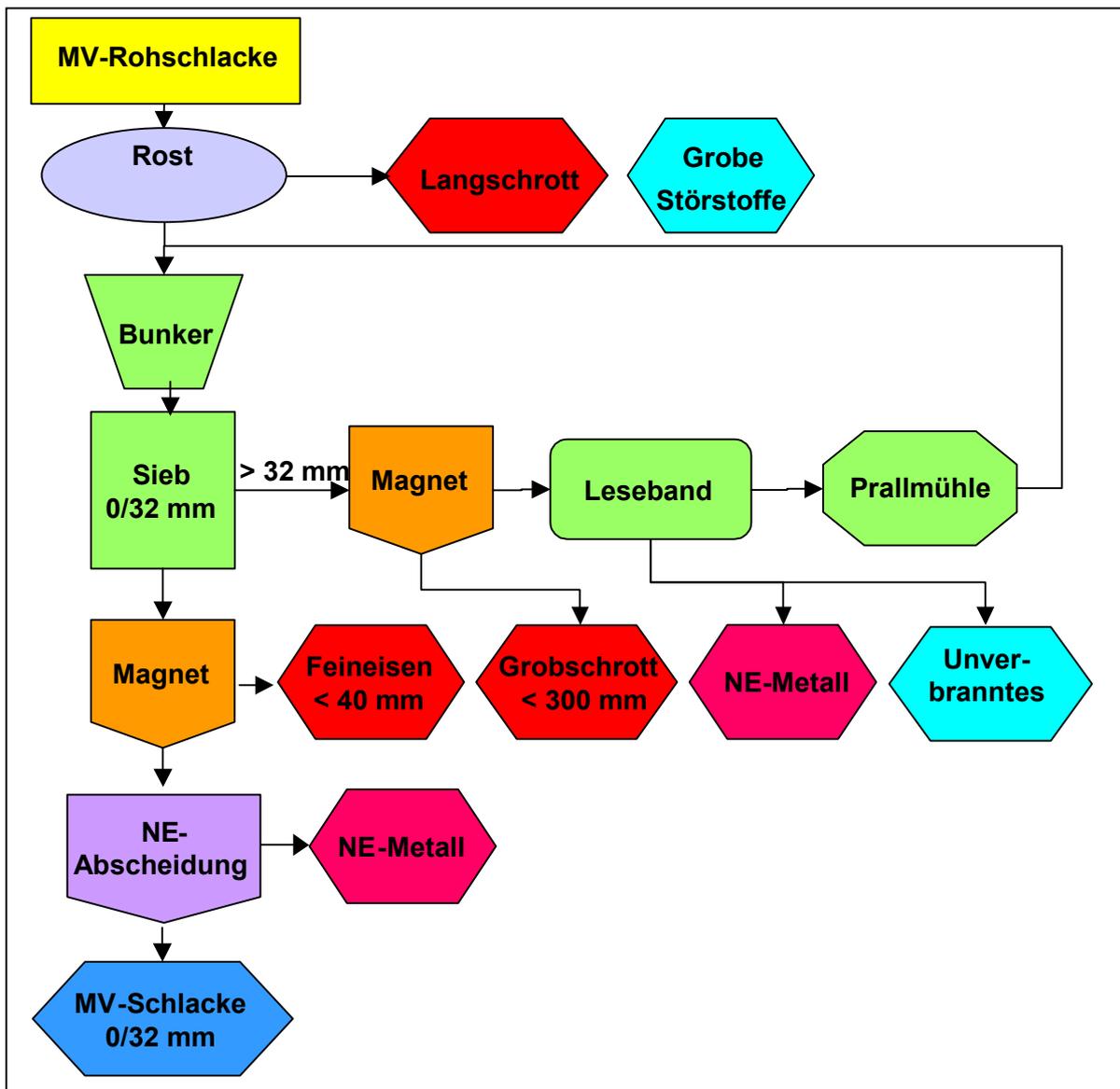


Abb. 40 Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA B

Die aufbereitete MV-Schlacke unterliegt der Güteüberwachung gemäß RG Min-StB 93 [30] und wird im Straßenbau und Deponiebau verwertet.

5.2.2.1 MV-Schlacke B-1 (Großversuch 1)

5.2.2.1.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-1

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke geht aus Tab. 19, die der Grobfraktion aus Tab. 20 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 41).

Im Feinanteil der MV-Schlacke stellen das Carbonat Calcit (CaCO_3) und teilweise das Oxid Quarz (SiO_2) die mineralogischen Hauptphasen dar, während die neu gebildeten Glasphasen teilweise als Nebenphasen auftreten. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie die Sulfate Anhydrit (CaSO_4), Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) und Gips $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ auf.

Tab. 19 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke B-1

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Akzessorie	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase/Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Hauptphase/Nebenphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	Gips	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase/Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

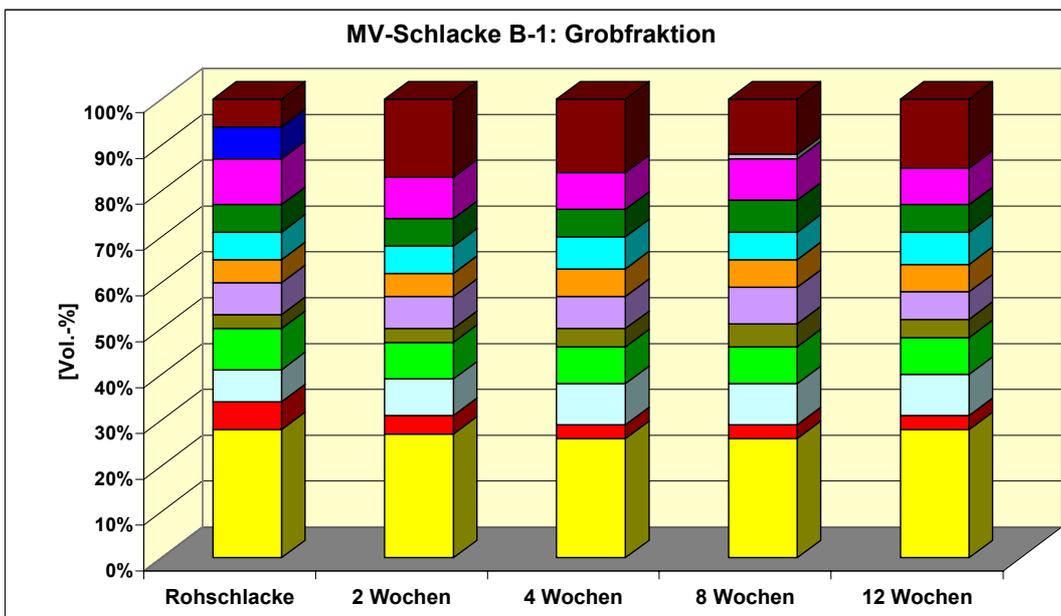
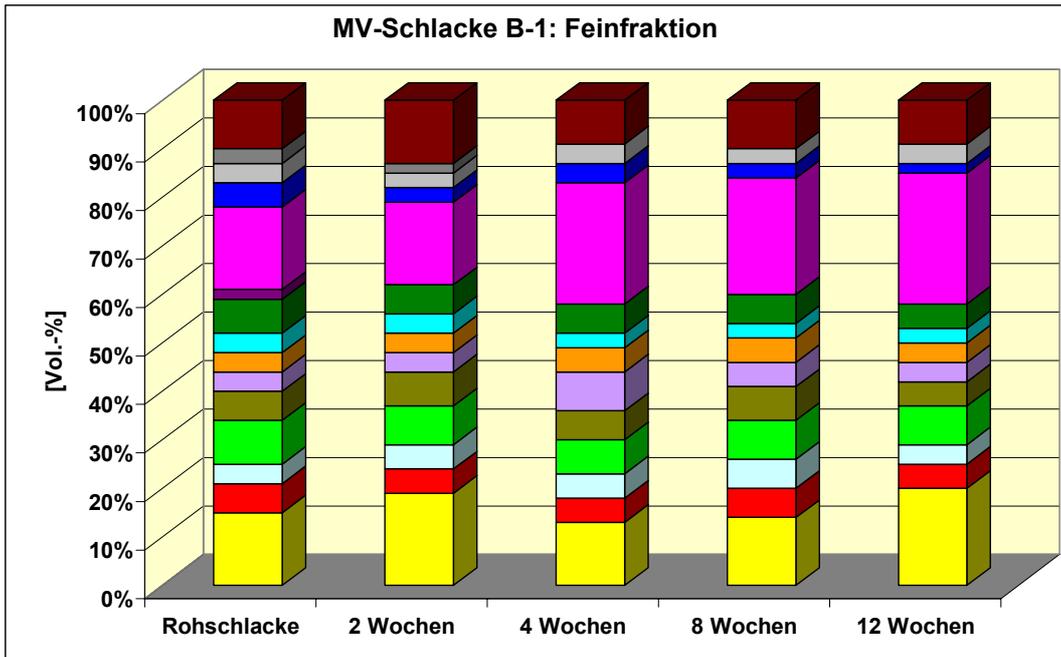
In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die alleinige Hauptphase dar, während die neu gebildete Glasphase als Nebenphase auftritt. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$), Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), das Carbonat Calcit (CaCO_3), das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) und das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) auf.

Tab. 20 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke B-1

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Akzessorie	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Akzessorie	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke B-1 handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO_2), sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) hingegen wird sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker, das Carbonat Calcit (CaCO_3) im Laufe der Ablagerung durch die zusätzliche Reaktion von Portlandit mit dem Luft- CO_2 gebildet.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO ₂	■ Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)
■ Hämatit	α-Fe ₂ O ₃	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe ₃ O ₄	■ Portlandit	Ca(OH) ₂
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	■ Calcit	CaCO ₃
■ Äkermanit	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi ₃ O ₈	■ Anhydrit	CaSO ₄
■ Plagioklas	(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	■ Gips	CaSO ₄ ·2H ₂ O
■ Diopsid	CaMgSi ₂ O ₆	■ Ettringit	Ca ₆ Al ₂ [(OH) ₂ SO ₄] ₃ ·24H ₂ O
■ <u>neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 41 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacken B-1

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke B-1 folgendes festgestellt (Abb. 42):

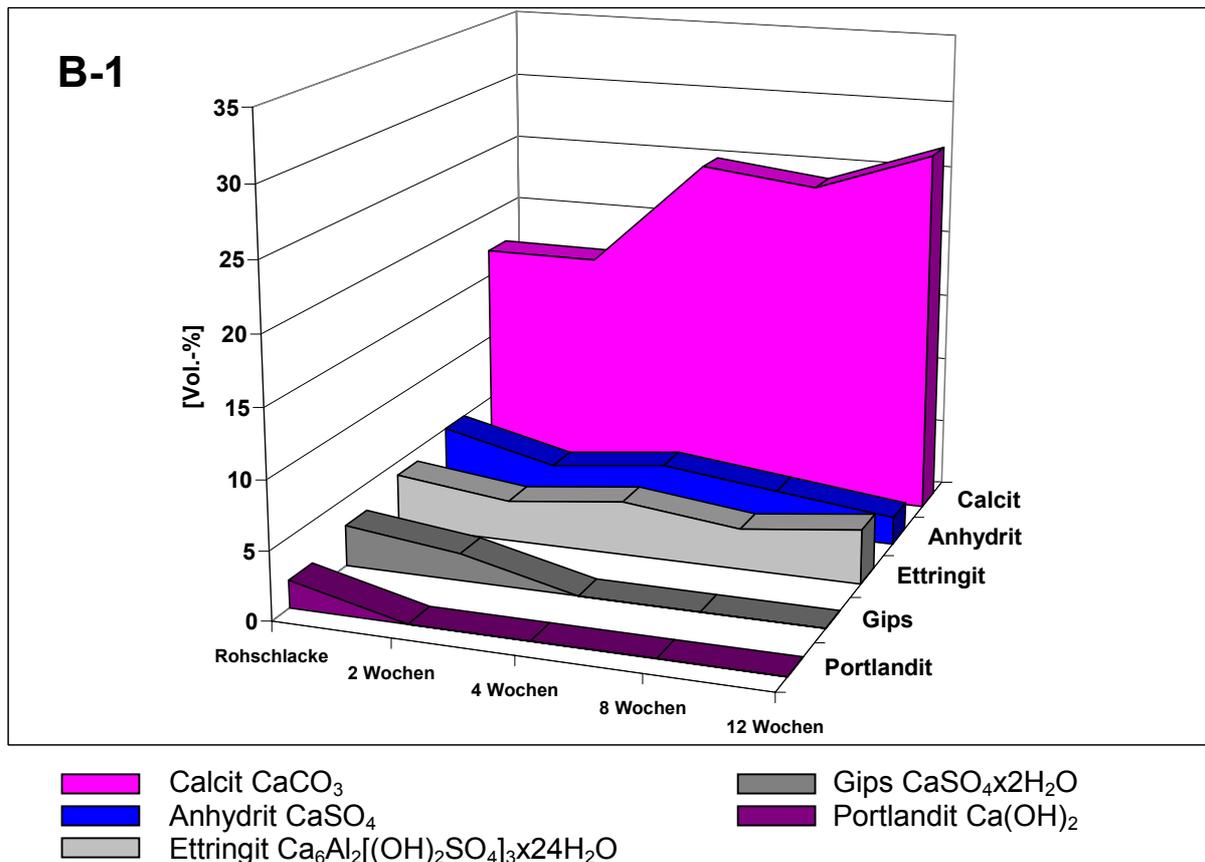


Abb. 42 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke B-1

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Schlacke B-1 eine deutliche Abnahme des Portlandits (Ca(OH)₂), wobei in der MV-Schlacke nach einer Ablagerungszeit von 2 Wochen kein Portlandit mehr detektiert werden kann. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO₃) gesteuert wird, zeigt ausgeprägte Alterationsreaktionen im Verlaufe der dreimonatigen Ablagerung, da eine sehr deutliche Zunahme des Calcits festgestellt werden kann. Die MV-Schlacke B-1 weist somit ein ausgeprägtes Carbonatisierungsvermögen auf.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO₄), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, ist in der untersuchten MV-Schlacke B-1 nur in sehr geringen Mengen vorhanden und nimmt während der Ablagerungszeit von 12 Wochen weiter ab. Die MV-Schlacke kann zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung bezüglich der Sulfatreaktionen als reaktionsträge und damit als ausreichend raumbeständig eingestuft werden, da weitere Sulfatreaktionen nicht mehr erwartet werden.
- Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) tritt bereits in der MV-Rohschlacke in geringen Mengen auf, und verbleibt während der dreimonatigen Alterung annähernd auf dem selben Niveau.

- Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) zeigt während der Alteration eine deutliche Abnahme und kann im Mineralbestand der 4 Wochen abgelagerten MV-Schlacke nicht mehr nachgewiesen werden.

Da bei der MV-Schlacke B-1 nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen sowohl ein ausreichendes Carbonatisierungsverhalten als auch abgeschlossene Sulfatreaktionen festgestellt werden, kann sie nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen als gering reaktiv und somit, aus mineralogischer Sicht, als ausreichend raumbeständig eingestuft werden.

5.2.2.1.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-1

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke B-1 zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 43-a und 43-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit nur geringfügig von pH 11,4 auf 11,0 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit liegen während der Ablagerungszeit auf einem vergleichbaren Niveau und nehmen lediglich in geringem Maße von ca. 140 mS/m auf 120 mS/m ab. Sie liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Der Zinkwert ist bereits in der MV-Rohschlacke sehr gering (ca. 20 mg/l) und fällt nach zwei Wochen unter die gerätespezifische Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zinkwerte unterschreiten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l sehr deutlich.
- Die Bleiwerte der MV-Schlacke liegen bereits in der MV-Rohschlacke unterhalb der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden somit von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke deutlich unterschritten.
- Die Kupferwerte fallen nach einer Ablagerungszeit von 8 Wochen von ca. 600 µg/l auf ca. 270 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden somit von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.
- Die Chromgehalte sind sehr gering und liegen für die MV-Schlacke B-1 nahe der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 200 µg/l bzw. 50 µg/l werden eingehalten.
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Nickel und teilweise Quecksilber liegen nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid variieren zwischen ca. 140 mg/l und 100 mg/l und zeigen keine deutliche Reduktion während der Ablagerung. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l werden unterschritten.

- Die Sulfatwerte variieren zwischen ca. 150 mg/l und 260 mg/l ohne eine eindeutige Tendenz aufzuweisen. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l werden eingehalten.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse [12] zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten werden und somit aus Sicht der Umweltverträglichkeit eine Verwertung entsprechend den Vorgaben der Regelwerke erfolgen kann.

- **Chemische Untersuchungen im Feststoff**

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 44 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke B-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke B-1 eingehalten.

- **Langzeitstabilität**

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 45 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnentests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnentests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil der betrachteten Schwermetalle Zink und Kupfer viel höher ist als derjenige von Blei, Nickel und Chrom, die die geringsten Verfügbarkeiten aufweisen.

Die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnentests liegen in einer vergleichbaren Größenordnung, nur Kupfer zeigt im Vergleich erhöhte Werte. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit an Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid, allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnentests, dass die eluierbaren Mengen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungs Vorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

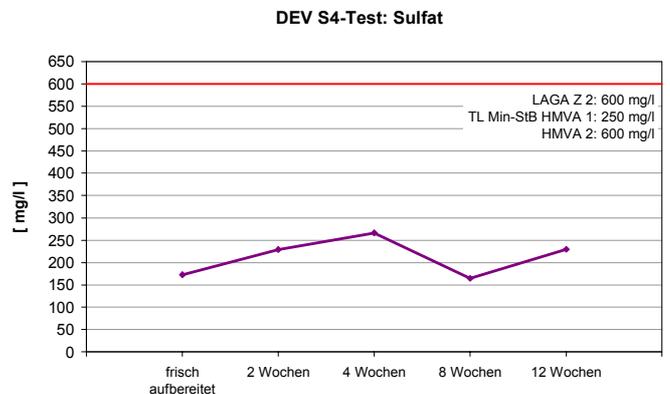
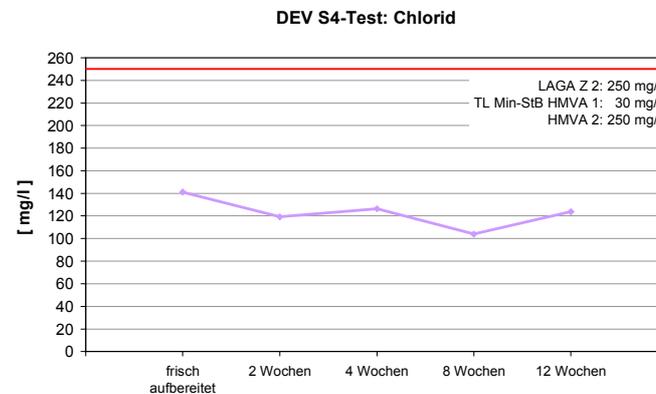
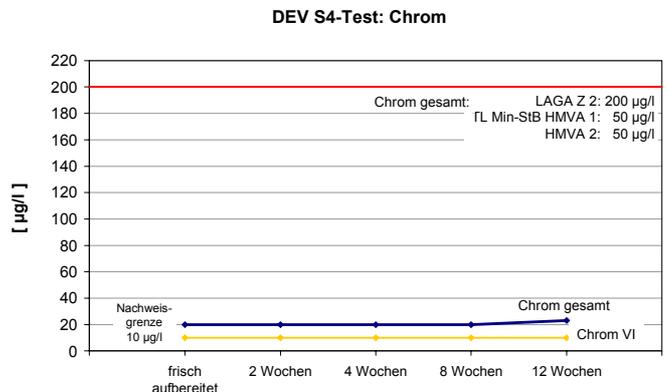
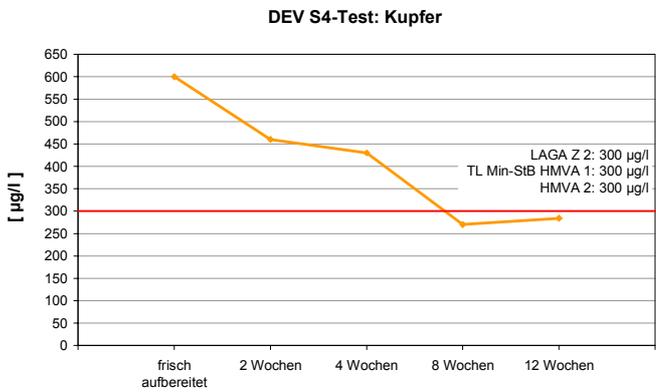
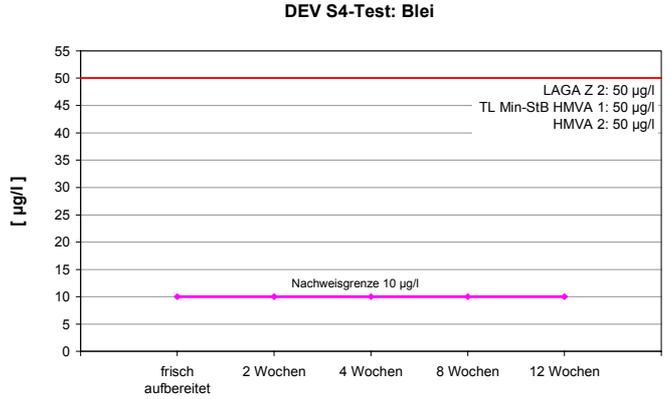
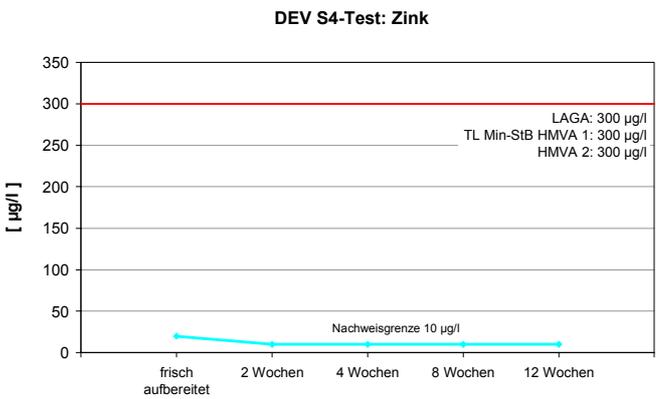
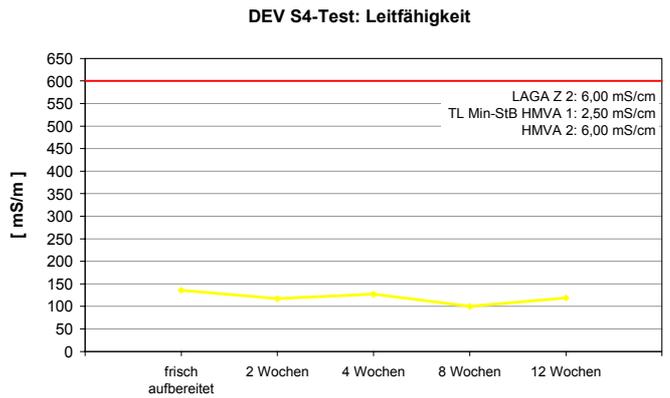
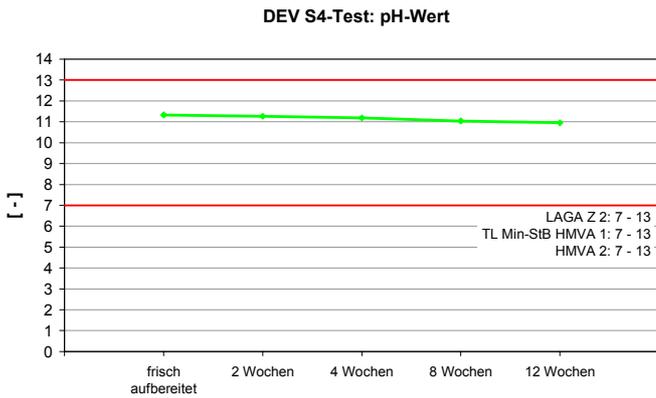
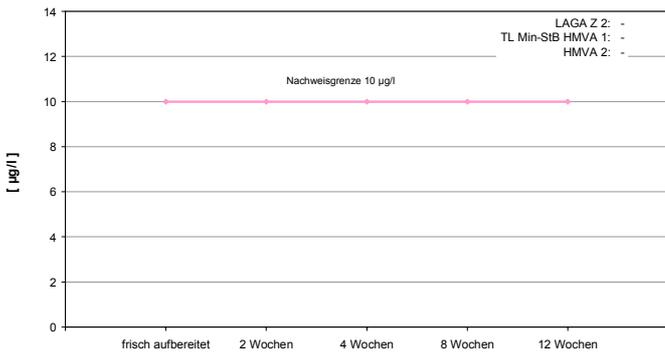
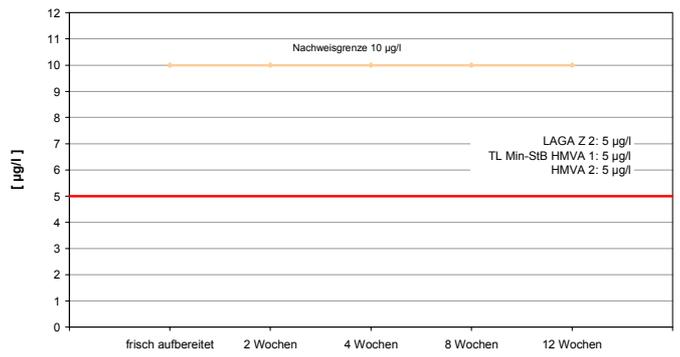


Abb. 43-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke B-1

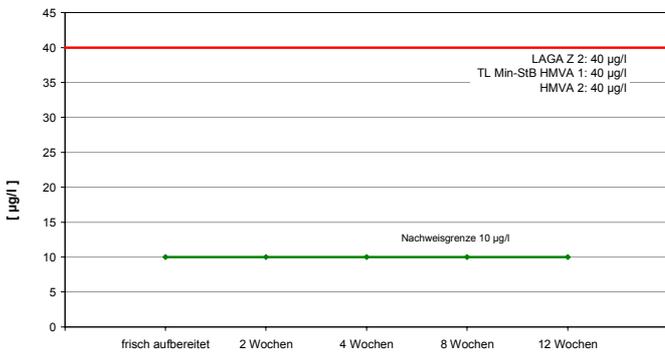
DEV S4-Test: Arsen



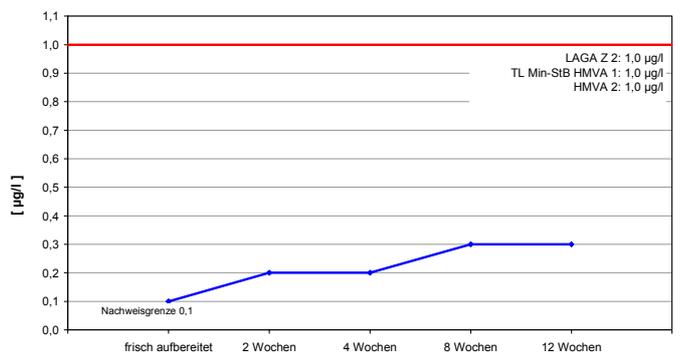
DEV S4-Test: Cadmium



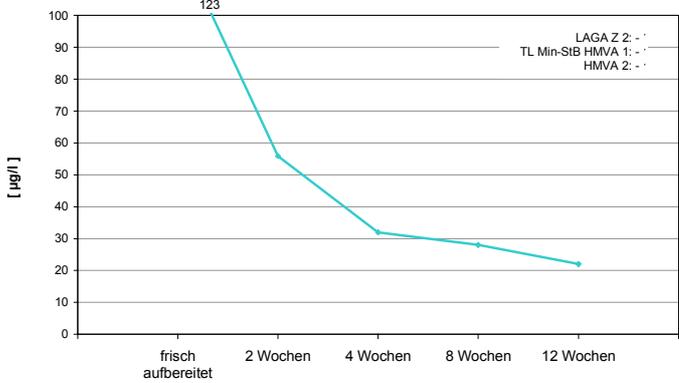
DEV S4-Test: Nickel



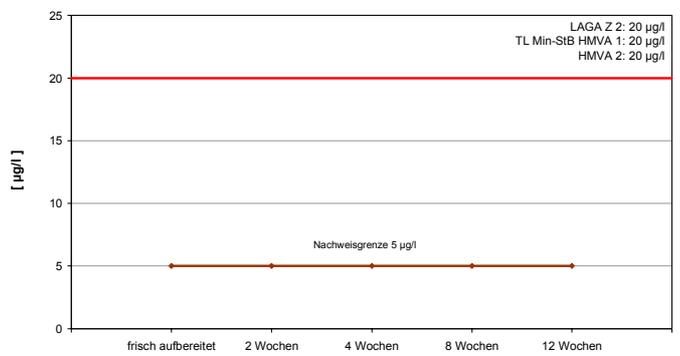
DEV S4-Test: Quecksilber



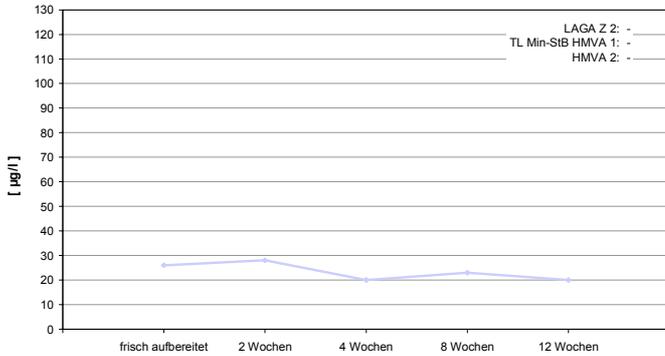
DEV S4-Test: Phenolindex



DEV S4-Test: Cyanid



DEV S4-Test: AOX



DEV S4-Test: DOC

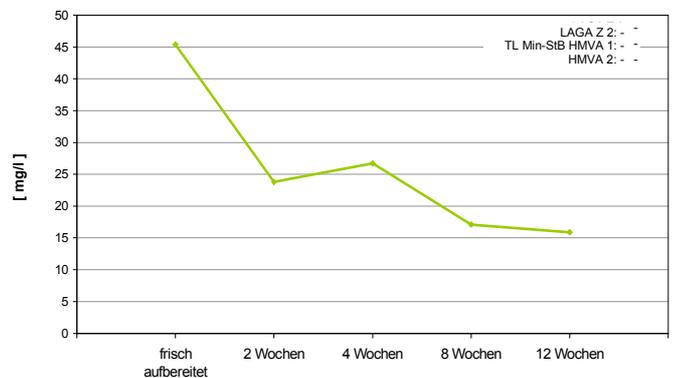


Abb. 43-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke B-1

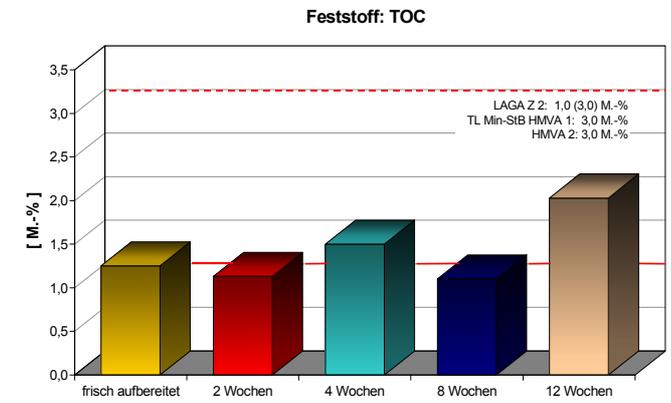
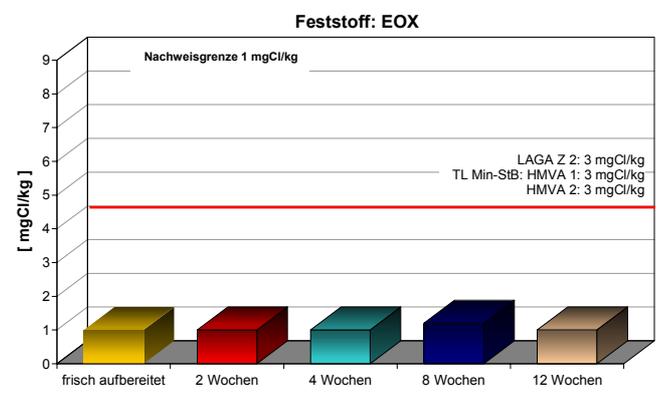
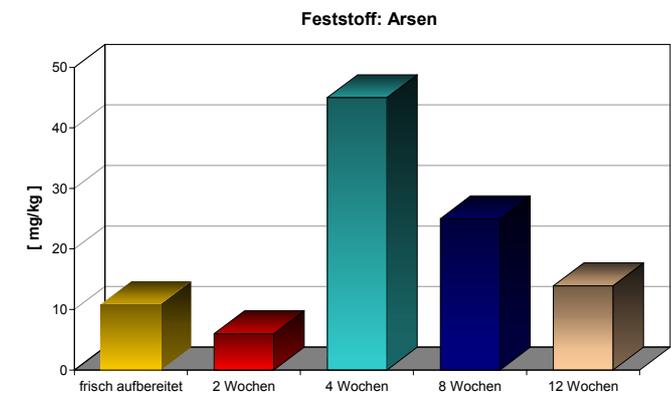
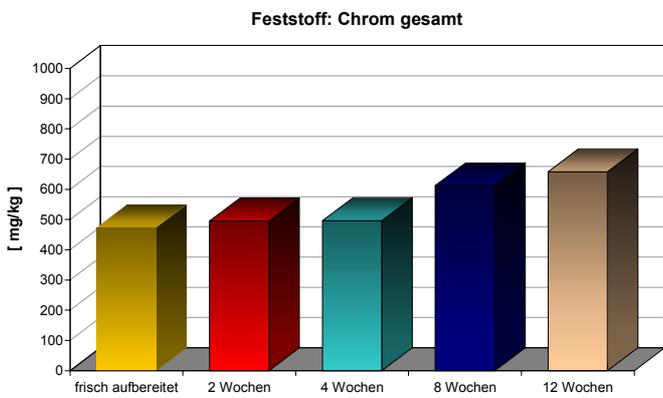
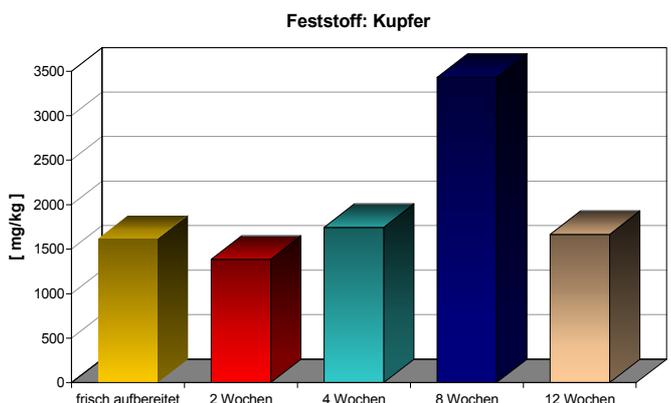
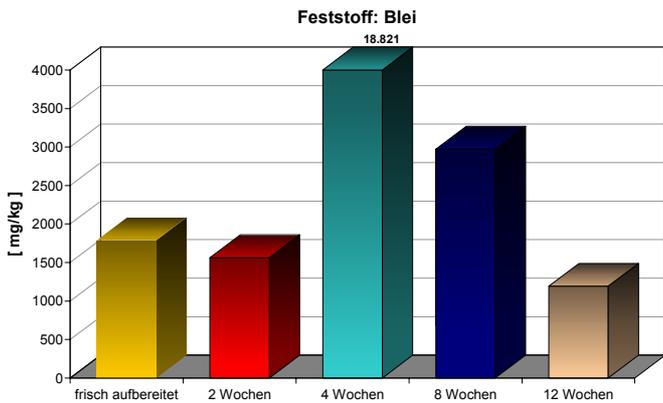
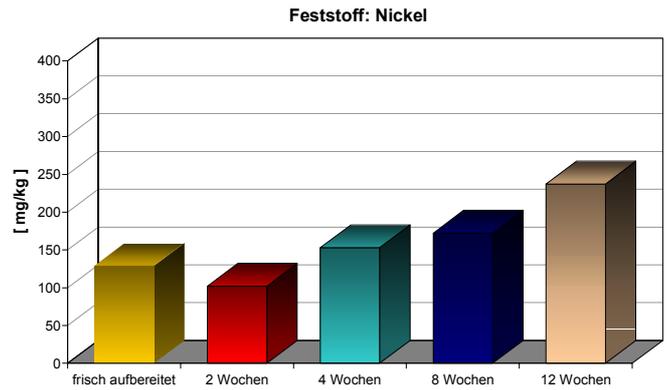
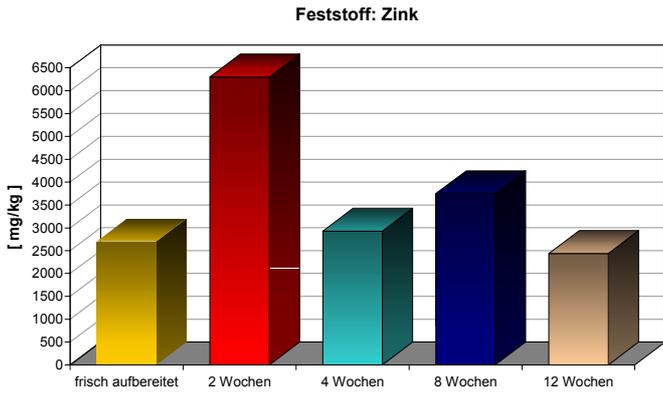


Abb. 44 Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen der MV-Schlacke B-1

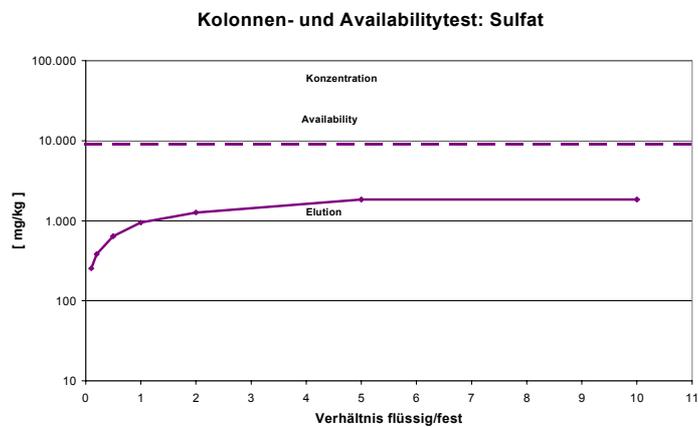
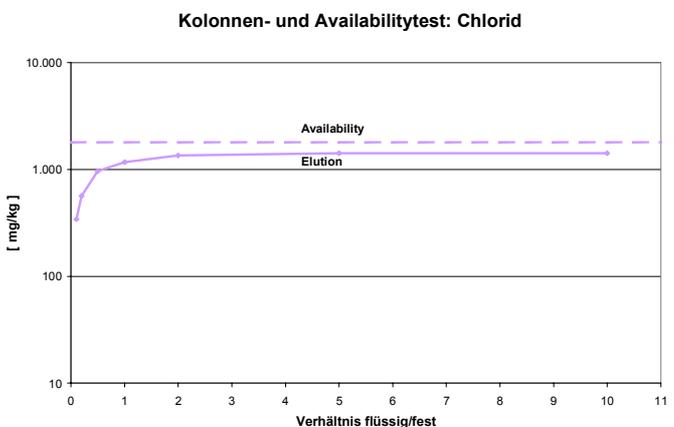
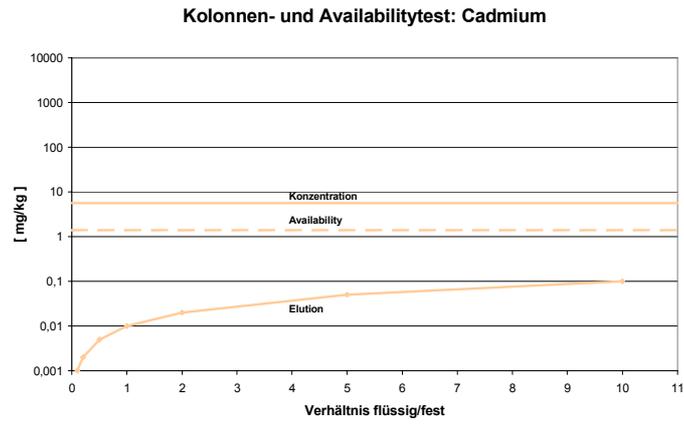
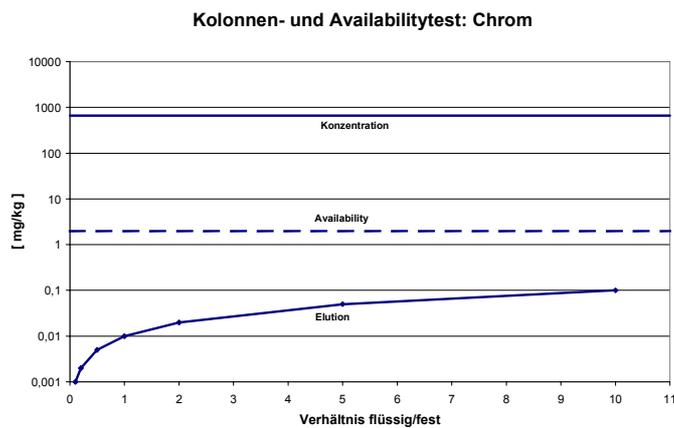
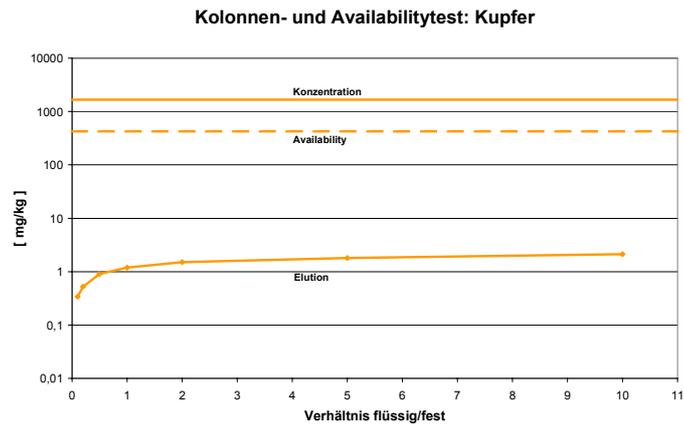
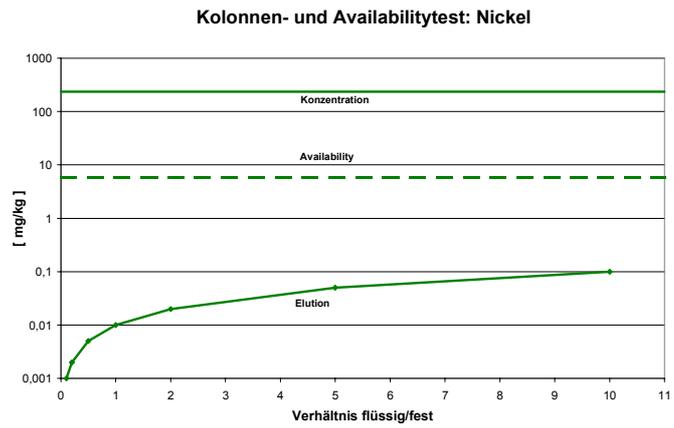
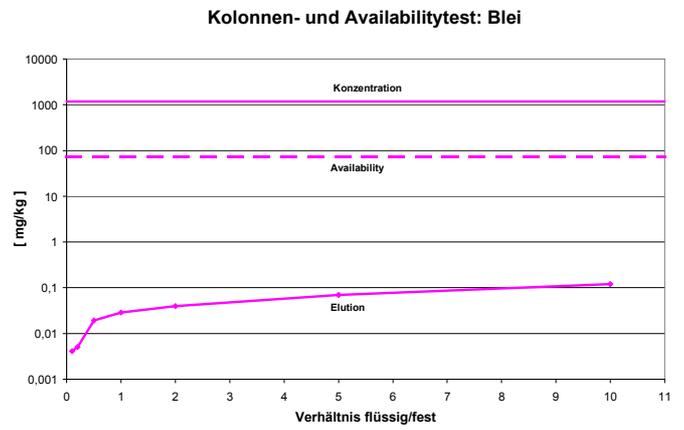
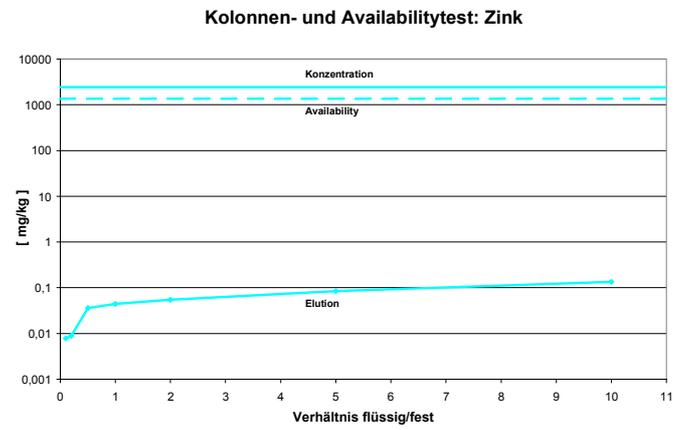


Abb. 45 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke B-1

5.2.2.1.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-1

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] beruht. Darüber hinaus erfolgen zusätzliche Untersuchungen, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken im Bereich des Deponiebaues und Erdbaus abschätzen zu können. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften einer drei Monate abgelagerten MV-Schlacke für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke B-1 gehen aus Abb. 46 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Nach der Aufbereitung liegen die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacke B-1 in einem sehr engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke B-1 haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 5 mm die untersuchte MV-Schlacke oberhalb der Grenzsieblinien liegt, d.h. einen zu geringen Anteil an Grobkorn aufweist.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke B-1 geht aus Abb. 47 hervor. Ein Vergleich der stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 35 bis 49 M.-%) der makroskopischen stofflichen Bestandteile.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ % M.-% werden von der MV-Schlacke B-1 eingehalten, ebenfalls die Anforderungen für den Metallgehalt von maximal 5,0 M.-% (Ist-Werte: 1,0 bis 3,9 M.-%).

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke liegen zwischen ca. 1,61 und 1,63 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 16,5 und 17,5 M.-% (Abb. 44). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke B-1, wie es sich auch in der Baupraxis zeigt.

• Wassergehalte

Die festgestellten Wassergehalte schwanken nach der Aufbereitung zwischen 15,1 und 16,8 M.-% (Tab. 21). Eine Reduktion der Wassergehalte während der Ablagerung erfolgt bei der MV-Schlacke B-1 nicht, wobei jedoch beachtet werden muss, dass die Lagerung der

aufbereiteten MV-Schlacke im Freiland erfolgte, und somit der natürliche Niederschlag direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte einwirken konnte.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,619 g/cm³ und 2,636 g/cm³ und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 21). Die große Schwankungsbreite geht auf die stark differierende stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke (z.B. Anteile an Metallen) zurück.

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde an den Gesamtkörnungen durchgeführt. Die Anforderung lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke B-1 (Ist: 7,5 bis 8,6 M.-%) eingehalten (Tab. 21).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung sind sehr homogen und liegen zwischen 38,8 und 39,6 M.-% (Tab. 21). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke B-1 erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Die Anteile an schlecht geformten Körnern liegen zwischen 18,4 und 24,4 M.-%, womit die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden (Tab. 21).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 1,4 und 4,3 M.-% Anforderungen an den Parameter Glühverlust gemäß TL Min-StB 2000 bestehen nicht (Tab. 21).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke B-1 eingehalten werden. Ein Einsatz ist somit aus bautechnischer Sicht möglich.

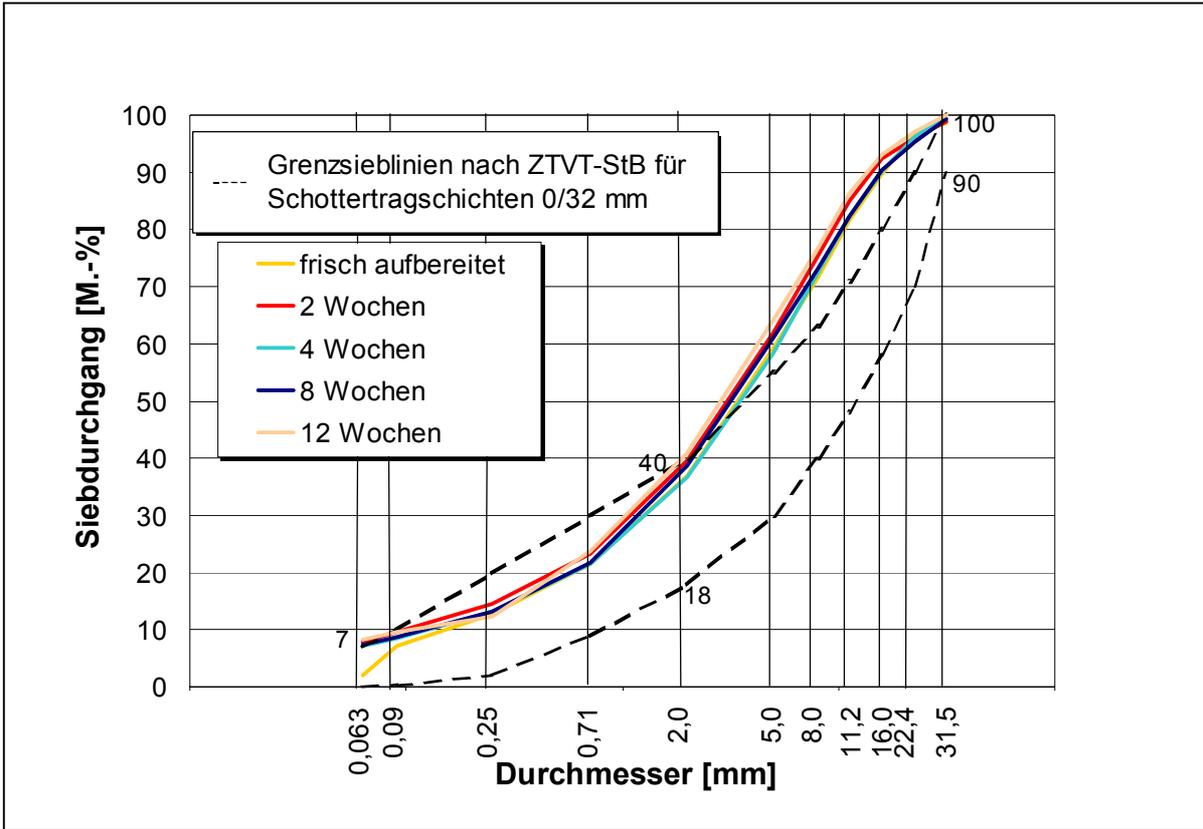


Abb. 46 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke B-1

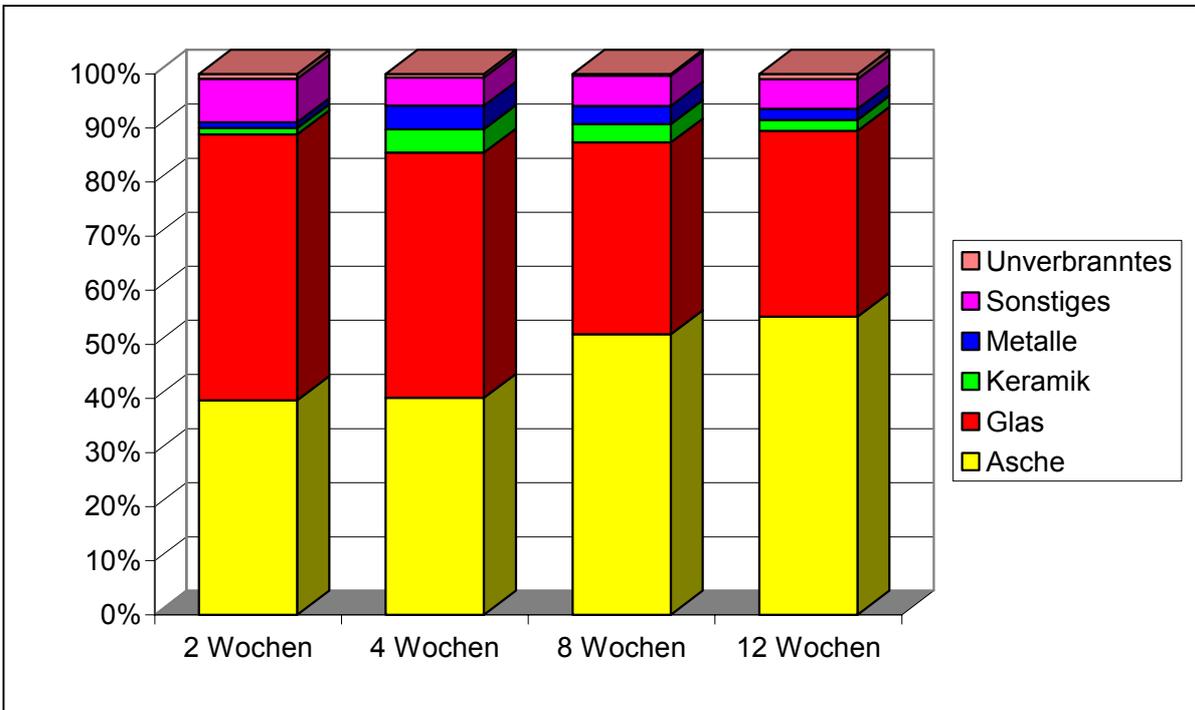


Abb. 47 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke B-1

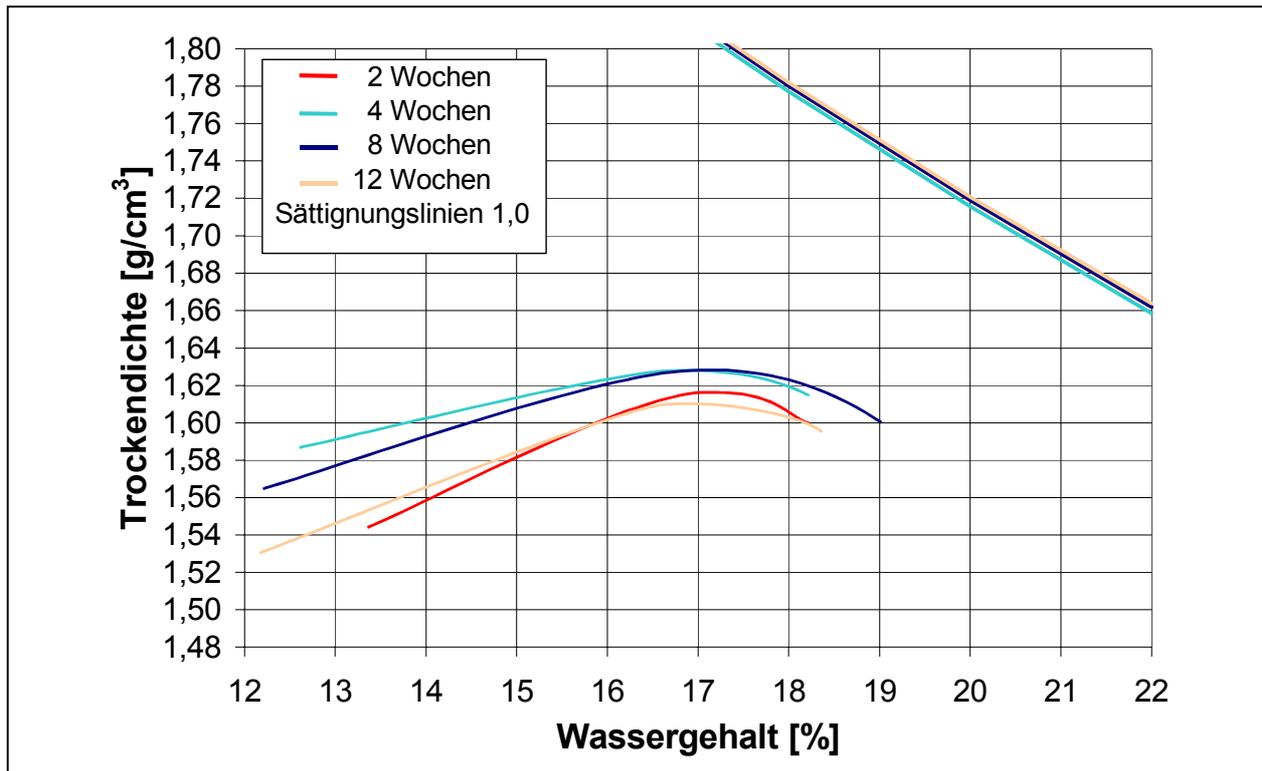


Abb. 48 Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke B-1

Tab. 21 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke B-1

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	16,1	16,8	16,6	15,1	
Rohdichte	g/cm ³	2,620	2,634	2,619	2,636	
Schüttdichte	g/cm ³	1,115	1,195	1,157	1,149	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	7,8	7,5	7,6	8,6	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	39,5	39,6	38,8	39,1	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	24,4	20,5	19,7	18,4	50
Glühverlust	M.-%	4,3	3,4	1,7	1,4	

5.2.2.2 MV-Schlacke B-2 (Großversuch 2)

5.2.2.2.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-2

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke geht aus Tab. 22, die der Grobfraktion aus Tab. 23 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 49).

Im Feinanteil der MV-Schlacke stellen das Carbonat Calcit (CaCO_3) und teilweise das Oxid Quarz (SiO_2) die mineralogischen Hauptphasen dar. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Åkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und die Sulfate Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$), Anhydrit (CaSO_4) und Gips ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) und sowie eine neu gebildete Glasphase auf.

Tab. 22 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke B-2

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7)$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Åkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase/Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Hauptphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	Gips	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

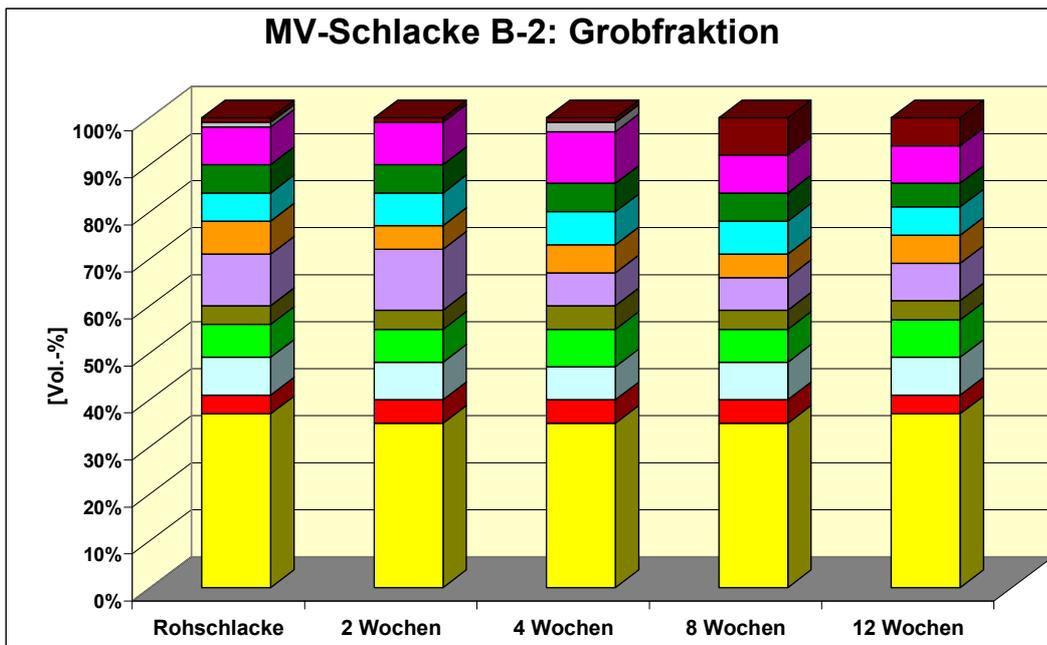
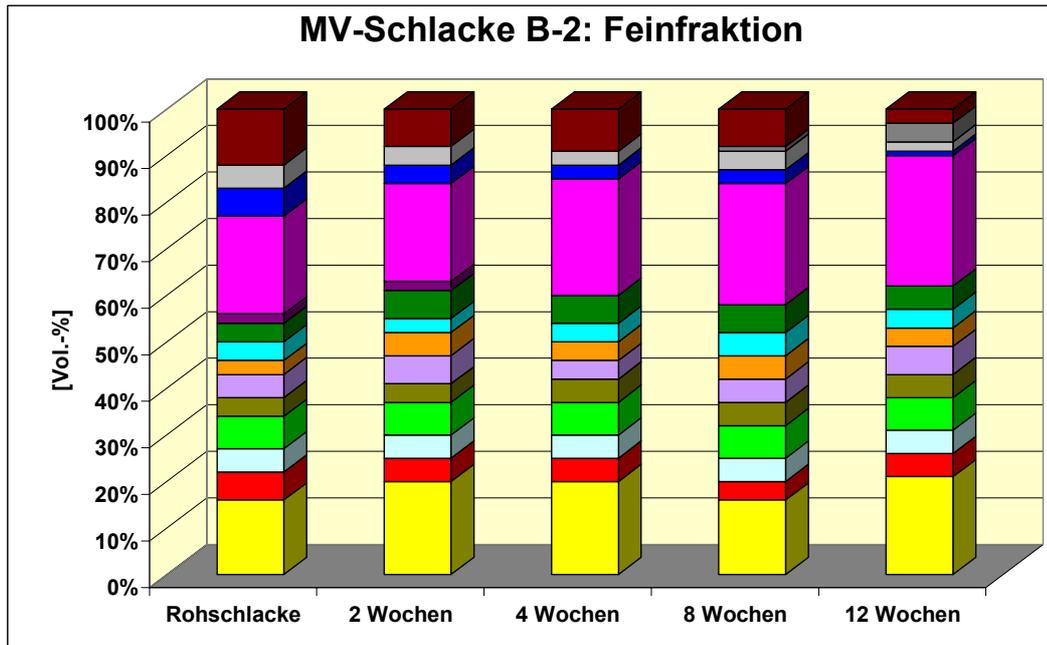
In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO₂) die alleinige Hauptphase dar, während das Silikat Kalifeldspat (KAlSi₃O₈) und in einer Probe Calcit (CaCO₃) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Plagioklas (Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si₂O₈], Gehlenit (Ca₂Al₂SiO₇), Äkermanit (Ca₂MgSi₂O₇) und Diopsid (CaMgSi₂O₆), das Carbonat Calcit (CaCO₃), die Oxide Magnetit (Fe₃O₄) und Hämatit (α-Fe₂O₃), das Sulfat Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O), das Phosphat Apatit (Ca₅(PO₄)₃(OH)) sowie neu gebildete Glasphasen auf.

Tab. 23 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke B-2

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi ₃ O ₈	Kalifeldspat	Nebenphase/Akzessorie	Durchläufer
(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	Plagioklas	Akzessorie	Durchläufer
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	Äkermanit	Spuren	Neubildung
CaMgSi ₂ O ₆	Diopsid	Akzessorie	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO ₂	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe ₃ O ₄	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
α-Fe ₂ O ₃	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO ₃	Calcit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
Ca ₆ Al ₂ [(OH) ₂ SO ₄] ₃ x24H ₂ O	Ettringit	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	Apatit	Akzessorie	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Akzessorie/Spuren	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke B-2 handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO₂), sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi₃O₈) und Plagioklas (Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si₂O₈] dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit Ca(OH)₂ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) hingegen wird sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker und das Carbonat Calcit (CaCO₃) im Laufe der Ablagerung durch die zusätzliche Reaktion von Portlandit mit dem Luft-CO₂ gebildet.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe_3O_4	■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Äkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
■ <u>Neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 49 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke B-2

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke B-2 folgendes festgestellt (Abb. 50):

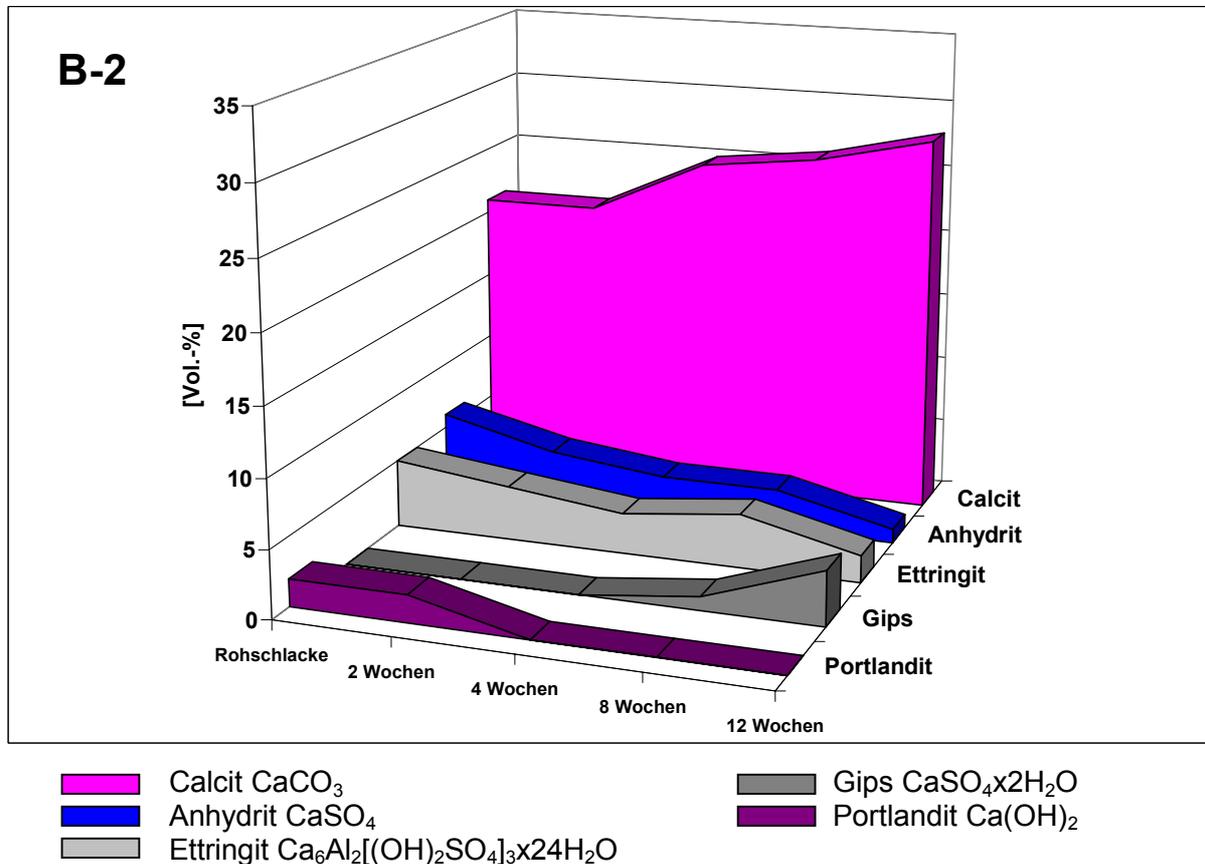


Abb. 50 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke B-2

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Schlacke B-2 eine deutliche Abnahme des Portlandits (Ca(OH)_2), wobei in der MV-Schlacke B-2 nach einer Ablagerungszeit von 4 Wochen kein Portlandit mehr detektiert werden kann. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO_3) gesteuert wird, lässt im Verlaufe der Ablagerung ausgeprägte Alterationsreaktionen erkennen, die sich in einer sehr deutlichen Zunahme des Calcits im Mineralbestand äußern. Die MV-Schlacke B-2 weist somit ein ausgeprägtes Carbonatisierungsvermögen auf.
- Im Mineralbestand der MV-Rohschlacke ist das Sulfat Anhydrit (CaSO_4), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, nur in geringen Mengen vorhanden und nimmt in der MV-Schlacke B-2 während einer Ablagerungszeit von 12 Wochen weiter ab. Die MV-Schlacke kann zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung bezüglich der Sulfatreaktionen als reaktionsträge und damit als ausreichend raumbeständig eingestuft werden, da weitere Sulfatreaktionen nicht mehr erwartet werden.
- Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) tritt bereits in der MV-Rohschlacke in deutlichen Mengen auf und nimmt, entsprechend dem Anstieg von Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), in der 12 Wochen abgelagerten MV-Schlacke wieder ab.

- Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) entsteht nach einer Ablagerungszeit von 8 Wochen und steigt in der 12 Wochen abgelagerten MV-Schlacke im Mineralbestand deutlich an.

Da bei der MV-Schlacke B-2 nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen sowohl ein ausreichendes Carbonatisierungsverhalten als auch abgeschlossene Sulfatreaktionen festgestellt werden, kann sie nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen als gering reaktiv und somit, aus mineralogischer Sicht, als ausreichend raumbeständig eingestuft werden.

5.2.2.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-2

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke B-2 zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 51-a und 51-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit von 12 Wochen deutlich von pH 11,0 auf 9,3 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7-13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit steigen während der Ablagerungszeit kontinuierlich von ca. 120 mS/m auf 150 mS/m an. Sie liegen jedoch innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Die Zinkwerte sind bereits in der MV-Rohschlacke sehr gering und liegen bei der abgelagerten MV-Schlacke B-2 unter der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zinkwerte unterschreiten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l deutlich.
- Der Bleiwert der MV-Schlacke B-2 liegt bereits in der MV-Rohschlacke an der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden somit von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke deutlich eingehalten.
- Die Kupferwerte nehmen während der Alteration sehr stark ab, und fallen von ca. 900 µg/l (MV-Rohschlacke/2 Wochen abgelagert) auf ca. 360 µg/l nach einer Ablagerungszeit von 8 Wochen. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden auch von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke nicht eingehalten.
- Die Chromgehalte liegen in einem Bereich von 20 µg/l und 40 µg/l ohne eine eindeutige Tendenz aufzuweisen. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 200 µg/l bzw. 50 µg/l werden eingehalten.
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Nickel und Quecksilber liegen nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid variieren zwischen ca. 120 mg/l und 200 mg/l und zeigen keine Tendenz während der Ablagerung. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l werden unterschritten.

- Die Sulfatwerte steigen während der Ablagerung von ca. 300 mg/l auf 550 mg/l an, halten jedoch die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l ein.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse [12] zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke, mit Ausnahme der Überschreitung des Parameters Kupfer, eingehalten werden.

• Chemische Untersuchungen im Feststoff

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 52 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke B-2 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke B-2 eingehalten.

• Langzeitstabilität

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 53 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnen-tests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

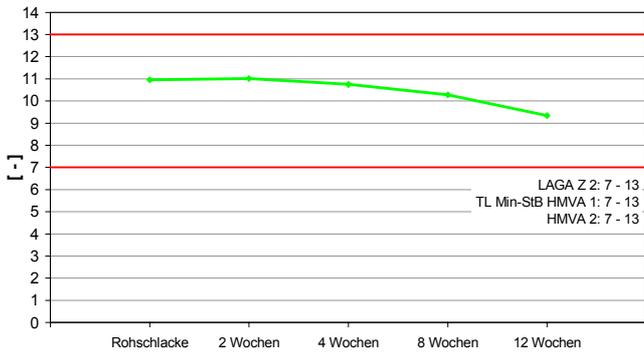
Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnen-tests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil der betrachteten Schwermetalle Zink und Kupfer deutlich höher ist als derjenige von Blei, während Nickel und Chrom die geringsten Verfügbarkeiten aufweisen.

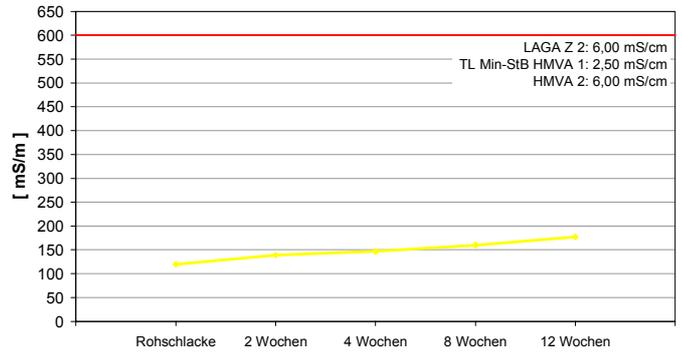
Die Eluatgehalte für Blei und Kupfer zeigen unter den Bedingungen des Kolonnen-tests die höchsten Werte, merklich niedriger liegen jedoch die Gehalte an Zink, Nickel und Chrom. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit von Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid. Die Ergebnisse des Kolonnen-tests zeigen ebenfalls höhere Werte für Sulfat. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungsvorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

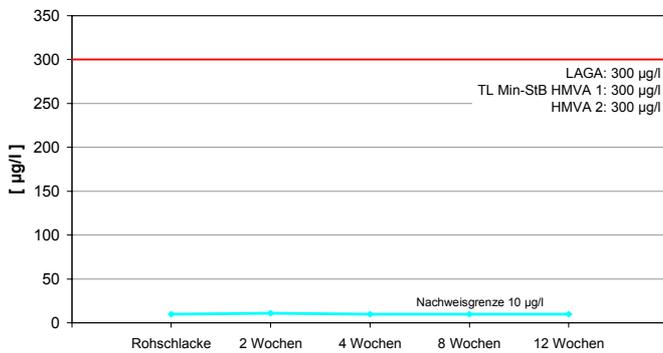
DEV S4-Test: pH-Wert



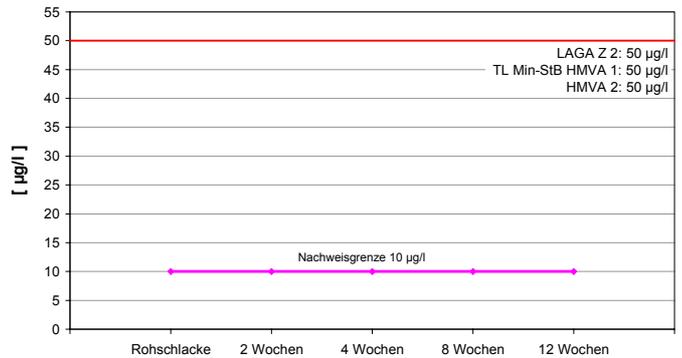
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



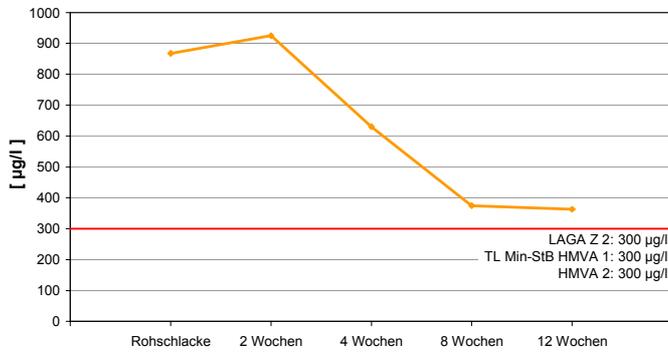
DEV S4-Test: Zink



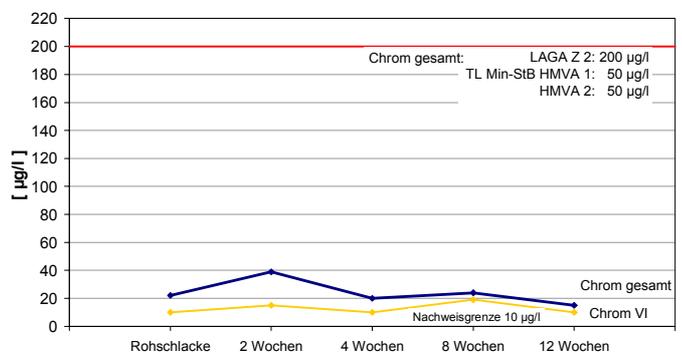
DEV S4-Test: Blei



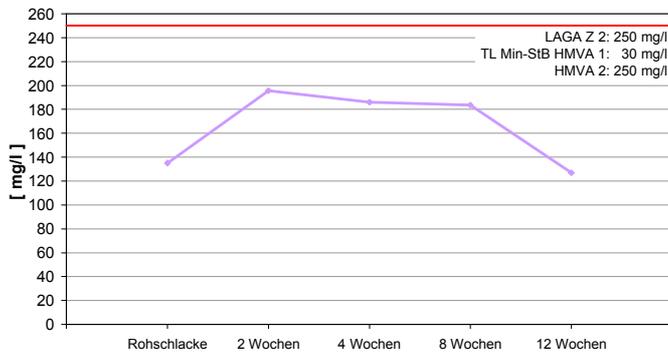
DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

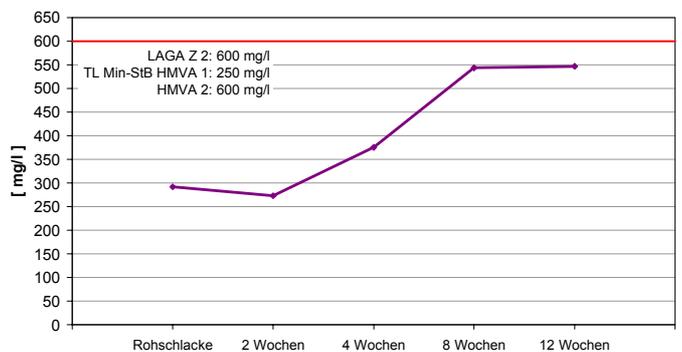


Abb. 51-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke B-2

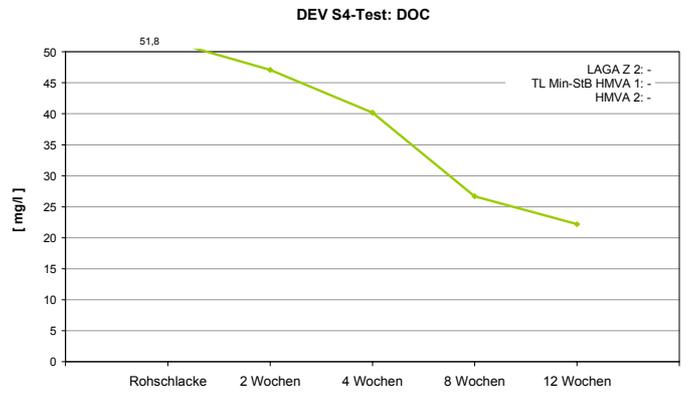
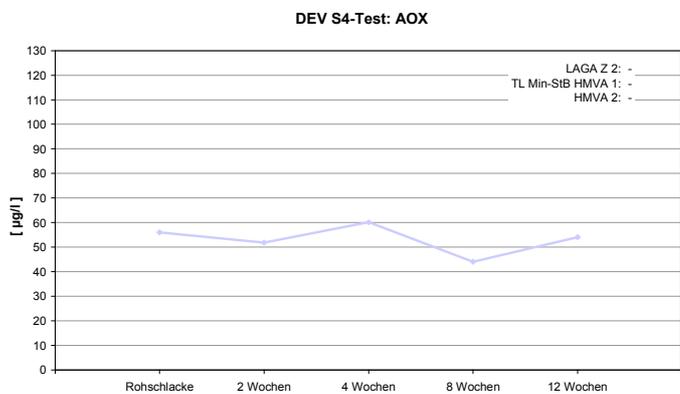
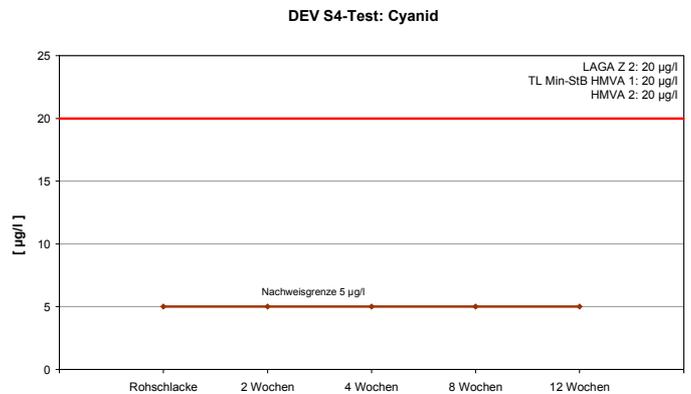
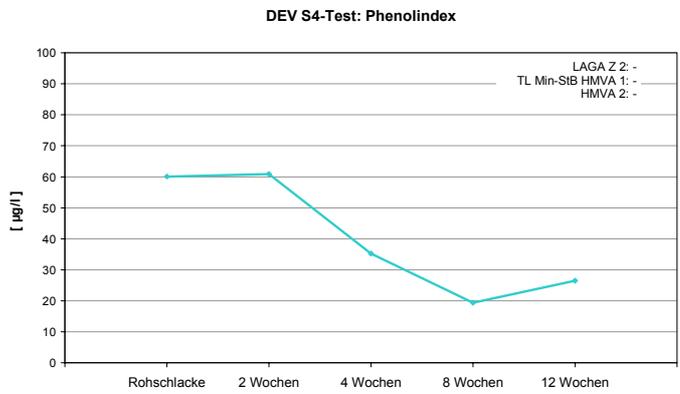
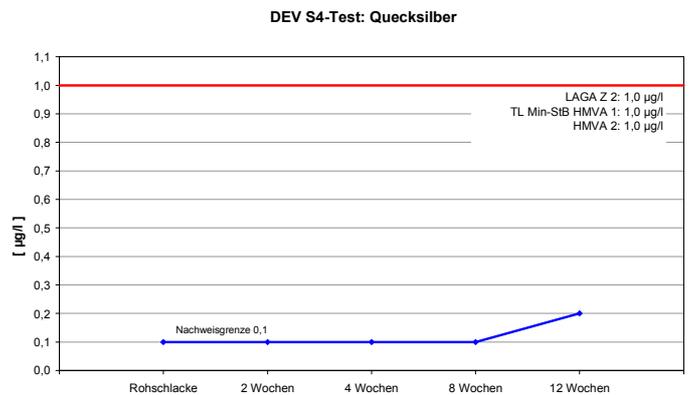
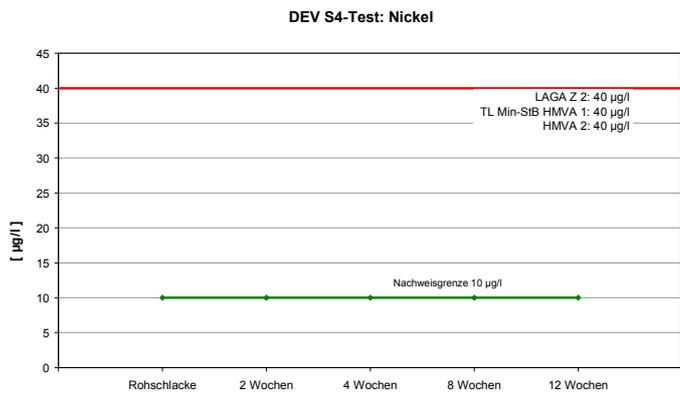
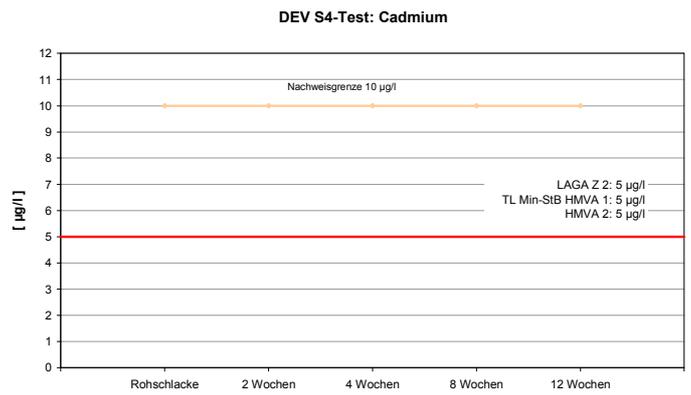
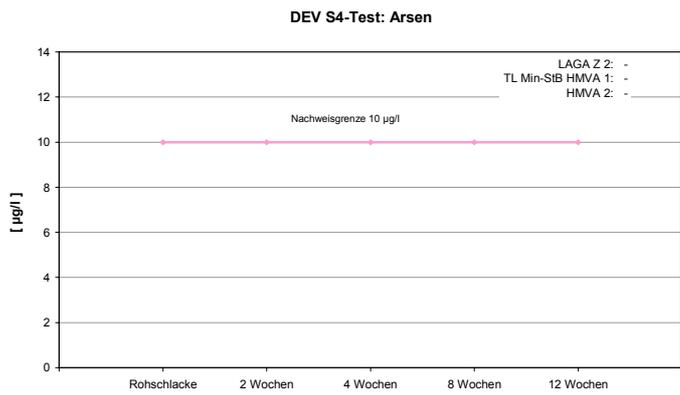


Abb. 51-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke B-2

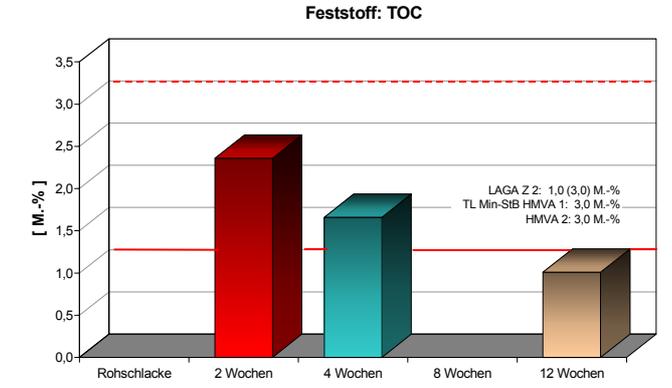
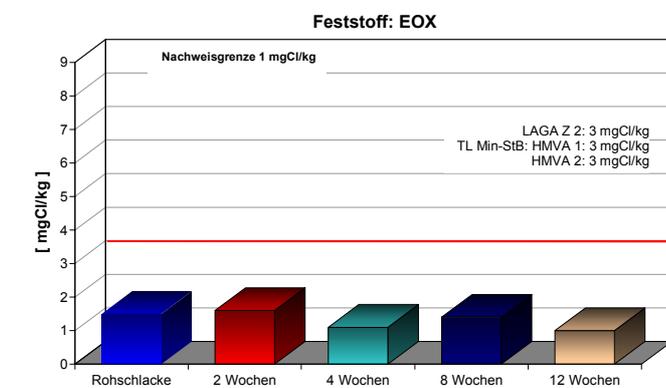
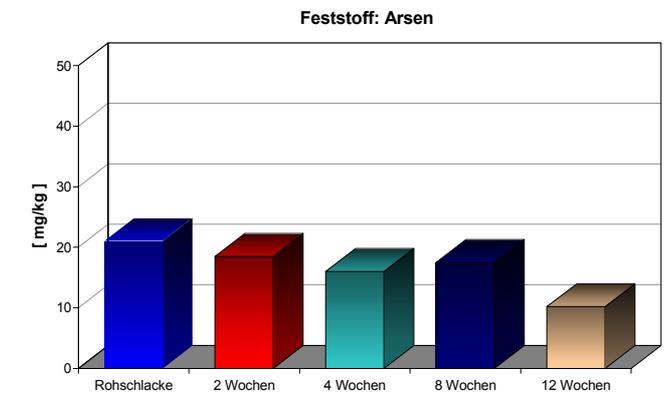
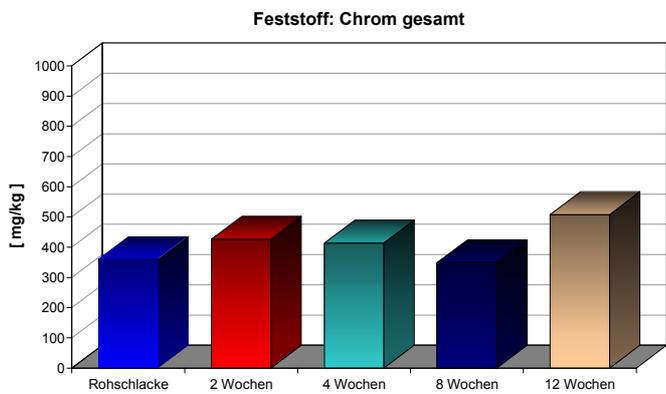
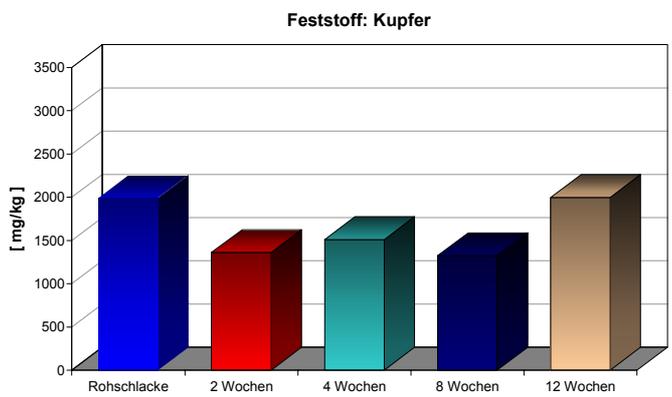
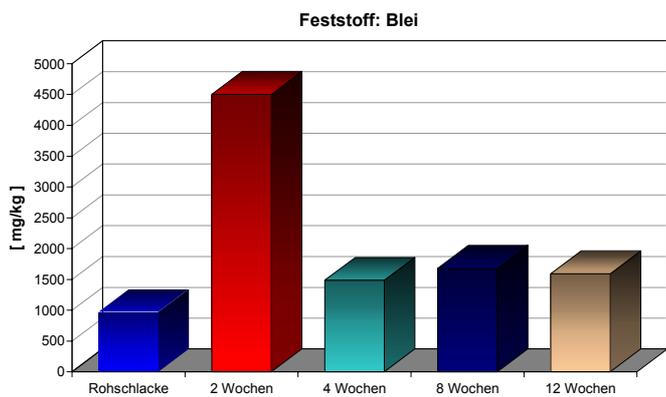
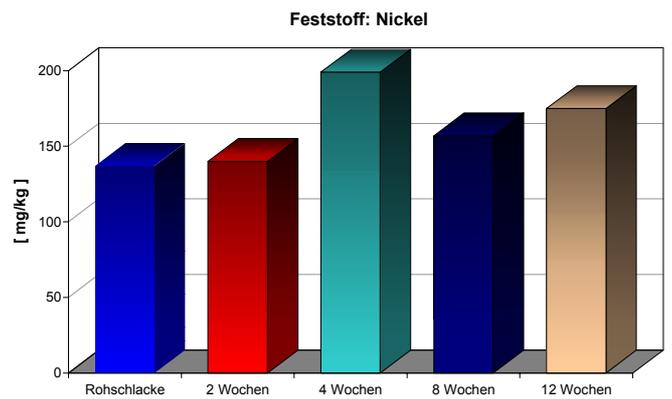
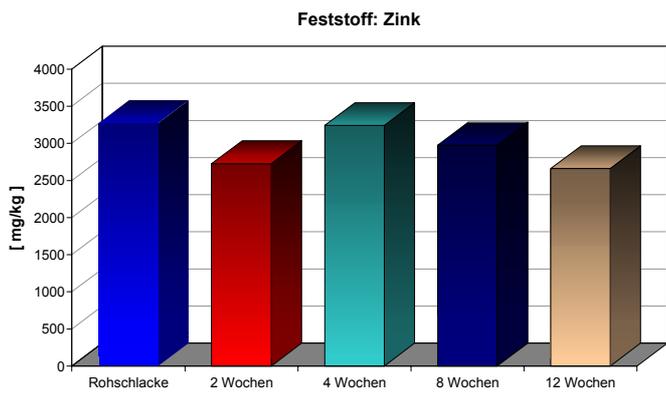
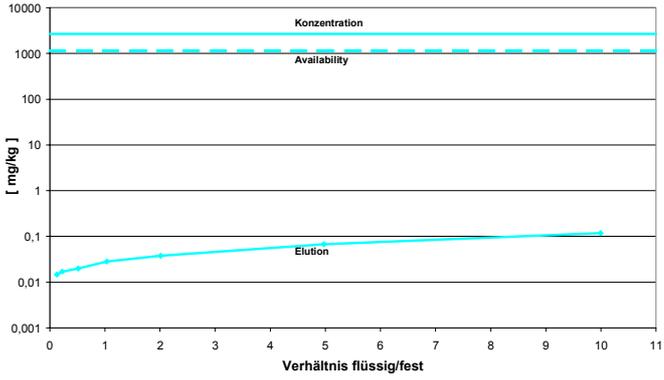
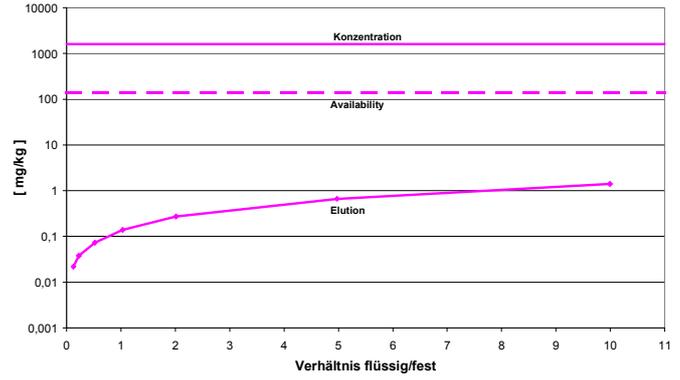


Abb. 52 Ergebnisse der Feststoffsuchungen der MV-Schlacke B-2

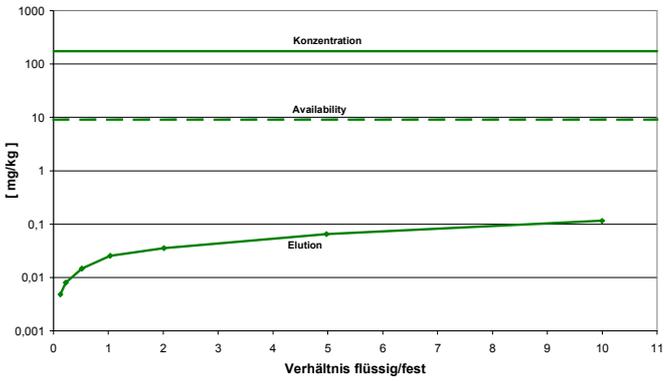
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



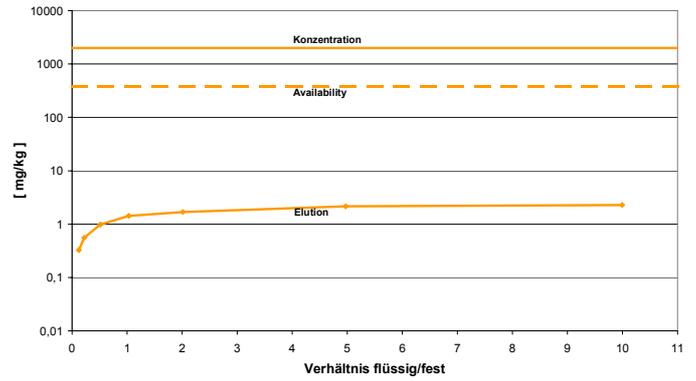
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



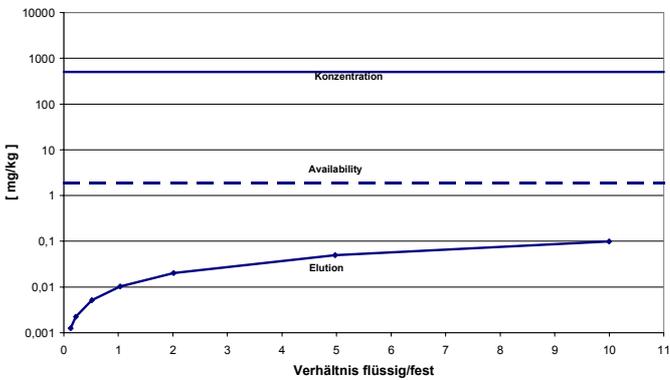
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



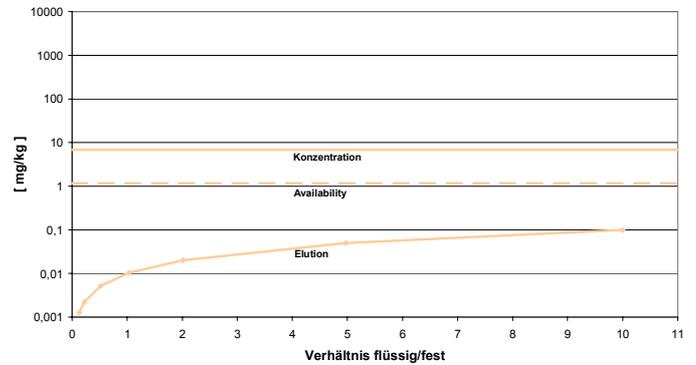
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



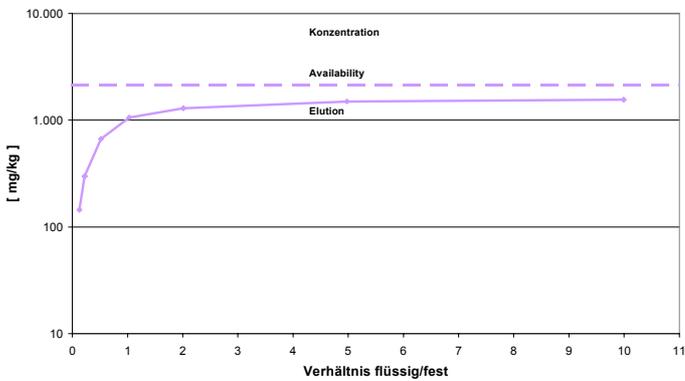
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

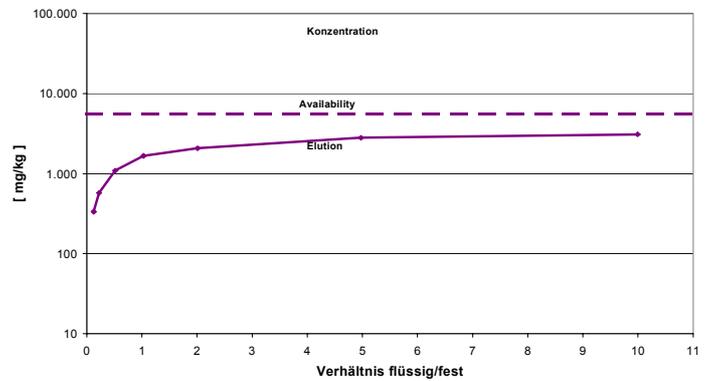


Abb. 53 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke B-2

5.2.2.2.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke B-2

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] erfolgt. Darüber hinaus werden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken abzuschätzen. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften einer drei Monate abgelagerten MV-Schlacke für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der MV-Schlacke B-2 geht aus Abb. 54 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Im Vergleich zu der aufbereiteten MV-Schlacke B-2 weist die MV-Rohschlacke B-2 einen deutlich höheren Anteil in der Grobfraction auf.
- Nach der Aufbereitung liegen die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacke in einem sehr engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 0,71 mm die untersuchte MV-Schlacke B-2 oberhalb der Grenzsieblinien liegt, d.h. einen zu geringen Anteil an Grobkorn aufweist.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke B-2 geht aus Abb. 55 hervor. Ein Vergleich der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 43 bis 55 M.-%) der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ % M.-% werden von der MV-Schlacke B-2 (Ist-Werte: 0,4 bis 0,7 M.-%) eingehalten, ebenso die Anforderung an den maximal erlaubten Metallanteil von 5,0 M.-% (Ist-Werte: 1,5 bis 3,1 M.-%).

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke liegen zwischen ca. 1,56 und 1,61 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 17,0 und 18,0 M.-% (Abb. 56). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke B-2, die sich auch in der Baupraxis zeigt.

- **Wassergehalt**

Die Wassergehalte der MV-Schlacke B-2 schwanken nach der Aufbereitung zwischen 14,2 und 15,7 M.-% (Tab. 24). Eine deutliche Reduktion der Wassergehalte während der Ablagerung erfolgt bei der MV-Schlacke B-2 nicht, wobei jedoch beachtet werden muss, dass die Lagerung der aufbereiteten MV-Schlacke im Freiland erfolgte, und somit der natürliche Niederschlag direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte einwirken konnte.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,555 g/cm³ und 2,628 g/cm³ und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 24). Die große Schwankungsbreite geht auf die stark unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke (z.B. Anteile an Metallen) zurück.

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm ≤ 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 6,3 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke nicht erfüllt.

Die Anforderung an die Gesamtkörnung gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke B-2 nicht eingehalten (Ist-Wert: 9,9 M.-%) (Tab. 24).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, sind sehr homogen und liegen zwischen 39,1 und 41,0 M.-% (Tab. 24). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke B-2 unter Einbeziehung der Toleranz von 5% relativ erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Die Anteile an schlecht geformten Körnern liegen zwischen 22,4 und 28,2 M.-%, womit die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden. (Tab. 24).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 1,9 und 3,5 M.-%. Anforderungen an den Parameter Glühverlust bestehen gemäß TL Min-StB 2000 nicht (Tab. 24).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke B-2, mit Ausnahme des Parameters Frost-Tau-Wechsel, eingehalten werden.

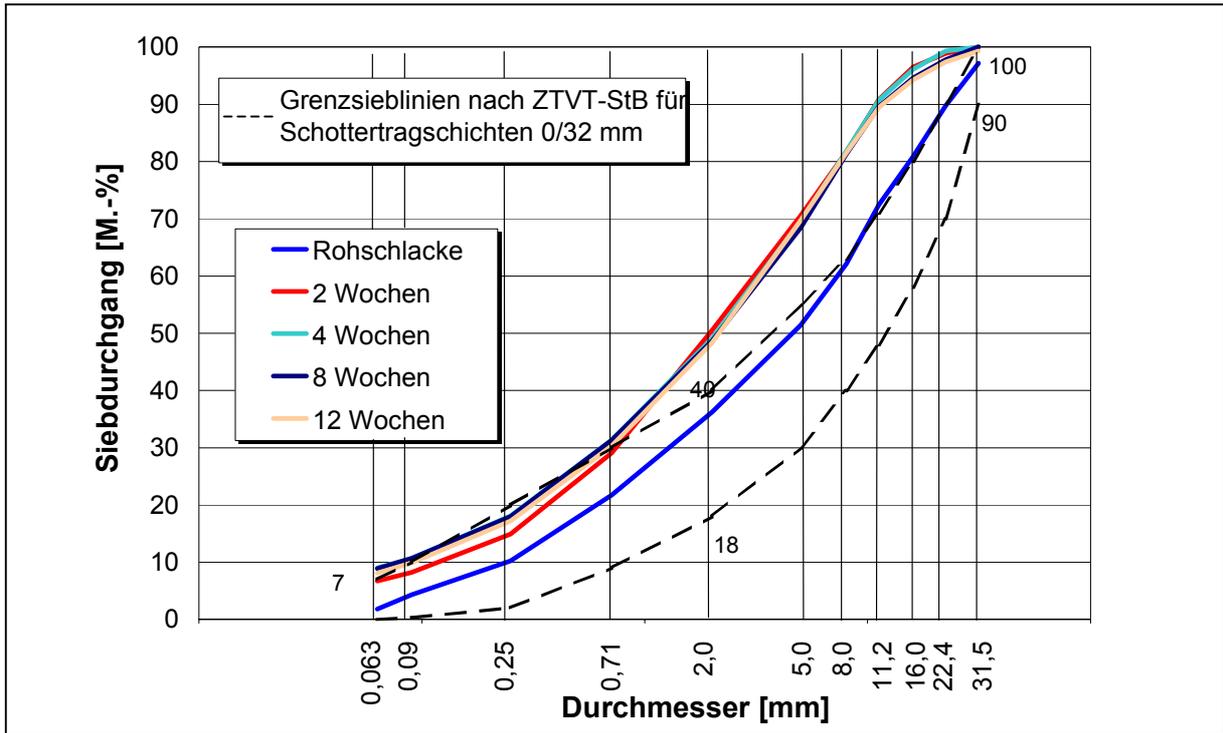


Abb. 54 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke B-2

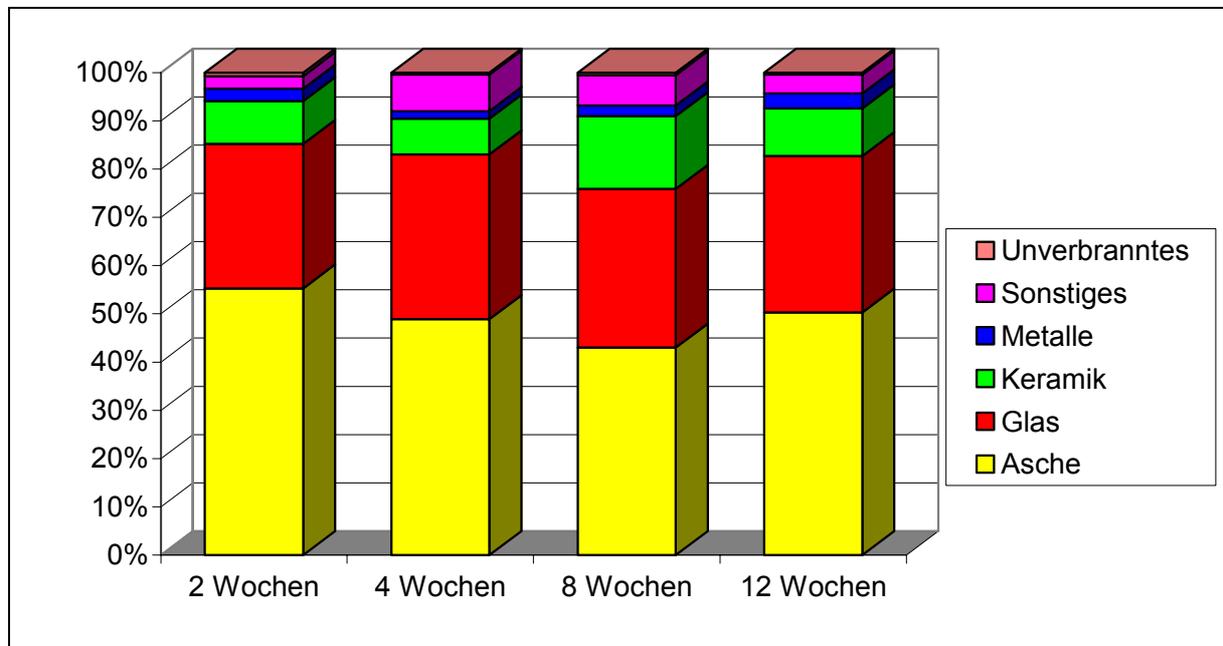


Abb. 55 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke B-2

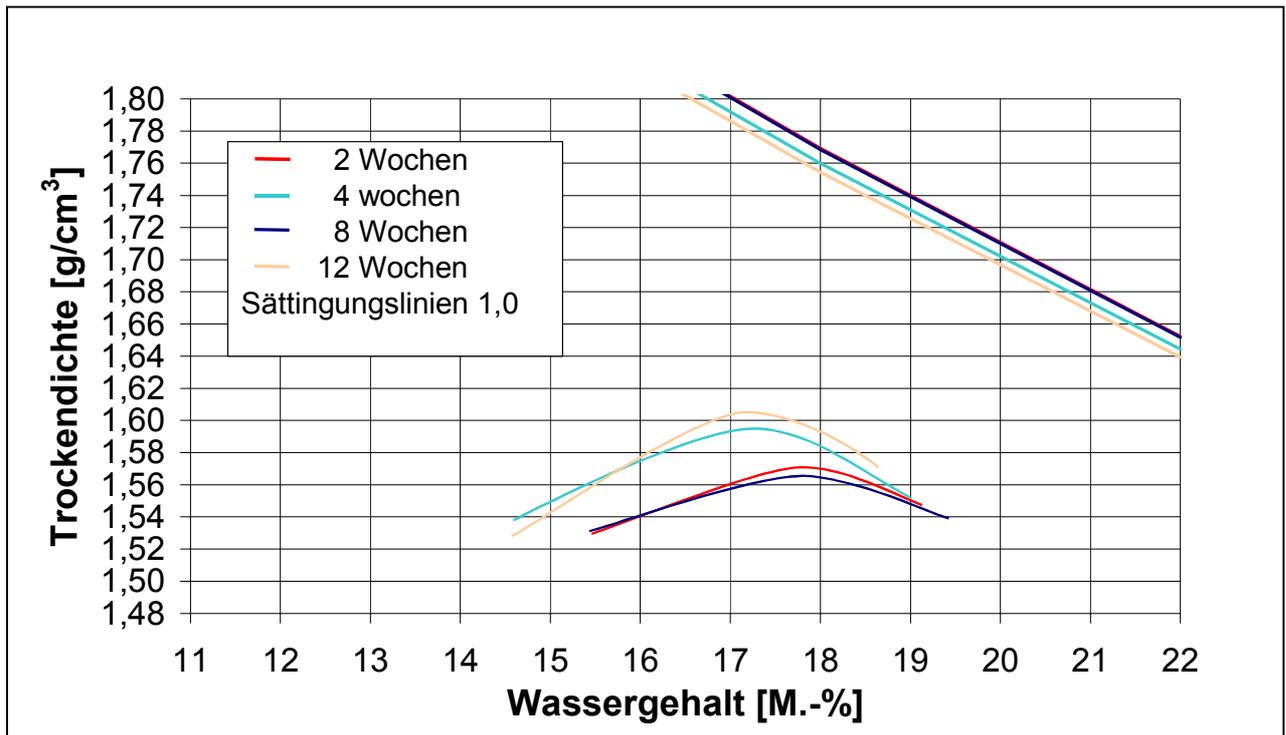


Abb. 56 Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke B-2

Tab. 24 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke B-2

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	15,7	14,2	15,6	15,5	
Rohdichte	g/cm ³	2,587	2,628	2,602	2,555	
Schüttdichte	g/cm ³	1,057	1,094	1,050	1,110	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16 mm)	< 5 mm < 0,71 mm M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	6,3	3 (5)
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	9,6	9,3	8,7	9,9	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	40,7	41,0	40,5	39,1	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	22,4	23,8	28,2	25,4	50
Glühverlust	M.-%	2,0	3,5	1,9	2,1	

5.2.3 ANLAGE C

In der MVA C wurde ein Großversuch (MV-Schlacken C) durchgeführt.

- **Verfahrenstechnik der Müllverbrennungsanlage C**

Die verfahrenstechnischen Parameter der Müllverbrennungsanlage C gehen aus Tab. 25 hervor. Die untersuchten Schlackeproben stammen aus einem Kessel mit Vorschubrost und Mittelstromfeuerung.

Tab. 25 Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA C

Verfahrensparameter der MVA C	
Rostsystem	Vorschubrost
Durchsatz [t/a]	92.000
Linien	1
Feuerung	Mittelstrom
Heizwert [kJ/kg]	11.000
Abfallarten	Hausmüll
	Gewerbeabfall
Schlackeanfall [t/a]	22.000

- **Müllinput**

In der Versuchsreihe wurde folgende Müllzusammensetzung großtechnisch thermisch behandelt (Tab. 26):

Tab. 26 Müllzusammensetzung während des Großversuches

Müllzusammensetzung während des Großversuches in der MVA C in M.-%		
Hausmüll	Gewerbeabfall	Sonstiges
93,0	3,0	4,0

- **Aufbereitungstechnik der MV-Schlacken**

Die in der Müllverbrennungsanlage C produzierten MV-Rohschlacken C werden per LKW zur angeschlossenen Schlackenaufbereitungsanlage transportiert.

Nach einer Zwischenlagerung im Bereich des Vorlagers zur Reduktion des Feuchtegehaltes werden die MV-Rohschlacken zu MV-Schlacken aufbereitet und anschließend drei Monate abgelagert. Die Vorlagerung sowie die Nachlagerung findet im Freien statt. Die Aufbereitungsanlage ist eingehaust und verfügt über einen Rost zur Entfernung grober Störstoffe und Langschrott, verschiedene Siebanlagen sowie eine Nichteisen- und Eisenabscheidung (Trommel- und Überbandmagneten).

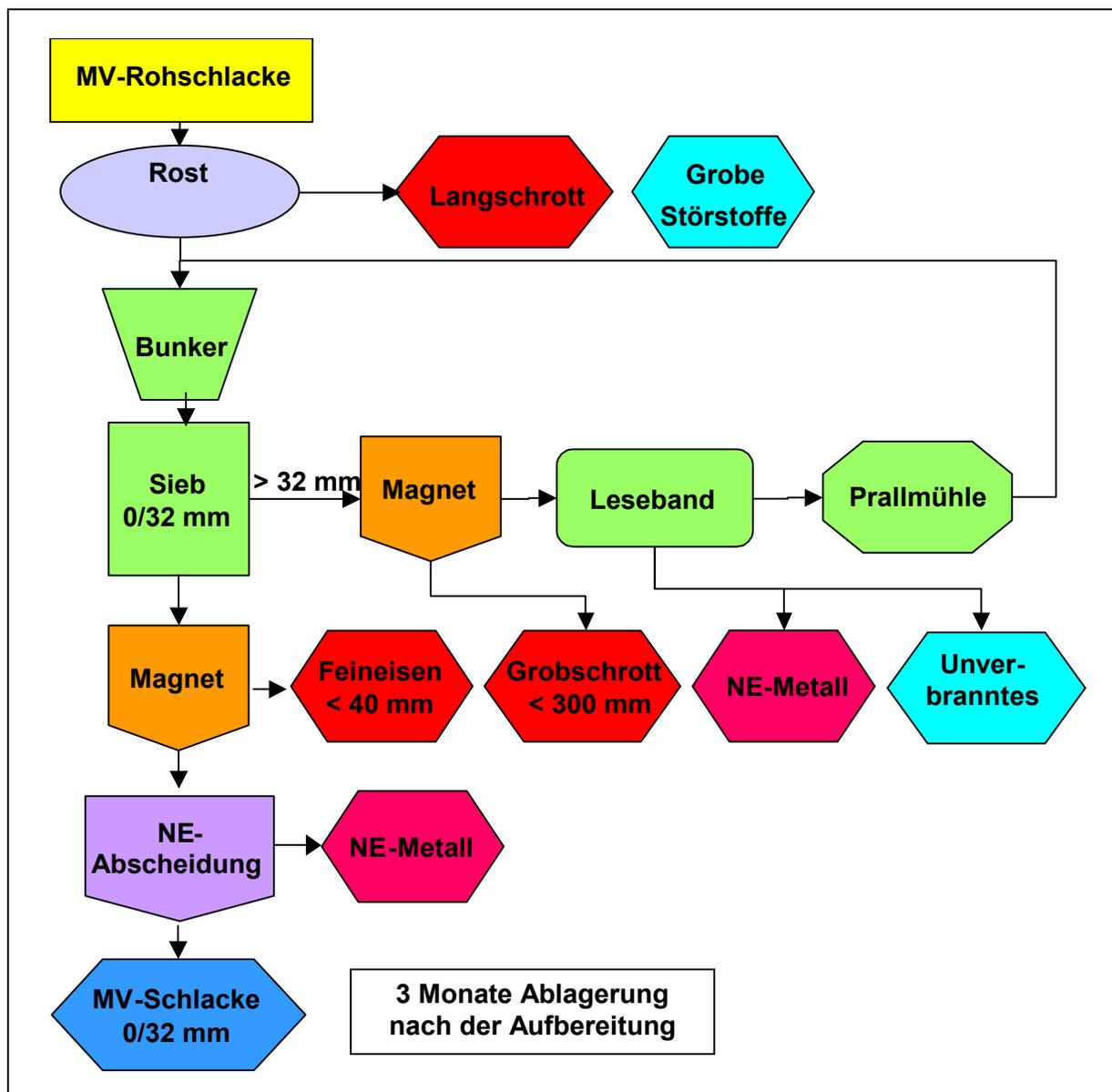


Abb. 57 Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA C

Die aufbereitete MV-Schlacke unterliegt der Güteüberwachung gemäß RG Min-StB 93 [30] und wird im Straßenbau und Deponiebau verwertet.

5.2.3.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke C

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke geht aus Tab. 27, die der Grobfraktion aus Tab. 28 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 58).

Im Feinanteil der MV-Schlacke stellt das Carbonat Calcit (CaCO_3) die mineralogische Hauptphase dar, während das Oxid Quarz (SiO_2) und teilweise das Sulfat Anhydrit (CaSO_4) sowie das Silikat Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) und neu gebildete Glasphasen auf.

Tab. 27 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke C

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Hauptphase/Nebenphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Spuren/Akzessorie	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Akzessorie/Spuren	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die alleinige Hauptphase dar, während das Carbonat Calcit (CaCO_3) als Nebenphase auftreten kann. Akzessorisch

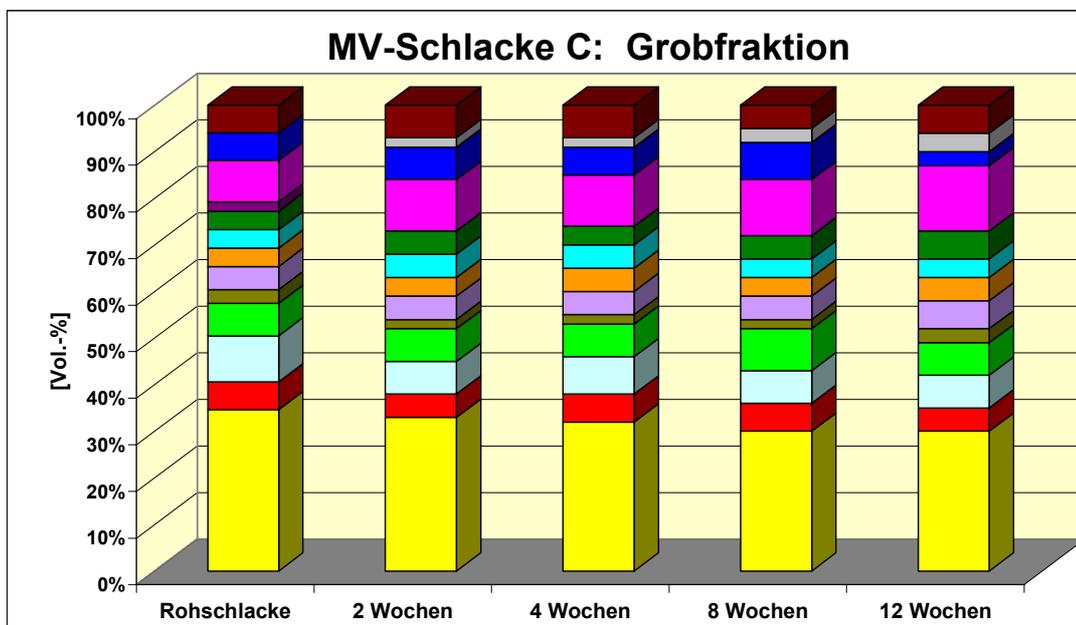
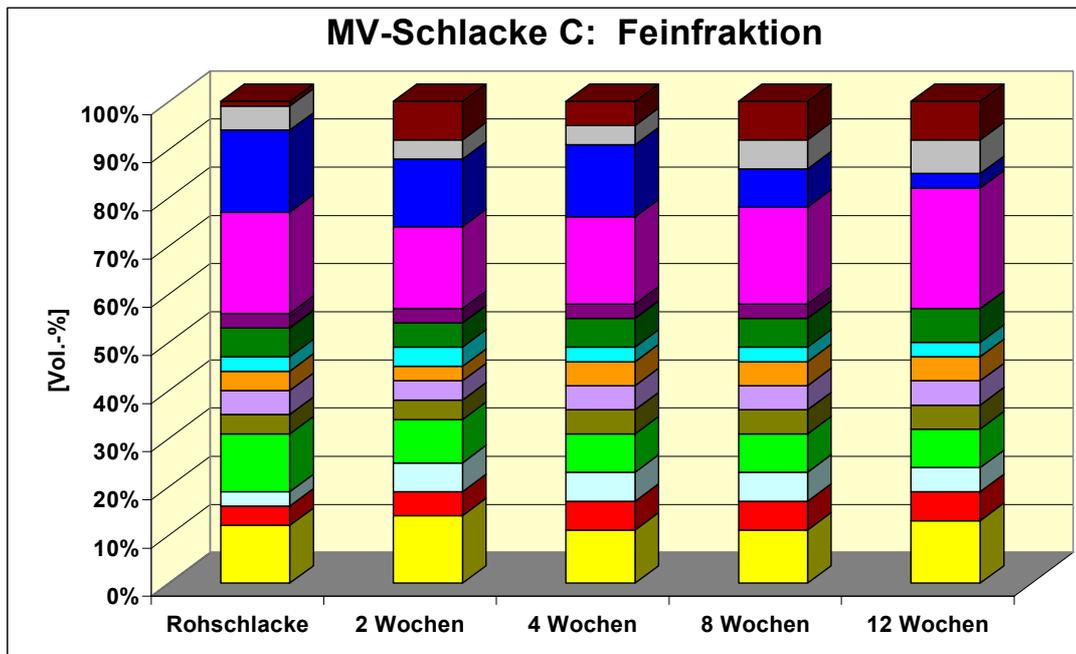
und im Spurenbereich treten die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$), Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Åkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) sowie eine neu gebildete Glasphase auf.

Tab. 28 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke C

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Akzessorie/Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Åkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Akzessorie	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Spuren/Akzessorie	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3$	Ettringit	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Akzessorie/Spuren	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke C handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO_2) sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) hingegen wird sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker und das Carbonat Calcit (CaCO_3) im Laufe der Ablagerung durch die zusätzliche Reaktion von Portlandit mit dem Luft- CO_2 gebildet.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe_3O_4	■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Äkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$		
■ <u>Neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 58 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke C

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke C folgendes festgestellt (Abb. 59):

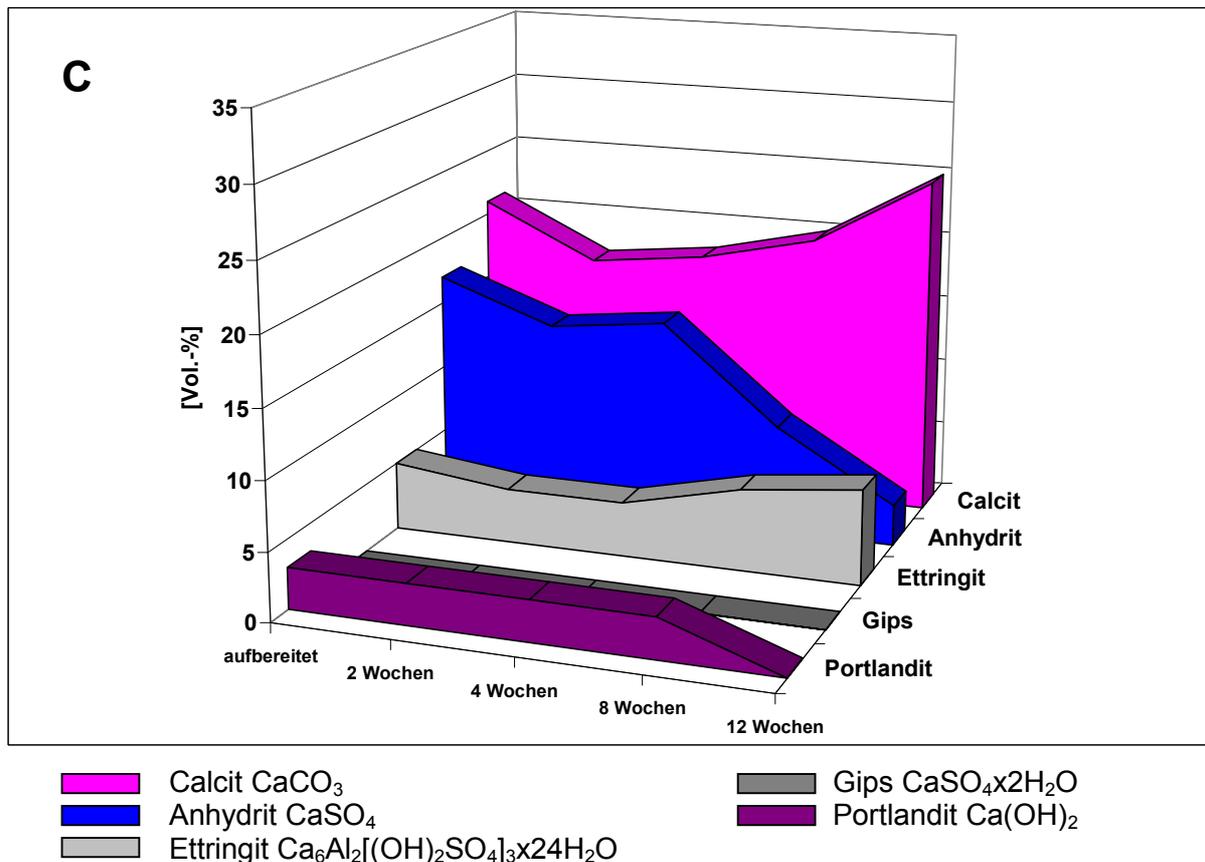


Abb. 59 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke C

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Schlacke C bis zu einer Ablagerungszeit von 8 Wochen gleichbleibende Anteile an Portlandit (Ca(OH)₂), die erst in der 12 Wochen abgelagerten MV-Schlacke C nicht mehr detektiert werden können. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO₃) gesteuert wird, zeigt zu Beginn der Ablagerung zunächst eine geringe Abnahme. Im weiteren Verlauf der Ablagerung nehmen die Calcitgehalte jedoch so stark zu, dass die MV-Schlacke C nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten ein ausgeprägtes Carbonatisierungsvermögen aufweist.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO₄), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, ist im Mineralbestand der MV-Rohschlacke sehr stark angereichert. Nach einer Ablagerungszeit von 4 Wochen setzt jedoch eine starke Abnahme der Anhydritgehalte ein und erreichen nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten Werte, die auf eine reaktionsträge und damit als ausreichend raumbeständige MV-Schlacke schließen lassen, da zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung die Sulfatreaktionen weitgehend abgeschlossen sind.
- Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) tritt bereits in der MV-Rohschlacke in deutlichen Mengen auf und reichert sich im Mineralbestand während der Ablagerungszeit weiter an.

Die MV-Schlacke C weist nach drei Monaten Ablagerung ein ausgeprägtes Carbonatisierungsverhalten auf und die Sulfatreaktionen sind nahezu abgeschlossen. Zu diesem Zeit-

punkt der Ablagerung kann die MV-Schlacke C als reaktionsträge und somit aus mineralogischer Sicht als ausreichend raumbeständig eingeordnet werden.

5.2.3.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke C

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke C zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 60-a und 60-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit kontinuierlich von pH 12,1 auf 11,2 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit fallen während der Ablagerungszeit von drei Monaten kontinuierlich von ca. 300 mS/m auf 160 mS/m. Sie liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Die Zinkwerte nehmen im Laufe der dreimonatigen Ablagerungszeit von ca. 80 µg/l auf 10 µg/l ab und unterschreiten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l deutlich.
- Die Bleiwerte der MV-Schlacke reduzieren sich von ca. 290 µg/l in der MV-Rohschlacke auf Werte unterhalb der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l nach einer Ablagerungszeit von 4 Wochen. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden somit von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.
- Die Kupferwerte liegen innerhalb einer Bandbreite von ca. 310 µg/l (MV-Rohschlacke) und 240 µg/l und zeigen keine eindeutige Tendenz während der Ablagerung. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke C eingehalten.
- Die Chromgehalte liegen in einem Bereich zwischen 40 µg/l und 60 µg/l. Der Zuordnungswert der LAGA von 200 µg/l wird eingehalten, während der Grenzwert der TL Min-StB 2000 von 50 µg/l von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke überschritten wird.
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Nickel und Quecksilber liegen nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid variieren zwischen ca. 140 mg/l und 180 mg/l und zeigen keine Tendenz während der Ablagerung. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l werden unterschritten.
- Die Sulfatwerte steigen von ca. 470 mg/l auf 550 mg/l während der dreimonatigen Ablagerungszeit an. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l werden eingehalten.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse [12] zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 [2] von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten werden mit Ausnahme des Parameters Chrom bei Zugrundelegung des Grenzwertes der TL Min-StB 2000 [2].

- **Chemische Untersuchungen im Feststoff**

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 61 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke C in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke C eingehalten.

- **Langzeitstabilität**

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 62 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnen-tests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

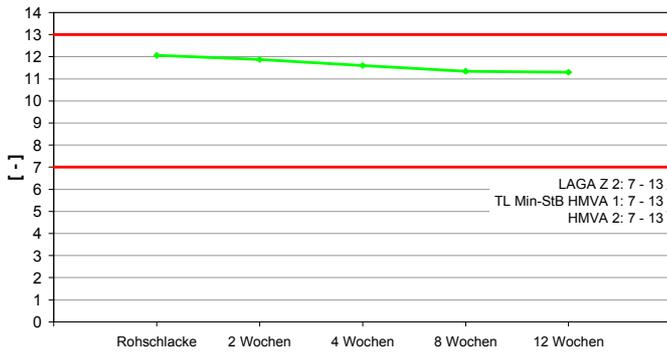
Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnen-tests kann die zeitabhängige Freisetzung abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil von Zink weitaus höher ist, als diejenigen von Kupfer und Blei. Nickel und Chrom weisen die niedrigsten Verfügbarkeiten auf.

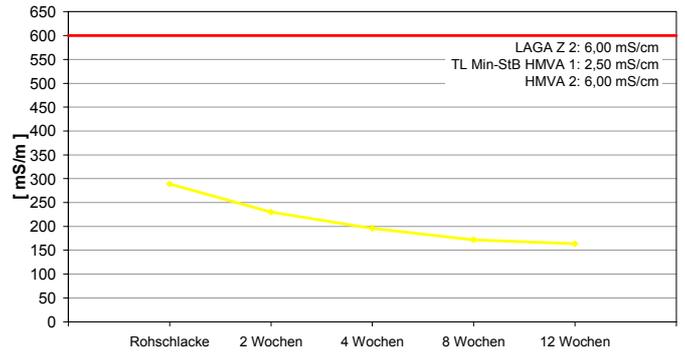
Die Eluatgehalte liegen unter den Bedingungen des Kolonnen-tests in einer vergleichbaren Größenordnung mit Ausnahme der erhöhten Kupfergehalte. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und insgesamt nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit an Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid, allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnen-tests, dass die eluierbaren Mengen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungsvorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

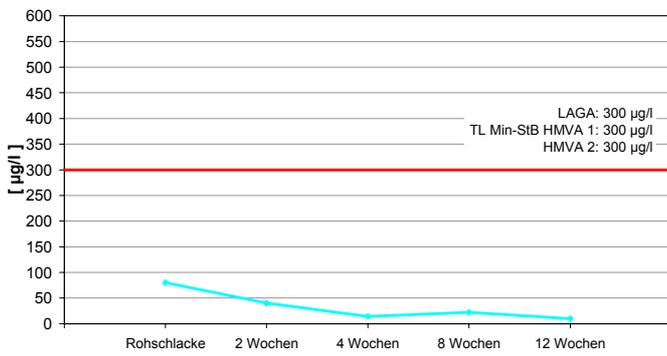
DEV S4-Test: pH-Wert



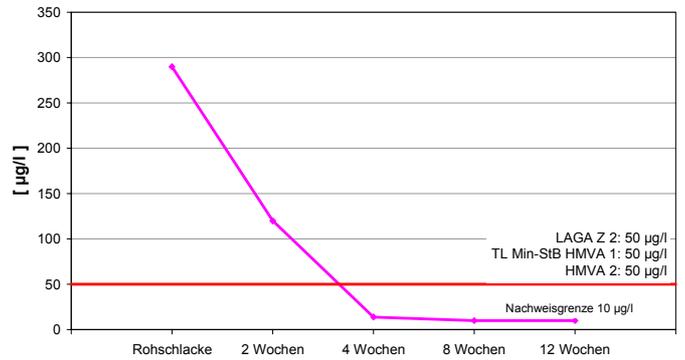
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



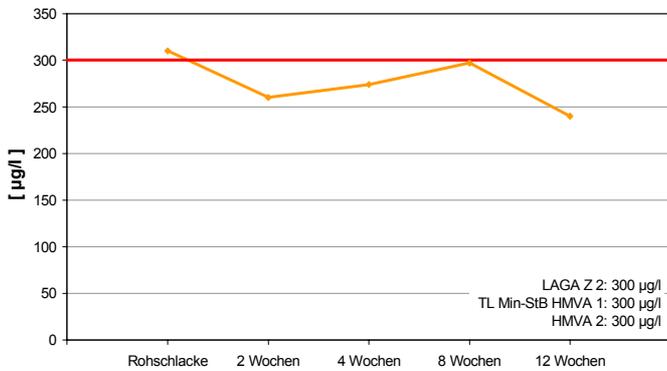
DEV S4-Test: Zink



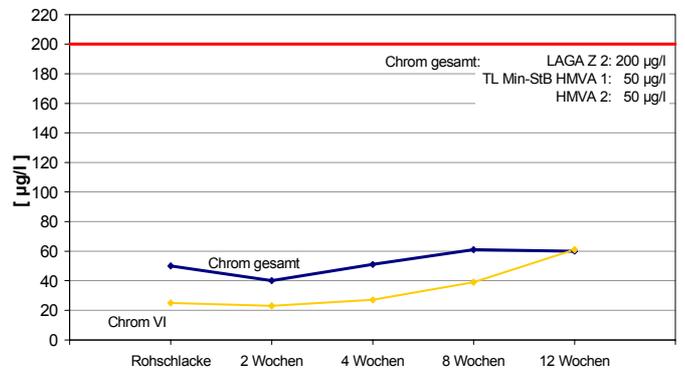
DEV S4-Test: Blei



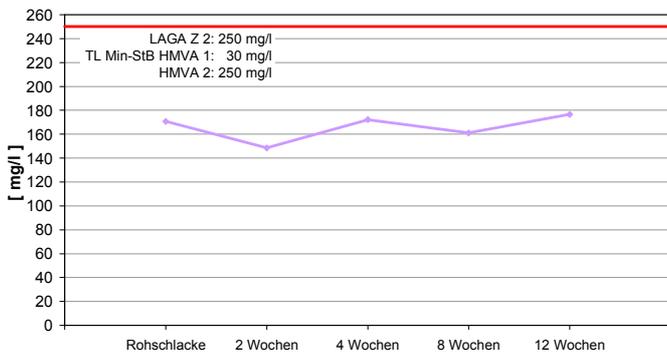
DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

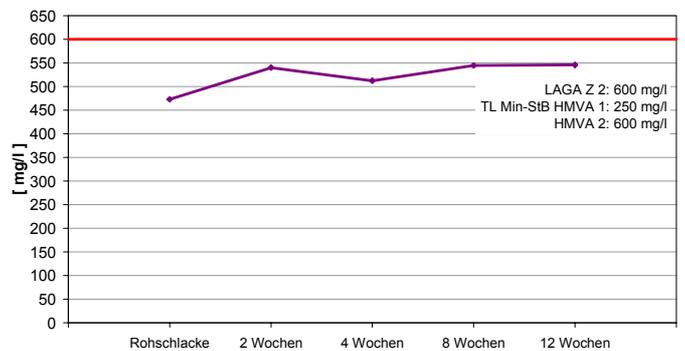


Abb. 60-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke C

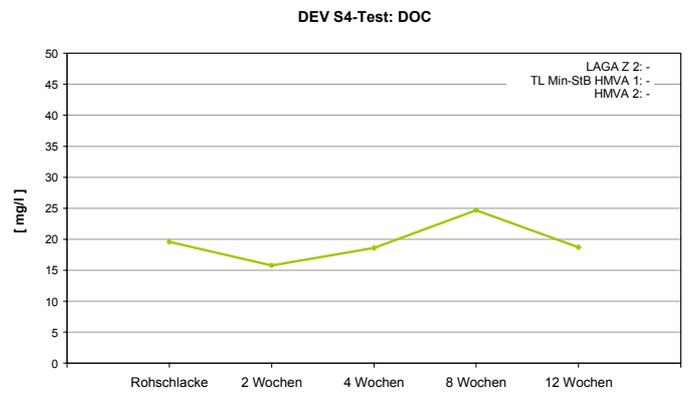
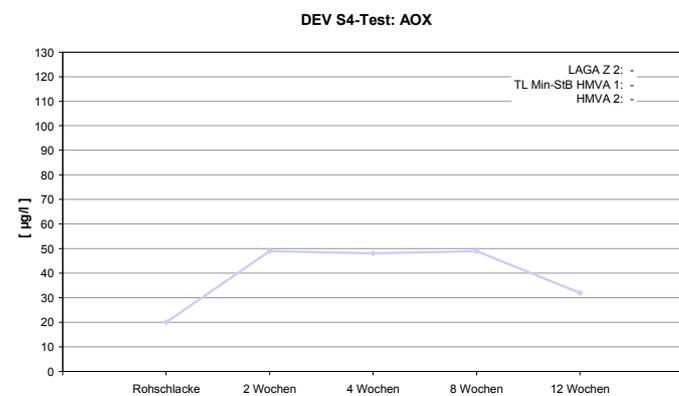
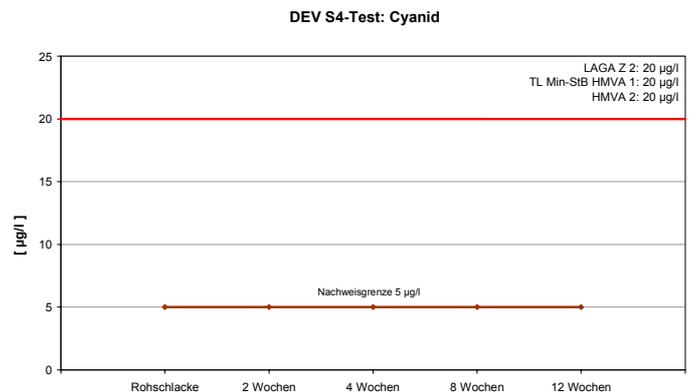
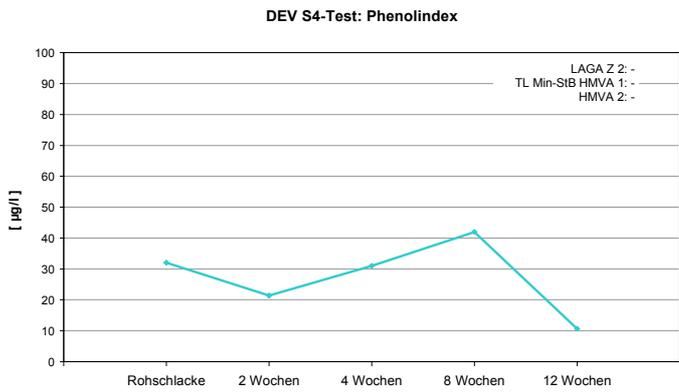
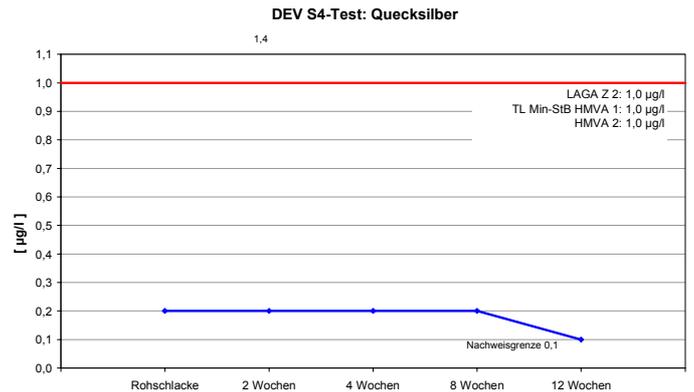
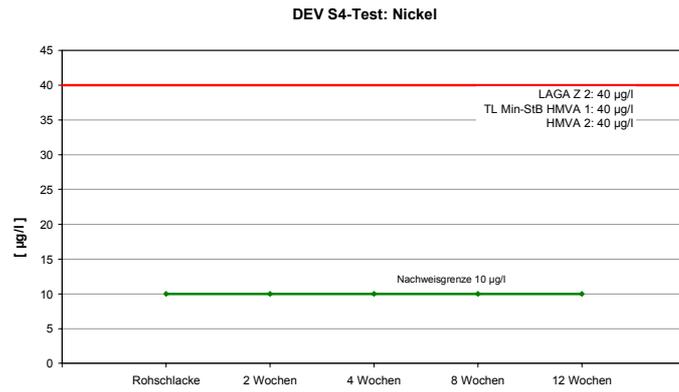
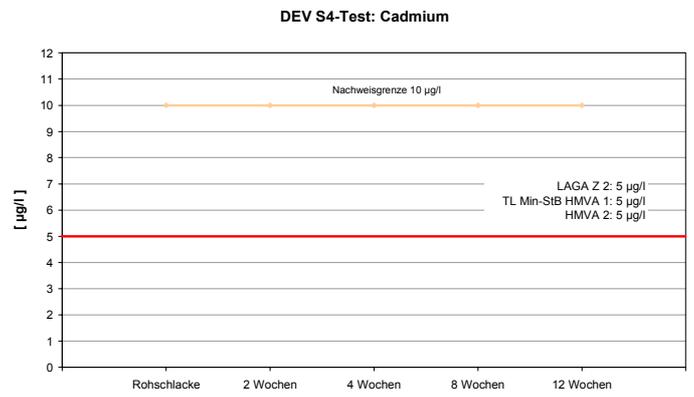
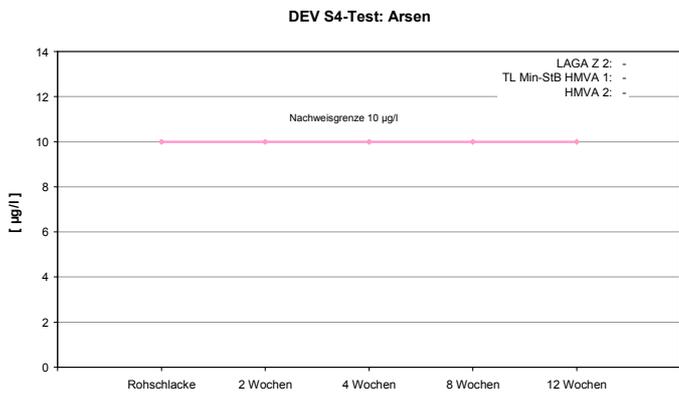


Abb. 60-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke C

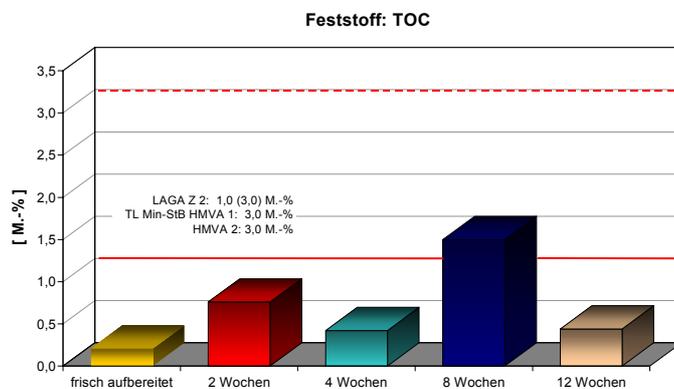
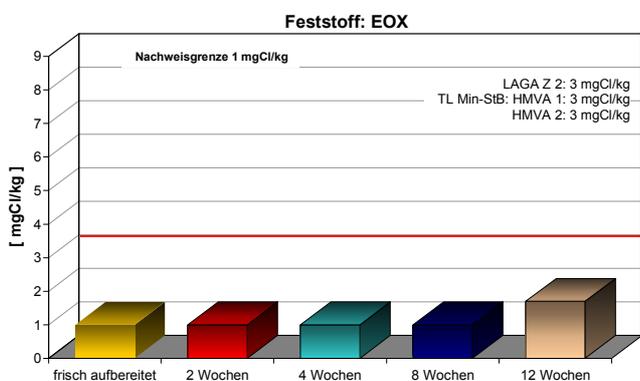
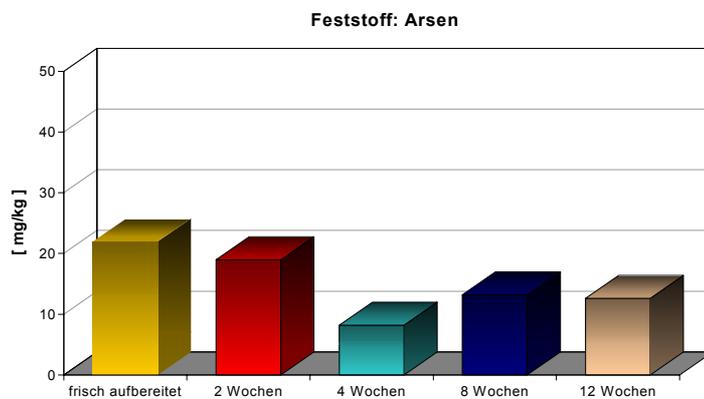
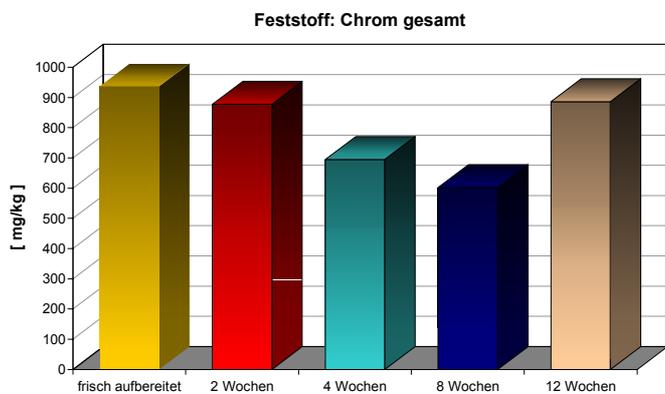
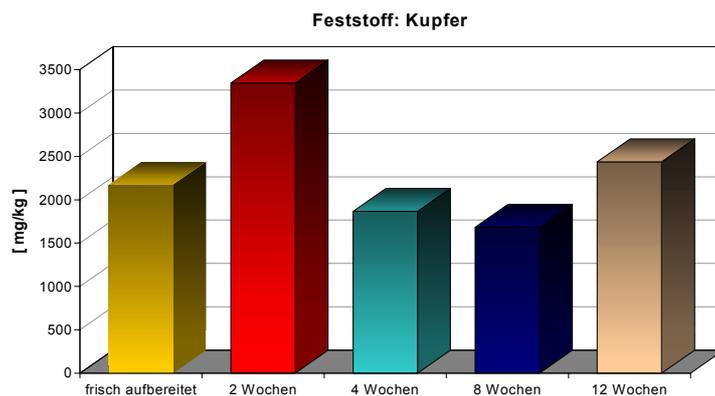
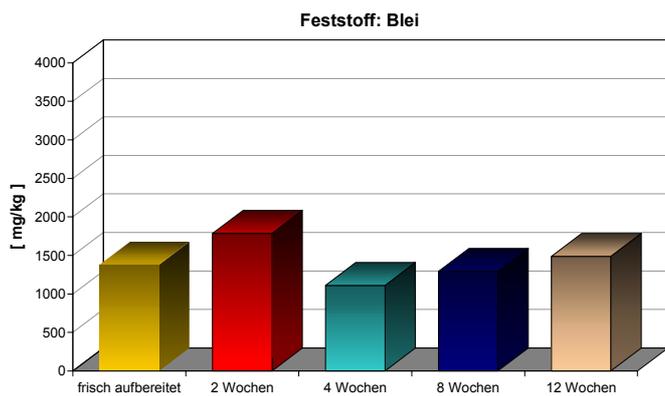
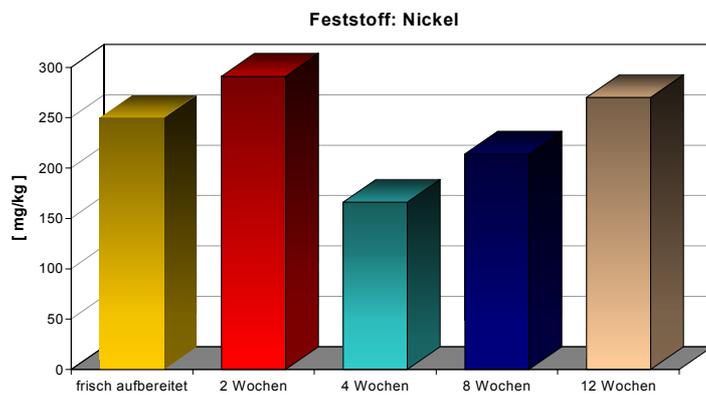
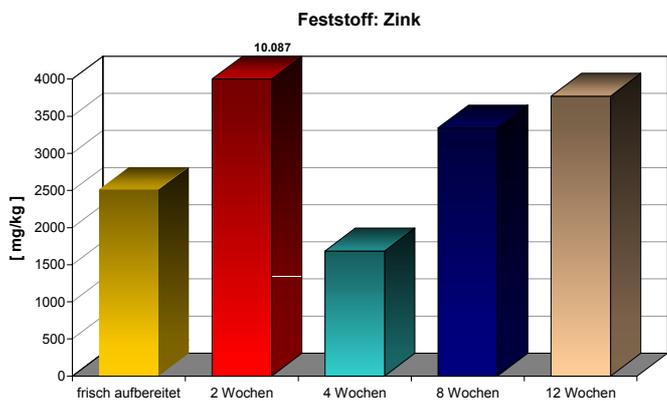
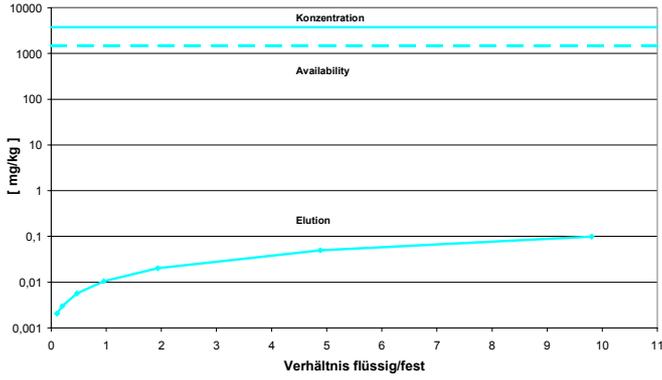
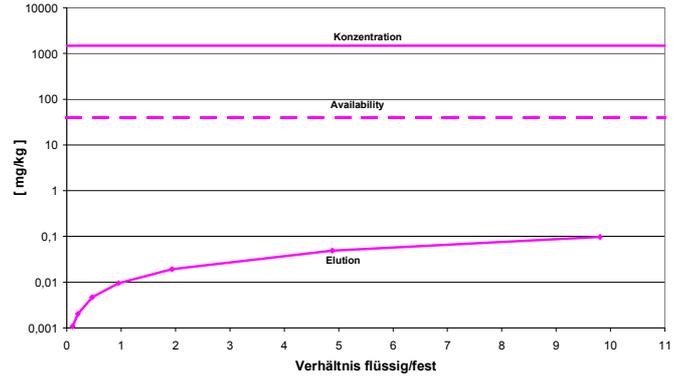


Abb. 61 Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke C

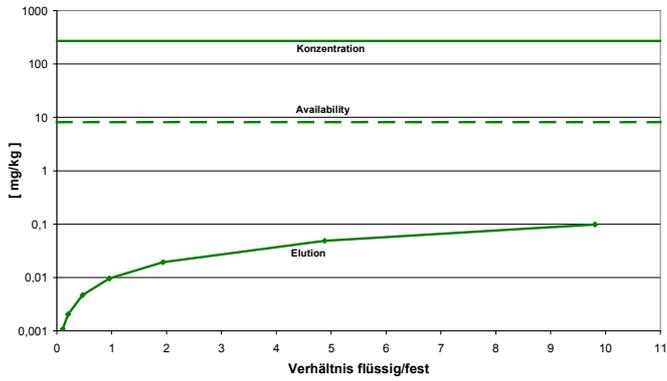
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



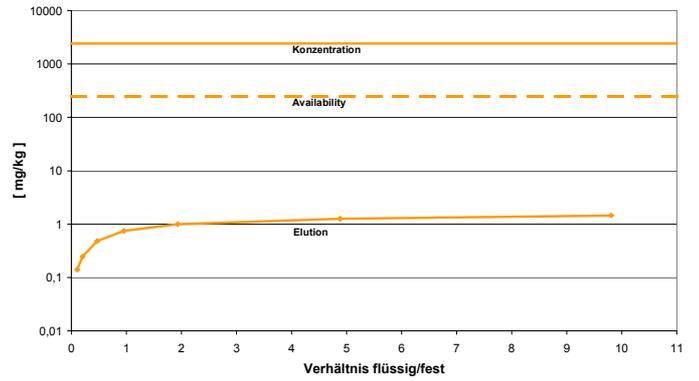
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



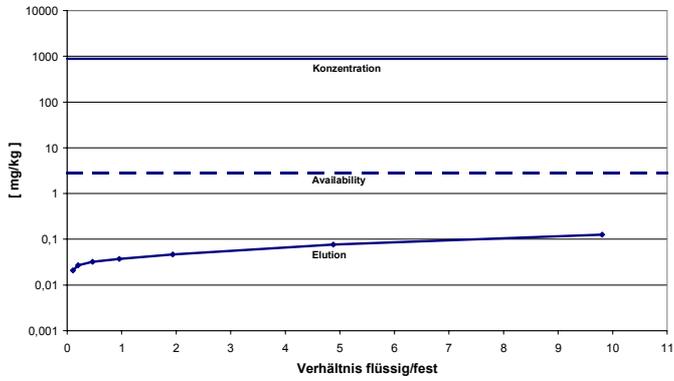
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



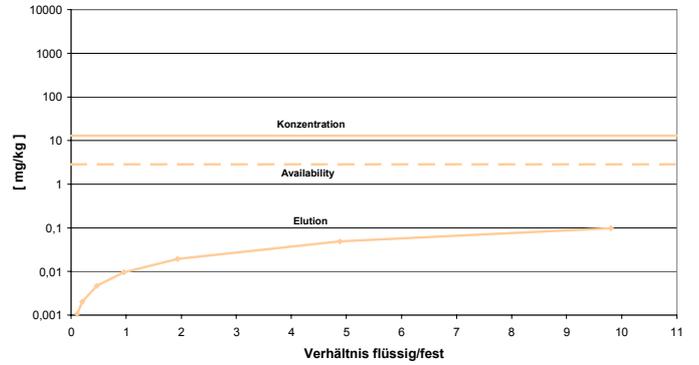
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



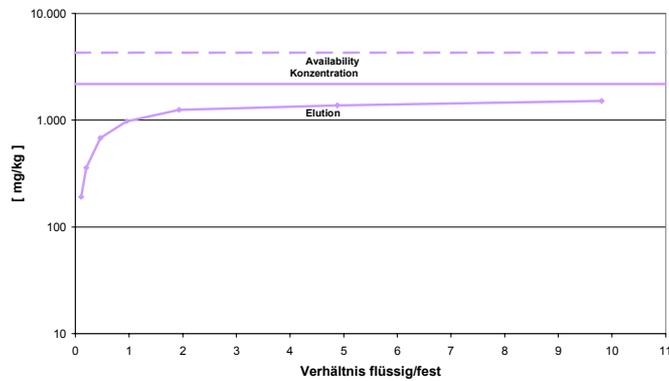
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

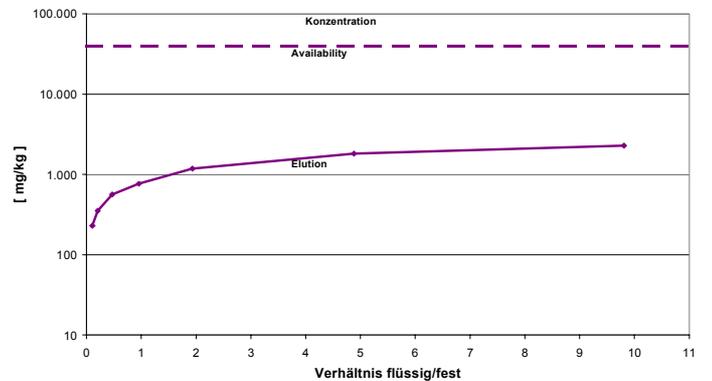


Abb. 62 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke C

5.2.3.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke C

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] beruht. Darüber hinaus erfolgen zusätzliche Untersuchungen, um weitere Verwertungsmöglichkeiten im Bereich des Erdbaus und Deponiebaus abzuschätzen. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften einer drei Monate abgelagerten MV-Schlacke für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke C gehen aus Abb. 63 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Nach der Aufbereitung liegen die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacke in einem engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist. Es ist jedoch eine geringe Tendenz zur Kornverfeinerung während der Ablagerung zu erkennen.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 [2] existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 8 mm die untersuchte MV-Schlacke oberhalb der Grenzsieblinien liegt, d.h. einen zu geringen Anteil an Grobkorn aufweist.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke C geht aus Abb. 64 hervor. Ein Vergleich der stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile stellen den größten Anteil (ca. 51 bis 59 M.-%) der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung dar.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ M.-% (Ist-Werte: 0,2 bis 0,5 M.-%) sowie an den Metallanteil von max. 5,0 M.-% (Ist-Werte: 1,7 bis 3,3 M.-%) werden von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke liegen zwischen ca. 1,60 und 1,69 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 16,5 und 17,5 M.-% (Abb. 65). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke C, die sich auch in der Baupraxis zeigt.

• Wassergehalt

Die Wassergehalte schwanken nach der Aufbereitung zwischen 14,8 und 11,7 M.-% (Tab. 29). Eine Reduktion der Wassergehalte während der Ablagerung erfolgt somit bei der

MV-Schlacke C in geringem Umfang, wobei jedoch beachtet werden muss, dass die Lagerung der aufbereiteten MV-Schlacke im Freiland erfolgte, und somit der natürliche Niederschlag direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte einwirken konnte.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,594 g/cm³ und 2,652 g/cm³ und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 29). Die große Schwankungsbreite geht auf die unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke (z.B. Anteile an Metallen) zurück.

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm ≤ 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 8,6 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke nicht erfüllt.

Die Anforderung an die Gesamtkörnung gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke C eingehalten (Ist-Werte: 5,2 bis 7,4 M.-%) (Tab. 29).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, sind sehr homogen und liegen zwischen 38,1 und 39,6 M.-% (Tab. 29). Die Anforderung gemäß TL Min.-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke C erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Die Anteile an schlecht geformten Körnern liegen zwischen 18,0 und 25,9 M.-%, womit die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden (Tab. 29).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 1,7 und 3,4 M.-% (Tab. 29). Anforderungen an den Parameter Glühverlust bestehen gemäß TL Min-StB 2000 nicht.

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke C eingehalten werden. Ein Einsatz ist somit aus bautechnischer Sicht möglich.

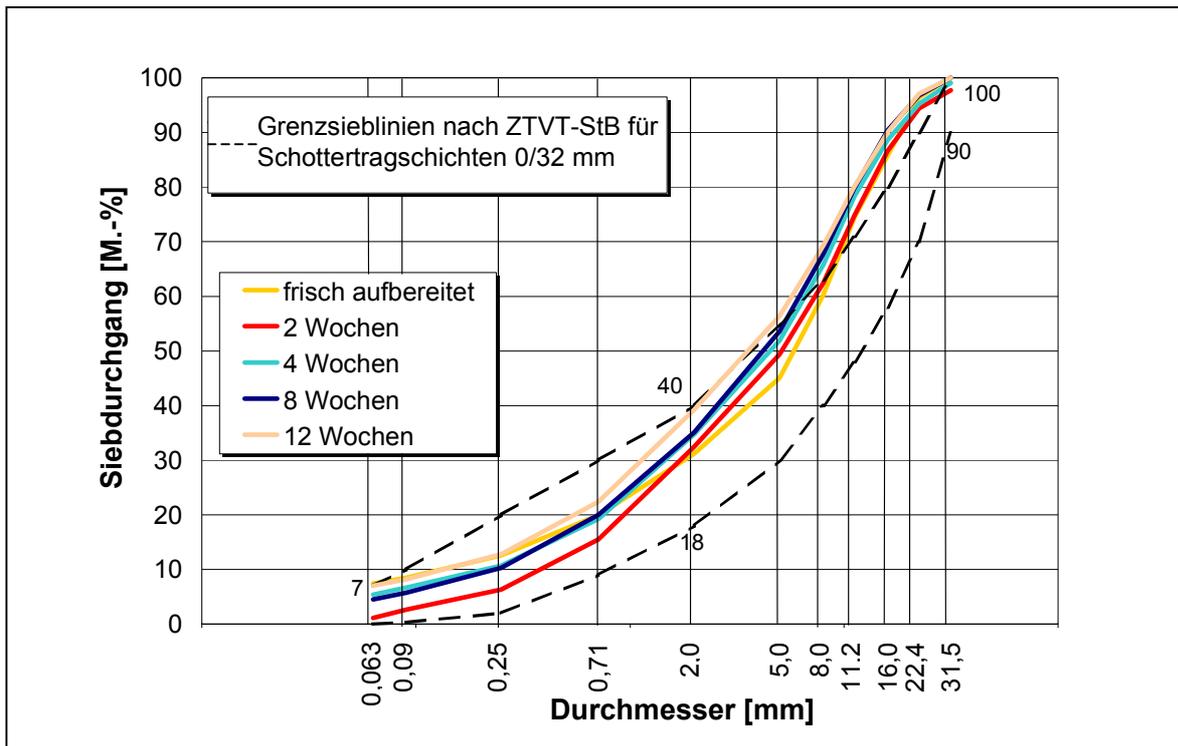


Abb. 63 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke C

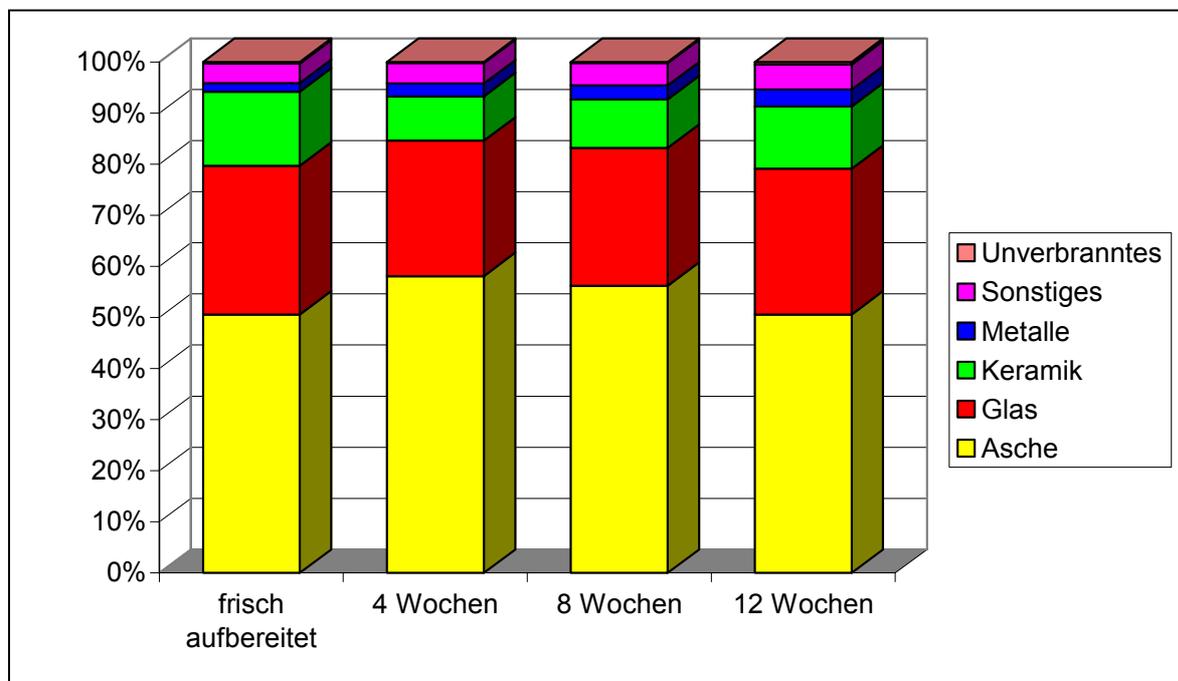


Abb. 64 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke C

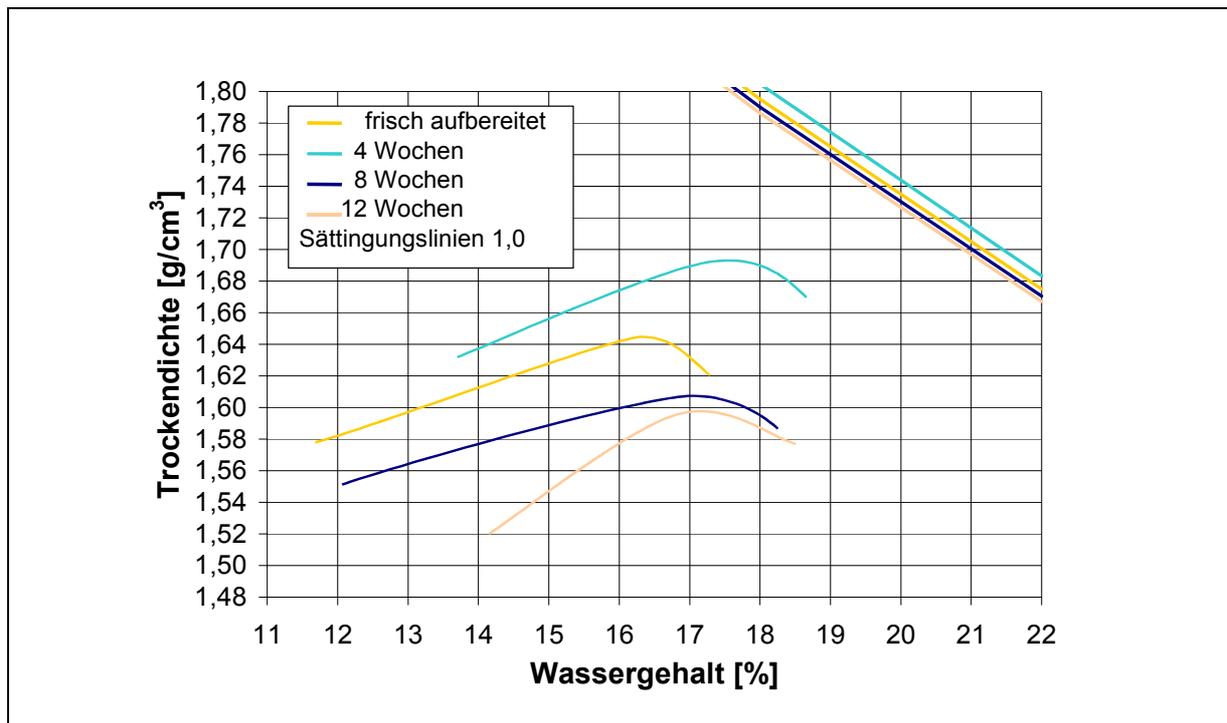


Abb. 65 Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke C

Tab. 29 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke C

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	14,8	11,3	10,7	11,4	
Rohdichte	g/cm ³	2,652	n.b.	2,594	2,612	
Schüttdichte	g/cm ³	1,156	n.b.	1,225	1,171	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16 mm)	< 5 mm < 0,71 mm M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	8,6	3 (5)
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	7,4	n.b.	5,2	7,2	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	39,1	n.b.	39,6	38,1	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	25,9	n.b.	18,0	21,6	50
Glühverlust	M.-%	1,7	2,8	2,3	3,4	

5.2.4 ANLAGE D

In der MVA D wurden drei Großversuche (MV-Schlacken D-1, D-2 und D-3) mit jeweils unterschiedlichem Müllinput durchgeführt, um den Einfluss der verfahrenstechnischen Randbedingungen auf das Versuchsergebnis zu minimieren.

• Verfahrenstechnik der Müllverbrennungsanlage D

Die verfahrenstechnischen Parameter der Müllverbrennungsanlage D gehen aus Tab. 30 hervor. Die untersuchten Schlackenproben stammen aus einem Kessel mit Walzenrost und Gleichstromfeuerung.

Tab. 30 Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA D

Verfahrensparameter der MVA D	
Rostsystem	Walzenrost
Durchsatz [t/a]	150.000
Linien	3
Feuerung	Gleichstrom
Heizwert [kJ/kg]	10.800
Abfallarten	Hausmüll
	Gewerbeabfall
	Sperrmüll
	Sonstiges: z.B. Tiermehl
Schlackeanfall [t/a]	45.000

• Müllinput

In drei Versuchsreihen wurden folgende Müllzusammensetzungen großtechnisch thermisch behandelt.

Tab. 31 Müllzusammensetzungen während der Großversuche

Müllzusammensetzungen während der Großversuche in der MVA D in M.-%						
Versuch	Hausmüll	Sperrmüll	Gemisches Material	Tiermehl	NKR*	Schlämme
D-1	73,0	8,4	9,9	3,8	4,9	
D-2	55,5	6,4	35,3		2,1	0,7
D-3	66,1	6,4	18,4		9,1	

* NKR = nicht kompostierbare Reste aus Kompostierungsanlage

- **Aufbereitungstechnik der MV-Schlacken**

Die in der Müllverbrennungsanlage D produzierten MV-Rohschlacken werden per LKW zur angeschlossenen Schlackenaufbereitungsanlage transportiert. Nach einer Vorlagerung von ca. 2 Wochen zur Reduktion des Feuchtegehaltes werden die MV-Rohschlacken zu MV-Schlacken aufbereitet. Die Vorlagerung, die Aufbereitung sowie die Nachlagerung finden im Freien statt.

Die Aufbereitungsanlage verfügt über einen Aufgabebunker für die MV-Rohschlacke, einem Rüttelsieb der Maschenweite 40 mm, sowie je einen Trommel- und Überbandmagneten zur Separierung der Eisenmetalle. Grobe Störstoffe werden auf dem Rüttelsieb von Hand aus der MV-Schlacke ausgesondert.

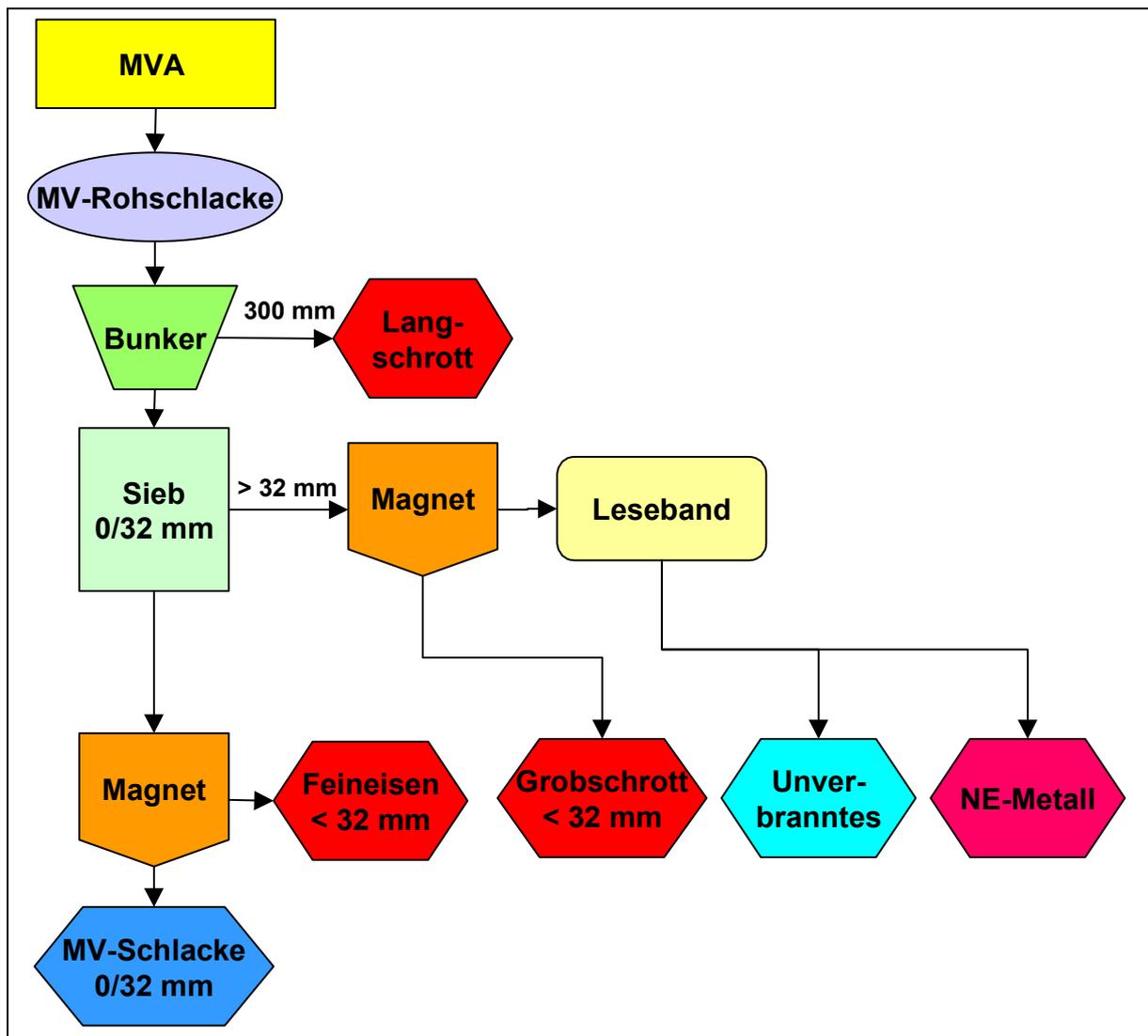


Abb. 66 Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA D

Die aufbereitete MV-Schlacke unterliegt der Güteüberwachung gemäß RG Min-StB 93 [30] und wird im Straßenbau und Deponiebau verwertet.

5.2.4.1 MV-Schlacke D-1 (Großversuch 1)

5.2.4.1.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-1

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacken geht aus Tab. 32, die der Grobfraktion aus Tab. 33 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 67).

Im Feinanteil der MV-Schlacke D-1 stellen das Carbonat Calcit (CaCO_3) und teilweise das Oxid Quarz (SiO_2) die mineralogischen Hauptphasen dar. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), die Sulfate Anhydrit (CaSO_4), Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) sowie neu gebildete Glasphasen auf.

Tab. 32 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacken D-1

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase/Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Hauptphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Spuren	Neubildung
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Gips	Spuren	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Akzessorie/Spuren	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

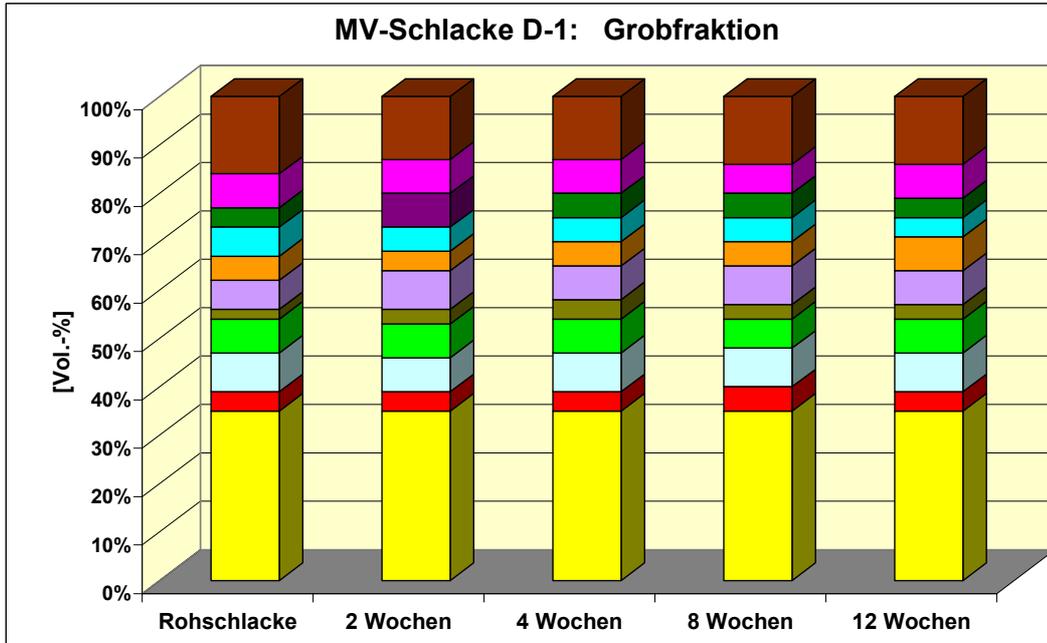
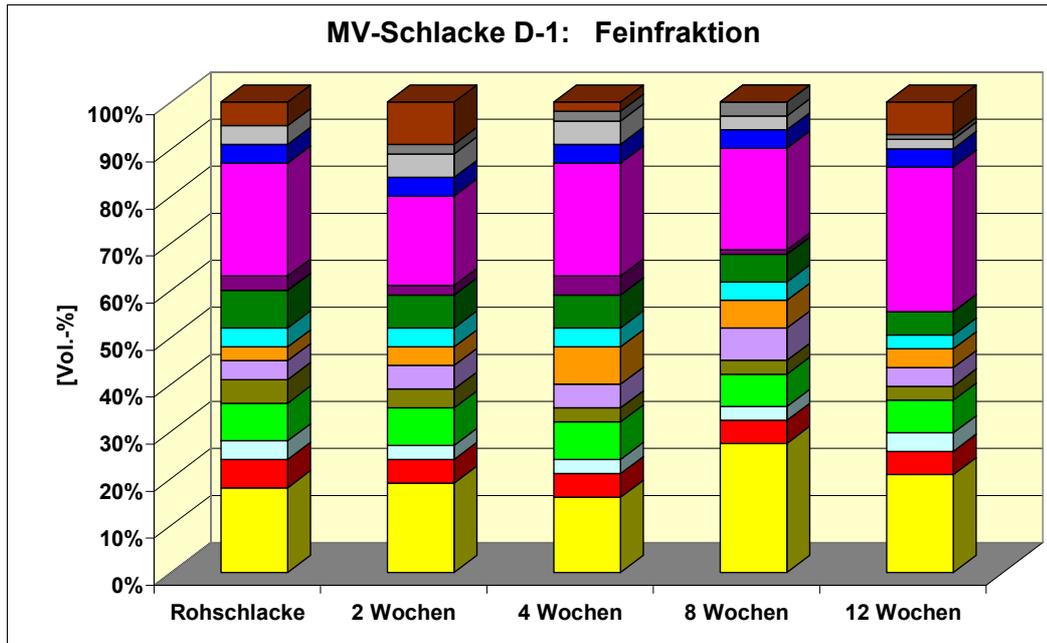
In der Grobfraktion der MV-Schlacke D-1 stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die alleinige Hauptphase dar, während die neu gebildeten Glasphasen die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$), Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), das Carbonat Calcit (CaCO_3), das Sulfat Anhydrit (CaSO_4), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) und das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) auf.

Tab. 33 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacken D-1

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Akzessorie/Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Akzessorie	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke D-1 handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO_2) sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) hingegen wird sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker und das Carbonat Calcit (CaCO_3) im Laufe der Ablagerung durch die zusätzlich Reaktion von Portlandit mit dem Luft- CO_2 gebildet.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe_3O_4	■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Åkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	■ Gips	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$
■ <u>neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 67 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke D-1

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke D-1 folgendes festgestellt (Abb. 68):

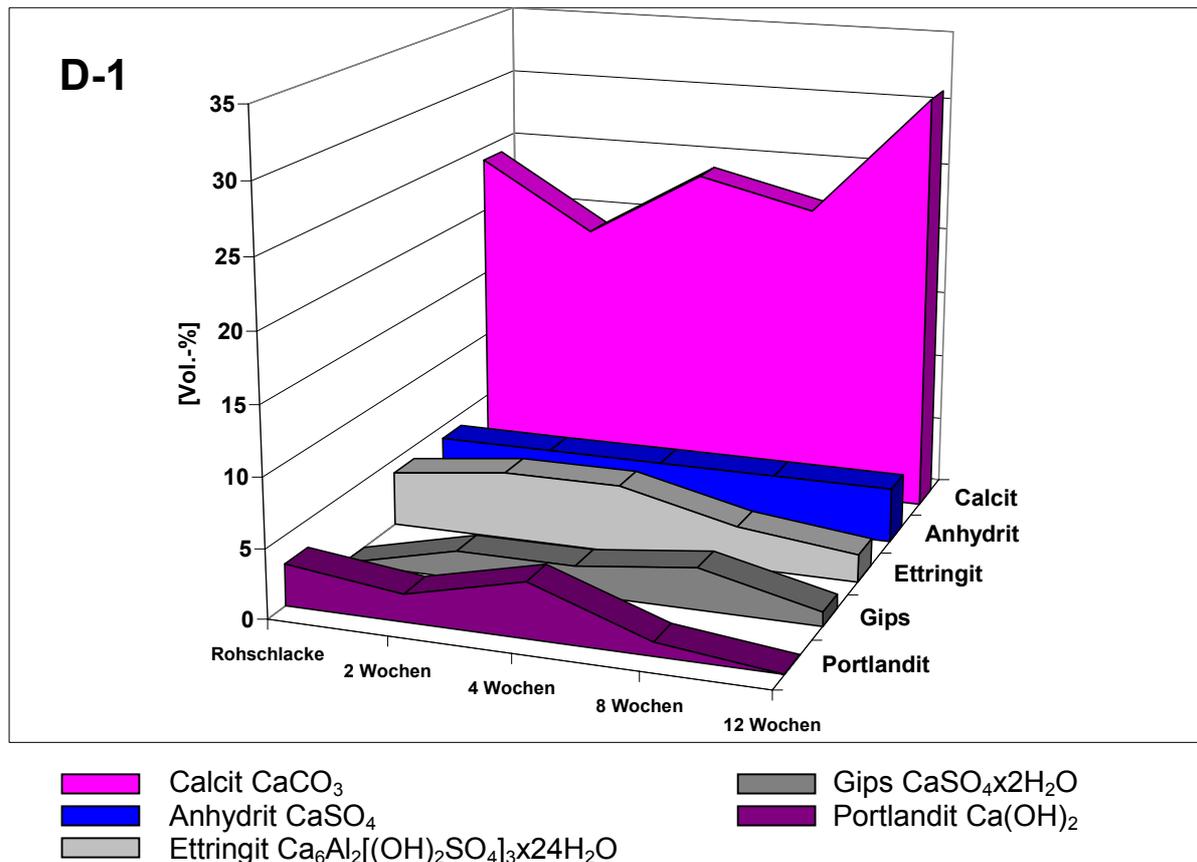


Abb. 68 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke D-1

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in den MV-Schlacken D-1 eine deutliche Abnahme des Portlandits (Ca(OH)₂), wobei nach einer Ablagerungszeit von 8 Wochen kein Portlandit mehr detektiert werden kann. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO₃) gesteuert wird, lässt ausgeprägte Alterationsreaktionen im Verlaufe der Ablagerung erkennen, da eine deutliche Zunahme des Calcits festgestellt werden kann. Die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke D-1 weist somit ein ausgeprägtes Carbonatisierungsvermögen auf.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO₄), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, tritt in der MV-Rohschlacke sowie in der abgelagerten MV-Schlacke D-1 nur in sehr geringen Mengen auf. Der niedrige Anhydritgehalt in der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke zeigt einen weit fortgeschrittenen Alterungsprozess an, womit die MV-Schlacke D-1 als reaktionsträge und damit als ausreichend raumbeständig eingestuft werden kann, da nur noch geringe Sulfatreaktionen erwartet werden.
- Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) tritt bereits in der MV-Rohschlacke auf und nimmt im Laufe der Ablagerungszeit leicht ab. Während der Ablagerung wird ebenfalls eine geringe Bildung von Gips (CaSO₄·2H₂O) festgestellt, die jedoch in der 12 Wochen abgelagerten MV-Schlacke wieder zurückgeht.

Bei der MV-Schlacke D-1 handelt es sich somit um eine MV-Schlacke, die nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen ein ausgeprägtes Carbonatisierungsvermögen aufweist und in der die Sulfatreaktionen ausreichend abgeschlossen sind. Sie kann zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung, im mineralogischen Sinne, als raumbeständig eingestuft werden.

5.2.4.1.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-1

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke D-1 zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 69-a und 69-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit geringfügig von pH 12,0 auf 11,2 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit nehmen während der Ablagerungszeit von 4 Wochen von ca. 250 mS/m auf 150 mS/m deutlich ab und bleiben danach auf demselben Niveau. Sie liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Die Zinkwerte zeigen während der Ablagerungszeit eine Abnahme von ca. 60 µg/l auf ca. 10 µg/l und unterschreiten die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l deutlich.
- Die Bleiwerte der MV-Schlacke nehmen in den DEV S4-Eluaten nach einer Ablagerungszeit von 2 Wochen von ca. 150 µg/l auf ca. 20 µg/l ab und liegen nach 4 Wochen an der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden somit von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.
- Die Kupferwerte liegen während der Ablagerungszeit gleichbleibend bei ca. 100 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden eingehalten.
- Die Chromgehalte (gesamt) liegen in einem Bereich von ca. 30 bis 60 µg/l und steigen während der Alteration an. Der Zuordnungswert der LAGA von 200 µg/l wird eingehalten, während der Grenzwert der TL Min-StB 2000 von 50 µg/l überschritten wird.
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Nickel und Quecksilber liegen nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid variieren in den ersten 8 Wochen der Ablagerung zwischen ca. 180 mg/l und 200 mg/l und verringern sich dann auf ca. 110 mg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l werden unterschritten.
- Die Sulfatwerte schwanken während der ersten 8 Wochen der Ablagerung zwischen ca. 100 und 150 mg/l und nehmen dann in den drei Monaten abgelagerten MV-Schlacken auf 230 mg/l zu. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l werden jedoch eingehalten.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 [2] von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke D-1, bis auf die Überschreitung des Parameters Chrom gemäß den Grenzwerten der TL Min-StB 2000 [2], eingehalten werden.

- **Chemische Untersuchungen im Feststoff**

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 70 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke D-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke D-1 eingehalten.

- **Langzeitstabilität**

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 71 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnen-tests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

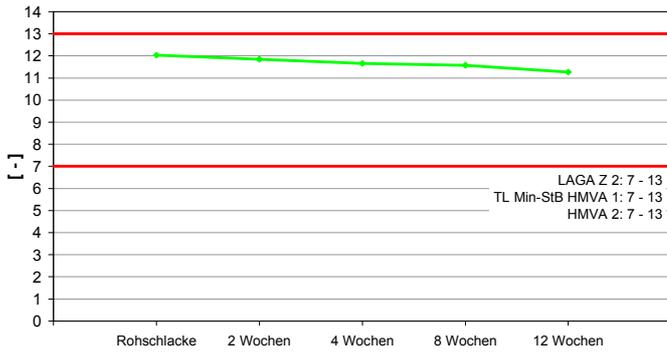
Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnen-tests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle, der Chloride und Sulfate abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil des Schwermetalles Zink weitaus höher ist als derjenige von Blei und Kupfer, wobei die geringsten Verfügbarkeiten Nickel und Chrom aufweisen.

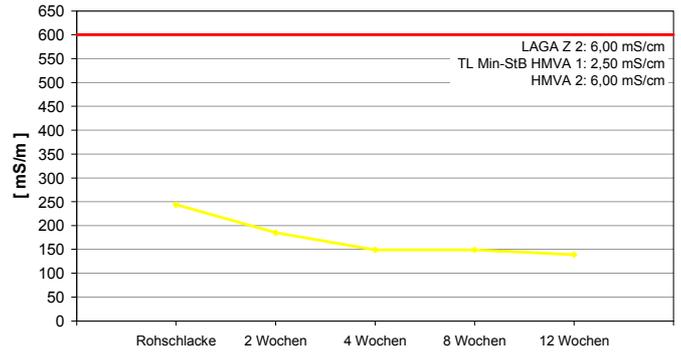
Die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnen-tests liegen für Blei und Kupfer in einem vergleichbaren Bereich, diejenigen von Zink, Kupfer, Chrom und Cadmium darunter. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit an Sulfat ist merklich höher als diejenige von Chlorid, die Ergebnisse des Kolonnen-tests zeigen die gleiche Tendenz. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungsvorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

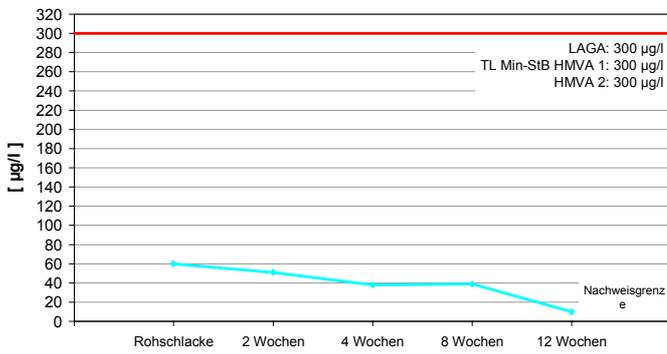
DEV S4-Test: pH-Wert



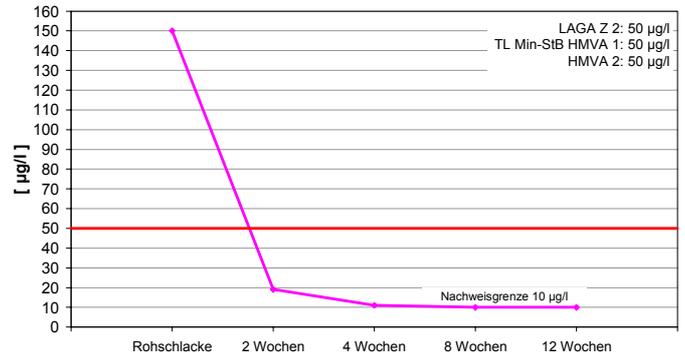
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



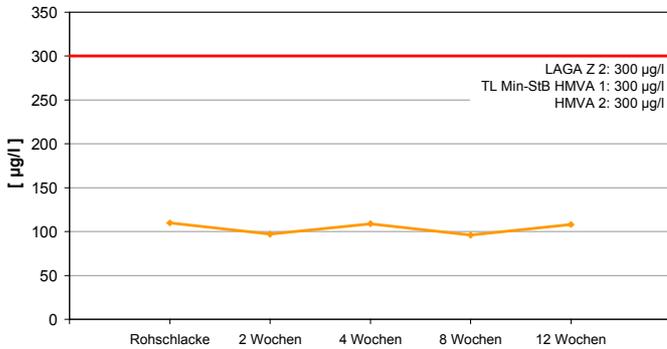
DEV S4-Test: Zink



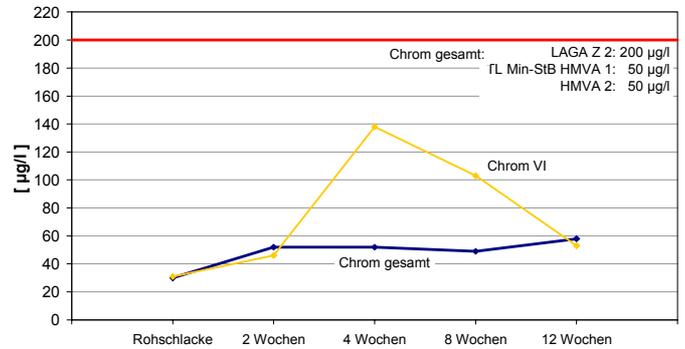
DEV S4-Test: Blei



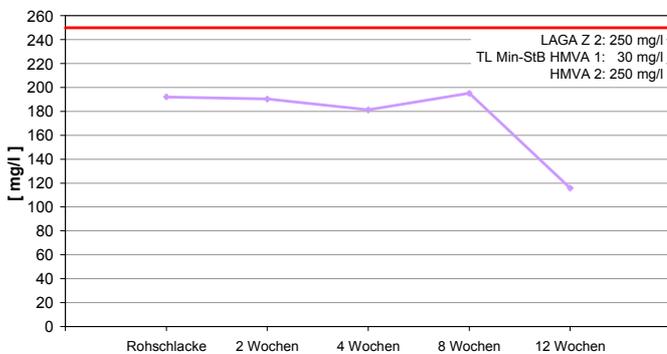
DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

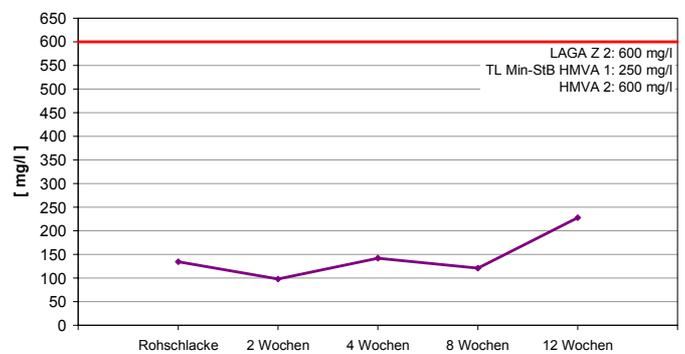
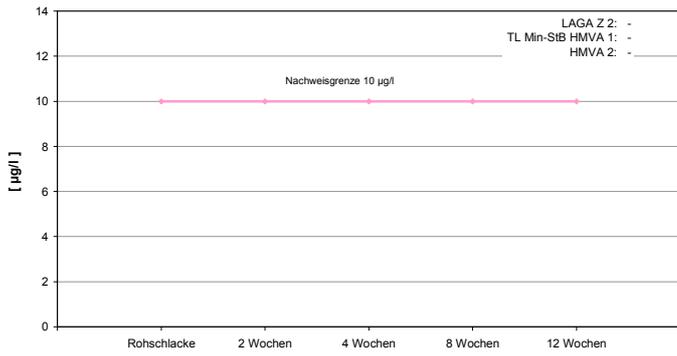


Abb. 69-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-1

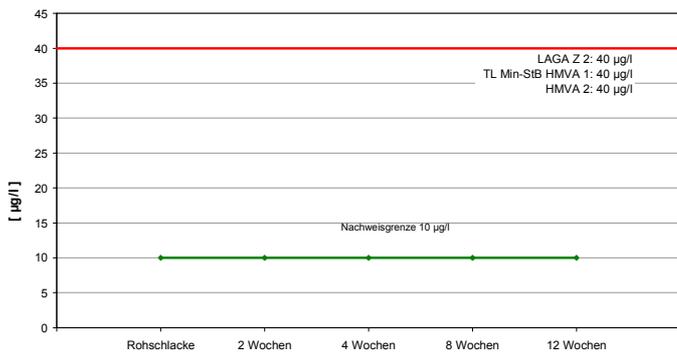
DEV S4-Test: Arsen



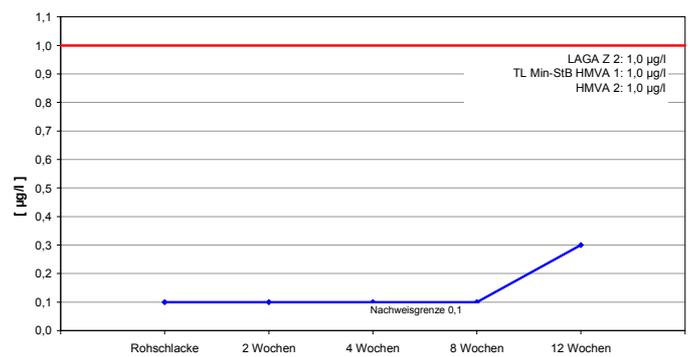
DEV S4-Test: Cadmium



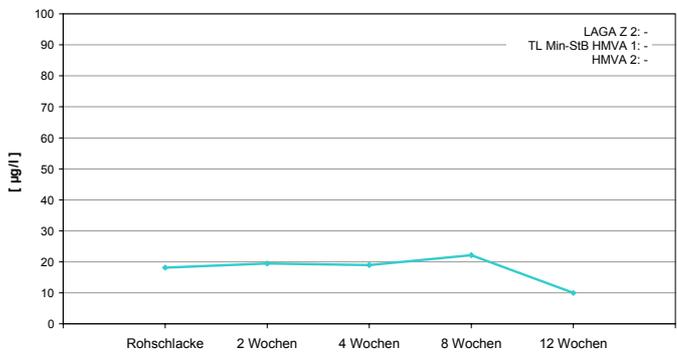
DEV S4-Test: Nickel



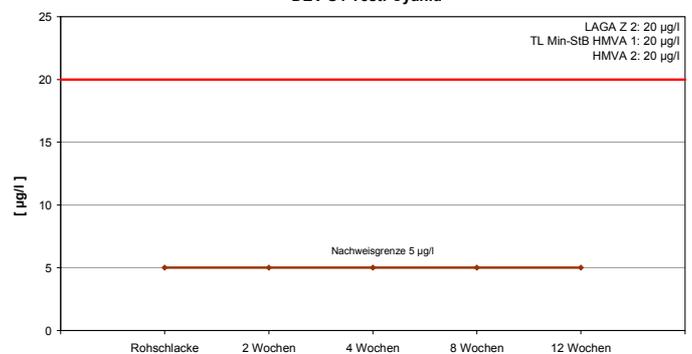
DEV S4-Test: Quecksilber



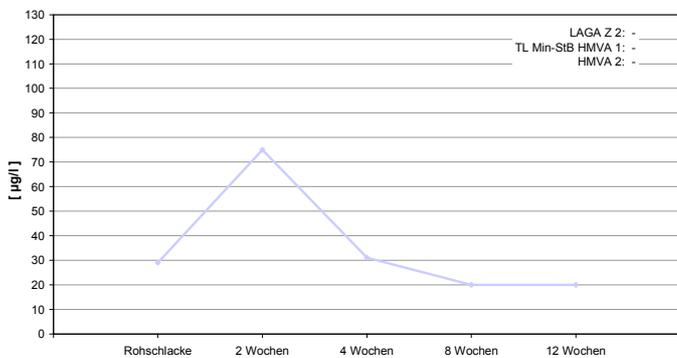
DEV S4-Test: Phenolindex



DEV S4-Test: Cyanid



DEV S4-Test: AOX



DEV S4-Test: DOC

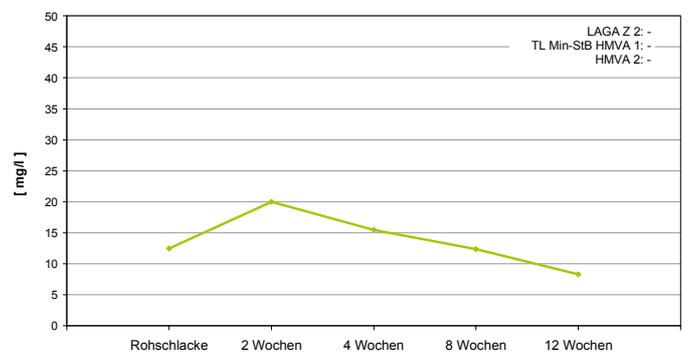


Abb. 69-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-1

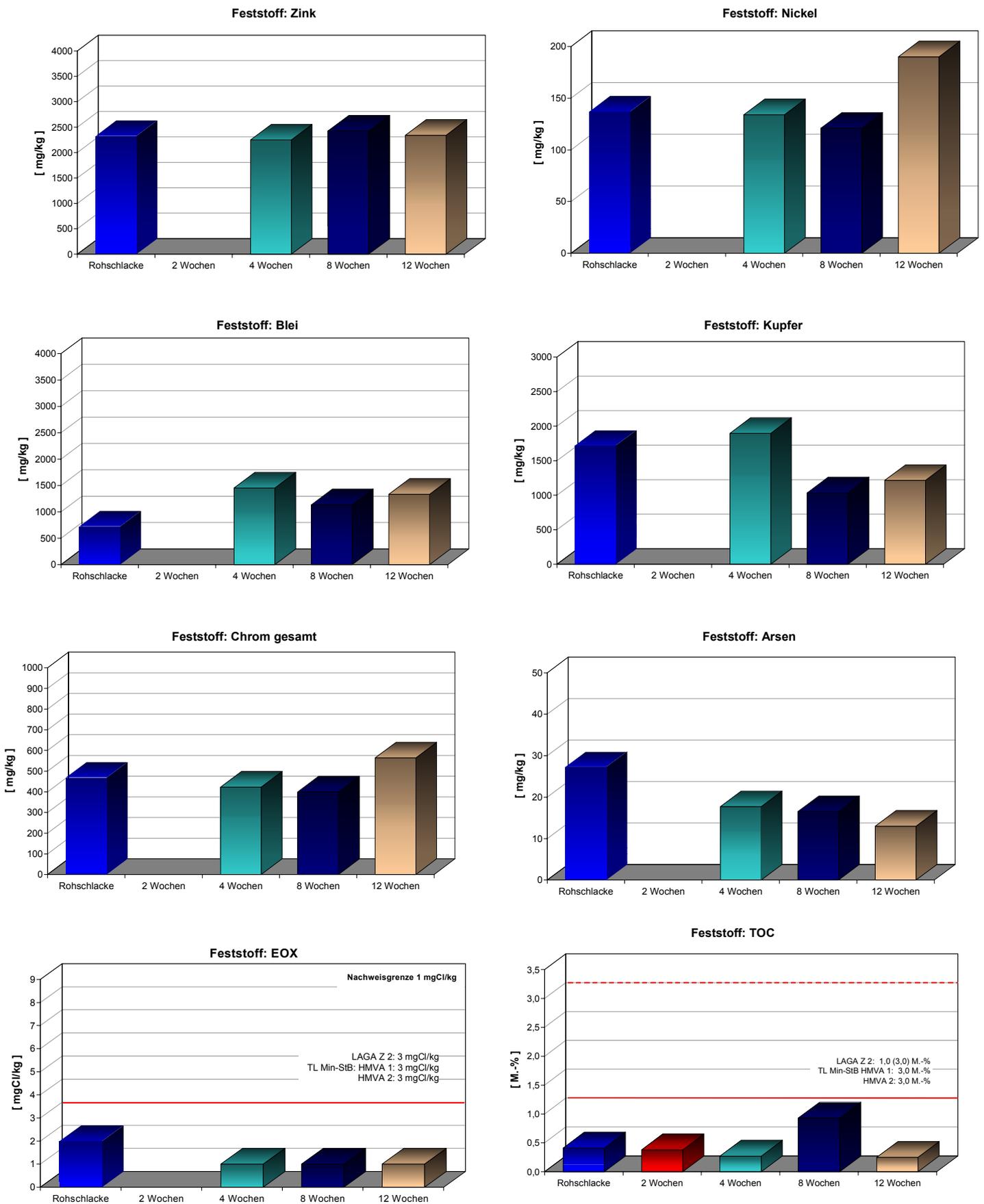
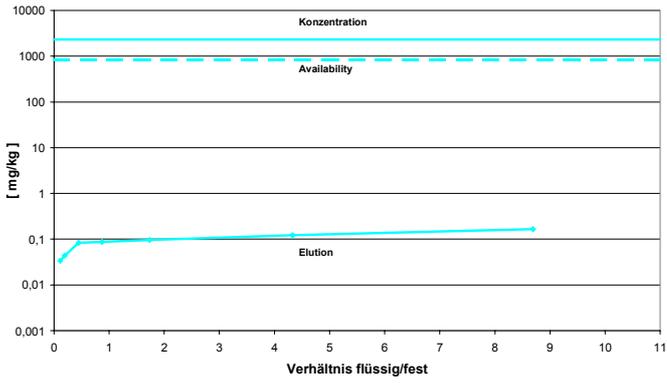
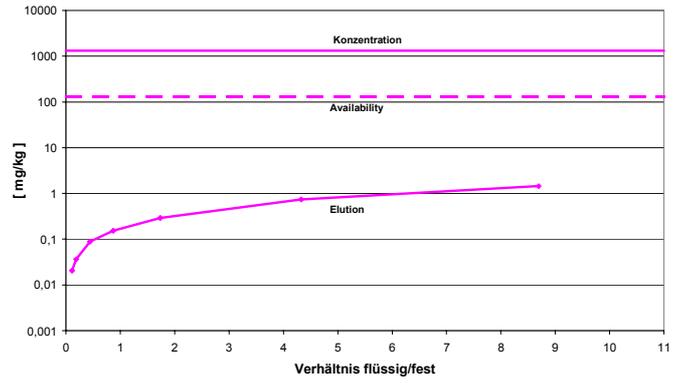


Abb. 70 Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke D-1

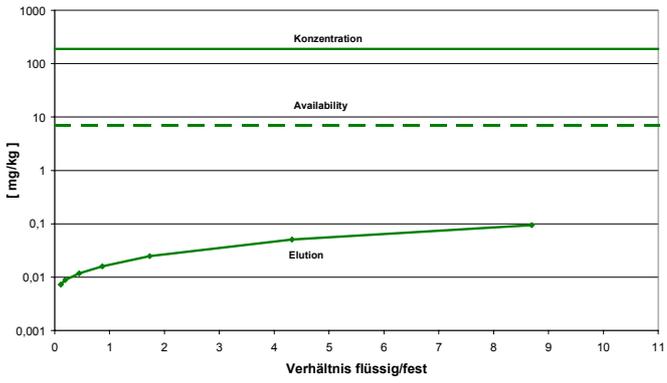
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



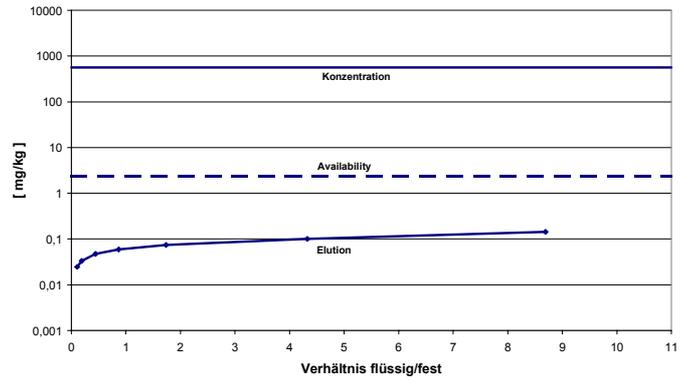
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



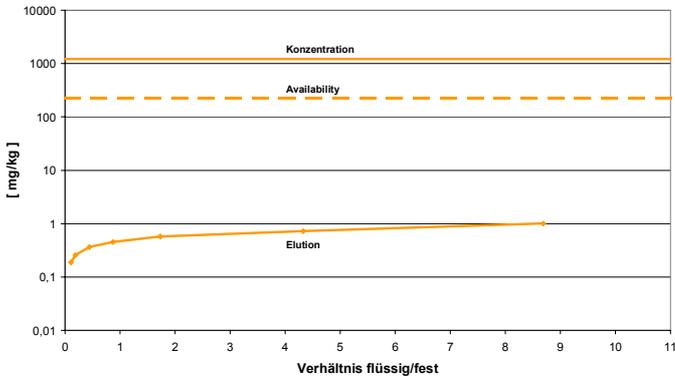
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



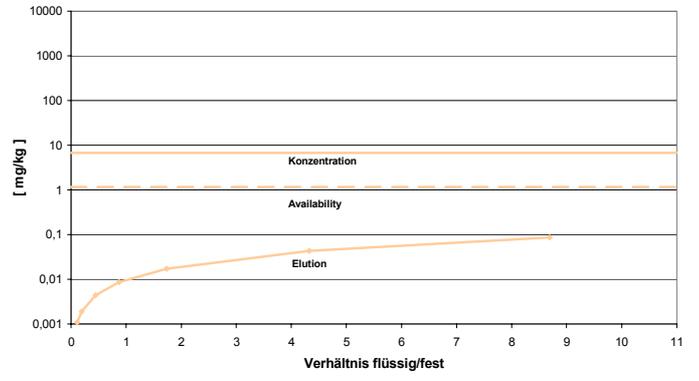
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



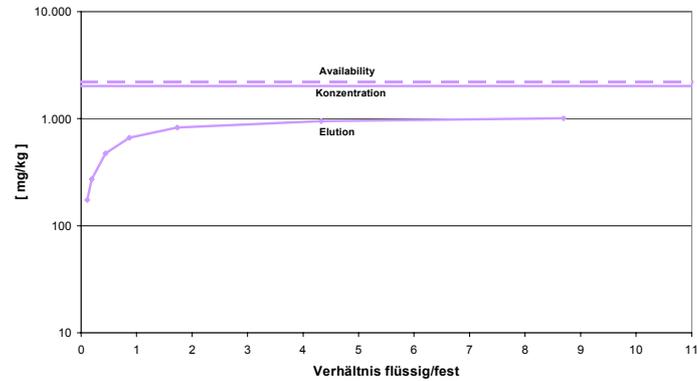
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

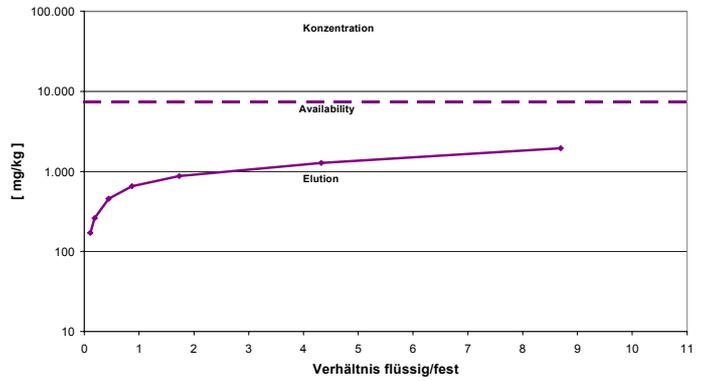


Abb. 71 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke D-1

5.2.4.1.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-1

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] beruht. Darüber hinaus erfolgen zusätzliche Untersuchungen, um weitere Verwertungsmöglichkeiten abzuschätzen. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke D-1 gehen aus Abb. 72 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Die Korngrößenverteilung der MV-Rohschlacke weist im Vergleich zu der aufbereiteten MV-Schlacke einen deutlich größeren Anteil an groben Kornfraktionen auf. Nach der Aufbereitung liegen die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacke in einem sehr engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 [2] existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 5 mm die untersuchte MV-Schlacke oberhalb der Grenzsieblinien liegt, d.h. einen zu geringen Anteil an Grobkorn aufweisen.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke D-1 geht aus Abb. 73 hervor. Ein Vergleich zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 54 bis 61 M.-%) der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ M.-% (Ist-Werte: max. 0,1 M.-%) sowie an den Metallanteil von max. 5,0 M.-% (Ist-Werte: 2,8 bis 3,8 M.-%) werden von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke liegen zwischen ca. 1,56 und 1,60 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 18 und 19 M.-% (Abb. 74). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke D-1, die sich auch in der Baupraxis zeigt.

• Wassergehalt

Die Wassergehalte liegen nach der Aufbereitung zwischen 11,4 und 14,3 M.-% (Tab. 34). Eine Reduktion der Wassergehalte während der Ablagerung erfolgt bei der MV-Schlacke D-1

nicht, wobei jedoch beachtet werden muss, dass die Lagerung der aufbereiteten MV-Schlacke im Freiland erfolgte und somit der natürliche Niederschlag direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte einwirken konnte.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,609 g/cm³ und 2,652 g/cm³ und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 34). Die große Schwankungsbreite geht auf die stark unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke (z.B. Anteile an Metallen) zurück.

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm ≤ 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 4,4 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke erfüllt.

Die Anforderung an die Gesamtkörnung gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke D-1 eingehalten (Ist-Werte: 5,3 bis 8,3 M.-%) (Tab. 34).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, sind sehr homogen und liegen zwischen 38,4 und 40,0 M.-% (Tab. 34). Die Anforderung gemäß TL Min.-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke D-1 erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Die Anteile an schlecht geformten Körnern liegen zwischen 16,2 und 24,9 M.-%, womit die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden (Tab. 34).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 1,6 und 2,2 M.-%. Anforderungen an den Glühverlust bestehen gemäß TL Min-StB 2000 nicht (Tab. 34).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke D-1 eingehalten werden. Ein Einsatz ist somit aus bautechnischer Sicht möglich.

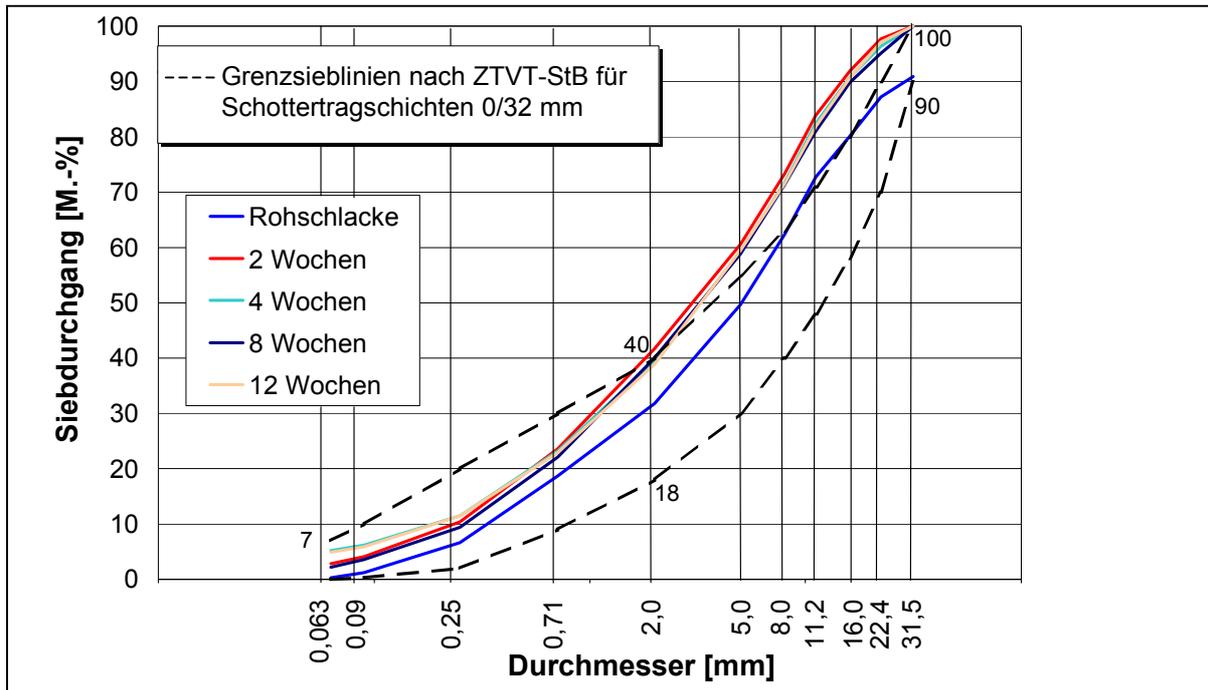


Abb. 72 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke D-1

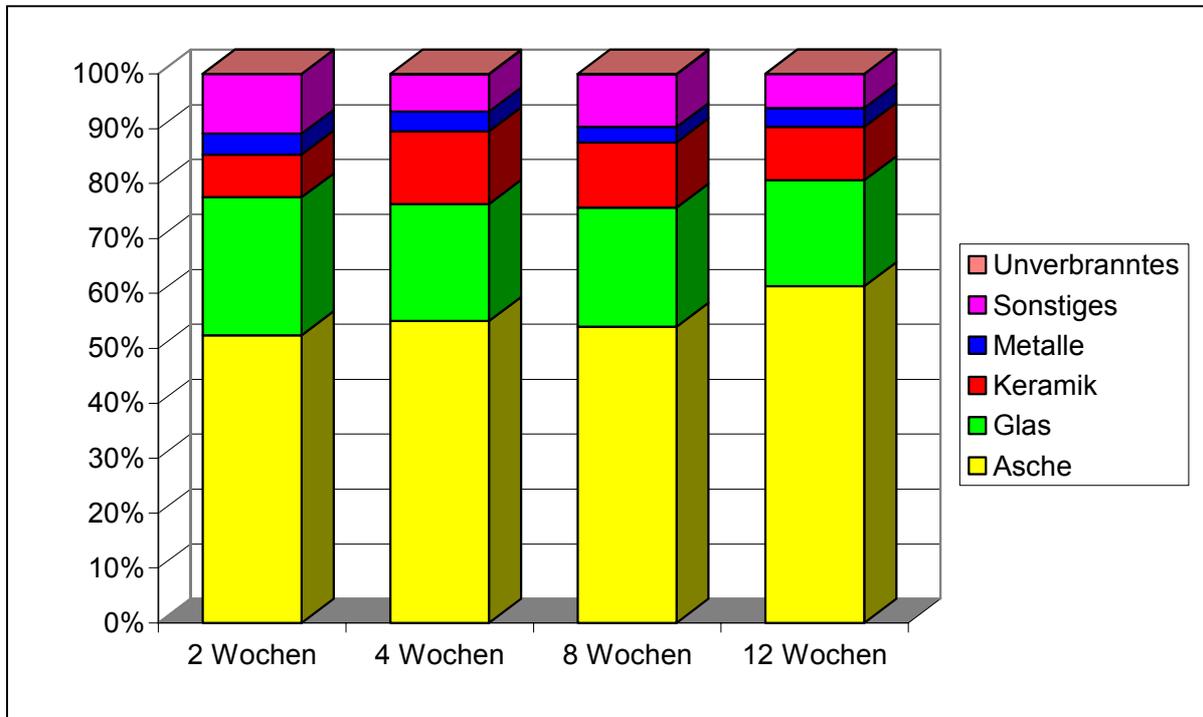


Abb. 73 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke D-1

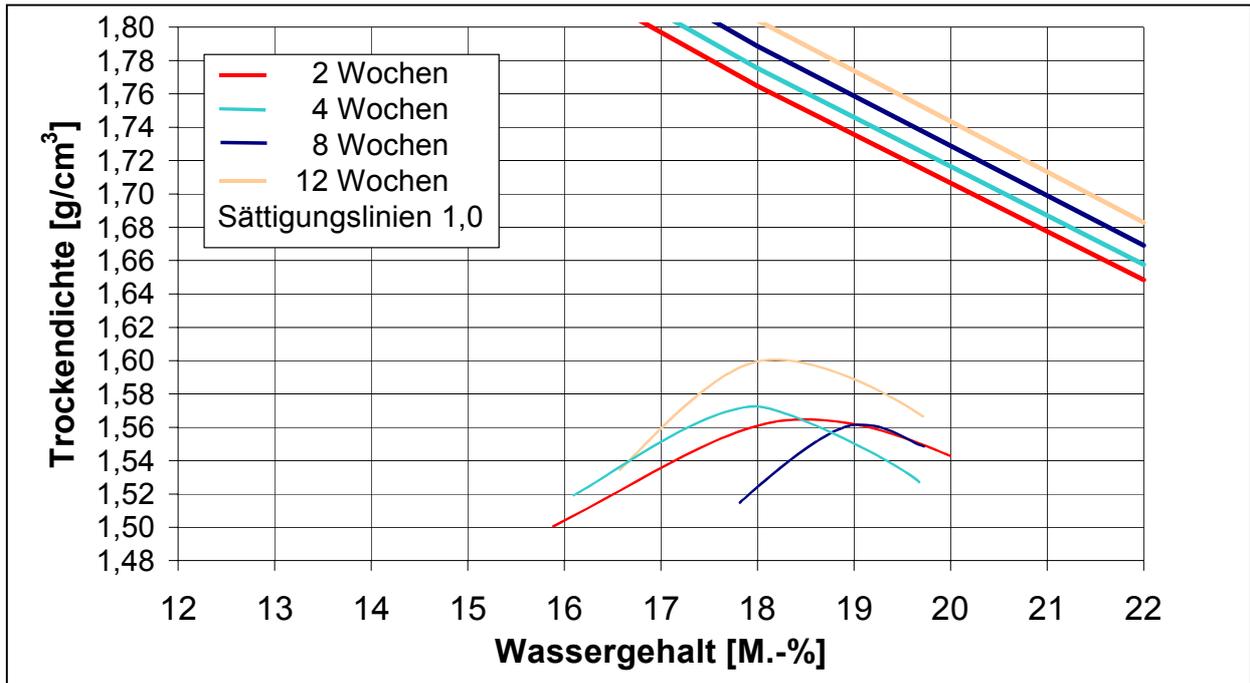


Abb. 74 Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke D-1

Tab. 34 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke D-1

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	13,5	11,4	13,5	14,3	
Rohdichte	g/cm³	2,609	2,638	2,652	2,637	
Schüttdichte	g/cm³	1,153	1,207	1,161	1,170	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16 mm)	< 5 mm < 0,71mm M.-%	6,1 2,7	6,3 3,3	7,1 3,6	4,4 2,4	3 (5) 2,5
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	7,9	8,3	6,7	5,3	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	39,6	39,8	38,4	40,0	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	24,9	24,4	16,2	19,3	50
Glühverlust	M.-%	1,7	1,6	2,2	1,6	

5.2.4.2 MV-Schlacke D-2 (Großversuch 2)

5.2.4.2.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-2

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke geht aus Tab. 35, die der Grobfraktion aus Tab. 36 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 75).

Im Feinanteil der MV-Schlacke D-2 stellen das Carbonat Calcit (CaCO_3) und teilweise das Oxid Quarz (SiO_2) die mineralogischen Hauptphasen dar. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie das Sulfate Anhydrit (CaSO_4), Gips ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$), sowie neu gebildete Glasphasen auf.

Tab. 35 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke D-2

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase/Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Hauptphase/Akzessorie	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	Gips	Spuren	
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase/Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

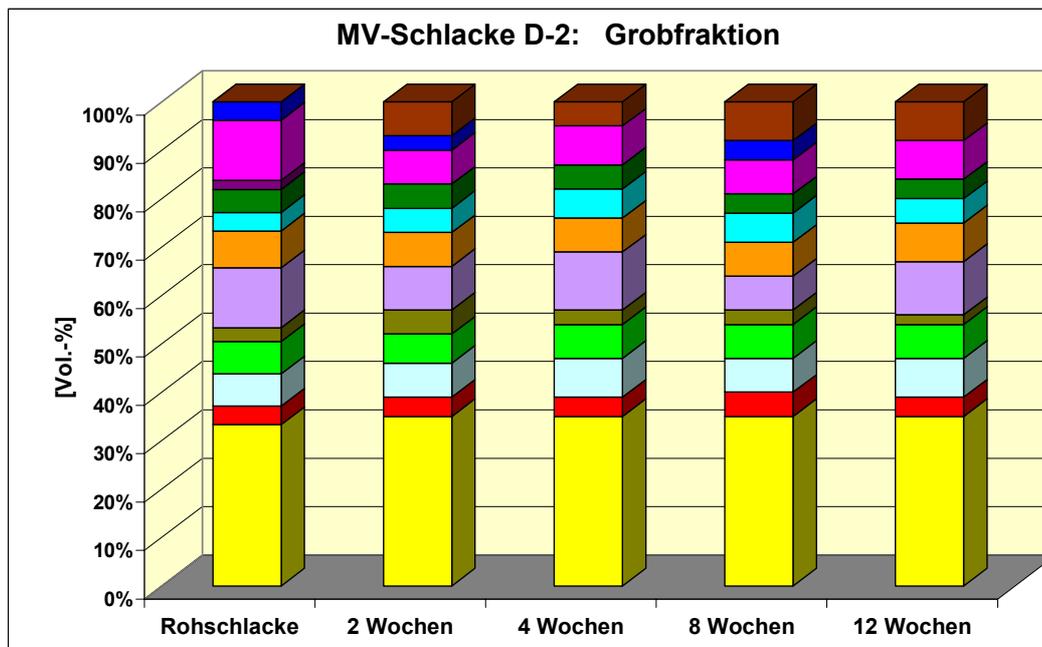
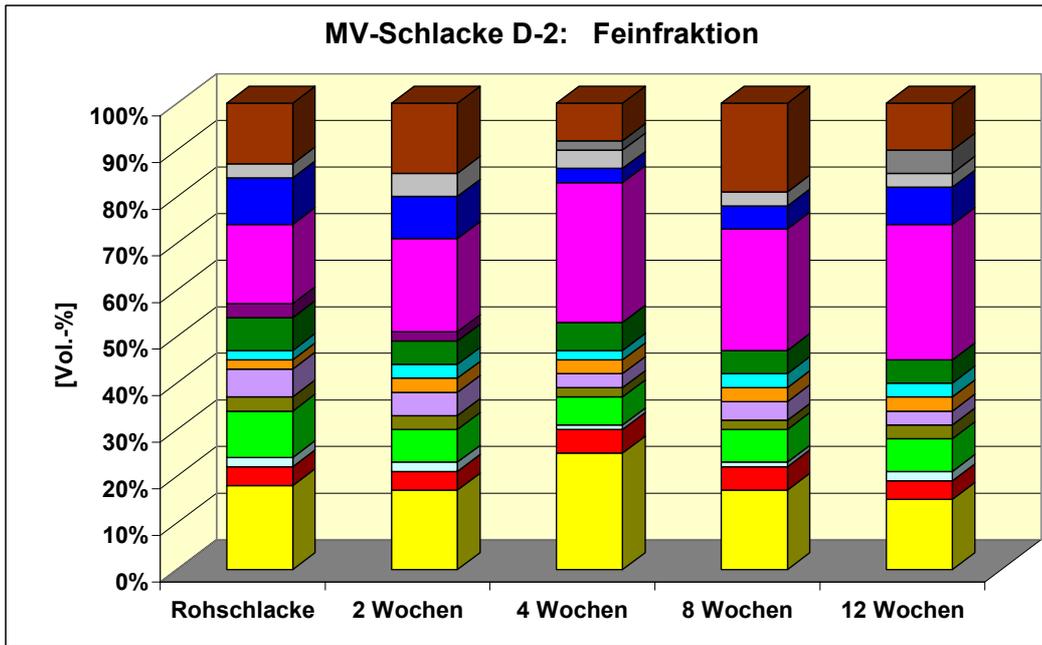
In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO₂) die alleinige Hauptphase dar, während das Silikat Kalifeldspat (KAlSi₃O₈) und teilweise das Carbonat (CaCO₃) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Plagioklas (Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si₂O₈], Gehlenit (Ca₂Al₂SiO₇), Äkermanit (Ca₂MgSi₂O₇) und Diopsid (CaMgSi₂O₆), das Carbonat Calcit (CaCO₃), das Sulfat Anhydrit (CaSO₄), die Oxide Magnetit (Fe₃O₄) und Hämatit (α-Fe₂O₃), das Phosphat Apatit (Ca₅(PO₄)₃(OH)) sowie neu gebildete Glasphasen auf.

Tab. 36 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke D-2

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi ₃ O ₈	Kalifeldspat	Nebenphase/Akzessorie	Durchläufer
(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	Plagioklas	Akzessorie	Durchläufer
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	Äkermanit	Spuren	Neubildung
CaMgSi ₂ O ₆	Diopsid	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO ₂	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe ₃ O ₄	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
α-Fe ₂ O ₃	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO ₃	Calcit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO ₄	Anhydrit	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke D-2 handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO₂) sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi₃O₈) und Plagioklas (Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si₂O₈] dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit Ca(OH)₂ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) hingegen wird sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker und das Carbonat Calcit (CaCO₃) im Laufe der Ablagerung durch die zusätzliche Reaktion von Portlandit mit dem Luft-CO₂ gebildet.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO ₂	■ Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)
■ Hämatit	α-Fe ₂ O ₃	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe ₃ O ₄	■ Portlandit	Ca(OH) ₂
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	■ Calcit	CaCO ₃
■ Äkermanit	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi ₃ O ₈	■ Anhydrit	CaSO ₄
■ Plagioklas	(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	■ Gips	CaSO ₄ ·2 H ₂ O
■ Diopsid	CaMgSi ₂ O ₆	■ Ettringit	Ca ₆ Al ₂ [(OH) ₂ SO ₄] ₃ ·24H ₂ O
■ <u>neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 75 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke D-2

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke D-2 folgendes festgestellt (Abb. 76):

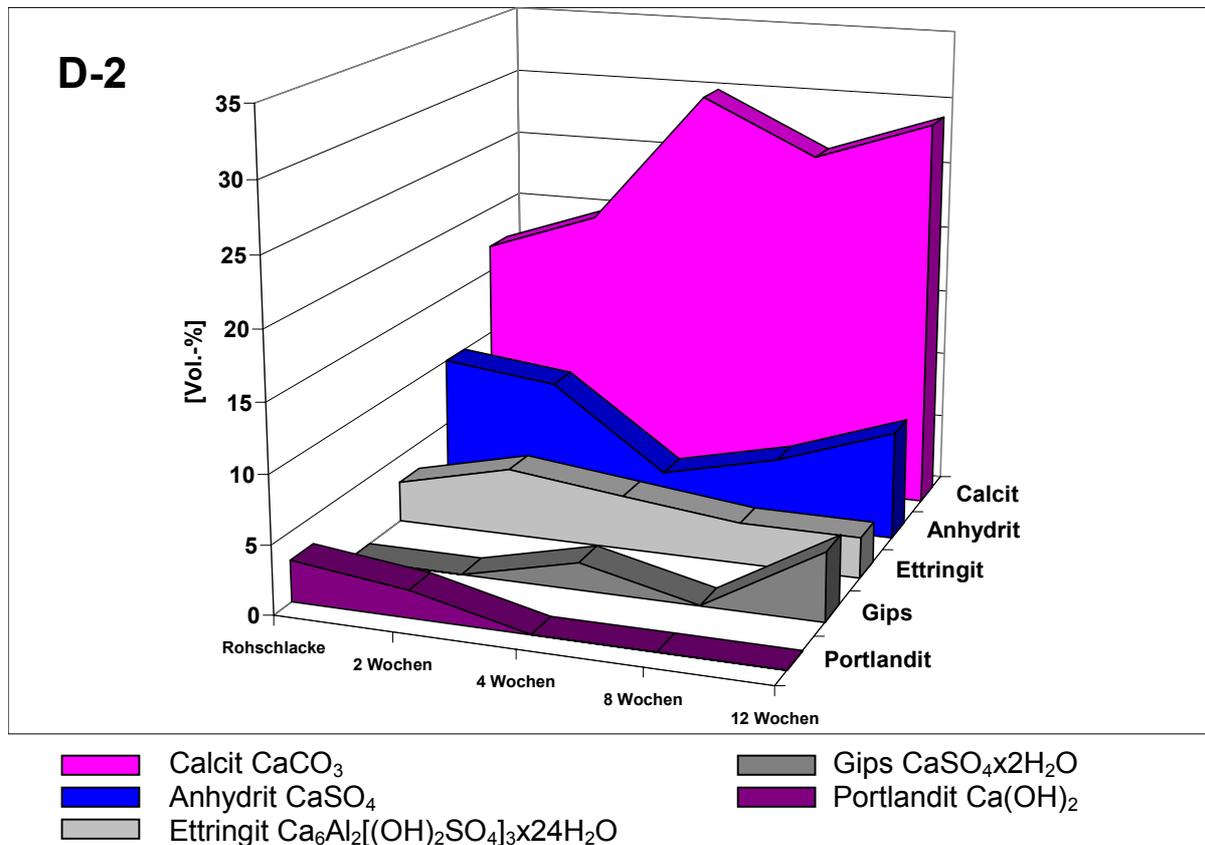


Abb. 76 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke D-2

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Schlacke D-2 eine deutliche Abnahme des Portlandits ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), wobei nach einer Ablagerungszeit von 4 Wochen kein Portlandit im Mineralbestand mehr nachgewiesen werden kann. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO_3) gesteuert wird, weist während der Ablagerungszeit ausgeprägte Alterationsreaktionen auf, die mit einer starken Zunahme des Calcits verbunden sind. Die MV-Schlacke D-2 besitzt nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen sehr hohe Calcitgehalte und weist demnach ein ausgeprägtes Carbonatisierungsvermögen auf.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO_4), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, tritt in der MV-Rohschlacke in deutlichen Mengen auf. Während einer Ablagerungszeit von vier Wochen nehmen die Gehalte zwar erheblich ab, nehmen allerdings danach wieder verstärkt, durch eine Neubildung von Anhydrit, zu. Die Sulfatreaktionen sind somit auch nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen nicht ausreichend abgeschlossen und die MV-Schlacke D-2 kann nicht als raumbeständig eingestuft werden.
- Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) ist bereits in der MV-Rohschlacke vorhanden und verbleibt während der Ablagerung auf einem vergleichbaren Niveau. Nach einer Ablagerungszeit von 8 Wochen wird ein deutlicher Anstieg von Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) festgestellt.

Bei der MV-Schlacke D-2 handelt es sich somit um eine MV-Schlacke, die nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen ein ausgeprägtes Carbonatisierungsvermögen aufweist, in der allerdings die Sulfatreaktionen noch andauern. Zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung ist die MV-Schlacke D-2 noch reaktiv und kann somit, im mineralogischen Sinne, nicht als ausreichend raumbeständig eingestuft werden.

5.2.4.2.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-2

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke D-2 zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 77-a und 77-b):

- Die pH-Werte schwanken während der Ablagerungszeit zwischen pH 12,7 und 10,8, wobei bei der 2 Wochen abgelagerten MV-Schlacke ein auffällig niedriger Wert von pH 8 ermittelt wurde. Die pH-Werte liegen jedoch innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit fallen während der Ablagerungszeit von 4 Wochen von ca. 600 mS/m auf 160 mS/m sehr stark ab und betragen in der 12 Wochen abgelagerten MV-Schlacke noch 110 mS/m. Sie liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Die Zinkwerte fallen nach zwei Wochen Ablagerungszeit von ca. 300 µg/l auf 20 µg/l und verbleiben danach auf diesem Niveau. Sie unterschreiten die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l deutlich.
- Die Bleiwerte der MV-Schlacke nehmen in den DEVS4-Eluaten nach einer Ablagerungszeit von 2 Wochen von ca. 2.400 µg/l auf Werte unterhalb der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l ab. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.
- Die Kupferwerte schwanken während der Ablagerung in starkem Maße und weisen Werte zwischen ca. 1.600 µg/l und 100 µg/l auf. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke D-2 dennoch eingehalten.
- Die Chromgehalte (gesamt) liegen in einem Bereich von ca. 20 bis 40 µg/l und liegen somit unterhalb der Zuordnungswerte der LAGA von 200 µg/l und dem Grenzwert der TL Min-StB 2000 von 50 µg/l.
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Nickel und Quecksilber liegen nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid fallen während der dreimonatigen Alterungszeit von ca. 240 mg/l auf 70 mg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l werden unterschritten.

- Die Sulfatwerte schwanken zwischen ca. 250 und 480 mg/l und zeigen während der Ablagerung keine Tendenz. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l werden eingehalten.

Eine Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse [12] zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 [2] von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten werden und somit aus Sicht der Umweltverträglichkeit eine Verwertung entsprechend den Vorgaben der Regelwerke erfolgen kann.

• Chemische Untersuchungen im Feststoff

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 78 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke D-2 eingehalten.

• Langzeitstabilität

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 79 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

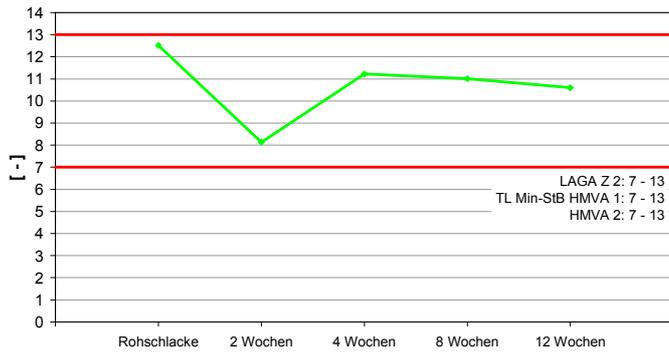
Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnen-tests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnen-tests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle, der Chloride und Sulfate abgeschätzt werden.

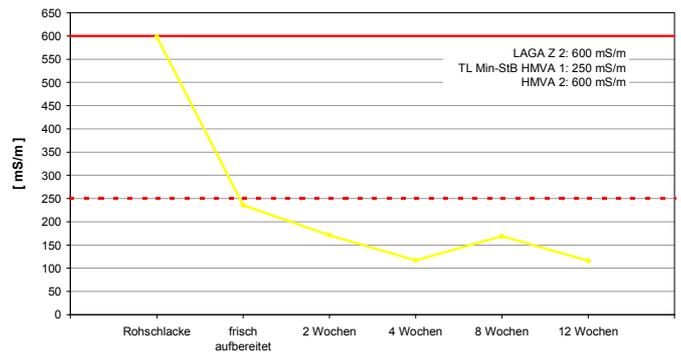
Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil der betrachteten Schwermetalle von Zink erreicht wird. Blei und Kupfer zeigen ebenfalls höhere Werte im Vergleich zu Nickel, Chrom und Cadmium. Die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnen-tests liegen jedoch in einer vergleichbaren Größenordnung, mit Ausnahme des etwas erhöhten Gehaltes an Kupfer. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit an Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid, allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnen-tests, dass die eluierbaren Mengen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungs Vorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

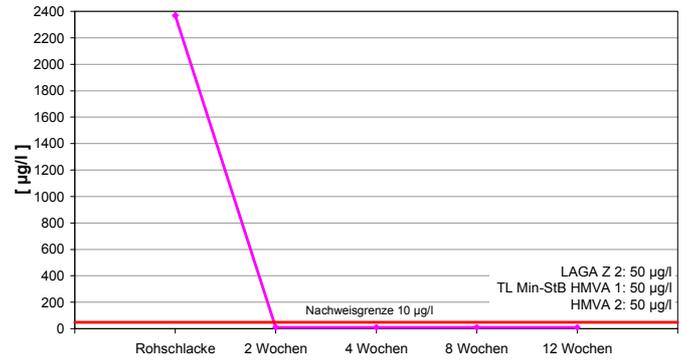
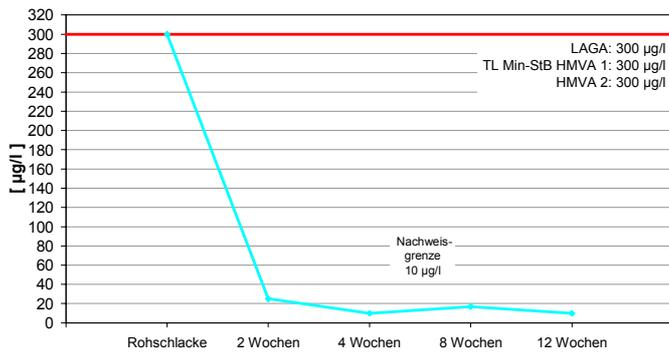
DEV S4-Test: pH-Wert



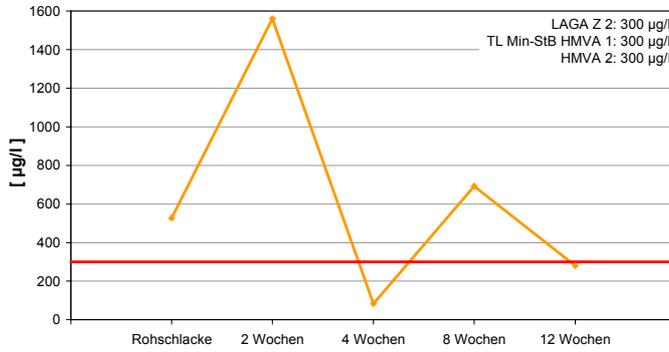
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



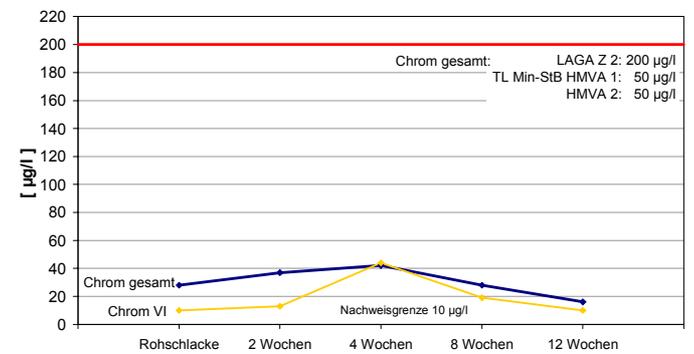
DEV S4-Test: Zink



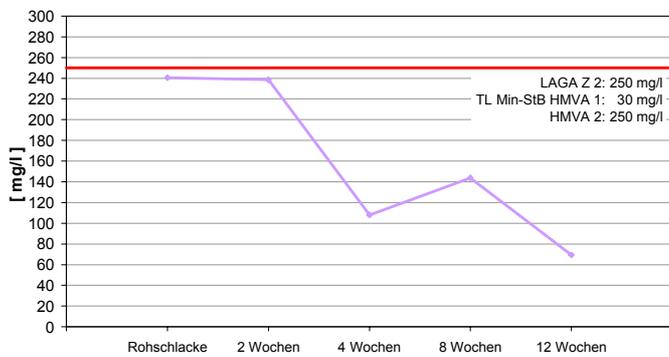
DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

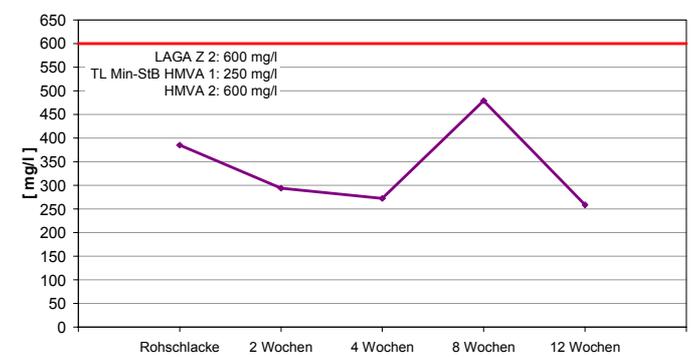


Abb. 77-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-2

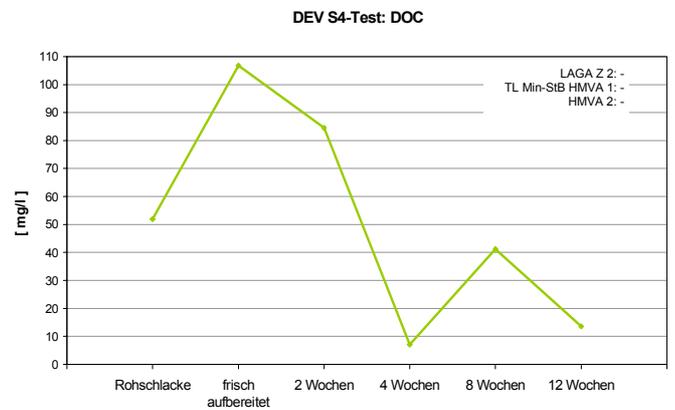
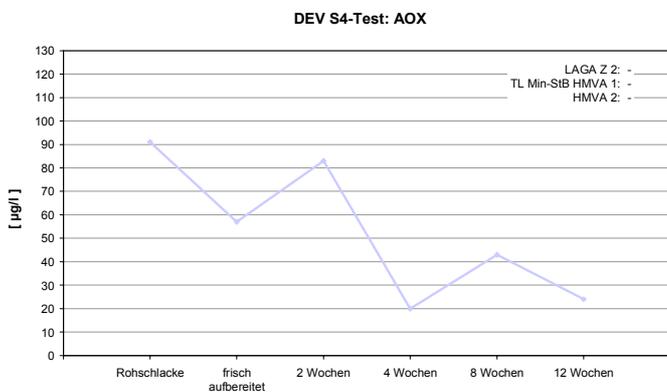
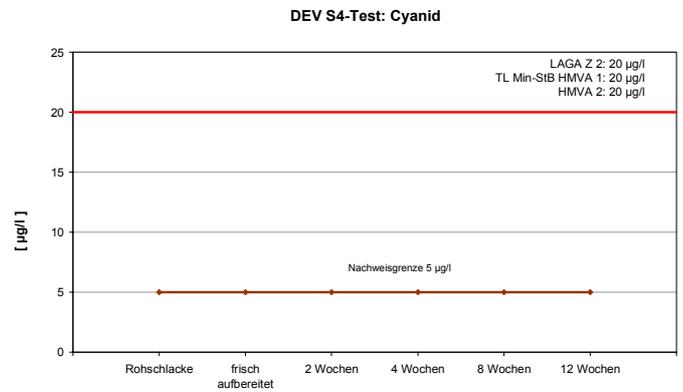
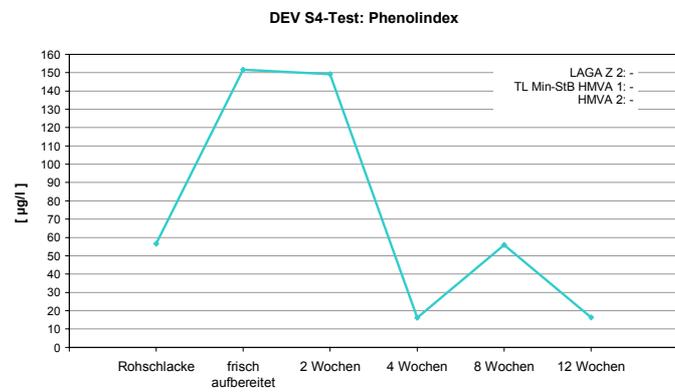
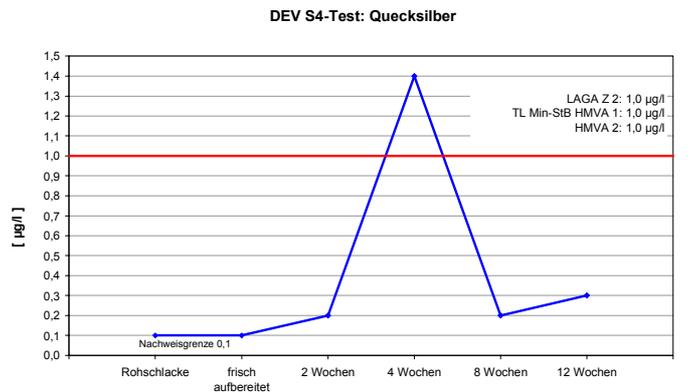
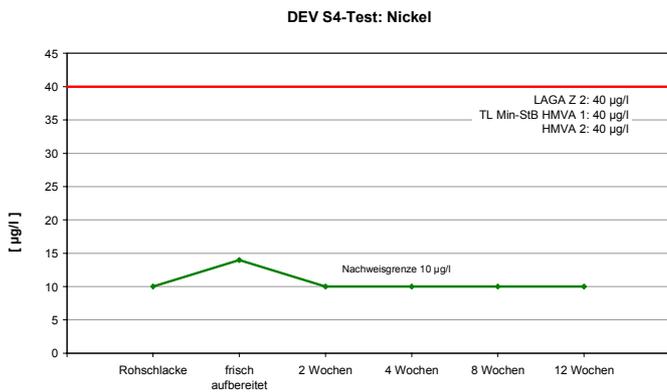
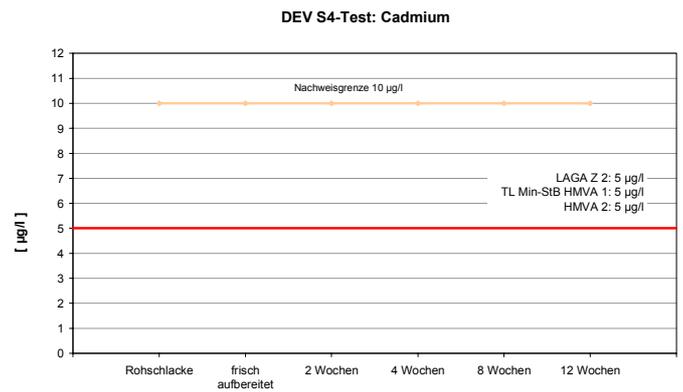
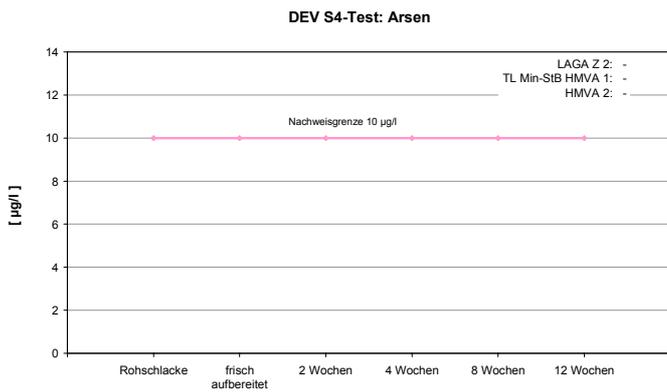


Abb. 77-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-2

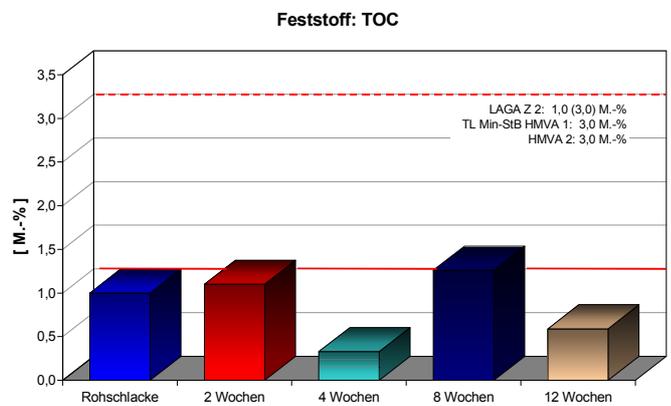
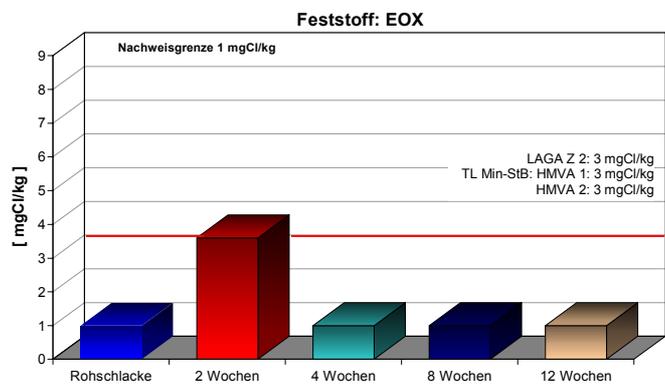
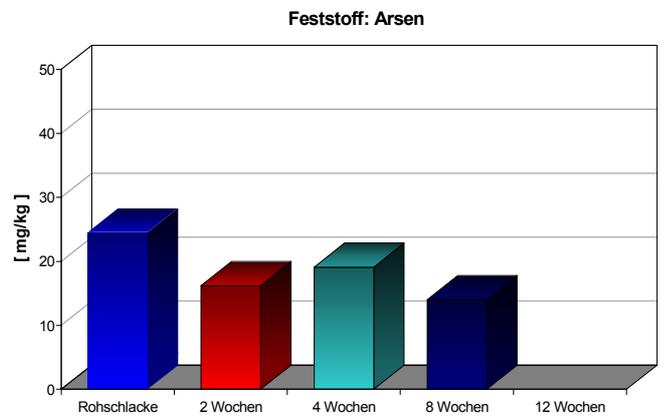
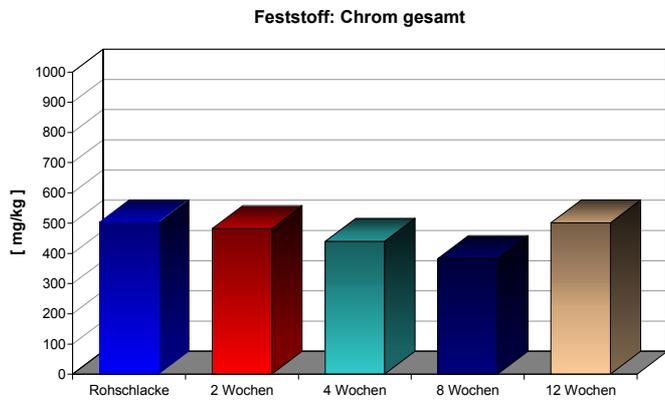
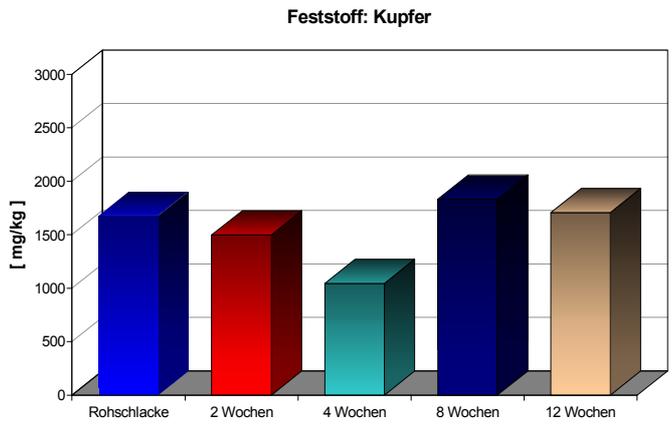
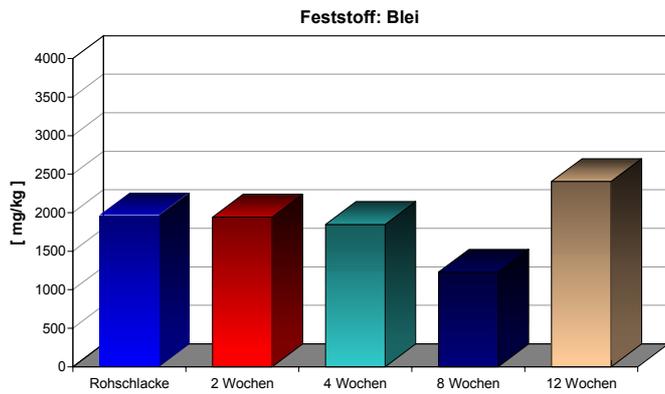
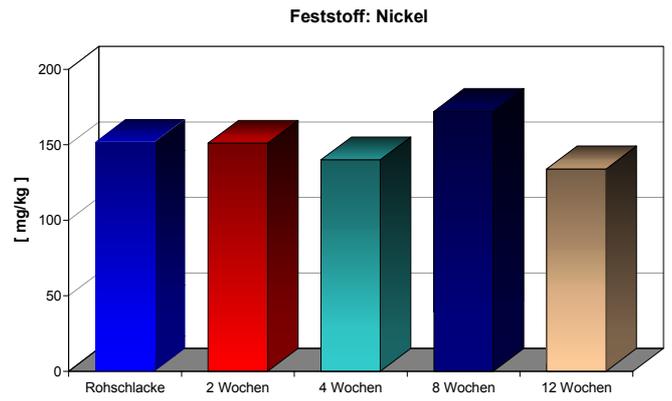
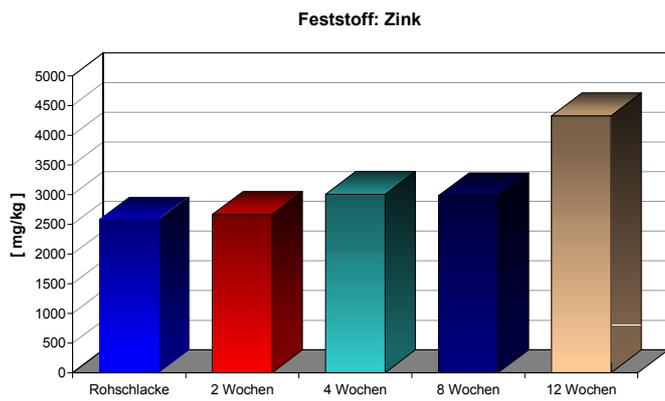
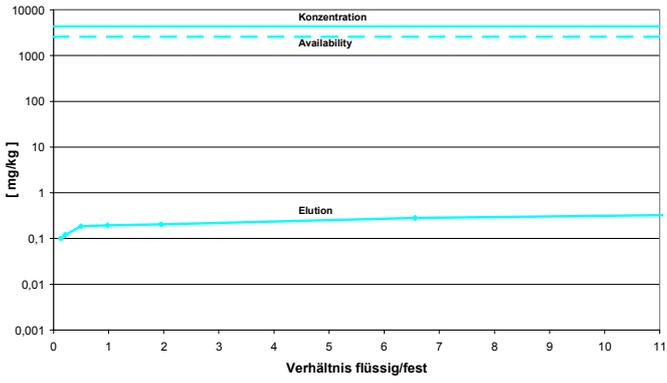
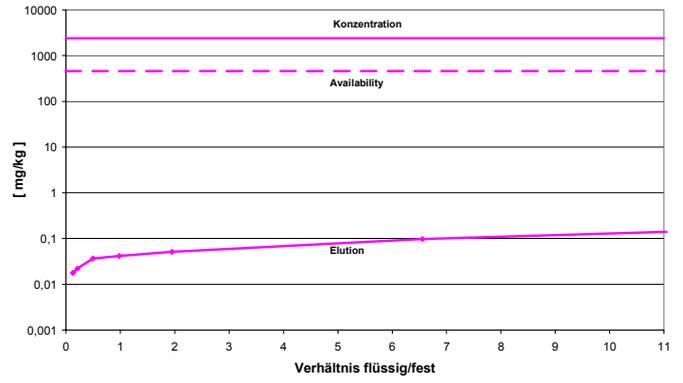


Abb. 78 Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke D-2

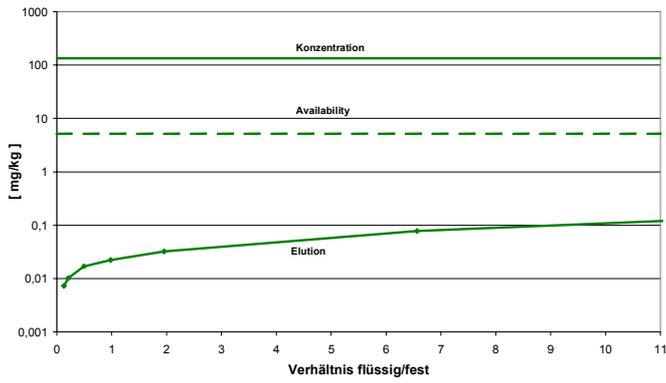
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



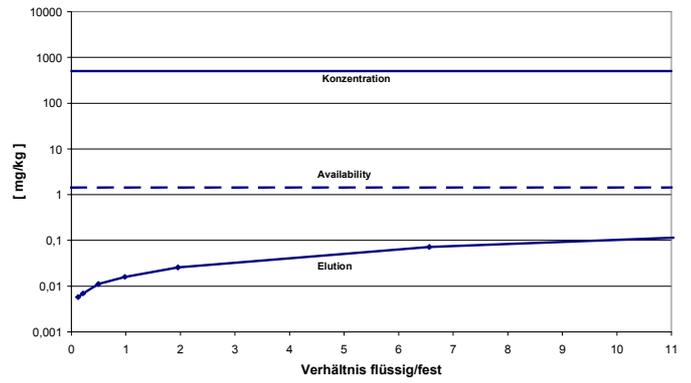
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



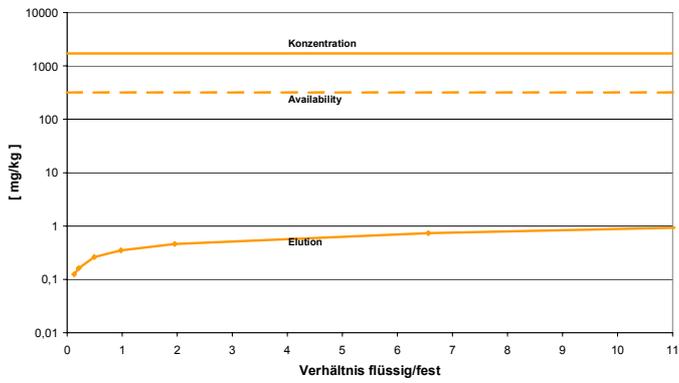
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



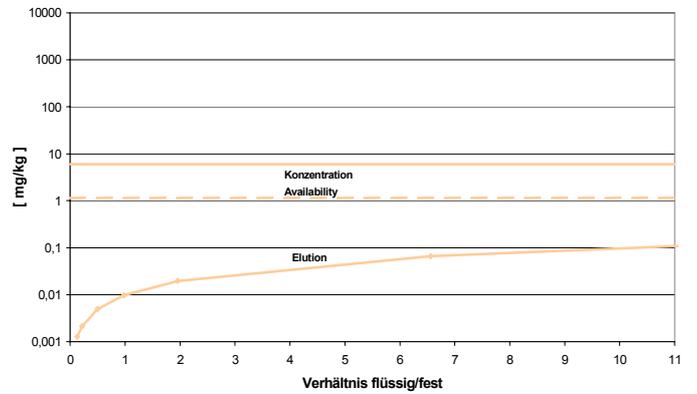
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



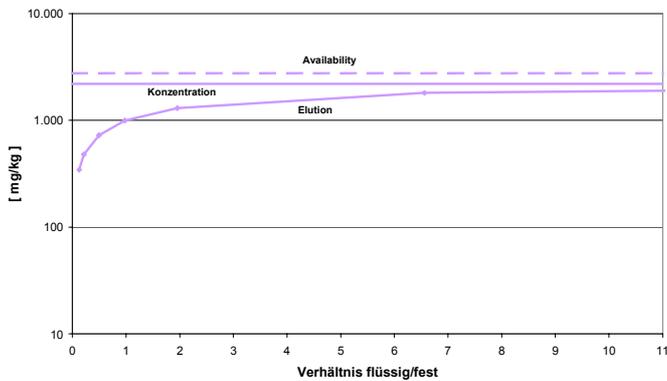
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

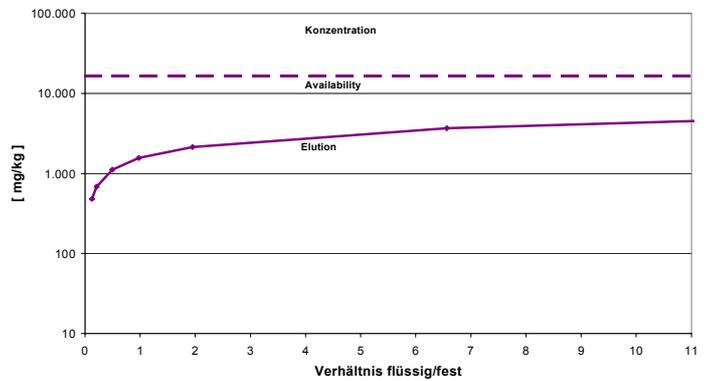


Abb. 79 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke D-2

5.2.4.2.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-2

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] erfolgt. Darüber hinaus erfolgen zusätzliche Untersuchungen, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacke abzuschätzen. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke D-2 geht aus Abb. 80 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Die Korngrößenverteilung der MV-Rohschlacke sowie die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacke liegen in einem sehr engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 5 mm die untersuchte MV-Schlacke oberhalb der Grenzsieblinien liegen, d.h. einen zu geringen Anteil an Grobkorn aufweisen.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke D-2 geht aus Abb. 81 hervor. Ein Vergleich der stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 51,8 bis 62,8 M.-%) der stofflichen Zusammensetzung.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ M.-% werden mit Ausnahme der MV-Rohschlacke (Ist-Wert: 1,9 M.-%) eingehalten (Ist-Werte: 0,1 bis 0,6 M.-%). Die Metallanteile liegen zwischen 1,9 und 3,8 M.-% und liegen somit unterhalb dem Grenzwert von 5,0 M.-%.

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke liegen zwischen ca. 1,57 und 1,62 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 18 und 19 M.-% (Abb. 82). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke D-2, die sich auch in der Baupraxis zeigt.

• Wassergehalt

Die festgestellten Wassergehalte der MV-Schlacke D-2 schwanken nach der Aufbereitung zwischen 14,3 und 18,1 M.-% (Tab. 37). Eine Reduktion der Wassergehalte während der Ablagerung erfolgt bei der MV-Schlacke D-2 nicht, wobei jedoch beachtet werden muss,

dass die Lagerung der aufbereiteten MV-Schlacken im Freiland erfolgte, und somit der natürliche Niederschlag direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte einwirken konnte.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,606 g/cm³ und 2,663 g/cm³ und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 37). Die große Schwankungsbreite geht auf die stark unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke (z.B. Anteile an Metallen) zurück.

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm ≤ 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 4,3 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke erfüllt.

Die Anforderung an die Gesamtkörnung gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke D-2 eingehalten (Ist-Werte: 5,2 bis 7,6 M.-%) (Tab. 37).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, sind sehr homogen und liegen zwischen 38,3 und 39,7 M.-% (Tab. 37). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke D-2 erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Die Anteile an schlecht geformten Körnern liegen zwischen 15,7 und 20,1 M.-%. Die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% werden erfüllt (Tab. 37).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 1,7 und 2,3 M.-%. Anforderungen an den Parameter Glühverlust gemäß TL Min-StB 2000 bestehen nicht (Tab. 37).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate alten MV-Schlacke D-2 eingehalten werden. Ein Einsatz ist somit aus bautechnischer Sicht möglich.

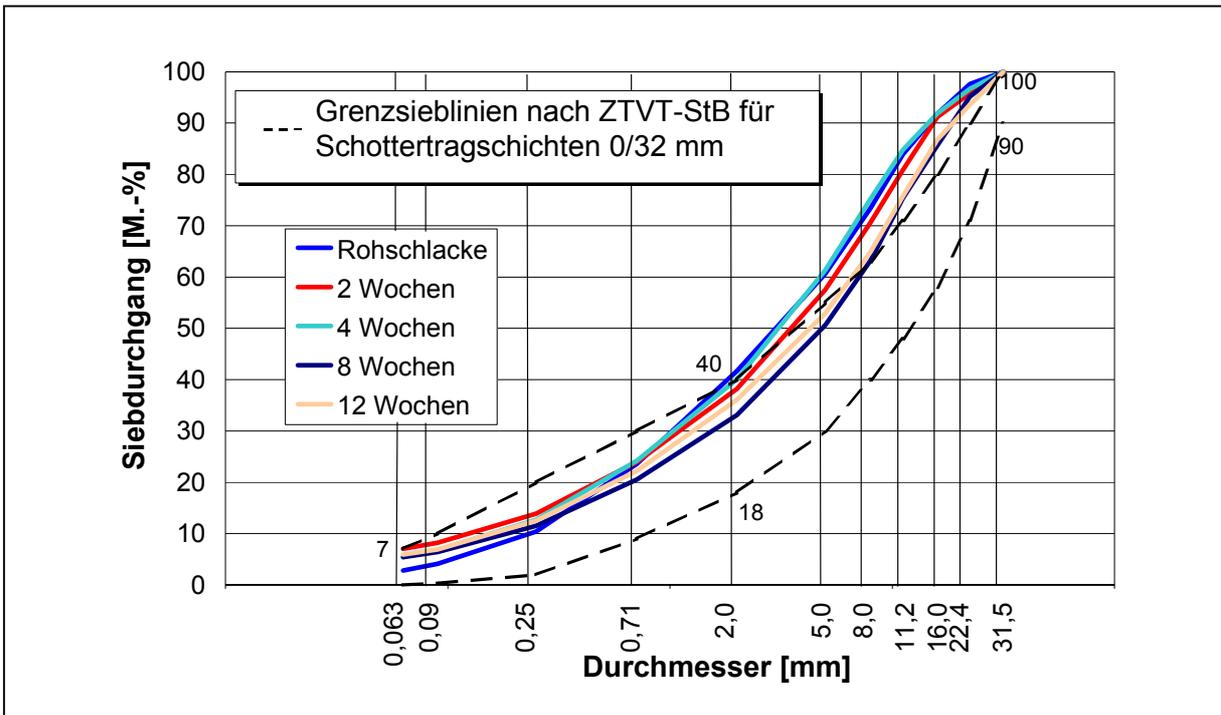


Abb. 80 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke D-2

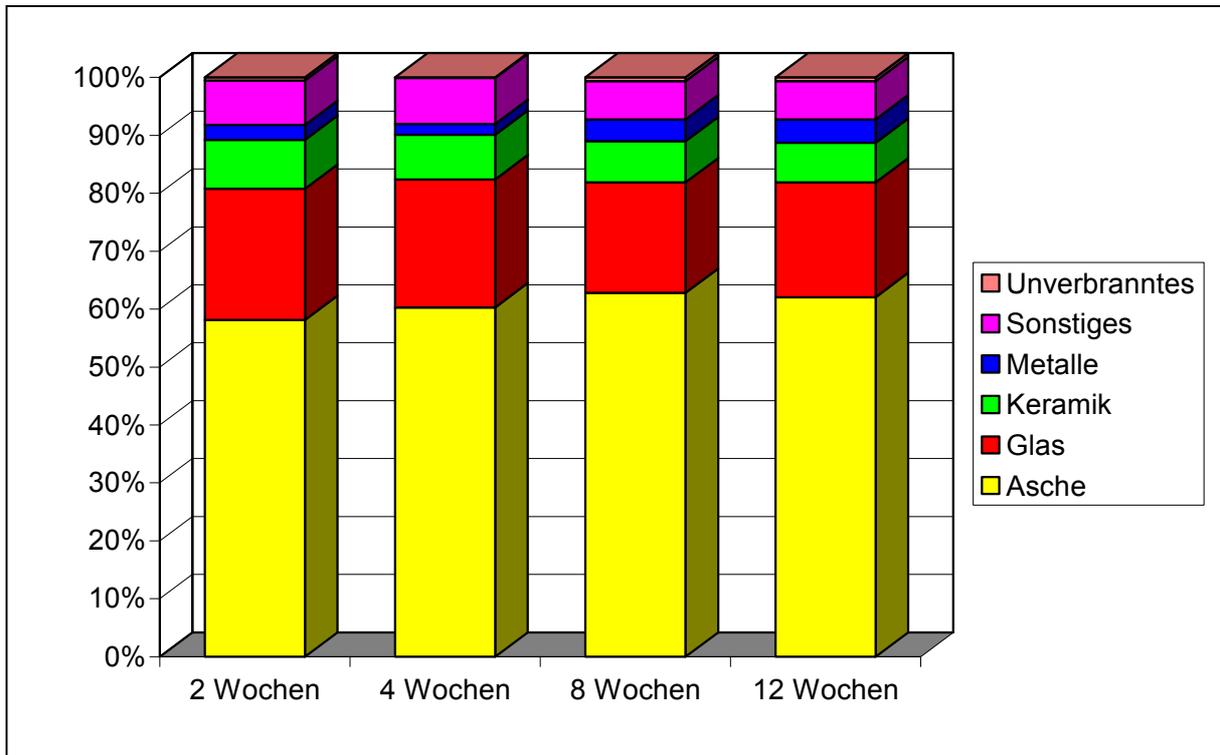


Abb. 81 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke D-2

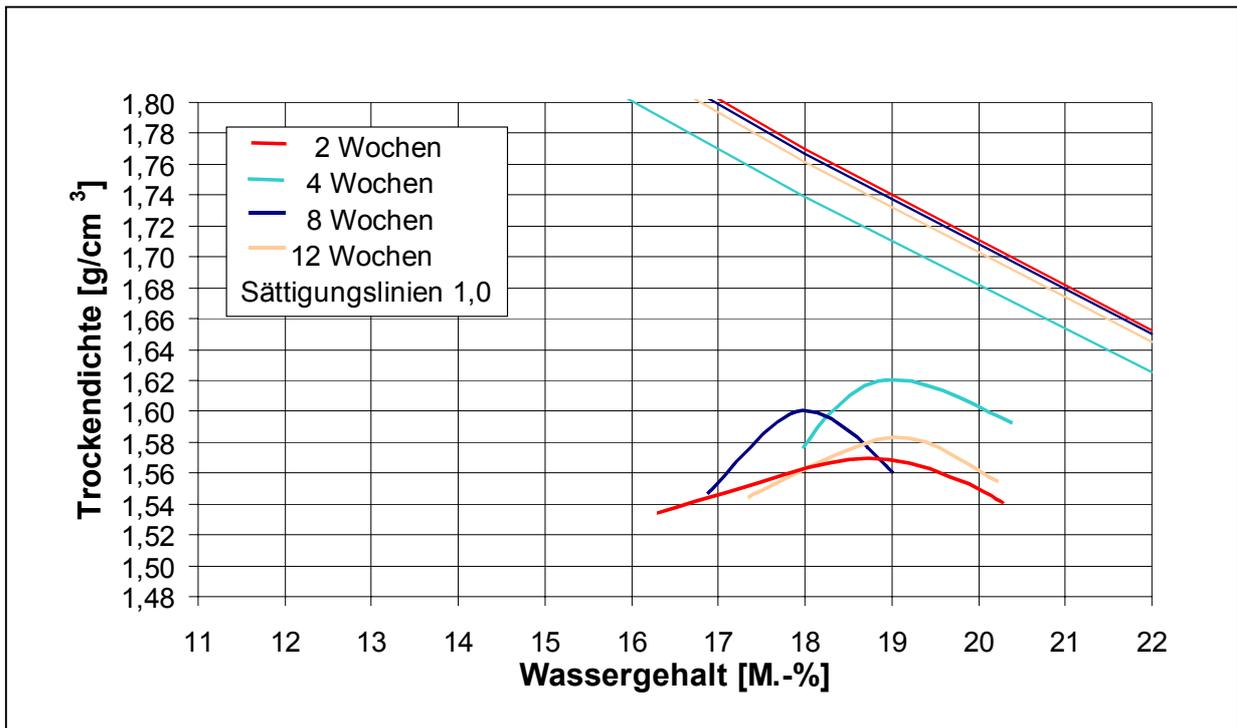


Abb. 82 Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke D-2

Tab. 37 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke D-2

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	15,7	16,0	14,3	18,1	
Rohdichte	g/cm ³	2,606	2,663	2,653	2,655	
Schüttdichte	g/cm ³	1,075	1,227	1,145	1,105	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16 mm)	< 5mm < 0,71 mm M.-%	6,4 2,2	6,9 3,9	5,0 2,6	4,3 1,8	3 (5) 2,5
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	7,6	7,3	5,2	7,2	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	38,8	39,7	38,3	38,7	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	20,1	18,8	15,7	18,9	50
Glühverlust	M.-%	2,2	1,7	2,2	2,3	

5.2.4.3 MV-Schlacke D-3 (Großversuch 3)

5.2.4.3.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacken D-3

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacken geht aus Tab. 38, die der Grobfraktion aus Tab. 39 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 83).

Im Feinanteil der MV-Schlacke stellen das Carbonat Calcit (CaCO_3) und teilweise das Oxid Quarz (SiO_2) die mineralogischen Hauptphasen dar. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie die Sulfate Anhydrit (CaSO_4) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) auf. Neu gebildete Glasphasen werden im Mineralbestand vorwiegend als Nebenphase und als Akzessorie angetroffen.

Tab. 38 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke D-3

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase/Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Spuren/Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Hauptphase/Nebenphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase/Akze./Spuren	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

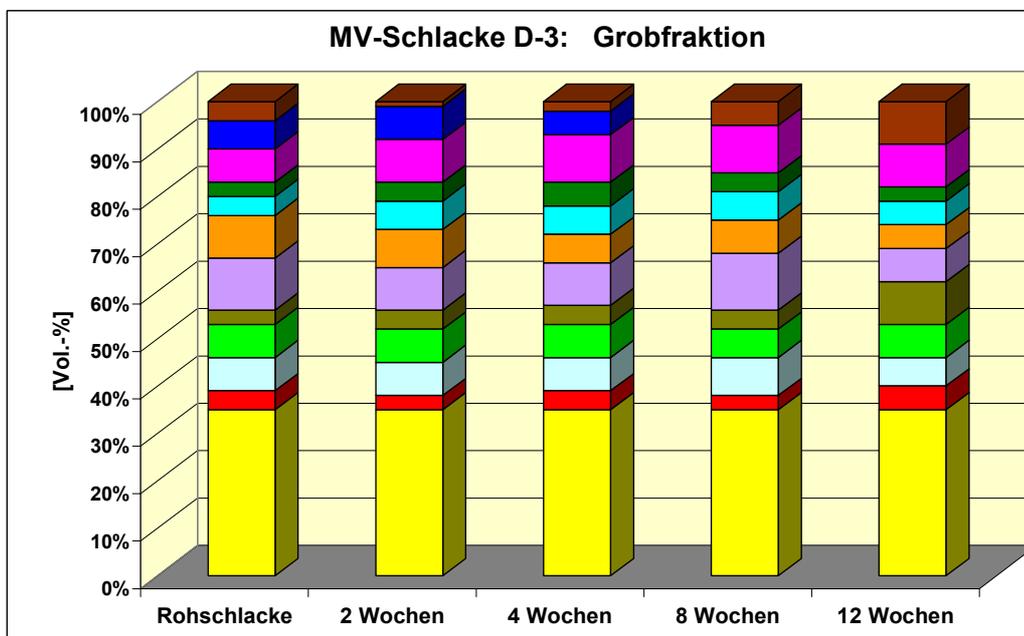
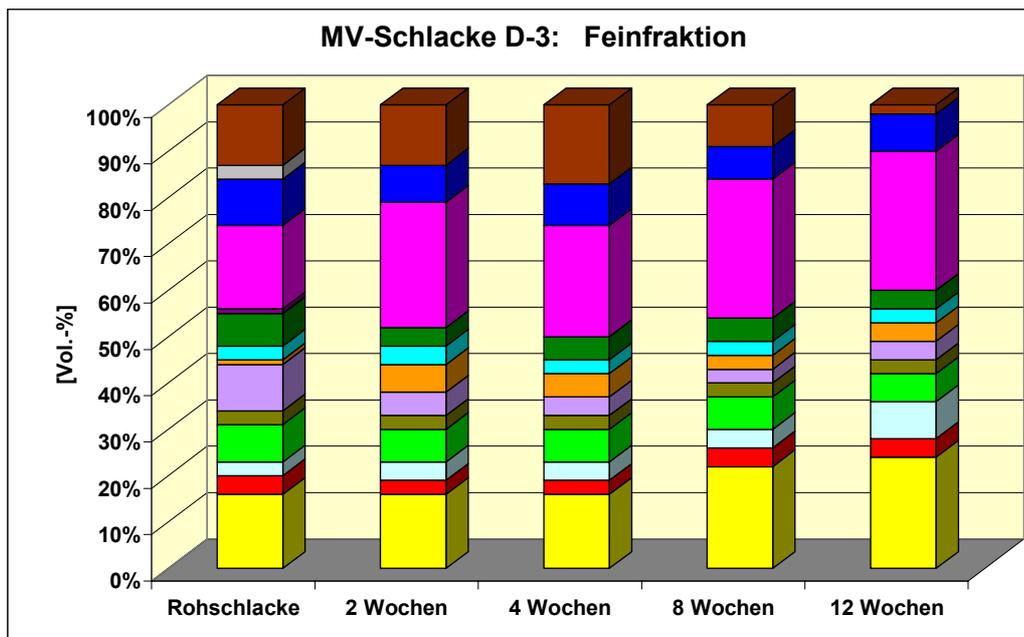
In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO₂) die alleinige Hauptphase dar während das Silikat Kalifeldspat (KAlSi₃O₈) sowie teilweise das Carbonat Calcit (CaCO₃) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Plagioklas (Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si₂O₈], Gehlenit (Ca₂Al₂SiO₇), Äkermanit (Ca₂MgSi₂O₇) und Diopsid (CaMgSi₂O₆), das Sulfat Anhydrit (CaSO₄), die Oxide Magnetit (Fe₃O₄) und Hämatit (α-Fe₂O₃), das Phosphat Apatit (Ca₅(PO₄)₃(OH) sowie neu gebildete Glasphasen auf.

Tab. 39 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke D-3

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi ₃ O ₈	Kalifeldspat	Nebenphase/Akzessorie	Durchläufer
(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	Plagioklas	Akzessorie	Durchläufer
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	Äkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
CaMgSi ₂ O ₆	Diopsid	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO ₂	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe ₃ O ₄	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
α-Fe ₂ O ₃	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO ₃	Calcit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO ₄	Anhydrit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Akzessorie/Spuren	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke D-3 handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO₂) sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi₃O₈) und Plagioklas (Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si₂O₈] dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit Ca(OH)₂ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) hingegen wird sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker und das Carbonat Calcit (CaCO₃) im Laufe der Ablagerung durch die zusätzliche Reaktion von Portlandit mit dem Luft-CO₂ gebildet.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$		
■ Magnetit	Fe_3O_4	<u>Hydroxide:</u>	
<u>Silikate:</u>		■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	<u>Carbonate:</u>	
■ Åkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	<u>Sulfate:</u>	
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$
■ <u>neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 83 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke D-3

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke D-3 folgendes festgestellt (Abb. 84):

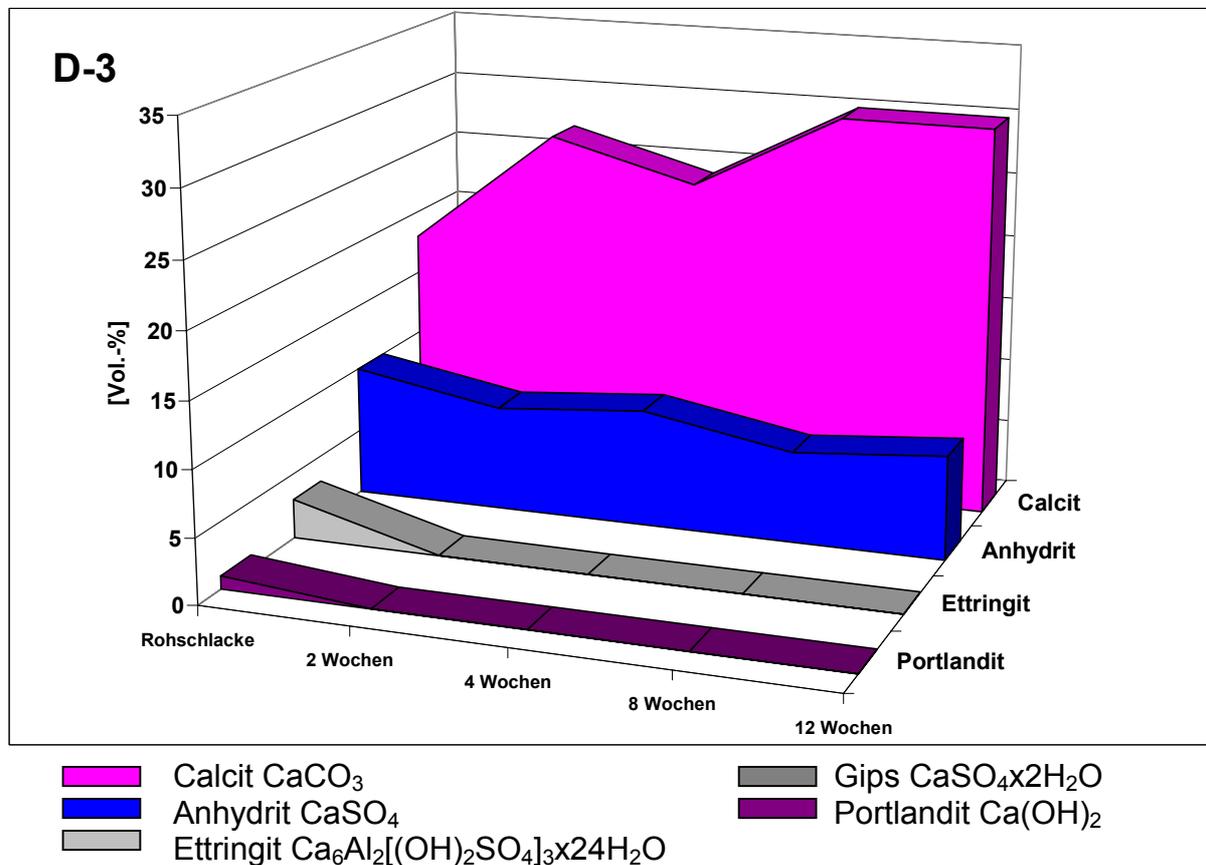


Abb. 84 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke D-3

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Schlacke D-3 sehr geringe Portlanditgehalte (Ca(OH)₂), die in der MV-Rohschlacke nur in Spuren auftreten und bereits in der 2 Wochen abgelagerten MV-Schlacke nicht mehr nachweisbar sind. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO₃) gesteuert wird, weist sehr ausgeprägte Alterationsreaktionen auf, die mit einer starken Zunahme des Calcits im Mineralbestand verbunden sind und auf ein ausgeprägtes Carbonatisierungsvermögen der MV-Schlacke hinweist.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO₄), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, tritt in der MV-Rohschlacke in deutlichen Mengen auf. Während der Ablagerungszeit tritt keine merkliche Reduktion der Anhydritgehalte ein. Die Sulfatreaktionen sind somit nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen noch nicht abgeschlossen und mit weiteren Sulfatreaktionen muss gerechnet werden.
- Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) ist in der MV-Rohschlacke bereits in geringen Mengen vorhanden und baut sich nach einer Ablagerungszeit von 2 Wochen vollständig ab.

Bei der MV-Schlacke D-3 handelt es sich um eine MV-Schlacke, die nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen ein ausgeprägtes Carbonatisierungsvermögen aufweist, bei der jedoch die Sulfatreaktionen noch andauern können. Daher kann die MV-Schlacke D-3 zu

diesem Zeitpunkt der Ablagerung, im mineralogischen Sinne, nicht als ausreichend raumbe-ständig eingestuft werden.

5.2.4.3.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-3

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationenverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke D-3 zeigen während der Ablagerung (Abb. 85a,b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit deutlich von ca. pH 11,8 auf 9,4 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit fallen während der Ablagerungszeit von ca. 230 mS/m auf 140 mS/m ab. Sie liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Die Zinkwerte variieren zwischen ca. 10 µg/l und 30 µg/l und unterschreiten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l deutlich.
- Die Bleigehalte der MV-Rohschlacke sind sehr gering und nehmen in den DEV S4-Eluaten ab einer Ablagerungszeit von 2 Wochen von 33 µg/l auf Werte nahe der geräte-spezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l ab. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LA-GA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden somit von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.
- Die Kupferwerte reduzieren sich im Laufe der Ablagerungszeit deutlich von ca. 1.300 µg/l auf 400 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke jedoch nicht eingehalten.
- Die Chromgehalte (gesamt) variieren von ca. 10 bis 30 µg/l und zeigen während der Ablagerungszeit eine geringe Abnahme. Die Zuordnungswerte der LAGA von 200 µg/l und der Grenzwert der TL Min-StB von 50 µg/l werden eingehalten.
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Nickel und Quecksilber liegen nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid liegen in einem Bereich von 130 mg/l und 250 mg/l und zeigen keine eindeutige Tendenz. Die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke unterschreitet die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l.
- Die Sulfatwerte steigen während der Ablagerung von 180 mg/l auf 500 mg/l, wobei je-doch die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l eingehalten werden.

Eine zusammenfassend Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse [12] zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] von der drei Monate abgelag-

gerten MV-Schlacke, bis auf eine Überschreitung des Parameters Kupfer, eingehalten werden.

- **Chemische Untersuchungen im Feststoff**

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 86 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke D-3 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke D-3 eingehalten.

- **Langzeitstabilität**

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke D-3 gehen aus Abb. 87 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

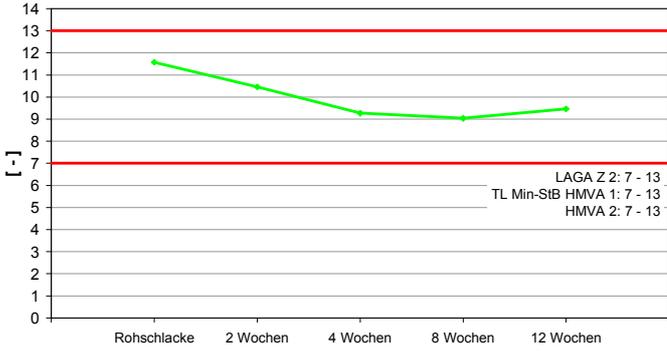
Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnen-tests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnen-tests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle, der Chloride und Sulfate abgeschätzt werden.

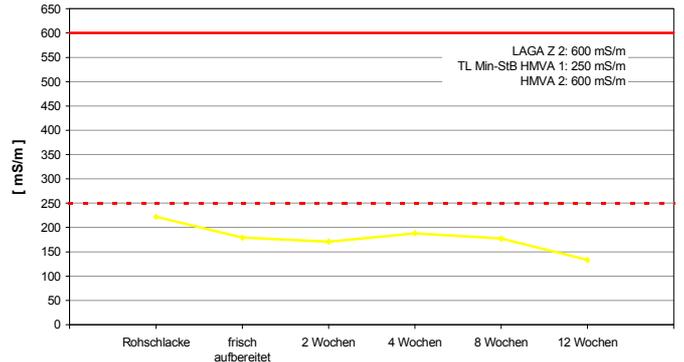
Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil der betrachteten Schwermetalle Zink und Kupfer weitaus höher ist als derjenige von Blei, Nickel, Chrom und Cadmium. Die Eluatgehalte liegen jedoch unter den Bedingungen des Kolonnen-tests, mit Ausnahme des etwas erhöhten Gehaltes von Kupfer, in einer vergleichbaren Größenordnung. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit an Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid, allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnen-tests, dass die eluierbaren Mengen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungs-vorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

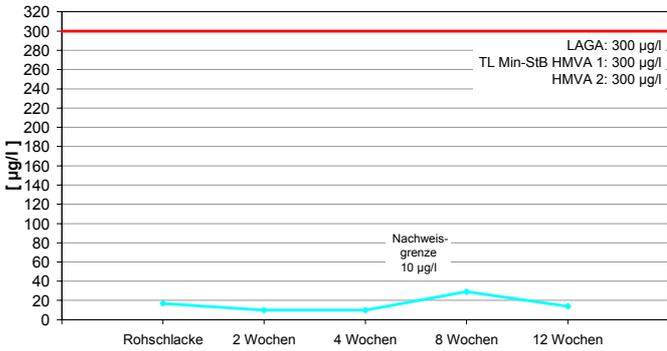
DEV S4-Test: pH-Wert



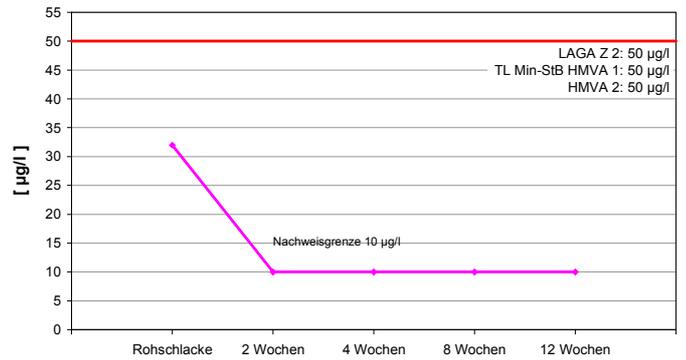
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



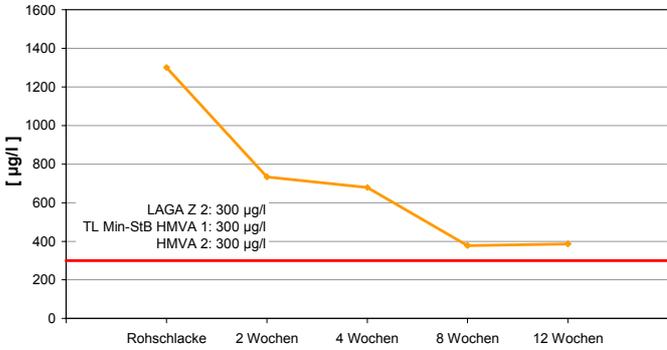
DEV S4-Test: Zink



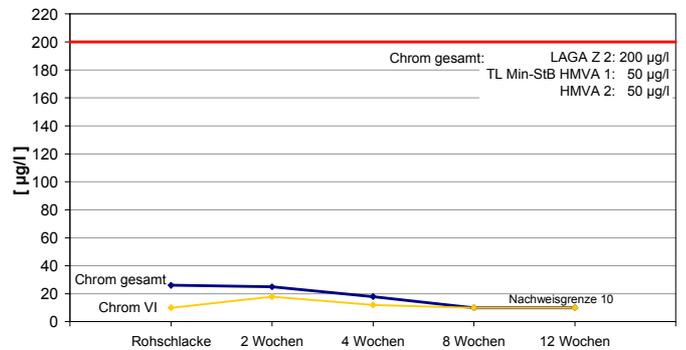
DEV S4-Test: Blei



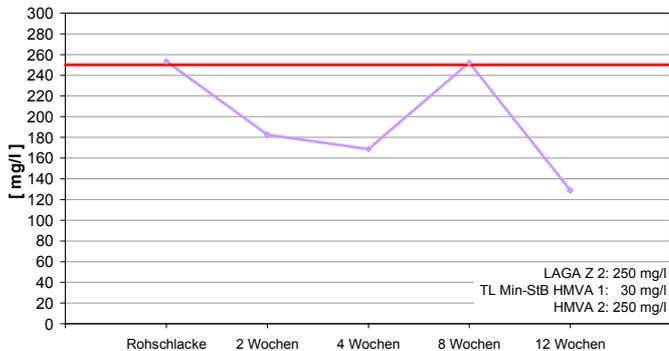
DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

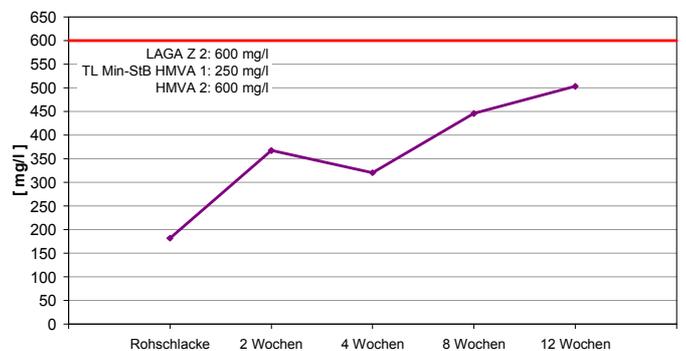


Abb. 85-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-3

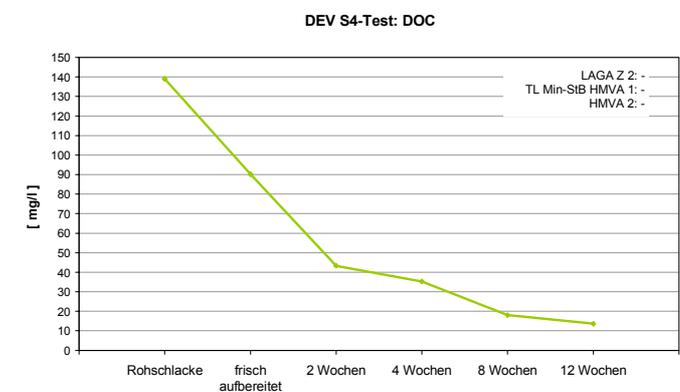
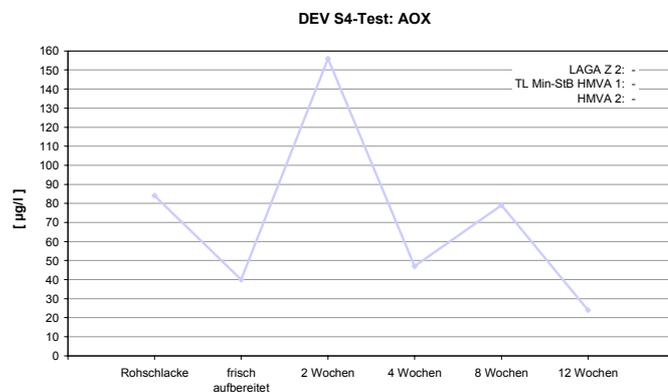
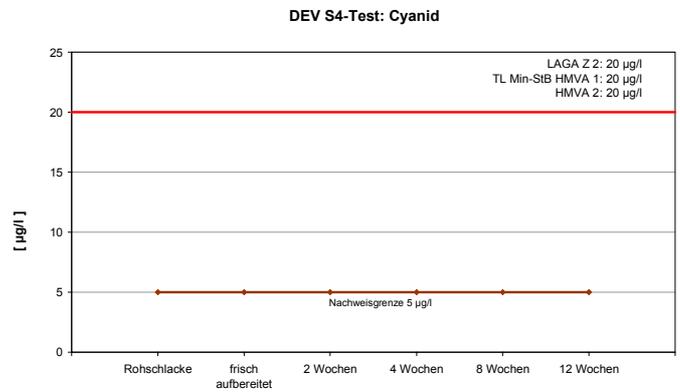
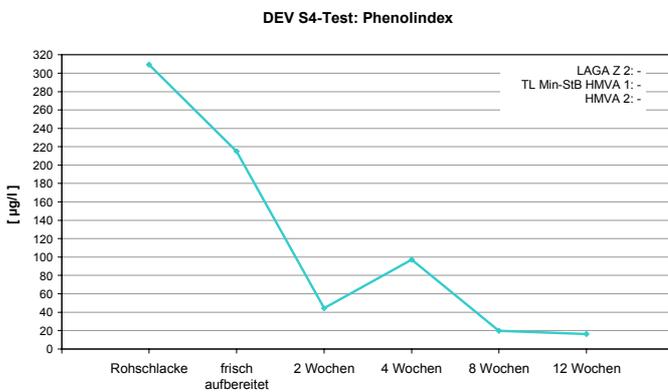
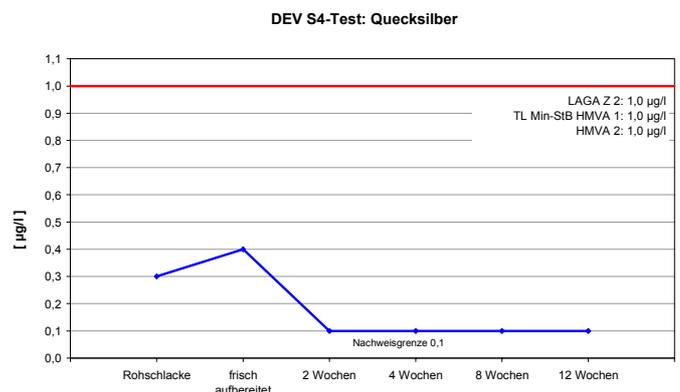
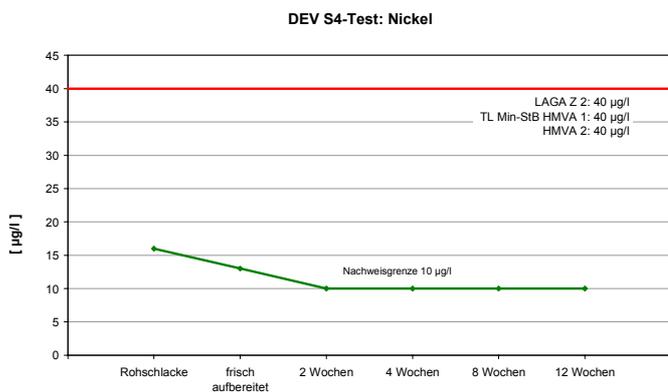
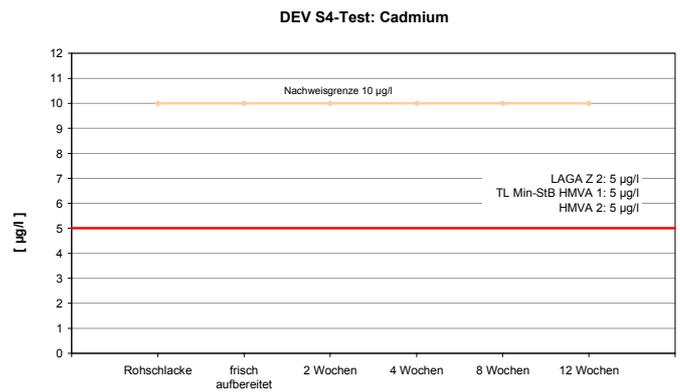
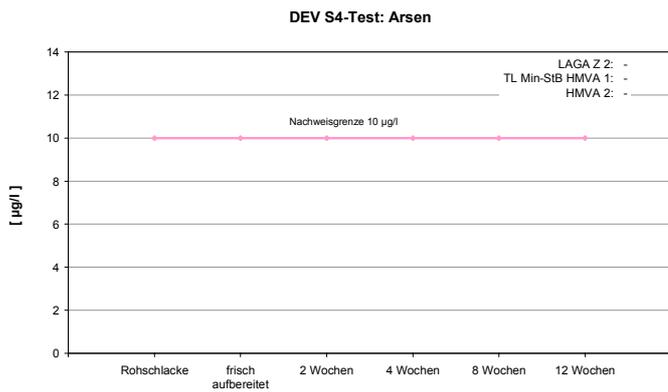


Abb. 85-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke D-3

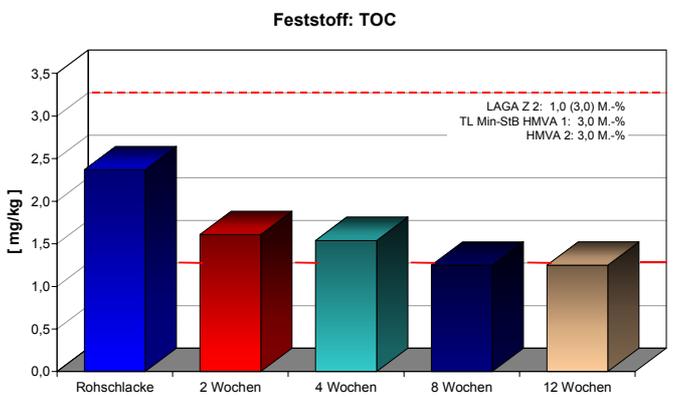
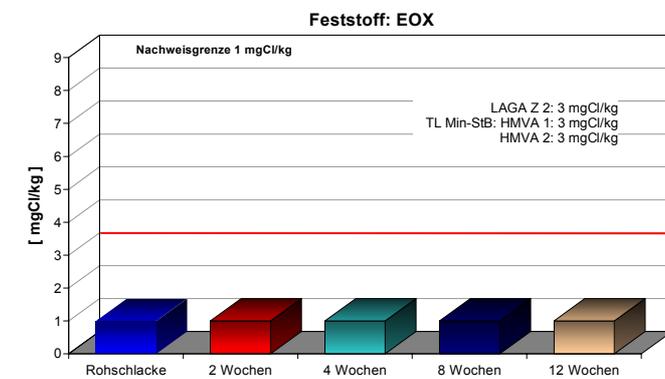
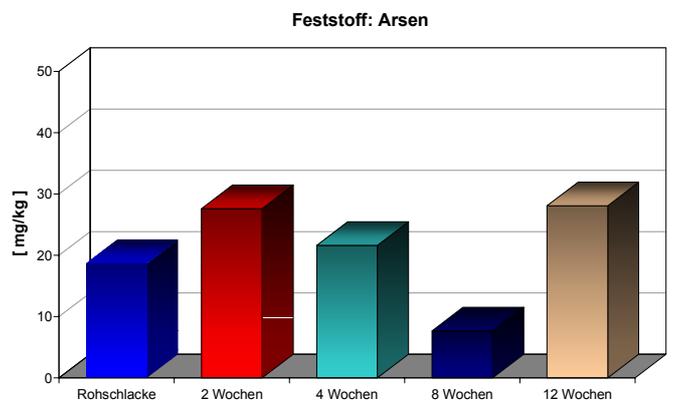
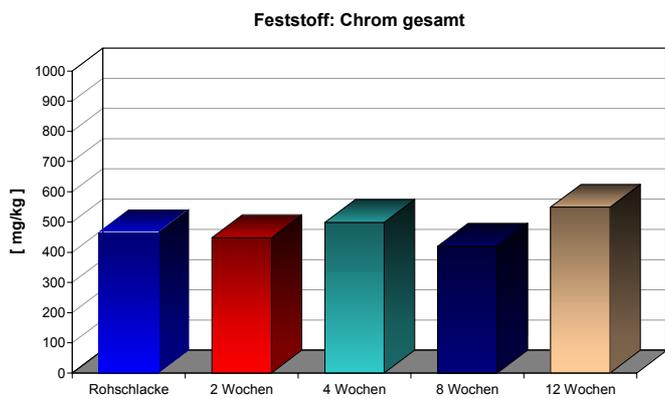
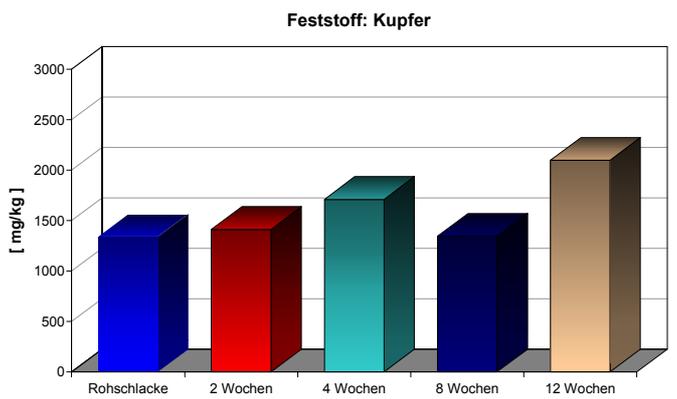
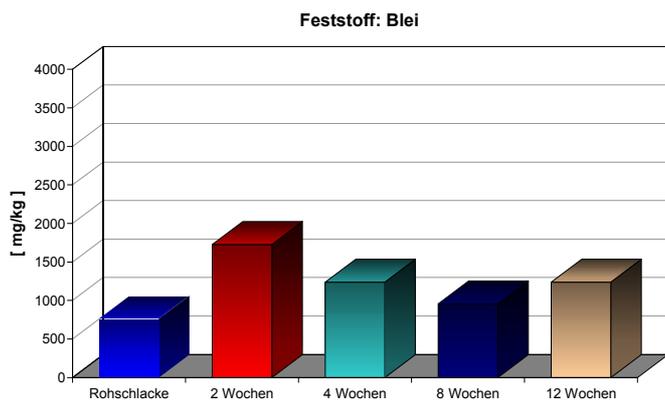
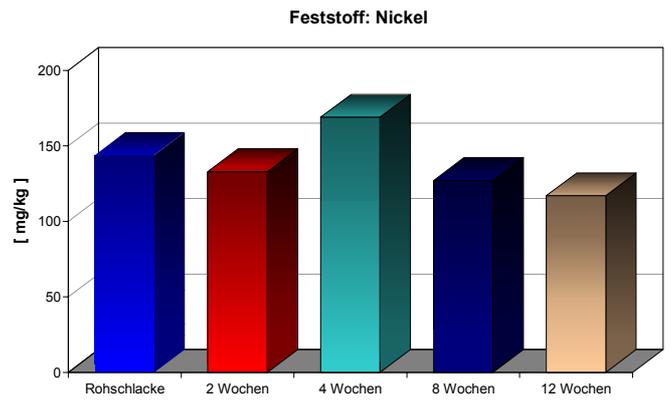
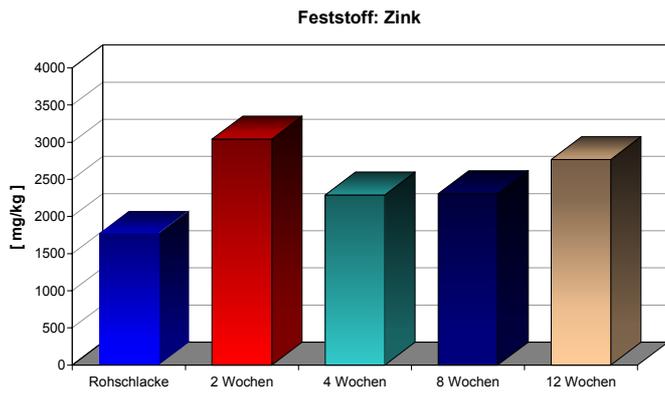
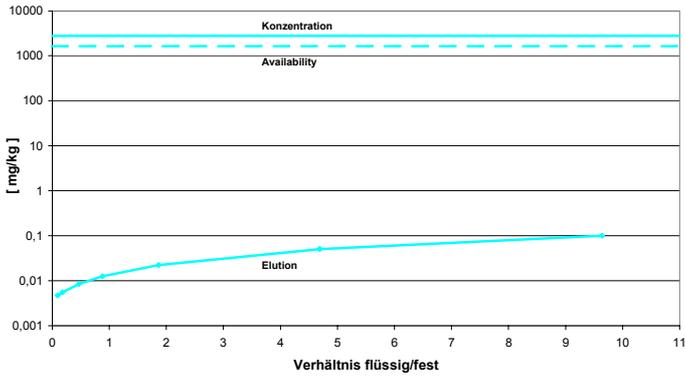
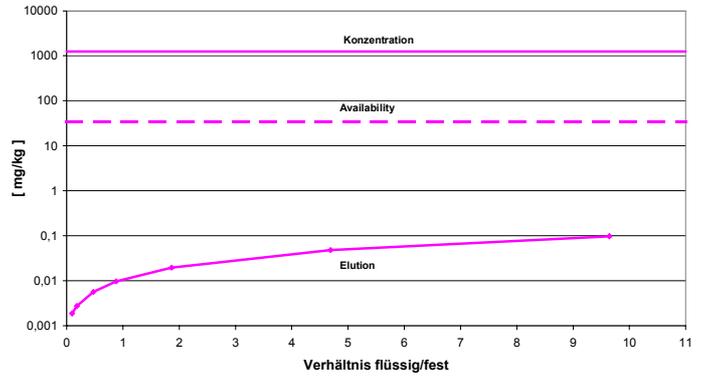


Abb. 86 Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke D-3

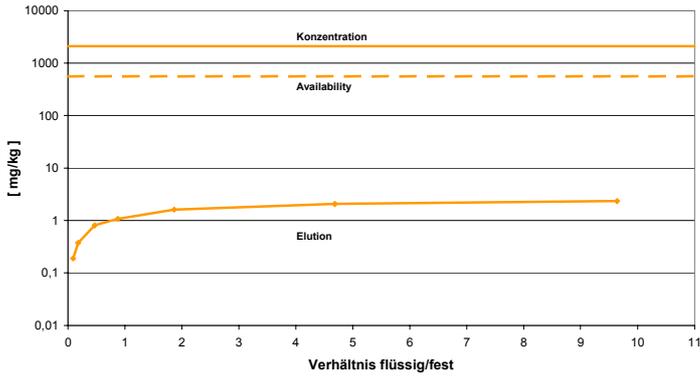
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



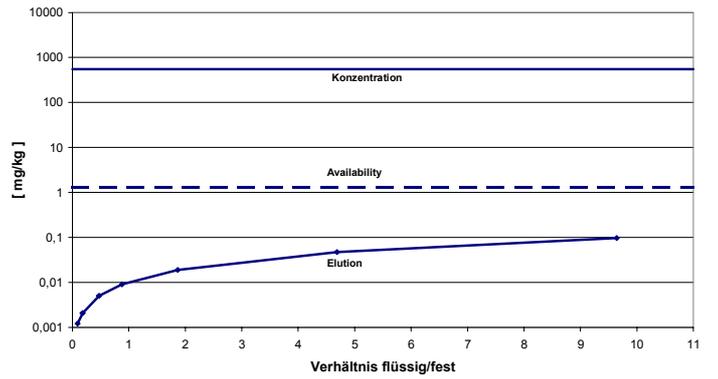
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



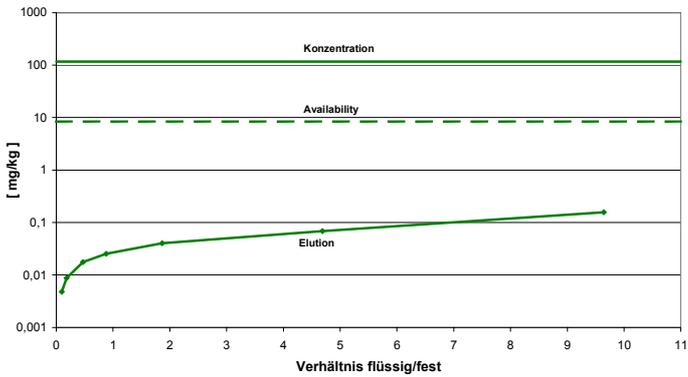
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



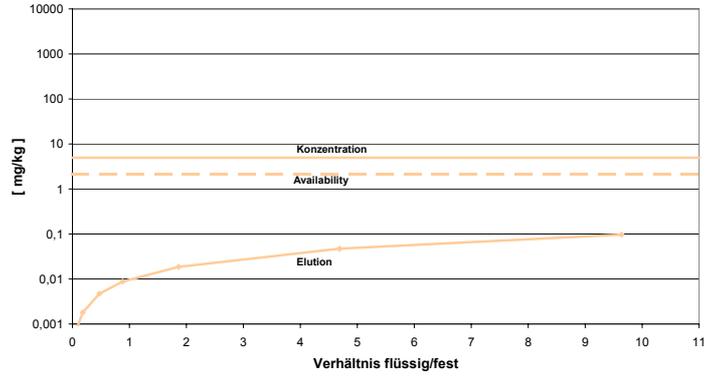
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



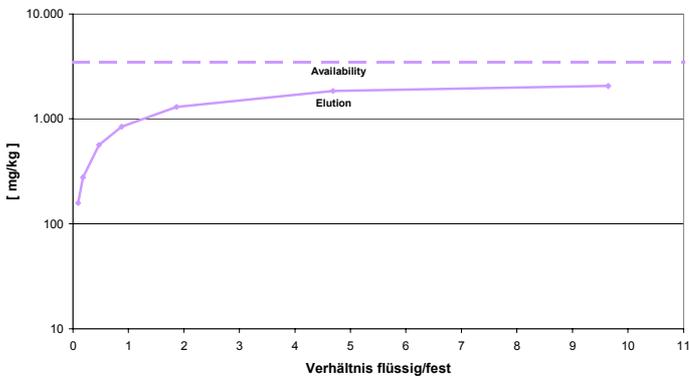
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

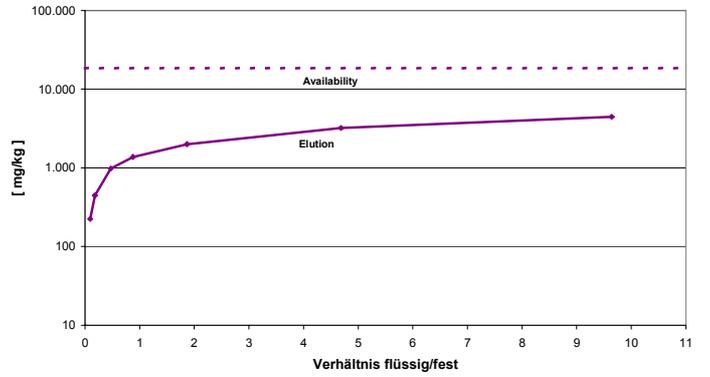


Abb. 87 Gesamtkonzentration der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke D-3

5.2.4.3.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke D-3

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] erfolgt. Darüber hinaus erfolgen zusätzliche Untersuchungen, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacke abschätzen zu können. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke D-3 gehen aus Abb. 88 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Die Korngrößenverteilung der MV-Rohschlacke weist im Vergleich zu der aufbereiteten MV-Schlacke einen deutlich höheren Anteil an größeren Körnern auf. Die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacken liegen in einem sehr engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 5 mm die untersuchte MV-Schlacke oberhalb der Grenzsieblinien liegen, d.h. einen zu geringen Anteil an der Grobfraktion aufweisen.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke D-3 geht aus Abb. 89 hervor. Ein Vergleich der stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 46,1 bis 55,4 M.-%) der makroskopischen stofflichen Bestandteile.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ M.-% werden eingehalten (Ist-Werte: 0,6 bis 1,4 M.-%). Die Metallanteile liegen zwischen 1,9 und 8,0 M.-%, wobei auch der Anteil an Metallen der drei Monate abgelagerte MV-Schlacke mit 7,1 M.-% über dem Grenzwert von 5,0 M.-% liegt.

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke D-3 liegen zwischen ca. 1,58 und 1,61 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 18,5 und 19,5 M.-% (Abb. 90). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke D-3, wie es sich auch in der Baupraxis zeigt.

• Wassergehalt

Die festgestellten Wassergehalte schwanken nach der Aufbereitung zwischen 15,6 und 18,7 M.-% (Tab. 40). Eine Reduktion der Wassergehalte während der Ablagerung erfolgt bei den MV-Schlacken D-3 nicht, wobei jedoch beachtet werden muss, dass die Lagerung der

aufbereiteten MV-Schlacke im Freiland erfolgte, und somit der natürliche Niederschlag direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte einwirken kann.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,606 g/cm³ und 2,711 g/cm³ und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 40). Die große Schwankungsbreite geht auf die stark unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke (z.B. Anteile an Metallen) zurück.

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm ≤ 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5,0 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 5,9 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke nicht erfüllt.

Die Anforderung an die Gesamtkörnung gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke D-3 eingehalten (Ist-Werte: 7,3 bis 8,6 M.-%) (Tab. 40).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, sind sehr homogen und liegen zwischen 38,2 und 38,8 M.-% (Tab. 40). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke D-3 erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Die Anteile an schlecht geformten Körnern liegen zwischen 18,2 und 24,4 M.-%, womit die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden (Tab. 40).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 2,1 und 2,4 M.-%. Anforderungen an den Glühverlust gemäß TL Min-StB 2000 bestehen nicht (Tab. 40).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke D-3, mit Ausnahme des erhöhten Metallanteiles eingehalten werden.

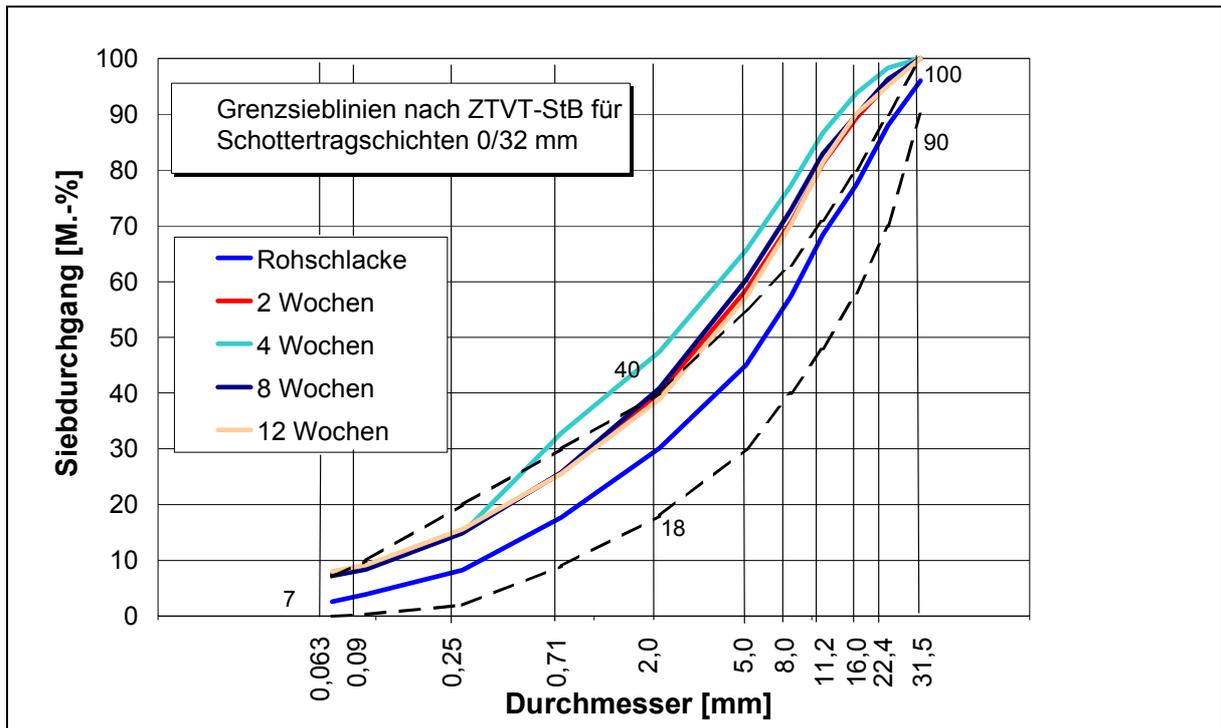


Abb. 88 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke D-3

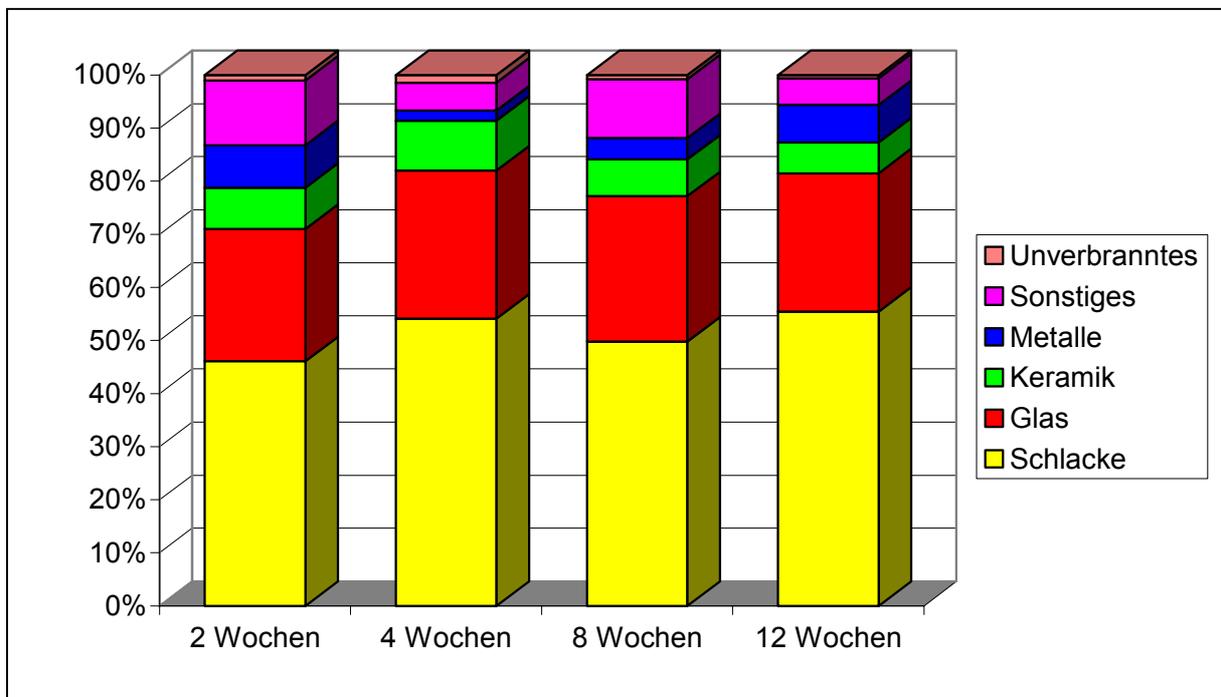


Abb. 89 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke D-3

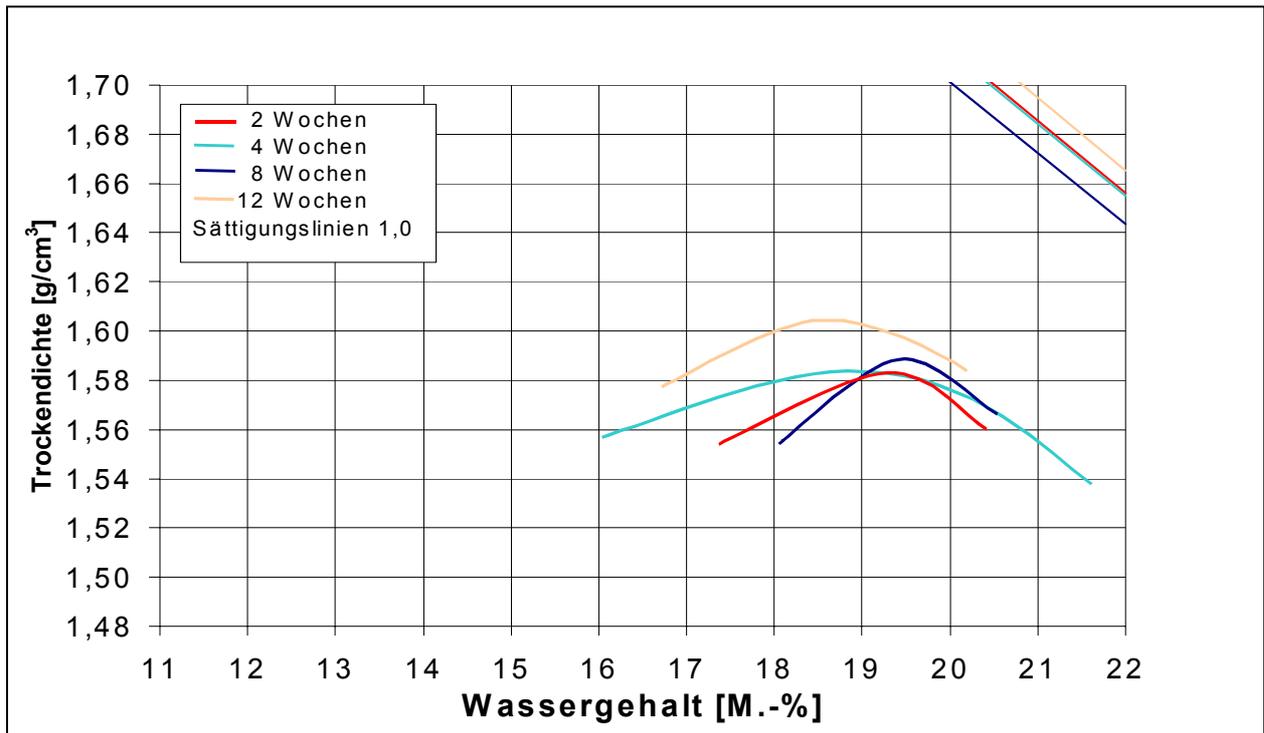


Abb. 90: Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke D-3

Tab. 40 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke D-3

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	15,6	16,8	n.b.	18,7	
Rohdichte	g/cm³	2,606	2,711	2,636	2,683	
Schüttdichte	g/cm³	1,053	1,088	1,038	1,026	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16 mm)	< 5 mm < 0,71 mm M.-%	4,1 1,6	5,1 1,9	4,5 1,6	5,9 2,3	3, 0 (5,0) 2,5
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	7,3	8,0	7,6	8,6	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	38,6	38,7	38,8	38,2	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	21,3	24,4	24,4	18,2	50
Glühverlust	M.-%	2,1	2,2	2,4	2,3	

5.2.5 ANLAGE E

In der MVA E wurde ein Großversuch (MV-Schlacken E) durchgeführt.

- **Verfahrenstechnik der Müllverbrennungsanlage E**

Die verfahrenstechnischen Parameter der Müllverbrennungsanlage gehen aus Tab. 41 hervor. Die untersuchten Schlackeproben stammen aus einem Kessel mit Vorschubrost und Mittelstromfeuerung.

Tab. 41 Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA E

Verfahrensparameter der MVA E	
Rostsystem	Rückschubrost
Durchsatz [t/a]	150.000
Linien	2
Feuerung	Natur-Umlauf-Dampferzeuger
Heizwert [kJ/kg]	9.500
Abfallarten	Hausmüll
	Gewerbeabfall
	Sonstiges, z.B. Tiermehl
Schlackeanfall [t/a]	41.000

- **Müllinput**

Folgende Müllzusammensetzung wurde großtechnisch thermisch behandelt:

Tab. 42 Müllzusammensetzung während des Großversuchs

Müllzusammensetzung während des Großversuches in der MVA E in M.-%		
Hausmüll	Gewerbeabfall	Tiermehl
55,4	44,2	0,4

- **Aufbereitungstechnik der MV-Schlacken**

Die in der Müllverbrennungsanlage E produzierten MV-Rohschlacken werden per LKW zu der Aufbereitungsanlage transportiert. Nach einer feuchteabhängigen Zwischenlagerung zur Reduktion des Feuchtegehaltes werden die MV-Rohschlacken zu MV-Schlacken aufbereitet. Durch diese Verfahrensweise kommt eine mehrmals umgeschichtete ca. 2 Wochen alte MV-Rohschlacke zur Aufbereitung. Die Vorlagerung, die Aufbereitung sowie die Nachlagerung findet in der Halle statt. Die Aufbereitungsanlage verfügt über mehrere Siebanlagen, einem Leseband zur Entfernung grober Störstoffe, mehreren Trommel- und Überbandmagneten sowie einer Nichteisenabtrennung.

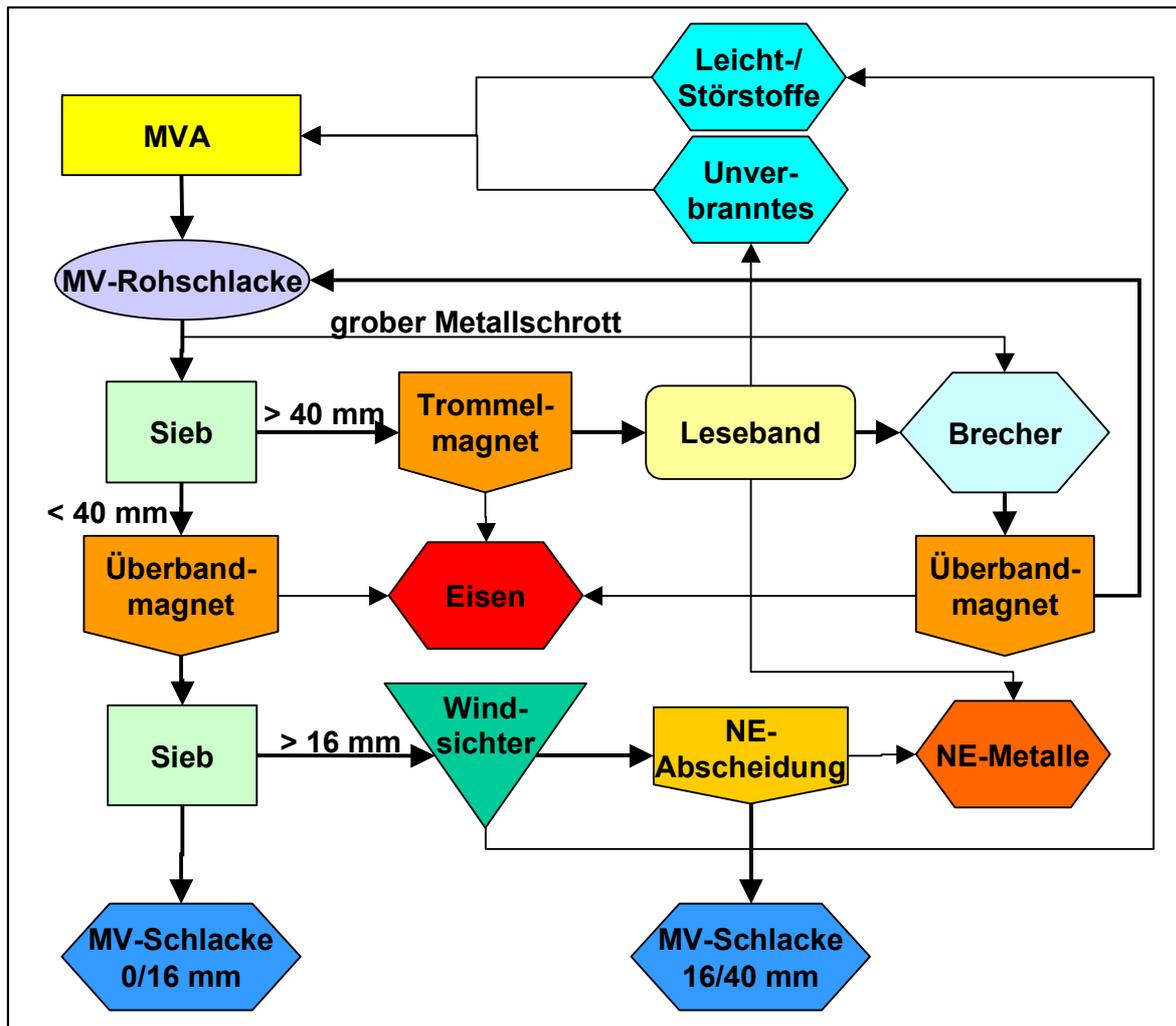


Abb. 91 Schematische Darstellung der Aufbereitungsanlage für die MV-Schlacke E

Die aufbereitete MV-Schlacke unterliegt der Güteüberwachung gemäß RG Min-StB 93 [30] und wird im Straßenbau und Deponiebau verwertet.

5.2.5.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke E

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke geht aus Tab. 43, die der Grobfraktion aus Tab. 44 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 92).

Im Feinanteil der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO_2), in der MV-Rohschlacke zusätzlich das Sulfat Anhydrit (CaSO_4) die mineralogischen Hauptphasen dar, während das Carbonat Calcit (CaCO_3) und teilweise die neu gebildeten Glasphasen die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) und Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sowie die Sulfate Anhydrit (CaSO_4) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) auf.

Tab. 43 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke E

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Akzessorie/Spuren	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Akzessorie/Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase/Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Nebenphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Haupt-/Nebenphase/Akz.	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase/Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

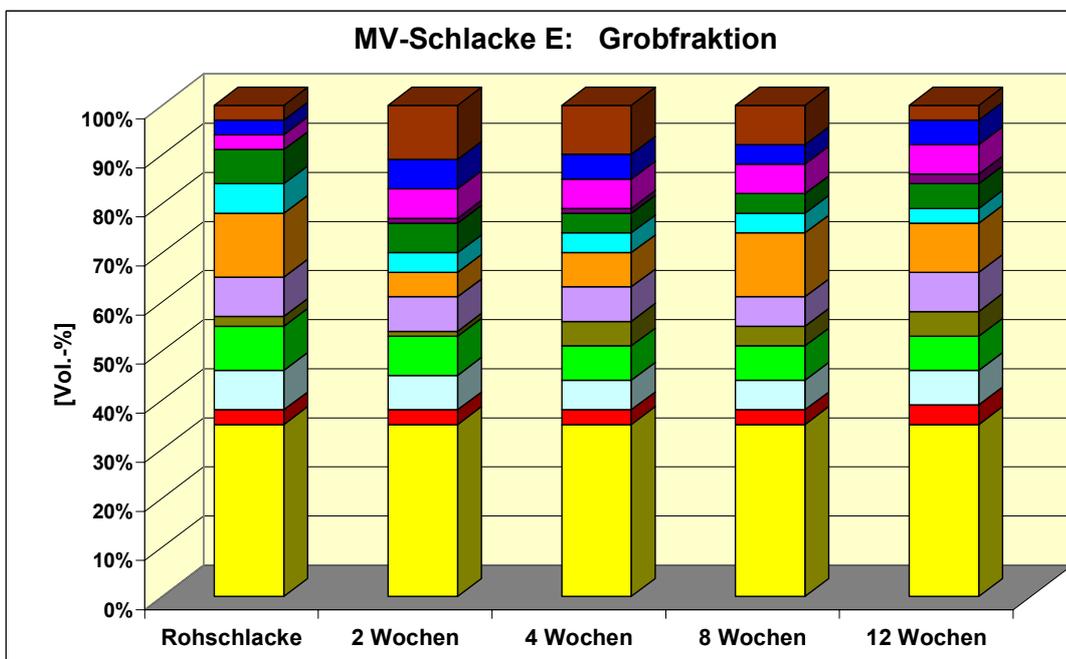
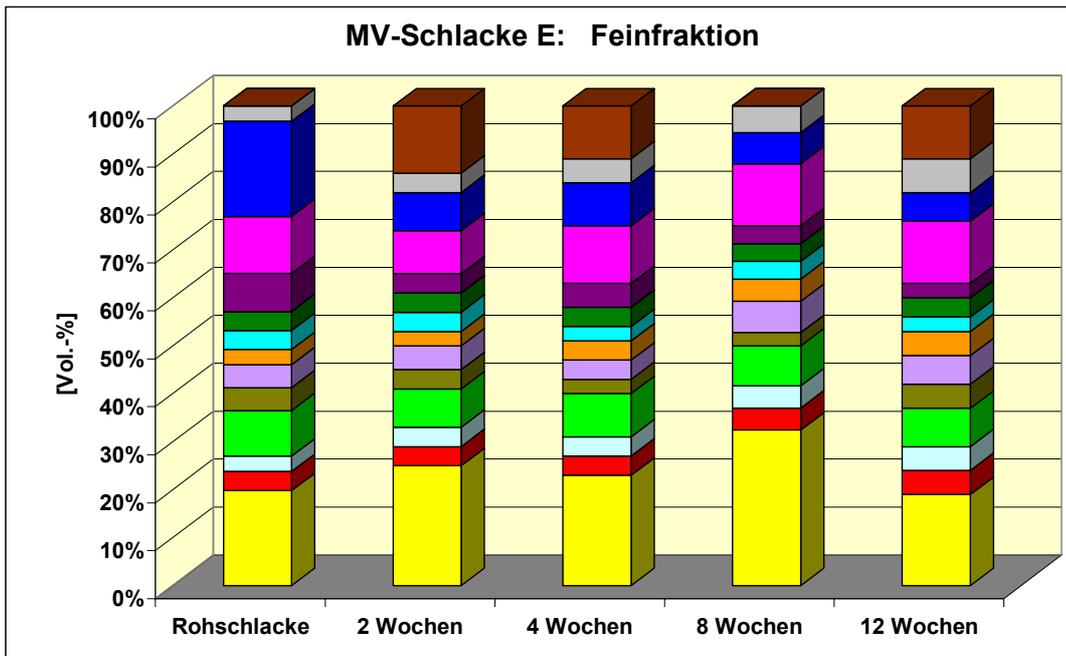
In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die alleinige Hauptphase dar, während teilweise die neu gebildeten Glasphasen und das Silikat Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Åkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), das Carbonat Calcit (CaCO_3), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) und das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) auf.

Tab. 44 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke E

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Nebenphase/Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Åkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Akzessorie	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase/Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke E handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO_2), sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) hingegen wird sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker und das Carbonat Calcit (CaCO_3) im Laufe der Ablagerung durch die zusätzliche Reaktion von Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mit dem Luft- CO_2 gebildet.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe_3O_4	■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Äkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$		
■ <u>Neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 92 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke E

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke E folgendes festgestellt (Abb. 93):

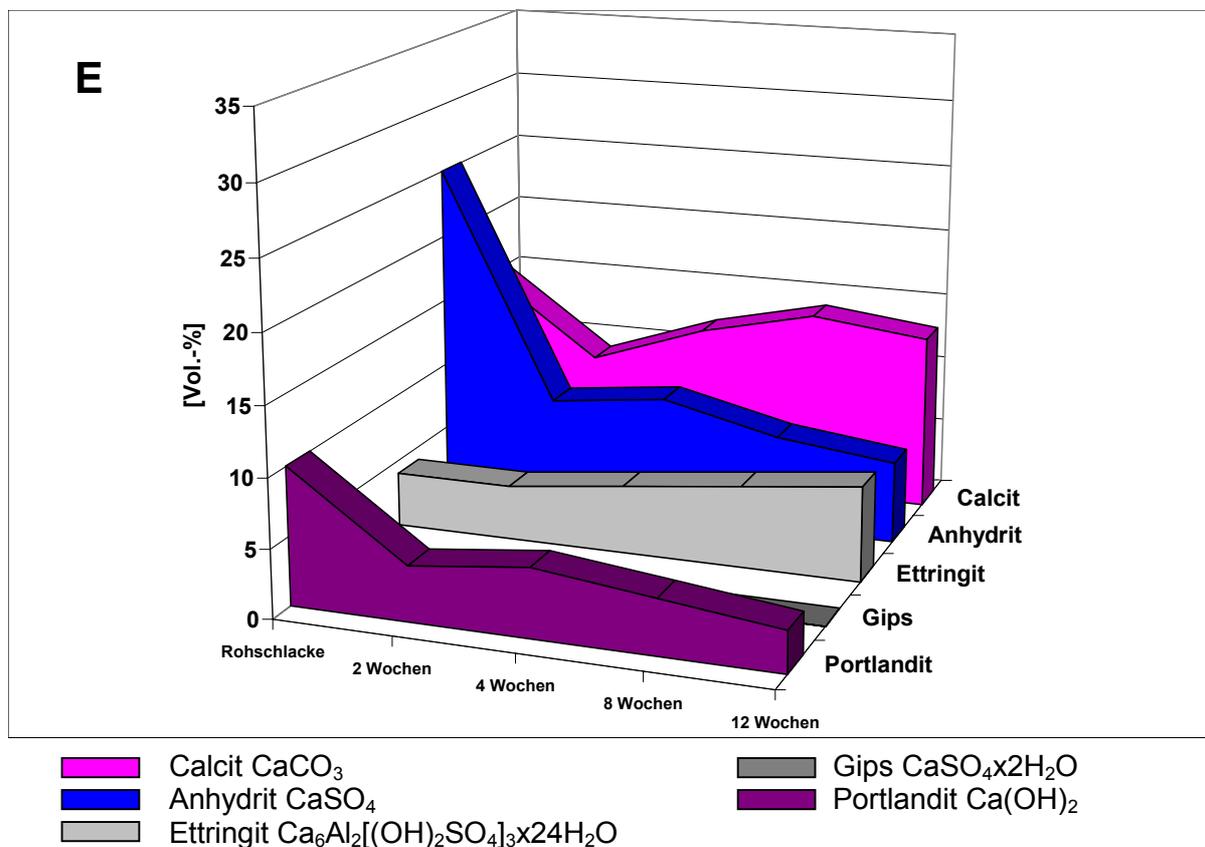


Abb. 93: Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke E

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Schlacke E nach zwei Wochen Ablagerung eine deutliche Abnahme des Portlandits ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Im weiteren Verlauf der Ablagerung bleiben die Portlanditgehalte jedoch auf einem vergleichbaren Niveau. Das Mineral Calcit (CaCO_3), das die weitere Carbonatisierung steuert, nimmt in den ersten beiden Wochen der Ablagerung ab und nimmt dann im weiteren Verlauf der Ablagerung zu, erreicht jedoch nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten lediglich Werte, die im Grenzbereich (> 14 M.-%) für ein gutes Carbonatisierungsverhalten liegen. Die noch deutlich vorhandenen Portlanditgehalte und der im Grenzbereich liegende Calcitgehalt weisen darauf hin, dass die Carbonatisierungsvorgänge nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten noch nicht abgeschlossen sind.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO_4), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, ist im Mineralbestand der MV-Rohschlacke in sehr großen Mengen vorhanden. Im Verlauf der Ablagerung nehmen die Anhydritgehalte zwar deutlich ab, erreichen aber nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten immer noch so hohe Werte, dass von einer reaktionsfähigen und damit nicht ausreichend raumbeständigen MV-Schlacke ausgegangen werden muss, da weitere Sulfatreaktionen erwartet werden.
- Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) tritt bereits in der MV-Rohschlacke auf und zeigt im weiteren Verlauf der Ablagerung ansteigende Gehalte.

Bei der MV-Schlacke E handelt es sich somit um eine MV-Schlacke, die nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten noch laufende Carbonatisierungsreaktionen zeigt und in der die Sulfatreaktionen noch nicht abgeschlossen sind. Sie muss nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten als noch reaktiv und somit, im mineralogischen Sinne, als nicht ausreichend raumbeständig eingestuft werden.

5.2.5.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke E

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke E zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 94-a und 94-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit in geringem Umfang von pH 12,6 auf 11,8 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit fallen während der Ablagerungszeit sehr stark von ca. 620 mS/cm auf 180 mS/cm. Die Werte liegen ab einer Ablagerungszeit von zwei Wochen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/l).
- Der Zinkgehalt ist in der MV-Rohschlacke mit 600 µg/l sehr hoch, fällt jedoch nach einer Ablagerungszeit von zwei Wochen auf ca. 70 µg/l zurück und liegt im Eluat der 12 Wochen abgelagerten MV-Schlacke nahe der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Der Zinkwert der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke unterschreitet die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l somit deutlich.
- Der Bleiwert ist ebenfalls in der MV-Rohschlacke mit ca. 4.000 µg/l sehr hoch und fällt auch hier nach einer Ablagerungszeit von zwei Wochen auf 250 µg/l zurück und liegt in der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke unterhalb der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.
- Die Kupferwerte nehmen während der Ablagerungszeit sehr stark ab. Sie fallen von ca. 1.280 µg/l (MV-Rohschlacke) auf ca. 550 µg/l nach einer Ablagerungszeit von 8 Wochen, um danach wieder auf 700 µg/l anzusteigen. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke deutlich überschritten.
- Die Gehalte an Chrom (gesamt) sind sehr gering und liegen für die untersuchte MV-Schlacke bei ca. 20 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 200 µg/l bzw. 50 µg/l werden eingehalten.
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Nickel und Quecksilber liegen nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.

- Die Gehalte an Chlorid steigen während der Ablagerungszeit von ca. 60 auf 240 mg/l an. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 µg/l werden unterschritten.
- Die Sulfatwerte variieren zwischen ca. 150 und 450 mg/l und halten die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l ein.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke E, mit Ausnahme des Parameters Kupfer, eingehalten werden.

• **Chemische Untersuchungen im Feststoff**

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 95 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke E in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke B-2 eingehalten.

• **Langzeitstabilität**

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 96 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

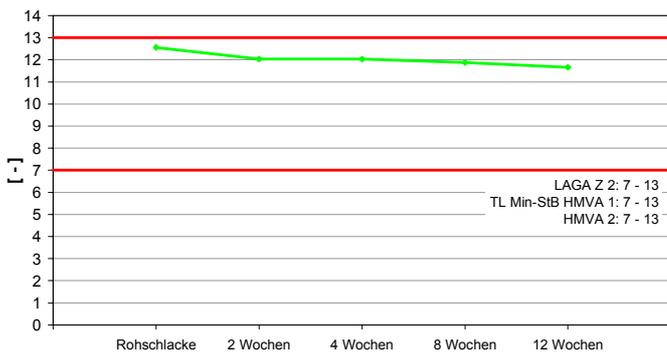
Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnentests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnentests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle abgeschätzt werden.

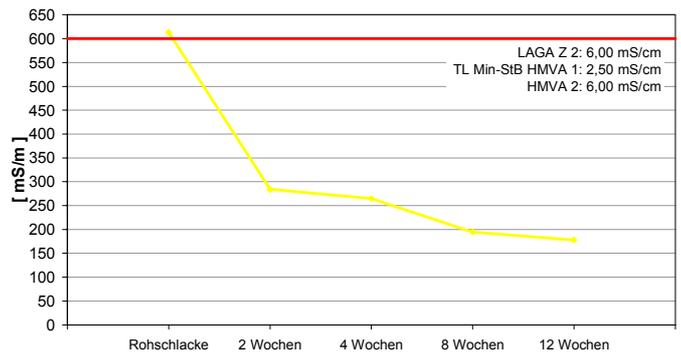
Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil der betrachteten Schwermetalle Zink, Blei und Kupfer weitaus höher ist als derjenige von Nickel, Chrom und Cadmium, die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnentests jedoch mit Ausnahme der leicht erhöhten Gehalte an Kupfer in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit an Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid, allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnentests, dass die eluierbaren Mengen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschvorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

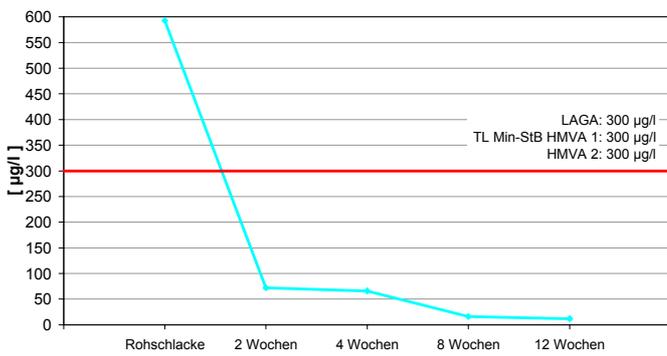
DEV S4-Test: pH-Wert



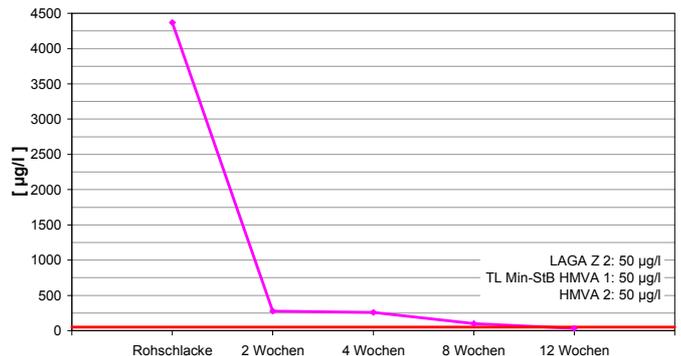
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



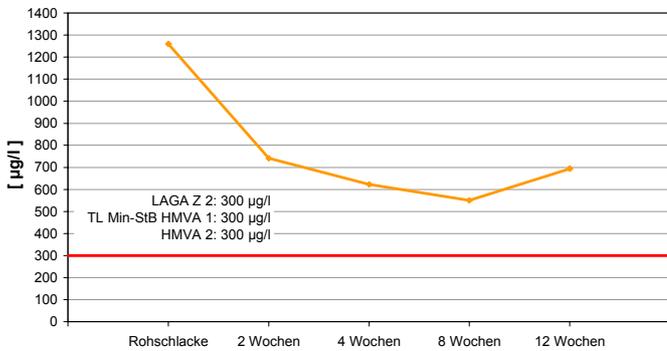
DEV S4-Test: Zink



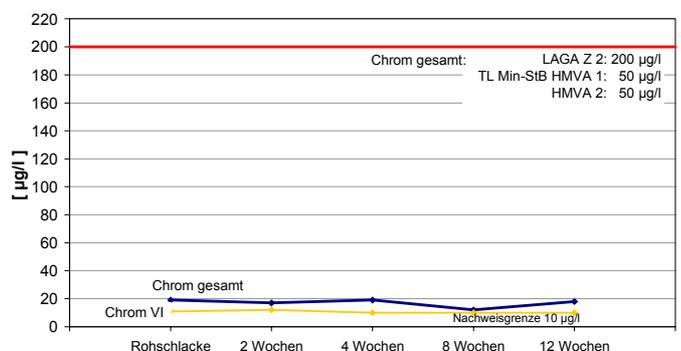
DEV S4-Test: Blei



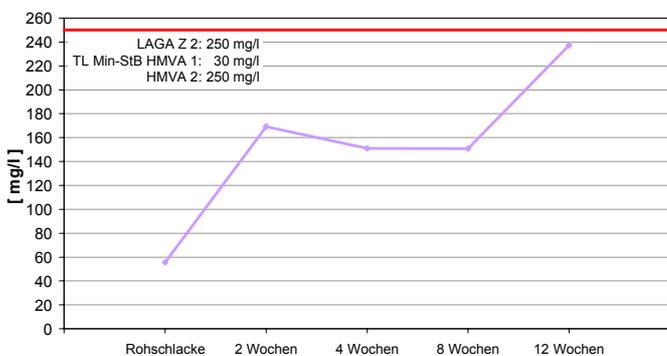
DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

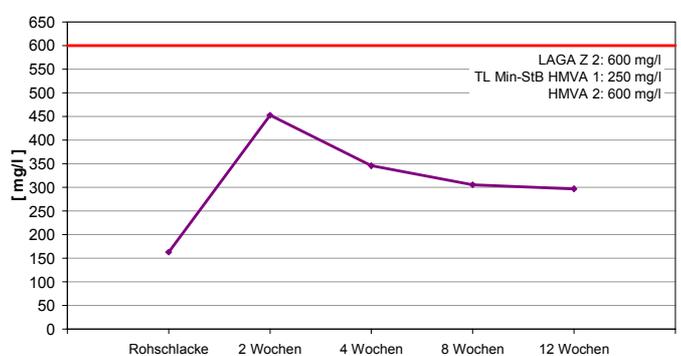


Abb. 94-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke E

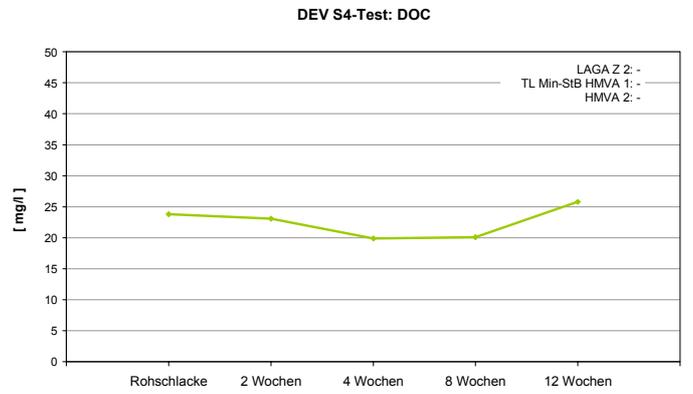
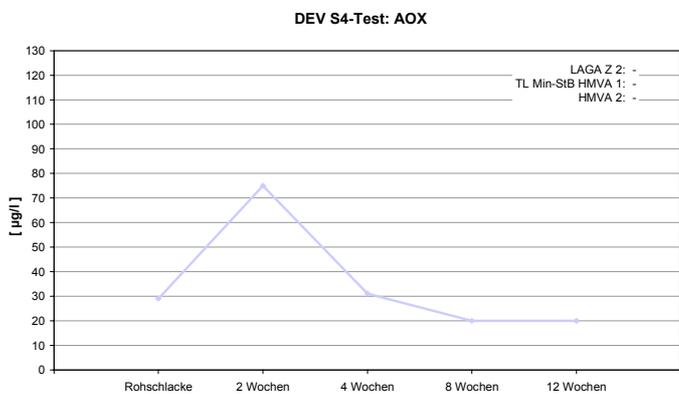
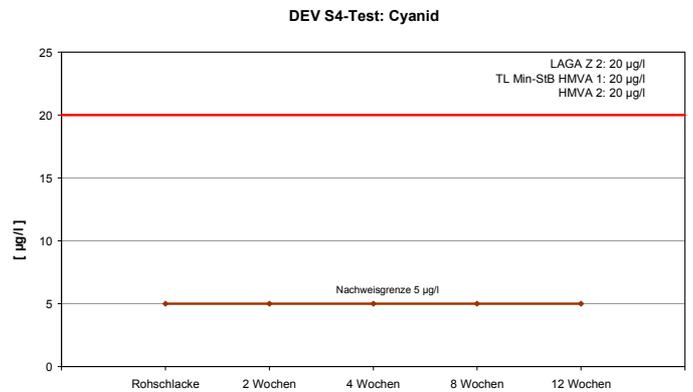
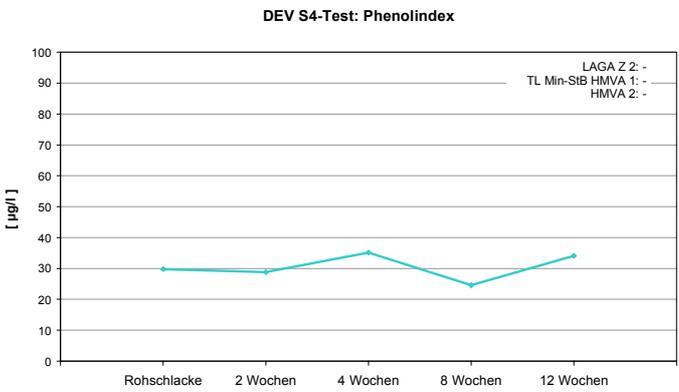
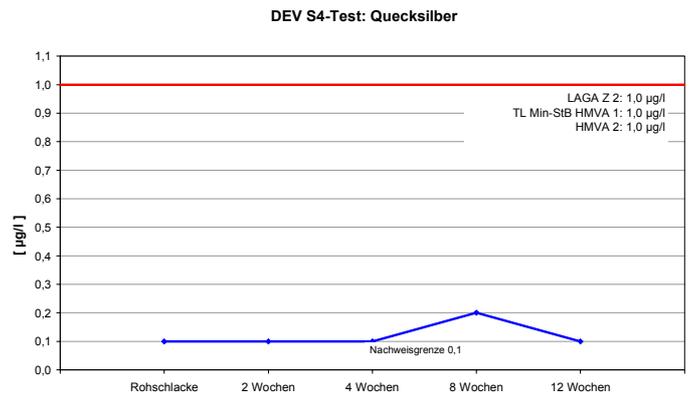
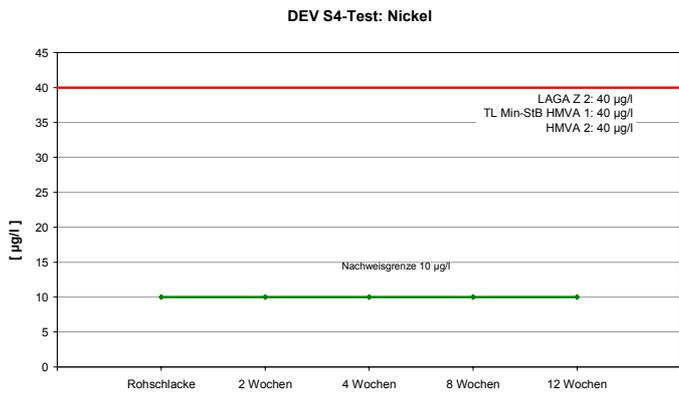
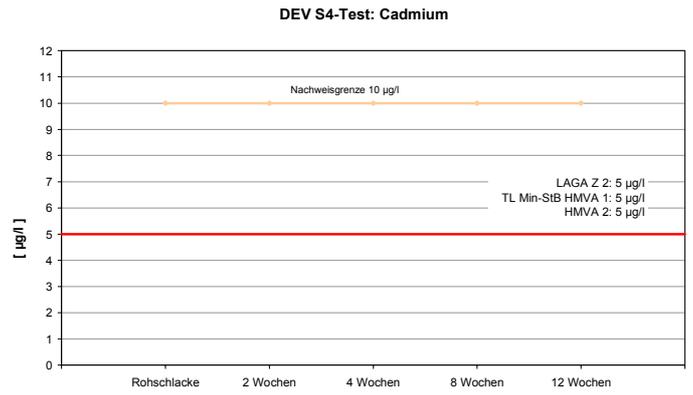
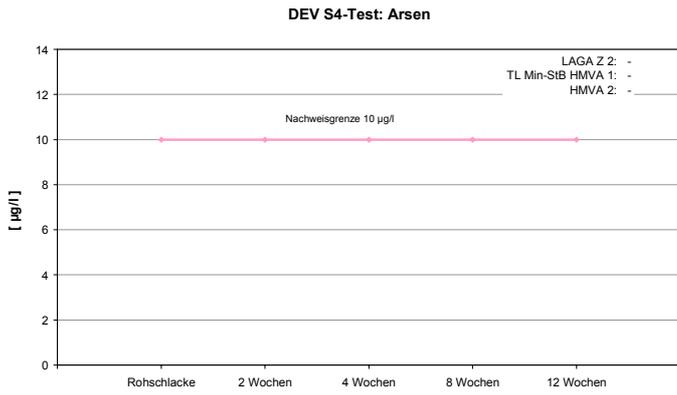


Abb. 94-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke E

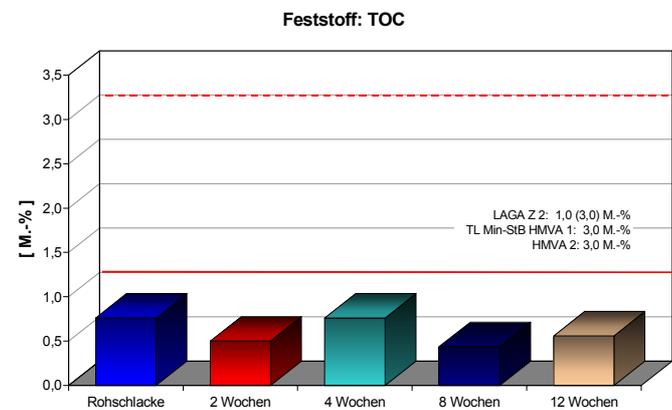
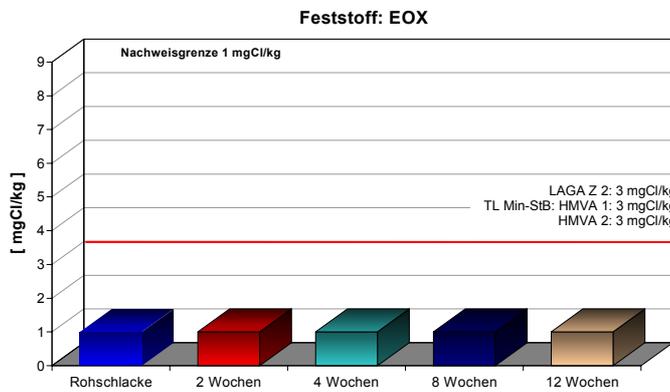
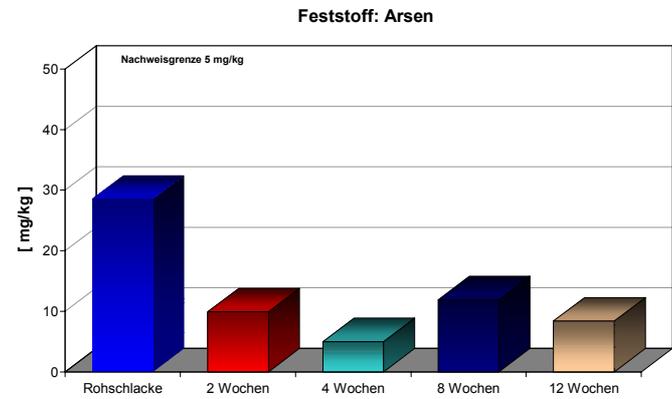
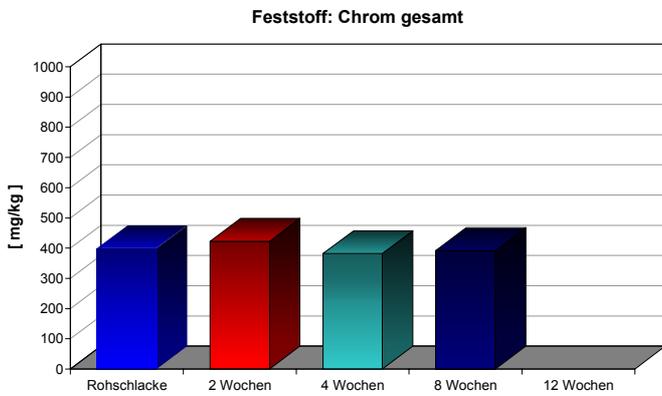
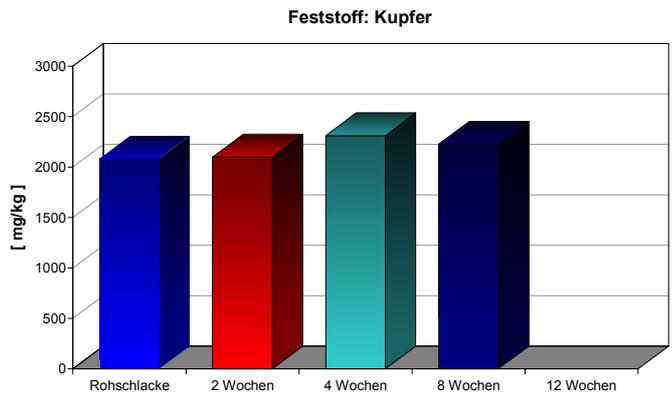
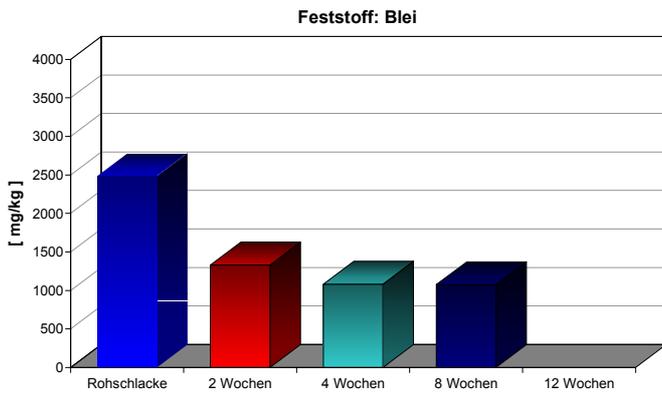
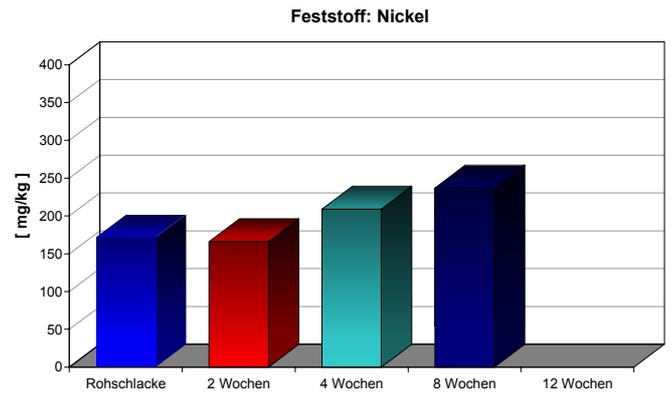
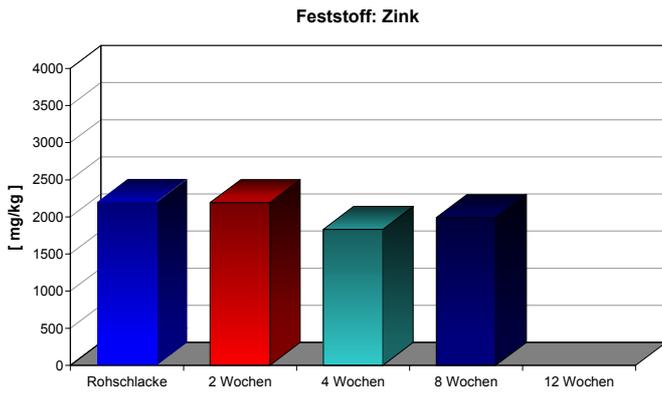
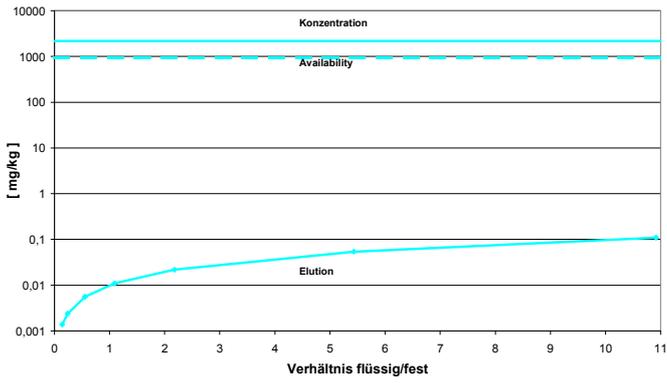
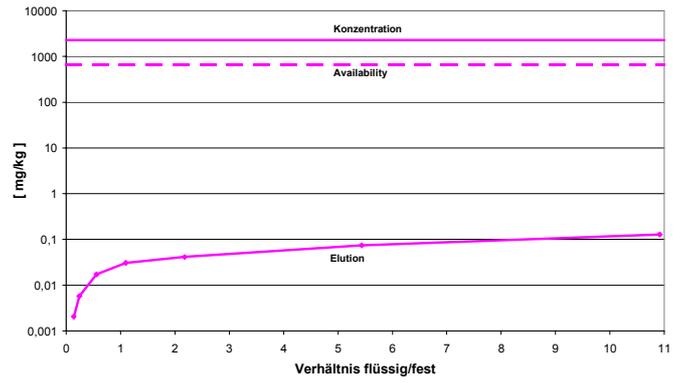


Abb. 95 Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke E

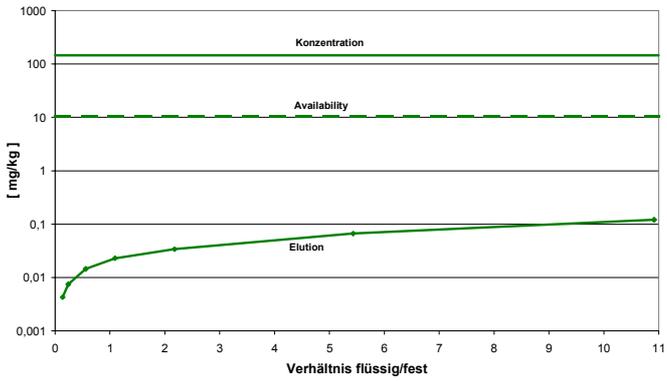
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



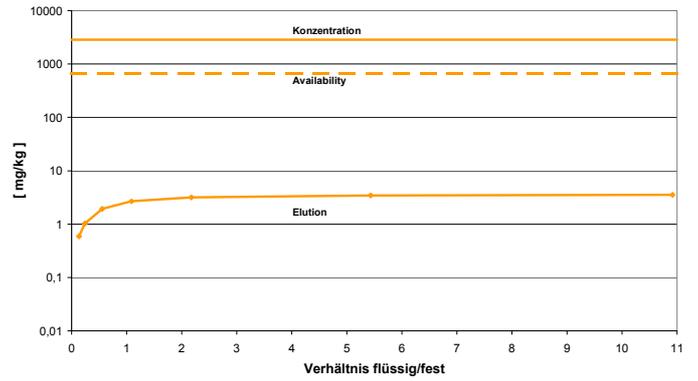
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



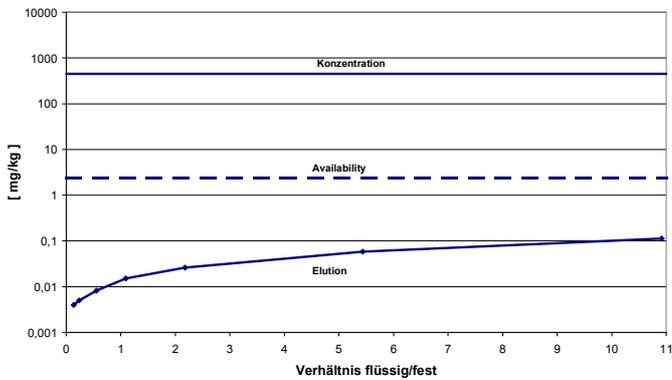
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



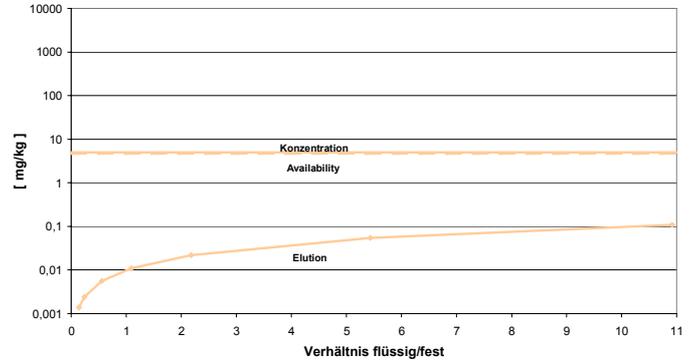
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



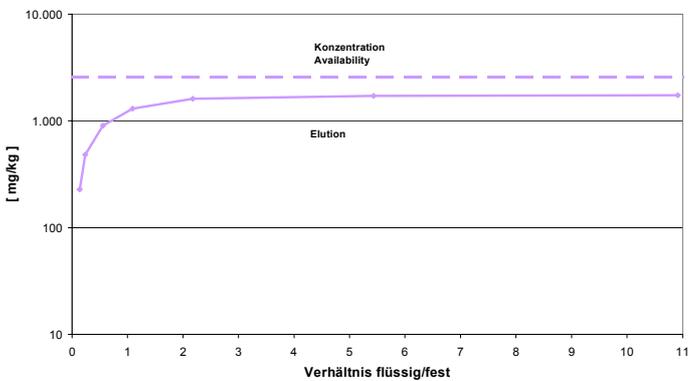
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

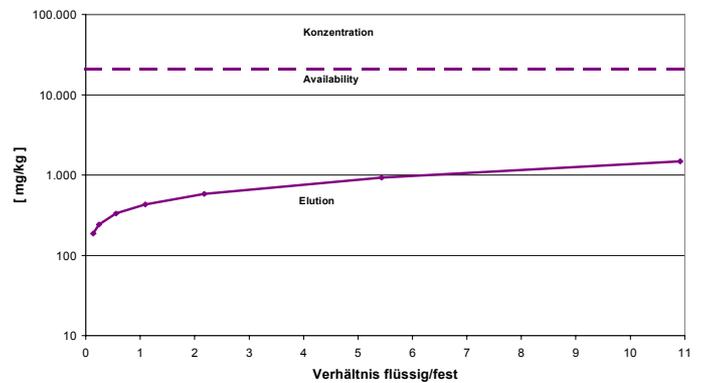


Abb. 96 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke E

5.2.5.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke E

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] erfolgt. Darüber hinaus werden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken abschätzen zu können. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke E gehen aus Abb. 97 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Nach der Aufbereitung liegen die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacke in einem sehr engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacken haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 8 mm die untersuchte MV-Schlacke in geringem Masse oberhalb der Grenzsieblinien liegen, d.h. einen zu geringen Anteil an Grobkorn aufweisen.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke E geht aus Abb. 98 hervor. Ein Vergleich der stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 69 bis 76 M.-%) der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material von $\leq 0,5$ M.-% (Ist-Werte: max. 0,2 M.-%), sowie an den Metallanteil von max. 5,0 M.-% (Ist-Werte: 1,8 bis 3,5 M.-%) werden von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke liegen zwischen ca. 1,73 und 1,77 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 12,5 und 14,0 M.-% (Abb.78). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke E, die sich auch in der Baupraxis zeigt.

• Wassergehalt

Die festgestellten Wassergehalte schwanken nach der Aufbereitung zwischen 10,1 M.-% und ca. 9,0 M.-% nach drei Monaten (Tab. 45).

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,667 g/cm³ und 2,737 g/cm³ und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 45) Die große Schwankungsbreite geht auf die stark unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke (z.B. Anteile an Metallen) zurück.

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm ≤ 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 5,3 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke nicht erfüllt.

Die Anforderung an die Gesamtkörnung gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke E eingehalten (Ist-Werte: 5,0 bis 6,2 M.-%) (Tab. 45).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“, als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, sind sehr homogen und liegen zwischen 35,2 und 38,1 M.-% (Tab. 45). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke E erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Die Anteile an schlecht geformten Körnern liegt bei 9,4 M.-%, womit die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden (Tab. 45).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 0,9 und 1,7 M.-%. Anforderungen an den Parameter Glühverlust bestehen gemäß TL Min-StB 2000 nicht (Tab. 45).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke E eingehalten werden. Ein Einsatz ist somit aus bautechnischer Sicht möglich.

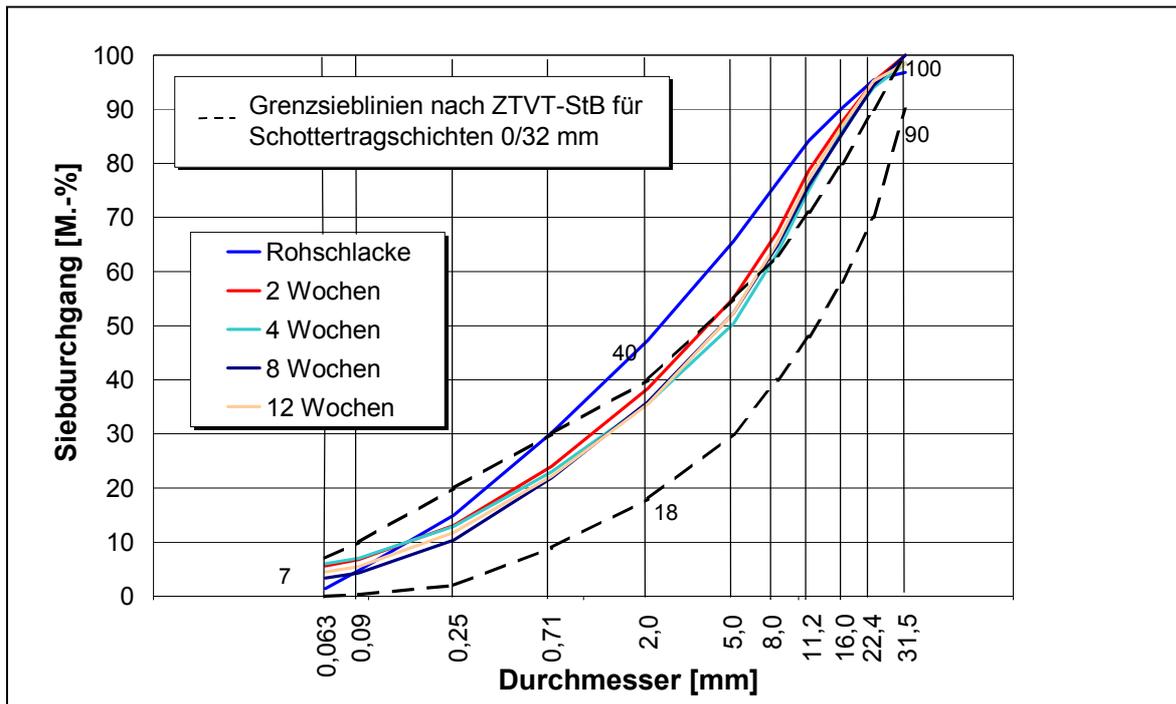


Abb. 97 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke E

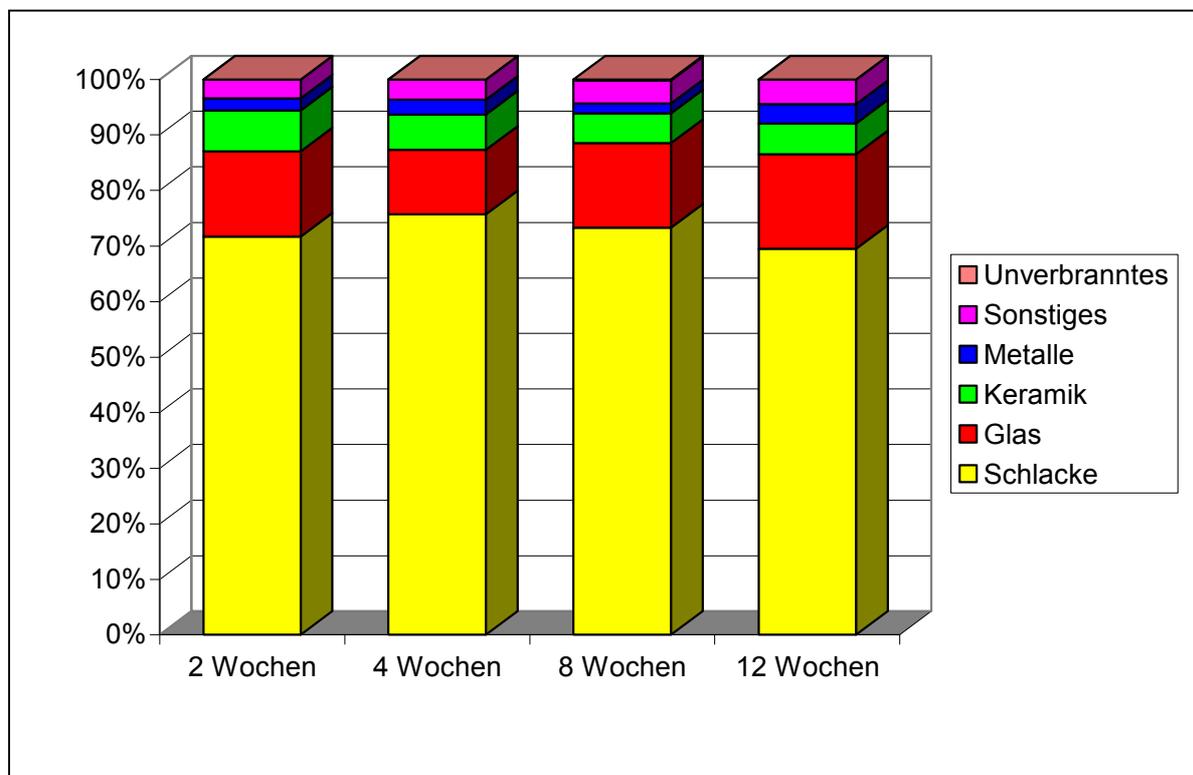


Abb. 98 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke E

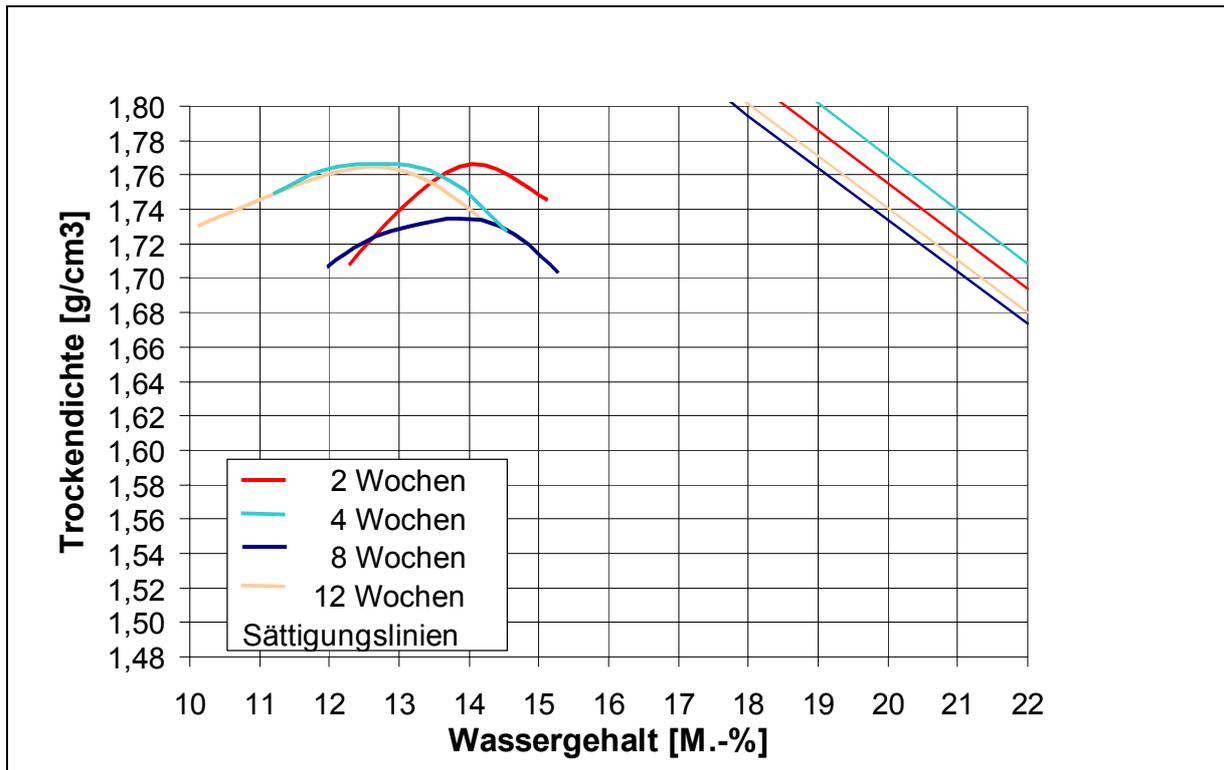


Abb. 99 Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke E

Tab. 45 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke E

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	10,1	9,9	8,8	9,0	
Rohdichte	g/cm ³	2,727	2,737	2,662	2,712	
Schüttdichte	g/cm ³	1,244	1,296	1,345	1,303	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16 mm)	< 5 mm	n.b.	n.b.	n.b.	5,3	3 (5)
	< 0,71 mm	n.b.	n.b.	n.b.	4,1	2,5
	M.-%					
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	5,4	6,2	5,2	5,0	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	37,0	38,1	37,4	35,2	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	9,4	50
Glühverlust	M.-%	0,9	1,1	1,5	1,7	

5.2.6 ANLAGE F

In der MVA F wurde ein Großversuch (MV-Schlacken F) durchgeführt.

- **Verfahrenstechnik der Müllverbrennungsanlage F**

Die verfahrenstechnischen Parameter der Müllverbrennungsanlage F gehen aus Tab. 46 hervor. Die untersuchten Schlackeproben stammen aus einem Kessel mit einem Treppenvorschubrost und einer Mittelstromfeuerung.

Tab. 46 Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA F

Verfahrensparameter der MVA F	
Rostsystem	Treppenvorschubrost
Durchsatz [t/a]	280.000
Linien	3
Feuerung	Mittelstrom
Heizwert [kJ/kg]	10.500
Abfallarten	Hausmüll
	Gewerbeabfall
	Sperrmüll
Schlackeanfall [t/a]	75.000

- **Müllinput**

Folgende Müllzusammensetzung wurde großtechnisch thermisch behandelt:

Tab. 47 Müllzusammensetzung während des Großversuches

Müllzusammensetzung während des Großversuches an der MVA F in M.-%				
Haumüll	Gewerbeabfall	Sperrmüll	Tiermehl	Sonstiges
43,8	36,5	15,7	1,1	2,9

- **Aufbereitungstechnik der MV-Schlacken F**

Die in der Müllverbrennungsanlage F produzierten MV-Schlacken werden per LKW zur angeschlossenen Schlackenaufbereitungsanlage transportiert.

Nach einer feuchteabhängigen Zwischenlagerung zur Reduktion des Feuchtegehaltes werden die MV-Rohschlacken zu MV-Schlacken aufbereitet. Die Vorlagerung sowie die Nachlagerung findet im Freien statt. Die Aufbereitungsanlage befindet sich ebenfalls im Freien und verfügt über eine Siebanlage sowie Trommel- und Überbandmagneten zur Entfernung von FE-Anteilen.

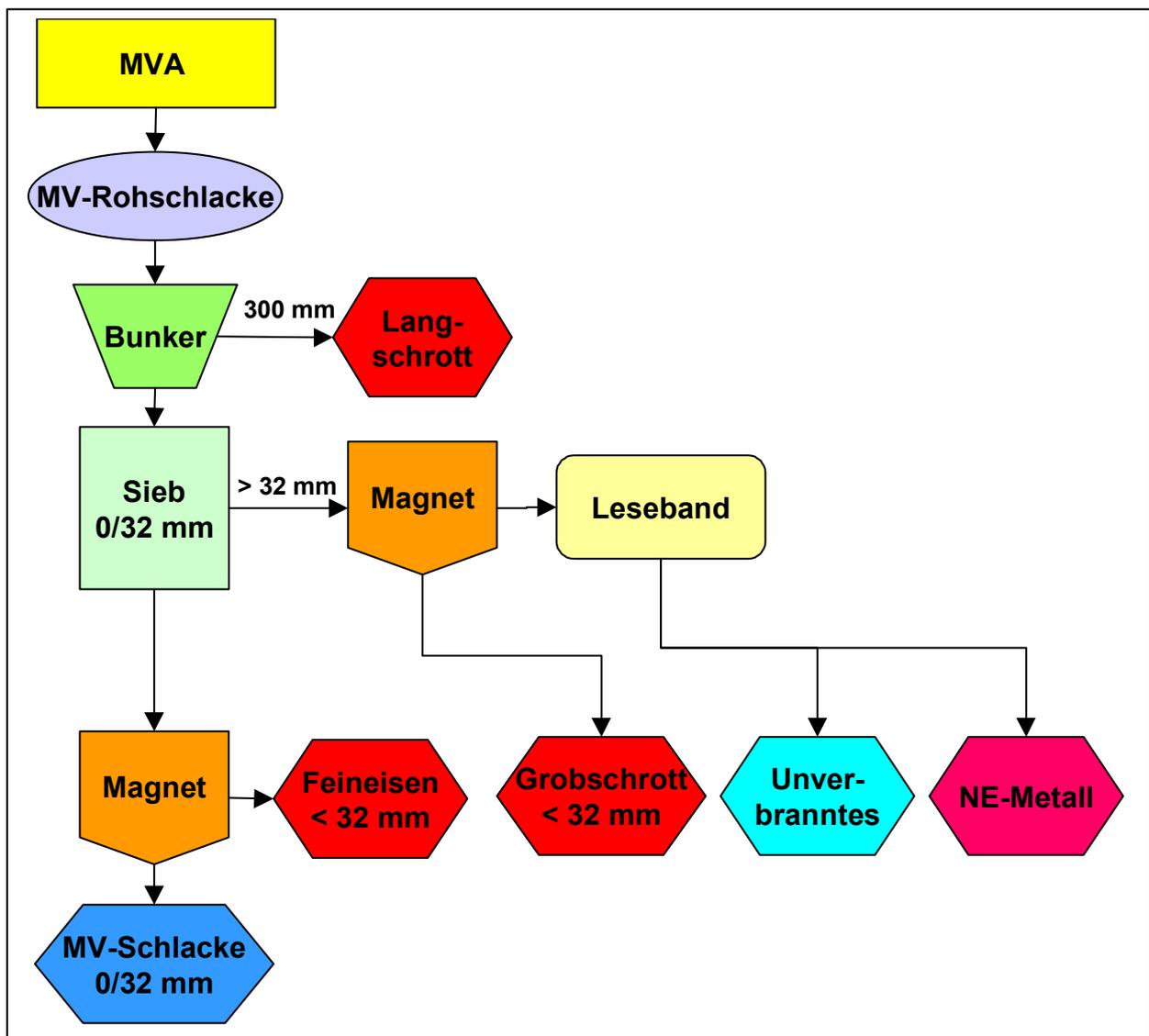


Abb. 100 Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA F

Die aufbereitete MV-Schlacke unterliegt der Güteüberwachung gemäß RG Min-StB 93 [30] und wird im Straßenbau und Deponiebau verwendet.

5.2.6.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke F

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke F geht aus Tab. 48, die der Grobfraktion aus Tab. 49 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 101).

Im Feinanteil der MV-Schlacke stellen das Carbonat Calcit (CaCO_3) und das Oxid Quarz (SiO_2) die mineralogischen Hauptphasen dar. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), die Sulfate Anhydrit (CaSO_4) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) sowie neu gebildete Glasphasen auf.

Tab. 48 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke F

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Akzessorie/Spuren	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase/Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Hauptphase/Nebenphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Akzessorie/Spuren	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

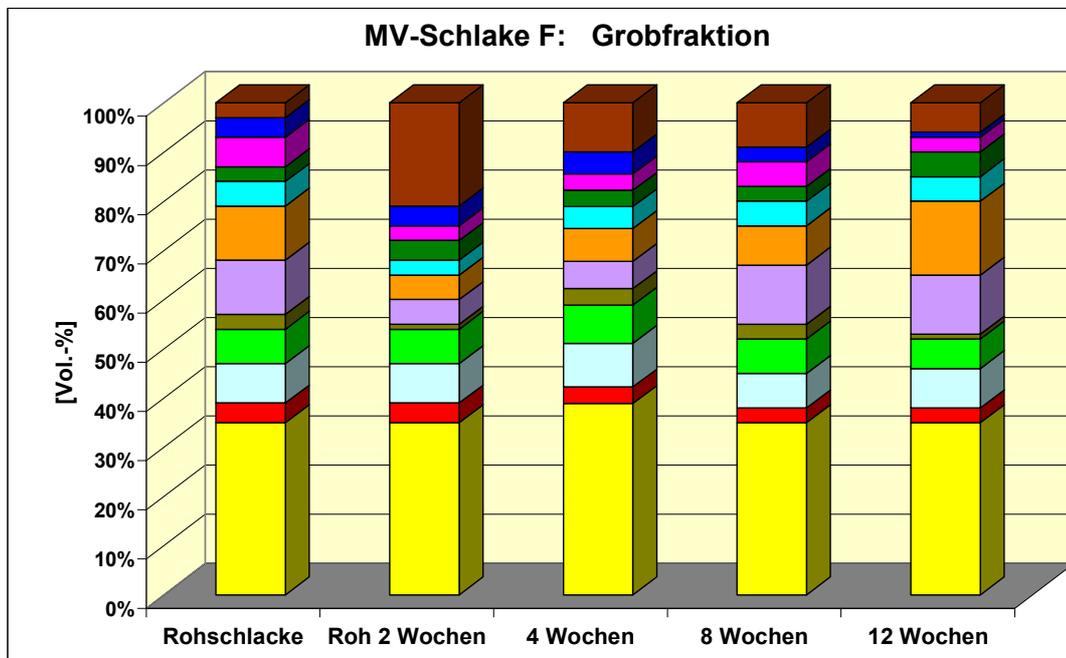
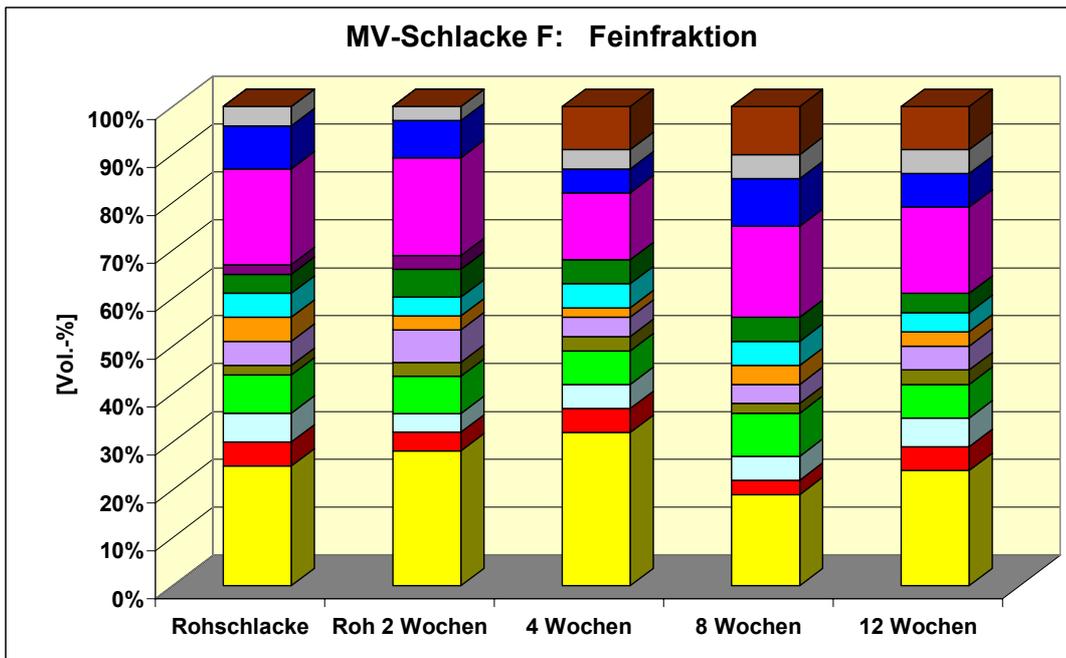
In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die alleinige Hauptphase dar, während die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und neu gebildete Glasphasen die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Carbonat Calcit (CaCO_3), das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$), und das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) auf.

Tab. 49 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke F

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Nebenphase/Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Nebenphase/Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Akzessorie	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
Neubildung			

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke F handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO_2), sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) hingegen wird sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker und das Carbonat Calcit (CaCO_3) im Laufe der Ablagerung durch die zusätzliche Reaktion von Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mit dem Luft- CO_2 gebildet.



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe_3O_4	■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Åkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$		
■ <u>Neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 101 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke F

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacken F folgendes festgestellt (Abb. 102):

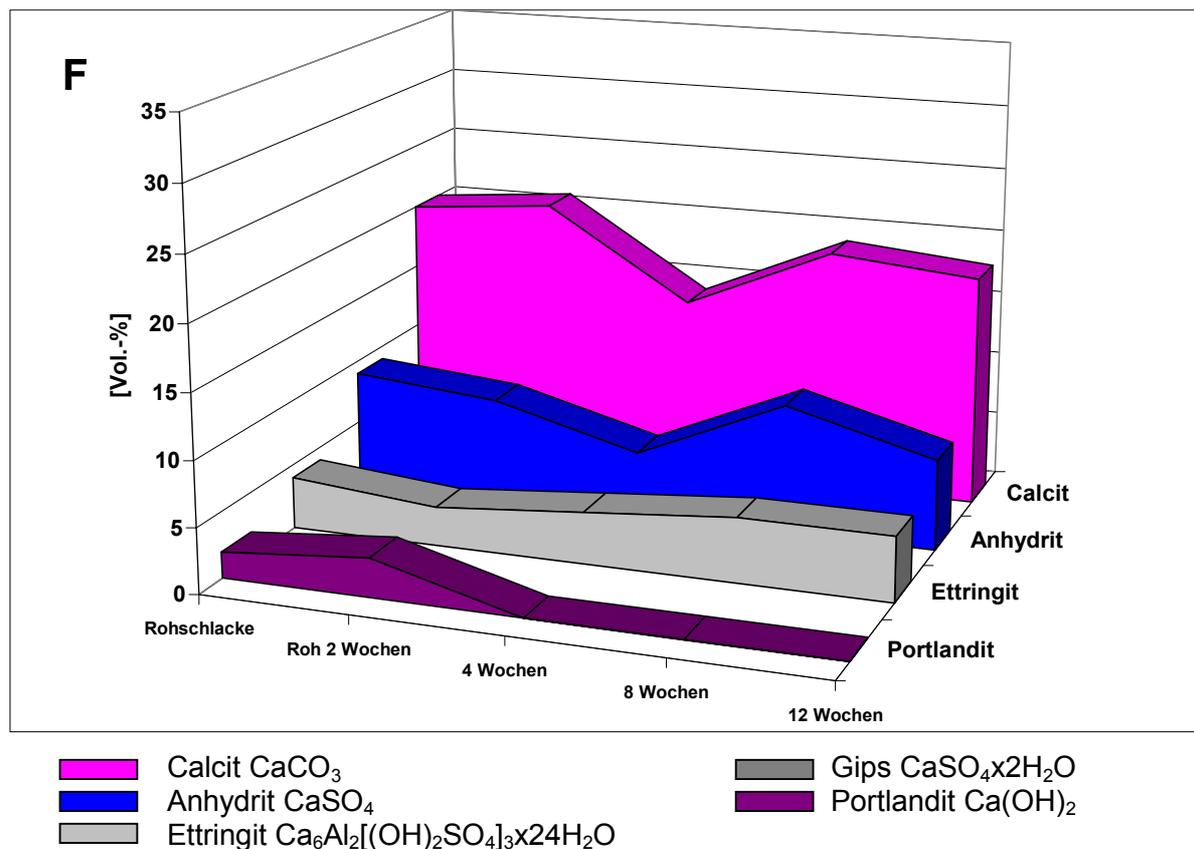


Abb. 102 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke F

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Schlacke F eine deutliche Abnahme des Portlandits (Ca(OH)₂), wobei in der MV-Schlacke nach einer Ablagerungszeit von 4 Wochen kein Portlandit mehr detektiert werden kann. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO₃) gesteuert wird, lässt keine ausgeprägten Alterationsreaktionen im Verlaufe der Ablagerung erkennen, da keine Zunahme des Calcits festgestellt werden kann. Die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke F weist sogar geringere Calcitgehalte als die frisch produzierte MV-Rohschlacke auf und deutet somit auf ein mangelndes Carbonatisierungsvermögen hin.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO₄), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, ist im Mineralbestand der MV-Rohschlacke sehr stark angereichert und kann während einer Ablagerungszeit von drei Monaten nicht ausreichend abgebaut werden. Demnach sind in der MV-Schlacke F die Sulfatreaktionen noch nicht abgeschlossen und es muss mit weiteren Reaktionen gerechnet werden, die sich negativ auf die Raumbeständigkeit auswirken können.
- Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃x24H₂O) tritt bereits in der MV-Rohschlacke in deutlichen Mengen auf, die während der Ablagerung noch weiter ansteigen.

Bei der MV-Schlacke F handelt es sich somit um eine MV-Schlacke, die nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen ein mangelndes Carbonatisierungsvermögen aufweist und

bei der die Sulfatreaktionen noch nicht abgeschlossen sind. Die MV-Schlacke F muss daher zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung als reaktiv und, im mineralogischen Sinne, als noch nicht ausreichend raumbeständig eingestuft werden.

5.2.6.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke F

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke F zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 103-a und 103-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit kontinuierlich von pH 12,1 auf 11,1 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit fallen während der Ablagerungszeit von drei Monaten kontinuierlich von ca. 220 mS/m auf 100 mS/m. Sie liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Die Zinkwerte zeigen im Laufe der Ablagerung eine starke Abnahme von ca. 80 µg/l auf 30 µg/l und unterschreiten folglich die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l.
- Die Bleiwerte der MV-Schlacke nehmen in den ersten beiden Wochen der Ablagerung sehr stark ab und fallen von ca. 230 µg/l auf 40 mg/l. Nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten liegen sie unterhalb der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden somit von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.
- Die Kupferwerte steigen in den ersten beiden Wochen der Ablagerung sehr stark von 800 µg/l auf ca. 1.900 µg/l an und fallen danach auf Werte von ca. 500 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden daher von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke nicht eingehalten.
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Nickel und Quecksilber liegen nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Chromgehalte sind gering und liegen zwischen 30 µg/l und 40 µg/l. Die Zuordnungswerte der LAGA von 200 µg/l und die Grenzwerte der TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden eingehalten.
- Die Gehalte an Chlorid variieren zwischen ca. 40 mg/l und 100 mg/l ohne eine eindeutige Tendenz aufzuweisen. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l werden unterschritten.
- Die Sulfatwerte steigen von ca. 170 mg/l auf 350 mg/l während der Ablagerungszeit an. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l werden eingehalten.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke, bis auf eine Überschreitung des Parameters Kupfer, eingehalten werden.

- **Chemische Untersuchungen im Feststoff**

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 104 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke F in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke F eingehalten.

- **Langzeitstabilität**

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 105 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

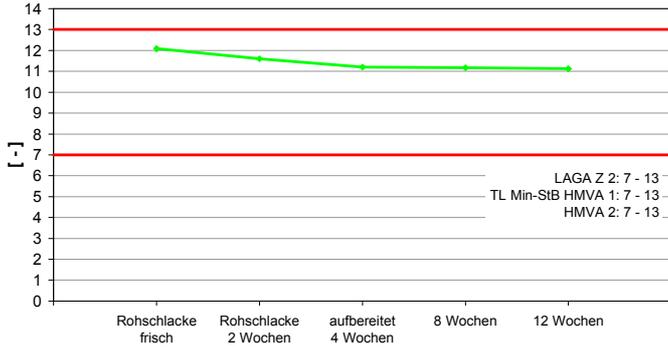
Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnentests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnentests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle, der Chloride und Sulfate abgeschätzt werden.

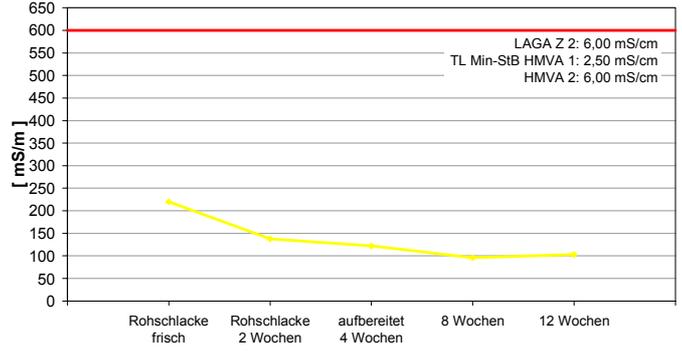
Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil der betrachteten Schwermetalle Zink, Blei und Kupfer weitaus höher ist als derjenige von Nickel, Chrom und Cadmium, die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnentests jedoch in einer vergleichbaren Größenordnung liegen mit Ausnahme des leicht erhöhten Wertes von Kupfer. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit von Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid, allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnentests, dass die eluierbaren Mengen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungsvorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

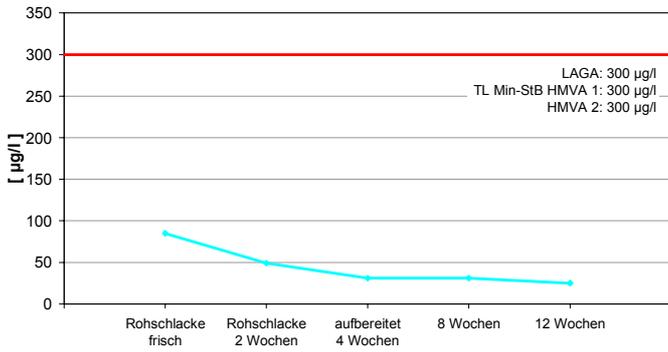
DEV S4-Test: pH-Wert



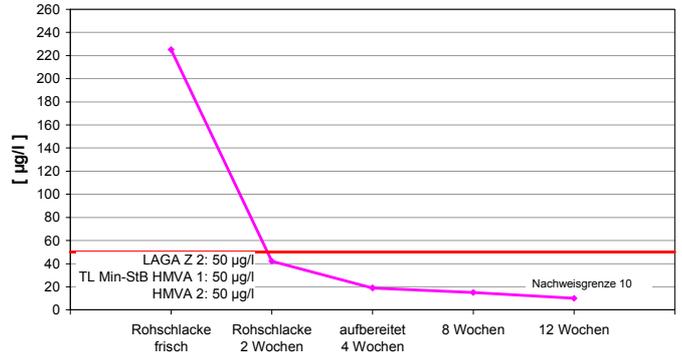
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



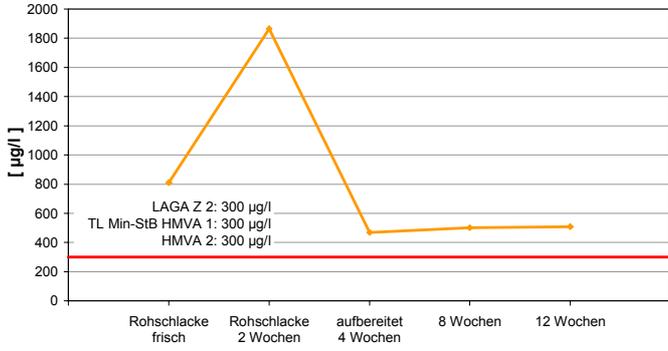
DEV S4-Test: Zink



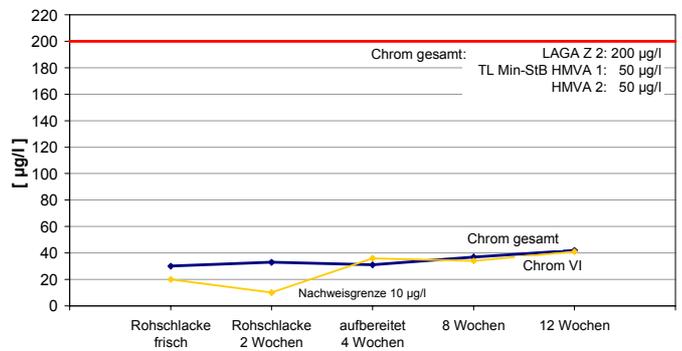
DEV S4-Test: Blei



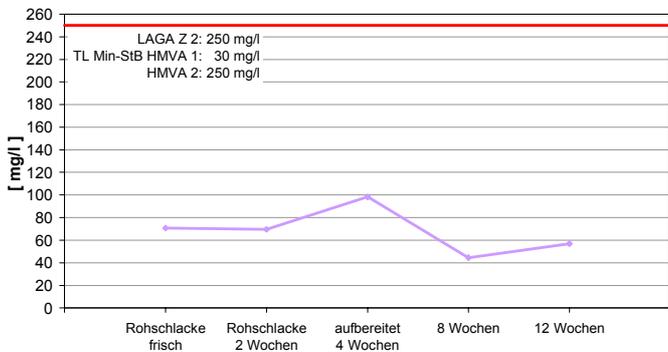
DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

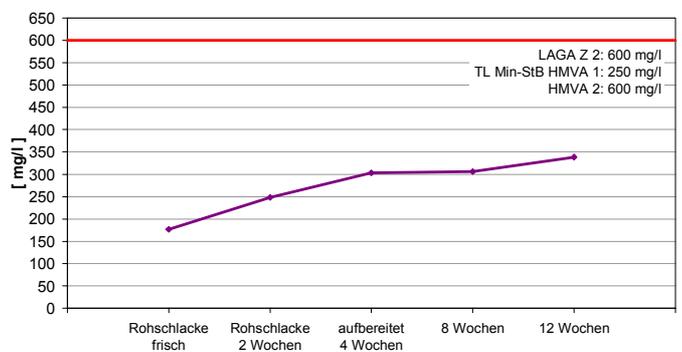


Abb. 103-a Ergebnisse der DEV S4-Eluateruntersuchung der MV-Schlacke F

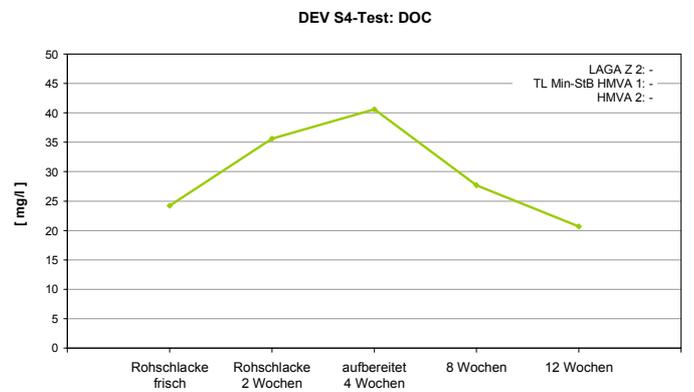
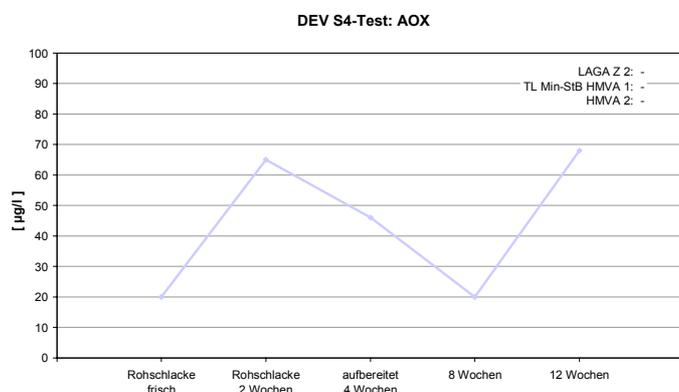
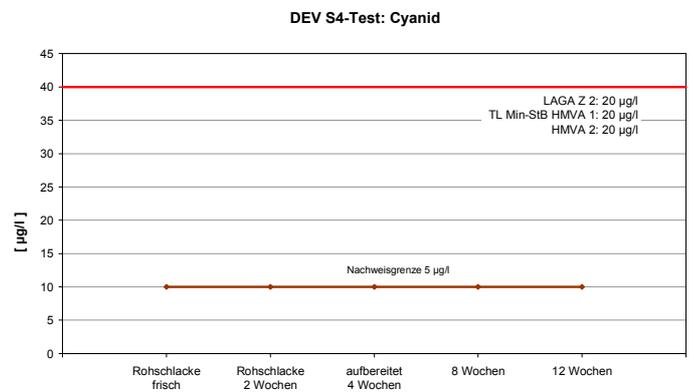
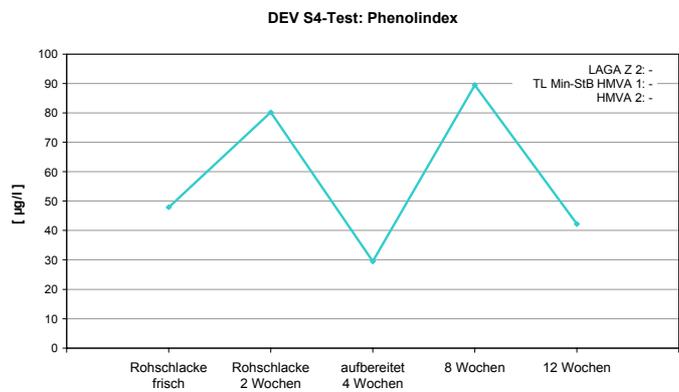
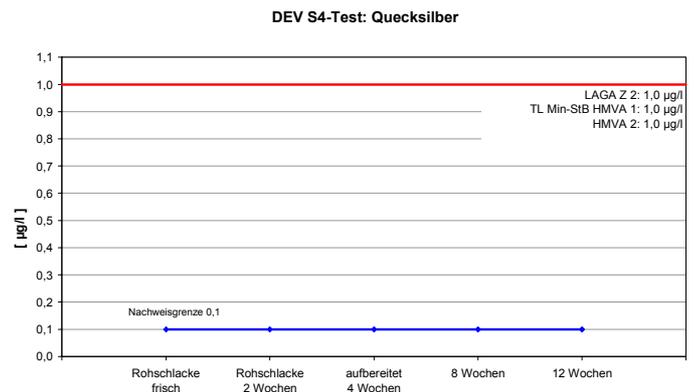
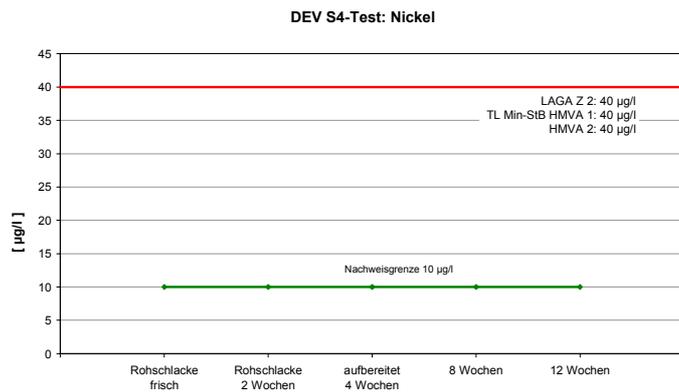
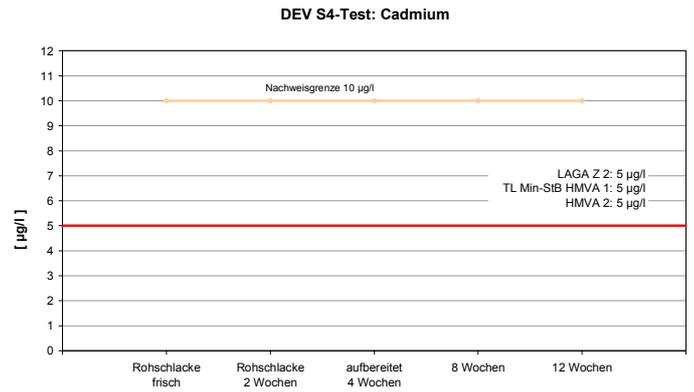
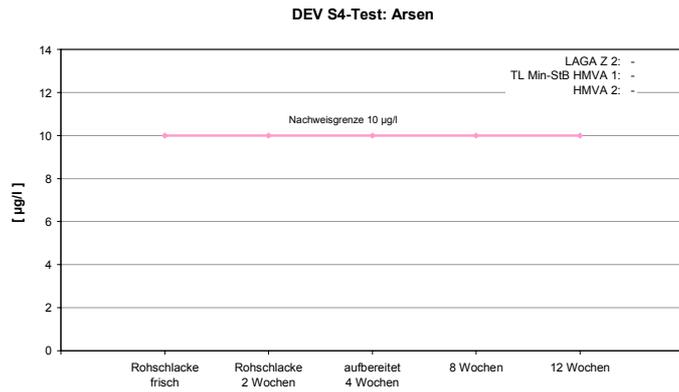


Abb. 103-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke F

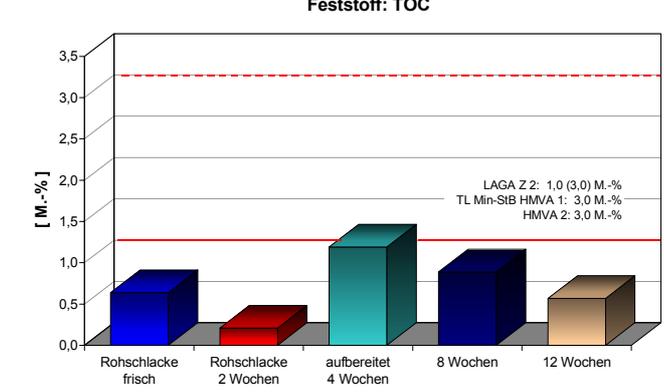
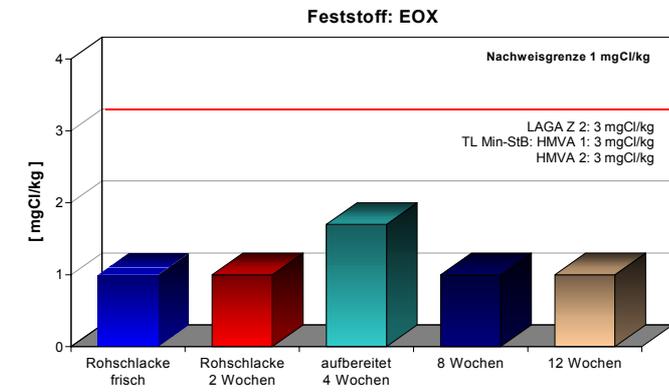
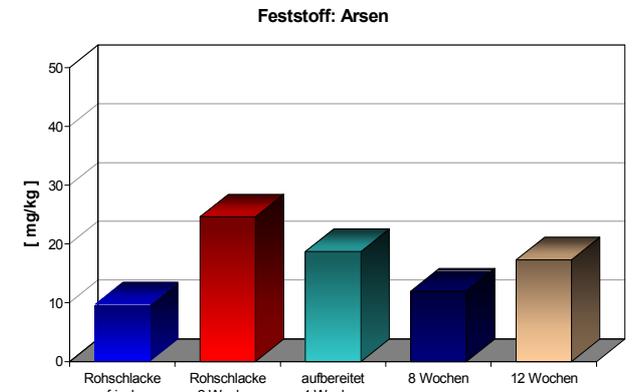
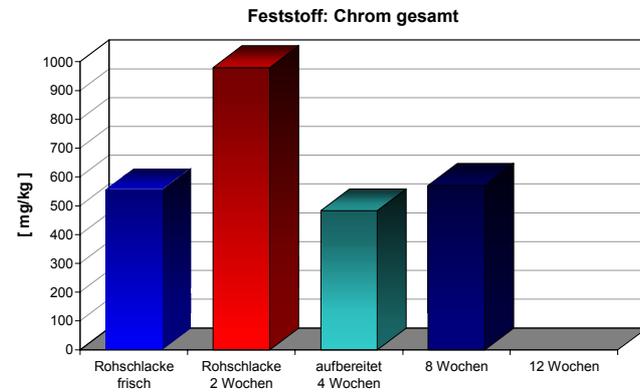
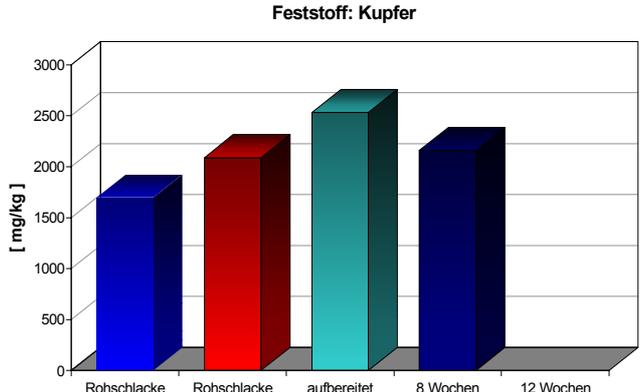
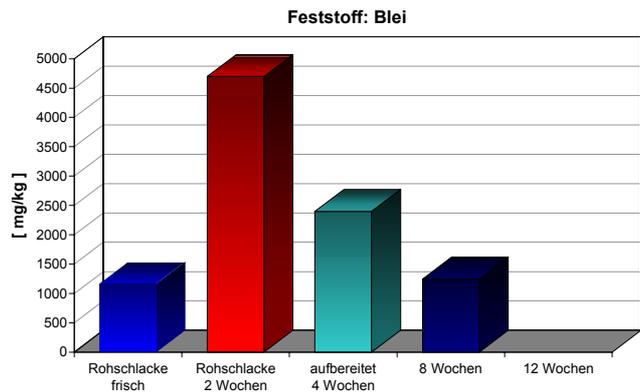
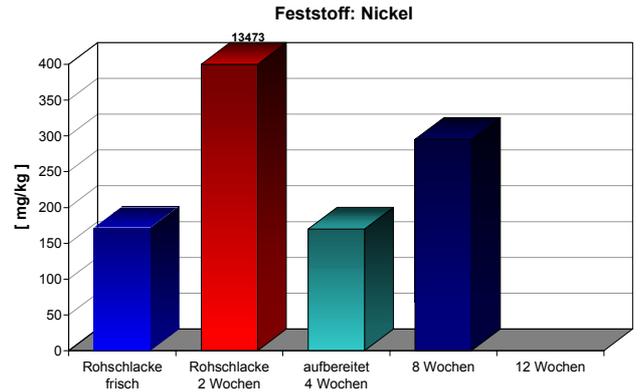
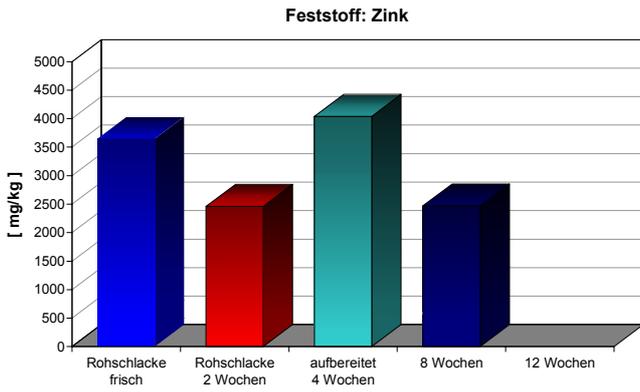
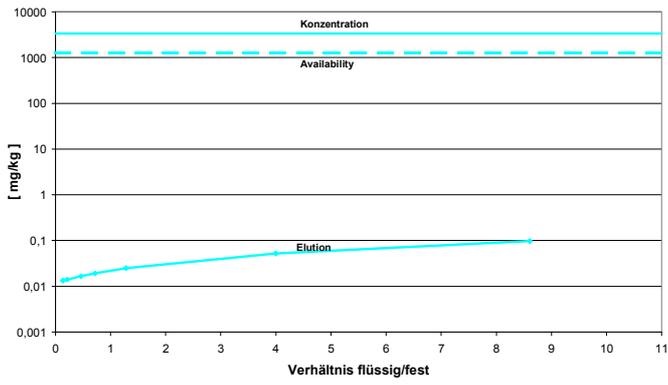
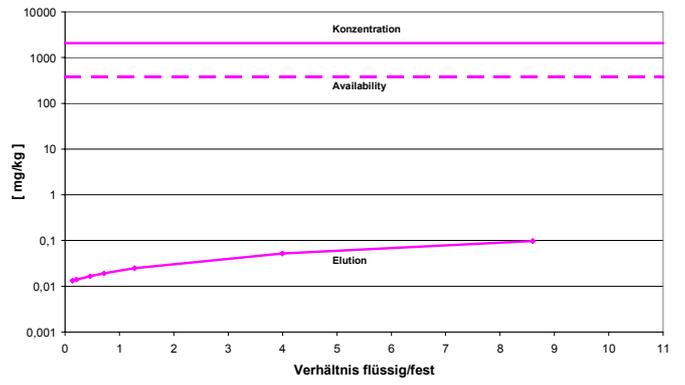


Abb. 104 Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen der MV-Schlacke F

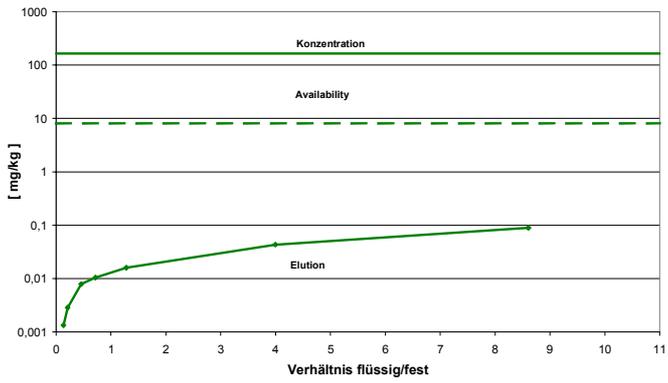
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



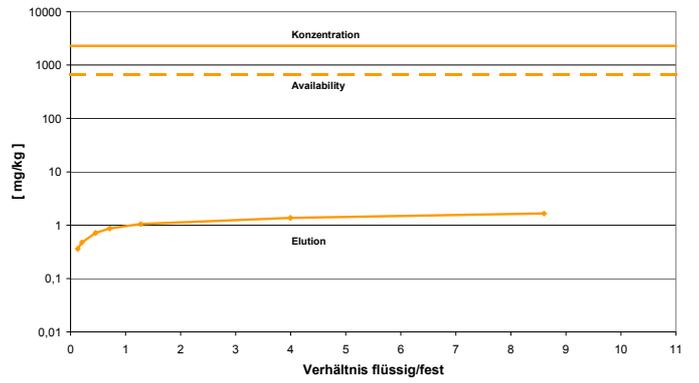
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



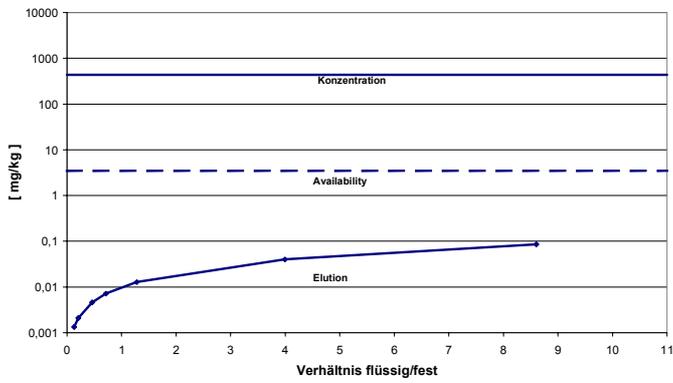
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



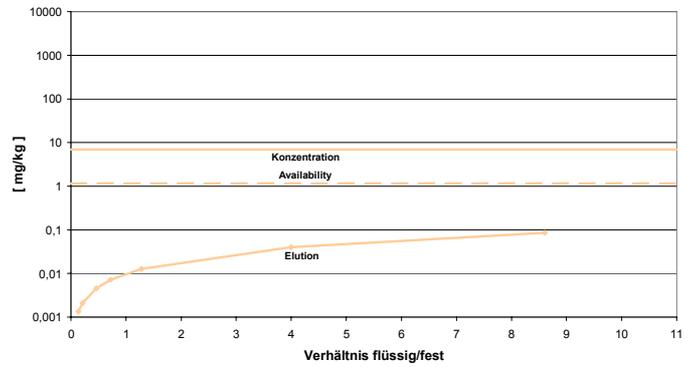
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



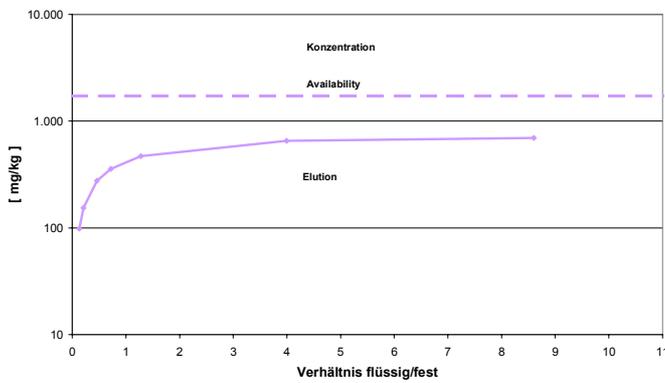
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

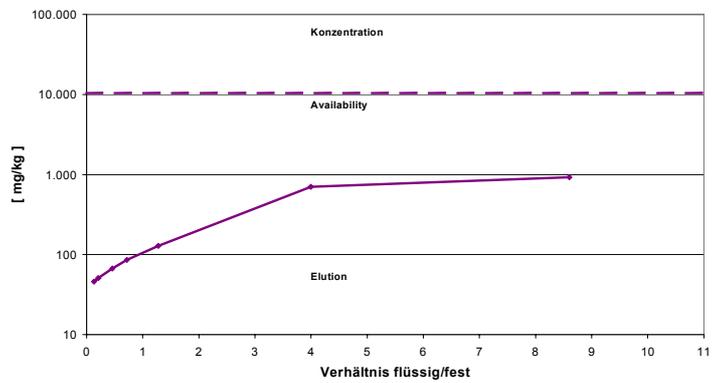


Abb. 105 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke F

5.2.6.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke F

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] erfolgt. Darüber hinaus werden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken abschätzen zu können. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke F gehen aus Abb. 106 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 11,2 mm die zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerte MV-Schlacken oberhalb der Grenzsieblinie liegen, d.h. einen zu geringen Anteil an Grobkorn aufweisen.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke F geht aus Abb. 107 hervor. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 62 bis 64 M.-%) der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ % (Ist-Werte: 0,2 bis 0,5 M.-%) sowie an den Metallanteil von max. 5,0 M.-% (Ist-Werte: 3,4 bis 4,7 M.-%) werden von dem untersuchten Material eingehalten.

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke liegen zwischen ca. 1,66 und 1,70 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 15 und 16,5 M.-% (Abb. 108). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke F, die sich auch in der Baupraxis zeigt.

• Wassergehalt

Die festgestellten Wassergehalte schwanken nach der Aufbereitung zwischen 13,3 und 16,1 M.-% (Tab. 50). Eine Reduktion der Wassergehalte während der Ablagerung erfolgt bei der MV-Schlacke F nicht, wobei jedoch beachtet werden muss, dass die Lagerung der aufbereiteten MV-Schlacke im Freiland erfolgte, und somit der natürliche Niederschlag direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte einwirken konnte.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,66 g/cm³ und 2,705 g/cm³ und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 50). Die große Schwankungsbreite geht auf die stark unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke (z.B. Anteile an Metallen) zurück.

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm \leq 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 3,9 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke erfüllt.

Die Anforderung an die Gesamtfraktion gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke F eingehalten (Ist-Werte: 4,7 bis 5,7 M.-%) (Tab. 50).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, sind sehr homogen und liegen zwischen 37,5 und 39,4 M.-% (Tab. 50). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke F erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Der Anteil an schlecht geformten Körnern liegt bei 13,5 M.-%, womit die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden (Tab. 50).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 1,4 und 1,75 M.-%. Anforderungen an den Parameter Glühverlust gemäß TL Min-StB 2000 bestehen nicht (Tab. 50).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke F eingehalten werden. Ein Einsatz ist somit aus bautechnischer Sicht möglich.

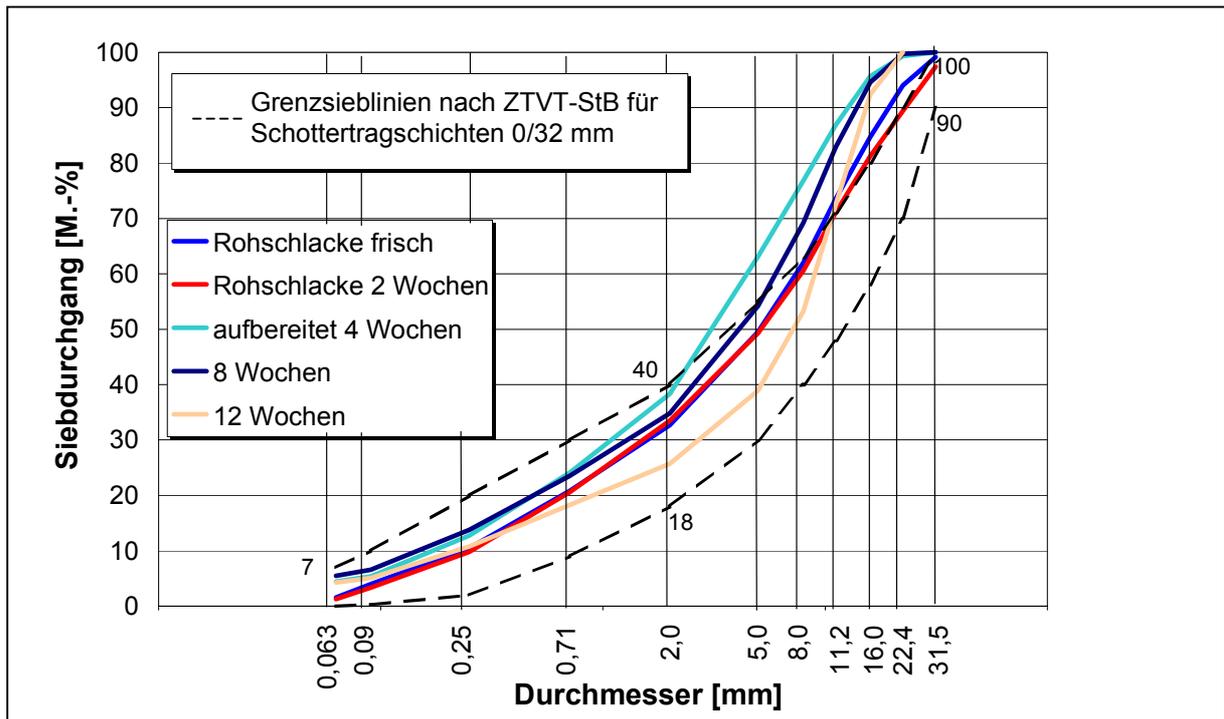


Abb. 106 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke F

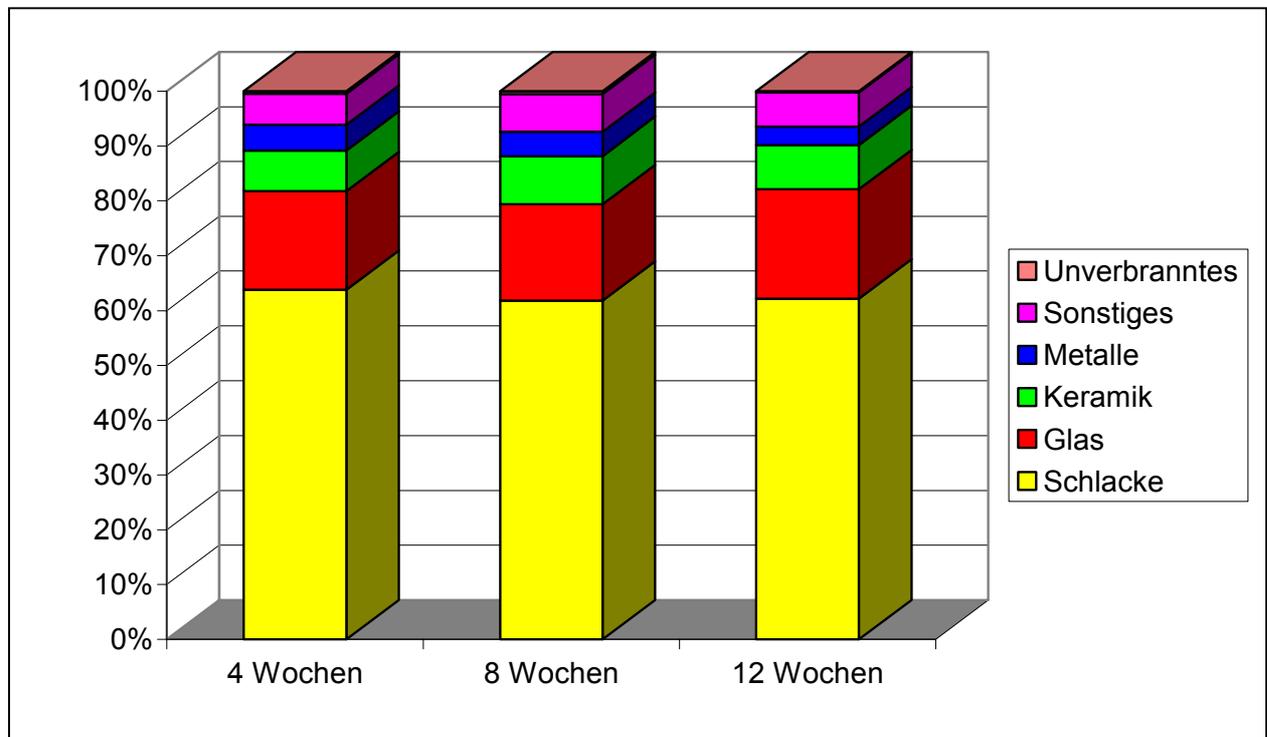


Abb. 107 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke F

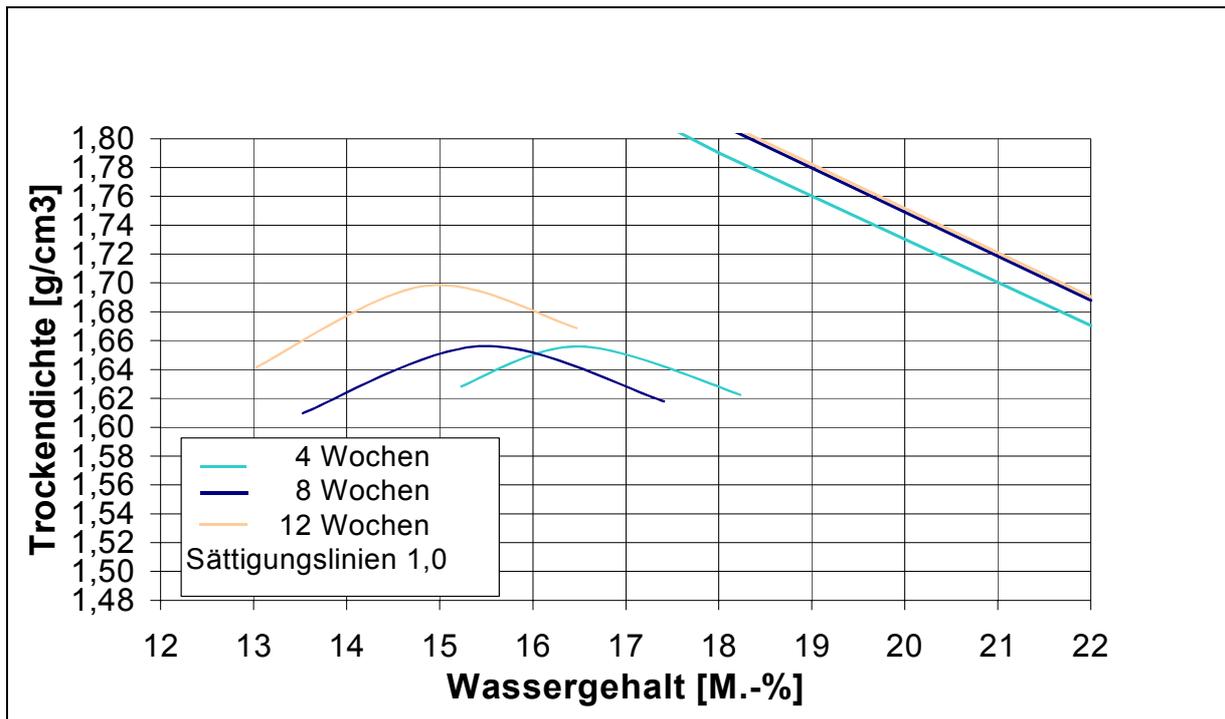


Abb. 108 Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke F

Tab. 50 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke F

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	14,4	16,1	14,0	13,3	
Rohdichte	g/cm ³	n.b.	2,705	2,660	2,682	
Schüttdichte	g/cm ³	n.b.	1,129	1,145	1,182	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16 mm)	< 5 mm < 0,71 mm M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	3,9	3 (5)
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	n.b.	5,6	5,7	4,7	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	n.b.	39,4	39,0	37,5	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	13,5	50
Glühverlust	M.-%	1,6	1,7	1,4	1,75	

5.2.7 ANLAGE G

In der MVA G wurde ein Großversuch (MV-Schlacken G) durchgeführt.

- **Verfahrenstechnik der Müllverbrennungsanlage G**

Die verfahrenstechnischen Parameter der Müllverbrennungsanlage gehen aus Tab. 51 hervor. Die untersuchten Schlackeproben stammen aus einem Kessel mit Vorschubrost und Mittelstromfeuerung.

Tab. 51 Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA G

Verfahrensparameter der MVA G	
Rostsystem	Vorschubrost
Durchsatz [t/a]	350.000
Linien	2
Feuerung	Mittelstrom
Heizwert [kJ/kg]	9.500
Abfallarten	Hausmüll
	Gewerbeabfall
	Sperrmüll
Schlackeanfall [t/a]	104.000

- **Müllinput**

Folgende Müllzusammensetzung wurde großtechnisch thermisch behandelt:

Tab. 52 Müllzusammensetzung während des Großversuchs

Müllzusammensetzung während des Großversuches in der MVA G in M.-%		
Hausmüll / Gewerbemüll	Sperrmüll	Sonstiges
83,8	6,7	9,5

- **Aufbereitungstechnik der MV-Schlacken**

Die in der Müllverbrennungsanlage G produzierten MV-Rohschlacken werden in der angeschlossenen Aufbereitungsanlage nach einer feuchteabhängigen Zwischenlagerung zur Reduktion des Feuchtegehaltes aufbereitet. Die Vorlagerung, die Aufbereitung sowie die Nachlagerung in Boxen findet in der Halle statt. Die Aufbereitungsanlage verfügt über mehrere Siebanlagen zur Herstellung definierter Körnungen, einem Leseband zur Entfernung grober Störstoffe, über mehrere Trommel- und Überbandmagnete und eine Nichteisenabtrennung.

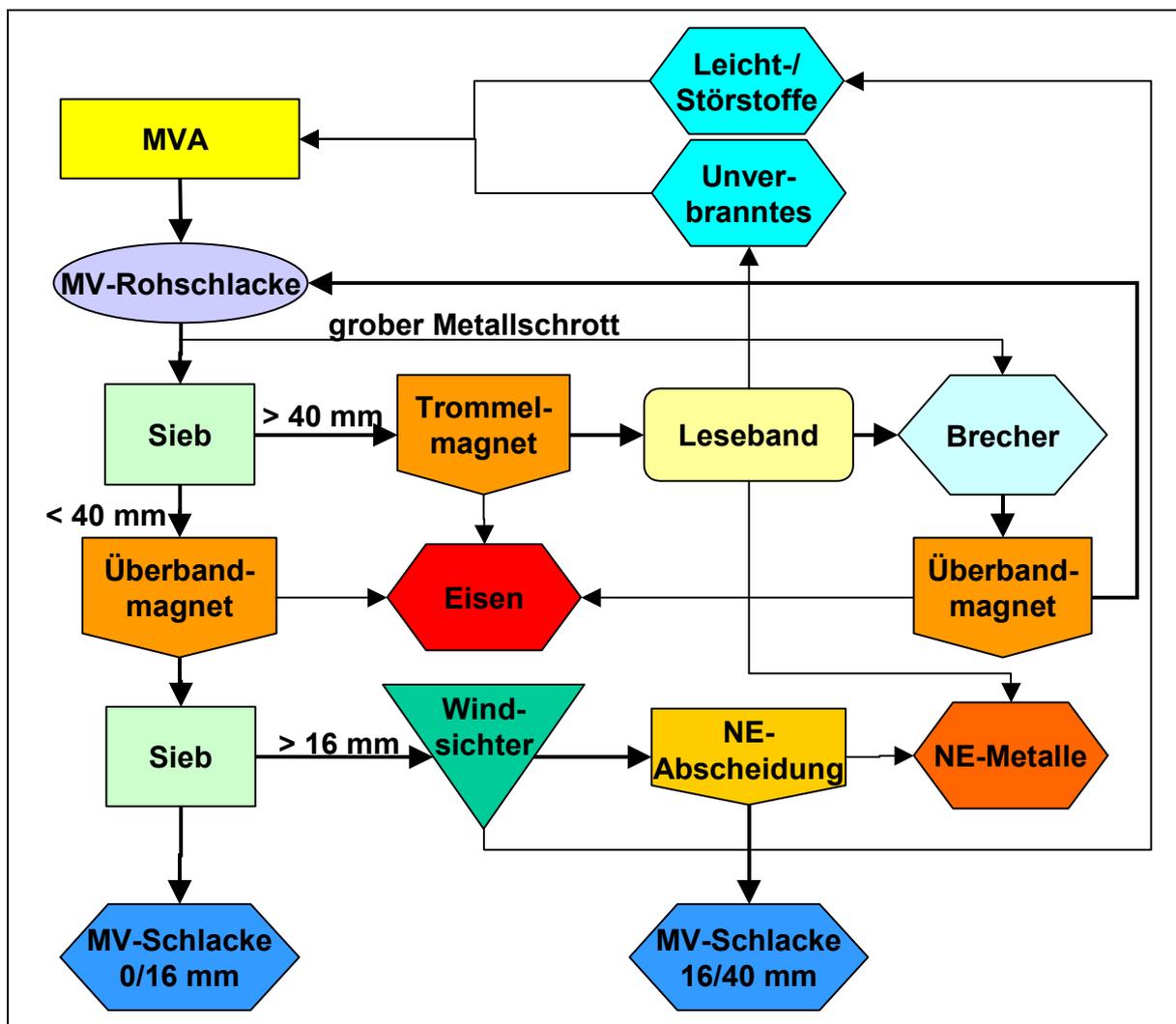


Abb. 109 Schematische Darstellung der Aufbereitungsanlage für die MV-Schlacke G

Die aufbereitete MV-Schlacke unterliegt der Güteüberwachung gemäß RG Min-StB 93 [30] und wird als Baustoff im Straßenbau und Deponiebau verwertet.

5.2.7.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke G

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke geht aus Tab. 53, die der Grobfraktion aus Tab. 54 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 110).

Im Feinanteil der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die Hauptphase dar, während das Carbonat Calcit (CaCO_3) sowie neu gebildete Glasphasen die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie die Sulfate Anhydrit (CaSO_4) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) auf.

Tab. 53 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke G

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Akzessorie/Spuren	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren/Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren/Akzessorie	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Nebenphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

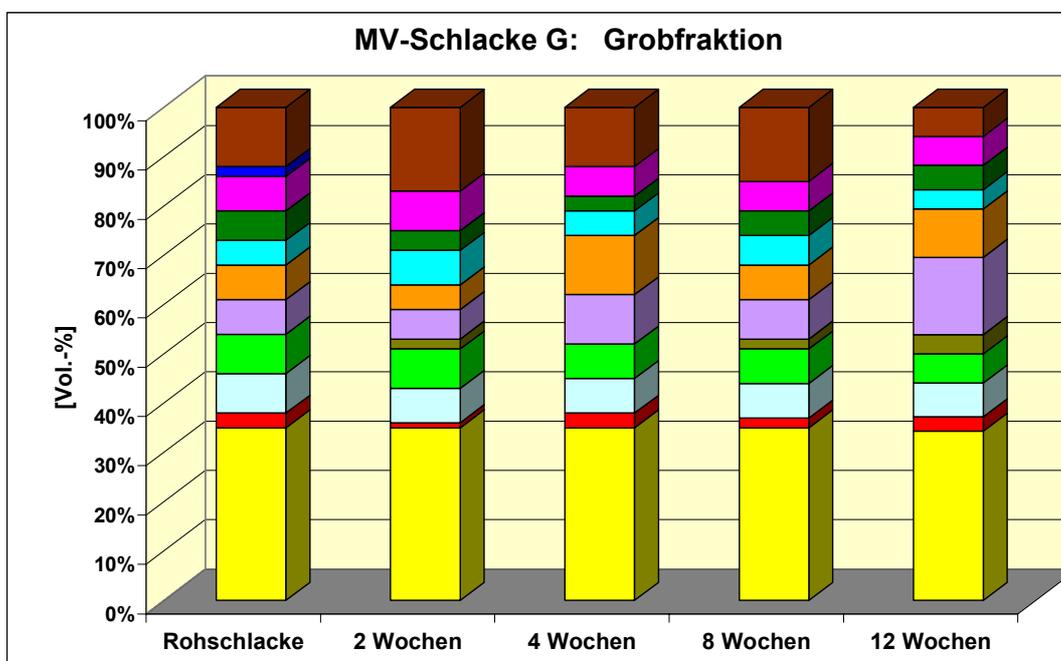
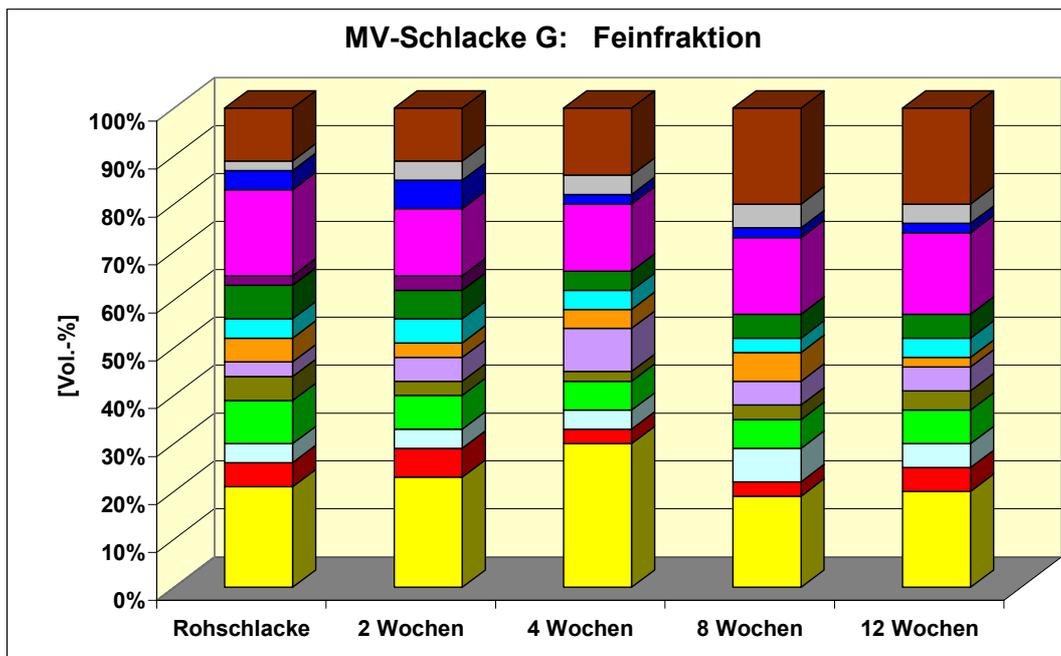
In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die alleinige Hauptphase dar, während teilweise die neu gebildeten Glasphasen und die Silikate Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), das Carbonat Calcit (CaCO_3), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) und das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) auf.

Tab. 54 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke G

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Nebenphase/Akzessorie	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Nebenphase/Akzessorie	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Akzessorie	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase/Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke G handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO_2), sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) wird nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker gebildet. Das Carbonat Calcit (CaCO_3) entsteht im Laufe der Ablagerung durch die Reaktion von Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mit dem Luft- CO_2 .



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe_3O_4	■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Äkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$		
■ <u>Neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 110 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke G

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke G folgendes festgestellt (Abb. 111):

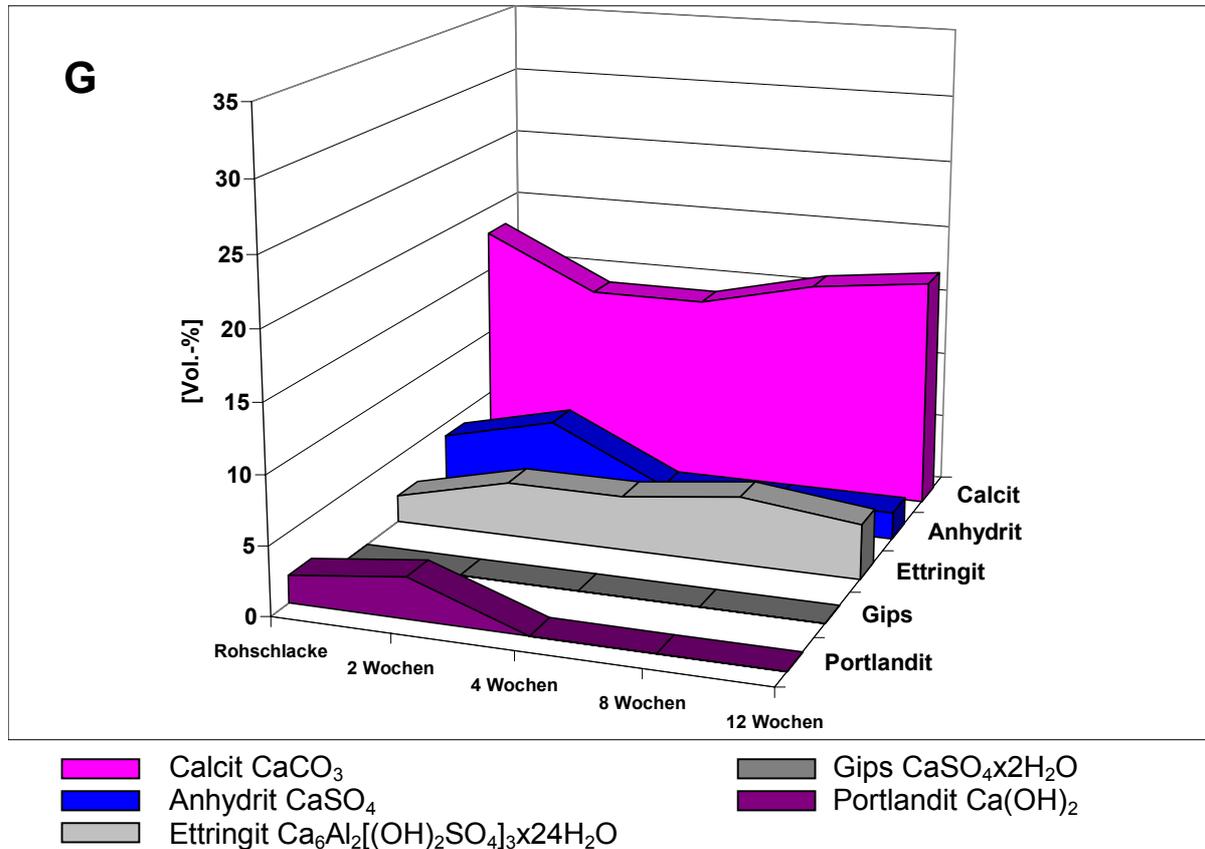


Abb. 111 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke G

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Schlacke G nach zwei Wochen eine deutliche Abnahme des Calcits (CaCO₃) verbunden mit einer Zunahme des Portlandits (Ca(OH)₂). Erst im weiteren Verlauf der Ablagerung nehmen die Portlanditgehalte ab und es kommt zu einer Neubildung des Carbonates Calcits, wobei nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen die Calcitgehalte wieder ihre Anfangsgehalte erreichen. Daher weist die MV-Schlacke G, insgesamt betrachtet, ein verzögertes Carbonatisierungsvermögen auf.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO₄), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, nimmt in der untersuchten MV-Schlacke während der Ablagerungszeit von 12 Wochen nach einem leichten Anstieg deutlich ab. Die MV-Schlacke kann zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung bezüglich der Sulfatreaktionen als reaktionsträge und damit als ausreichend raumbeständig eingestuft werden, da weitere Sulfatreaktionen nur noch in geringem Umfang erwartet werden.
- Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) tritt bereits in der MV-Rohschlacke auf und zeigt im weiteren Verlauf der Ablagerung ansteigende Gehalte, die jedoch in der 12 Wochen abgelagerten MV-Schlacke wieder leicht abnehmen.

Bei der MV-Schlacke G handelt es sich somit um eine MV-Schlacke, die ein verzögertes Carbonatisierungsverhalten aufweist, bei der jedoch nach einer Ablagerungszeit von drei

Monaten die Carbonatisierungsreaktionen sowie die Sulfatreaktionen soweit abgeschlossen sind, dass von einer, im mineralogischen Sinne, raumbeständigen MV-Schlacke ausgegangen werden kann.

5.2.7.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke G

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt, der Aussagen über ein mögliches Gefährdungspotential eines bestimmten Stoffes liefert. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke G zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 112-a und 112-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit in geringem Umfang von pH 11,8 auf 11,1 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit fallen während der Ablagerungszeit von ca. 188 mS/cm auf 131 mS/cm. Die Werte liegen bereits bei der MV-Rohschlacke unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/l).
- Der Zinkgehalt ist bereits in der MV-Rohschlacke mit 57 µg/l sehr gering und fällt während der Ablagerungszeit auf 18 µg/l im Eluat der 12 Wochen abgelagerten MV-Schlacke ab. Die Zinkwerte der MV-Rohschlacke sowie der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke unterschreiten die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l deutlich.
- Der Bleiwert zeigt mit ca. 95 µg/l einen für MV-Rohschlacken moderaten Anfangsgehalt und fällt im weiteren Verlauf der Ablagerung unter die gerätespezifische Nachweisgrenze von ca. 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden bereits von der 2 Wochen abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.
- Die Kupferwerte zeigen während der Alteration zwar eine Abnahme von 820 µg/l (MV-Rohschlacke) auf ca. 329 µg/l nach einer Ablagerungszeit von 8 Wochen, steigen danach jedoch wieder auf 542 µg/l an. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden somit von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke überschritten.
- Die Chromgehalte sind sehr gering und liegen für die untersuchte MV-Schlacke zwischen 13 µg/l und 41 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 200 µg/l bzw. 50 µg/l werden eingehalten.
- Die Gehalte von Cadmium, Nickel, Arsen und Quecksilber liegen fast ausnahmslos nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid variieren, steigen während der Ablagerungszeit jedoch deutlich von ca. 143 auf 241 mg/l an. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 µg/l werden dennoch unterschritten.

- Die Sulfatwerte steigen von 173 mg/l auf 296 mg/l, halten jedoch auch nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l ein.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke G, bis auf den Parameter Kupfer, eingehalten werden.

• Chemische Untersuchungen im Feststoff

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 113 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke G in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke G eingehalten.

• Langzeitstabilität

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 114 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

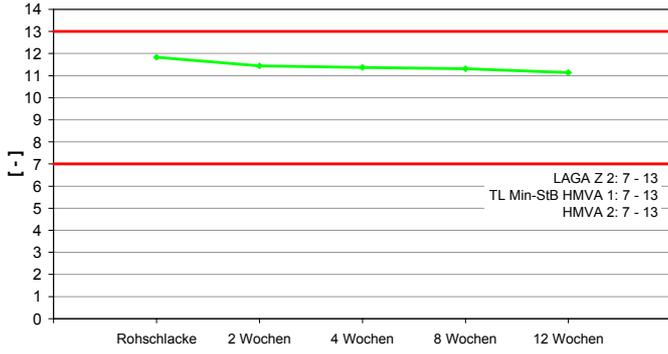
Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnen-tests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnen-tests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle, der Chloride und Sulfate abgeschätzt werden.

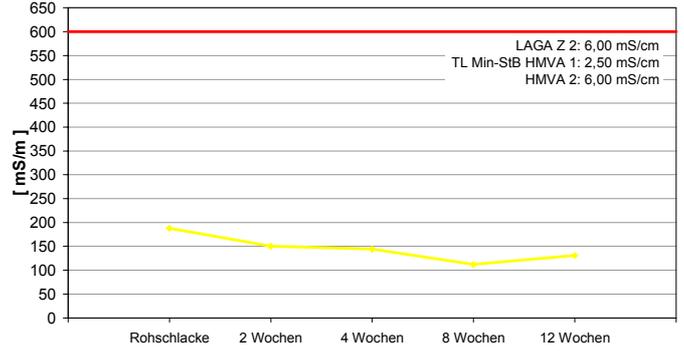
Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil der betrachteten Schwermetalle Zink, Kupfer und in geringerem Umfang Blei weitaus höher ist als derjenige von Nickel, Chrom und Cadmium, die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnen-tests jedoch in einer vergleichbaren Größenordnung liegen, mit Ausnahme des leicht erhöhten Gehaltes an Kupfer. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit an Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid, allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnen-tests, dass die eluierbaren Mengen von Chlorid sogar über denen von Sulfat liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungsvorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

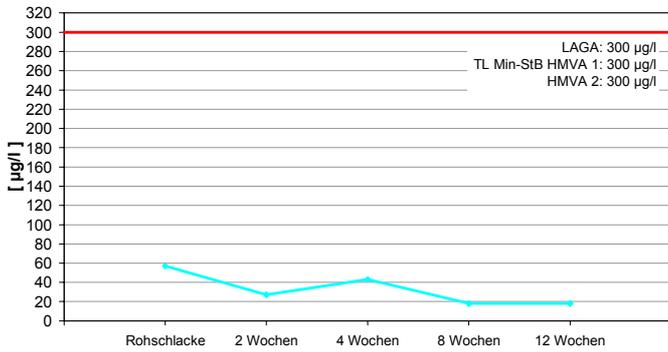
DEV S4-Test: pH-Wert



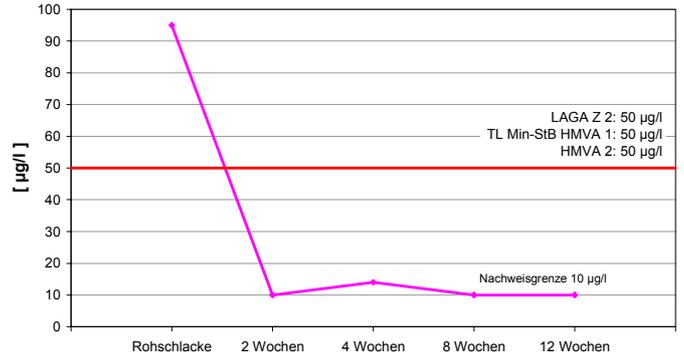
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



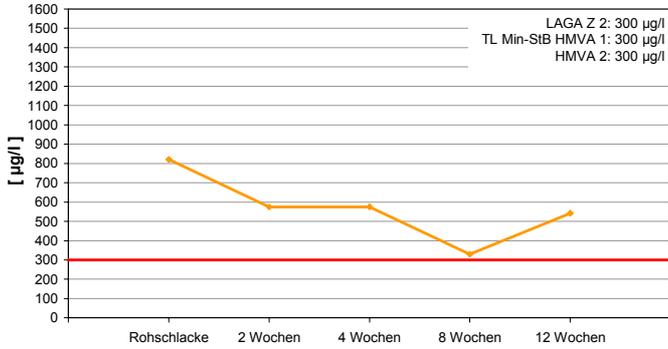
DEV S4-Test: Zink



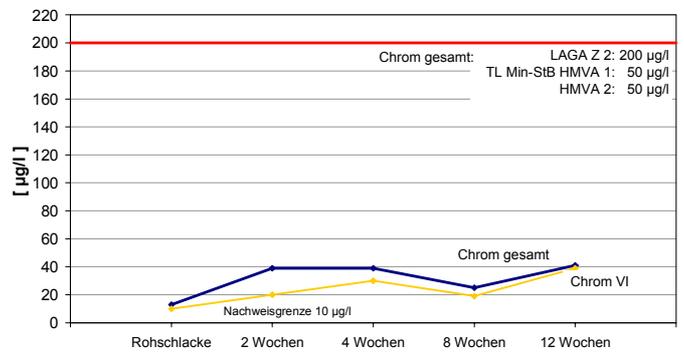
DEV S4-Test: Blei



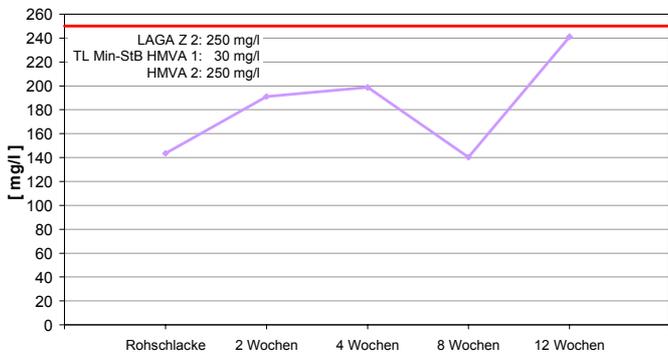
DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

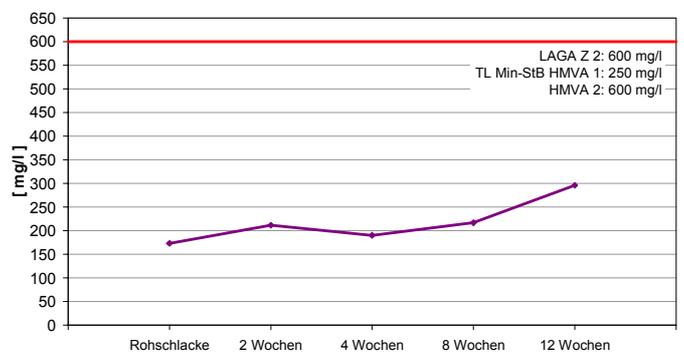
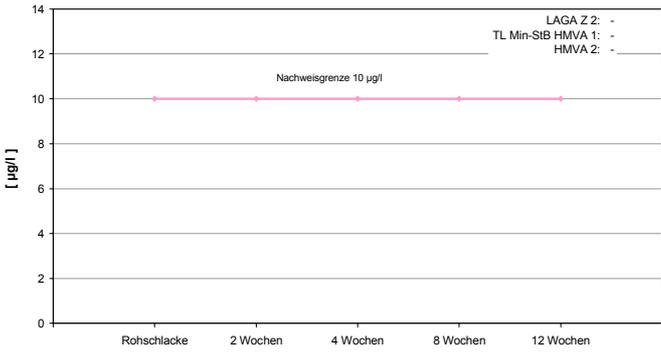
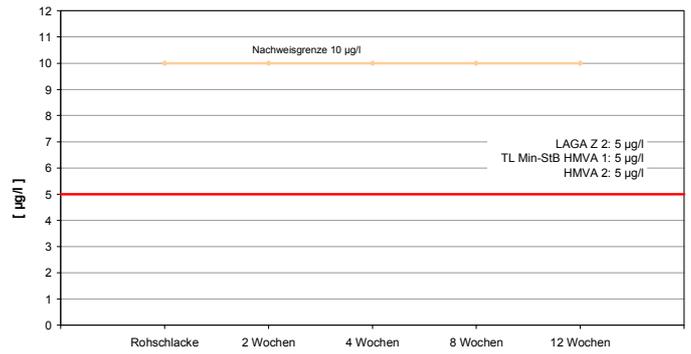


Abb. 112-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke G

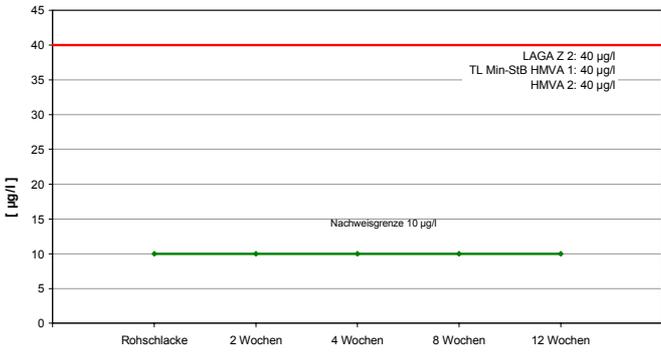
DEV S4-Test: Arsen



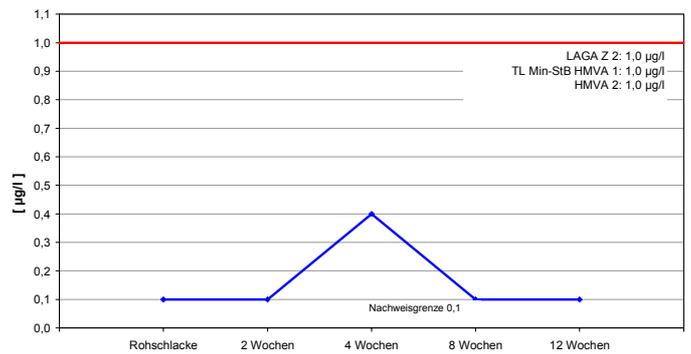
DEV S4-Test: Cadmium



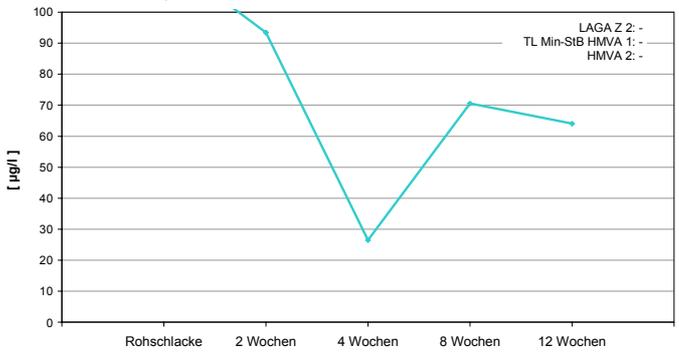
DEV S4-Test: Nickel



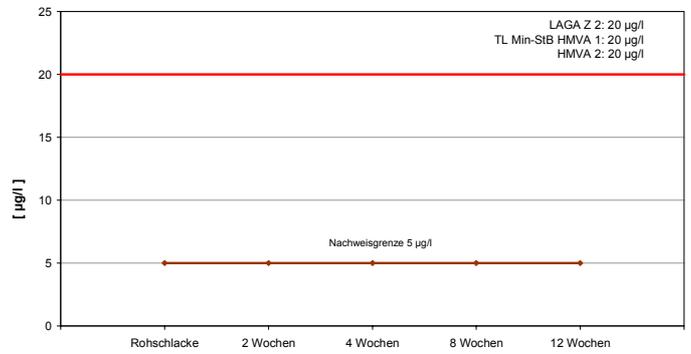
DEV S4-Test: Quecksilber



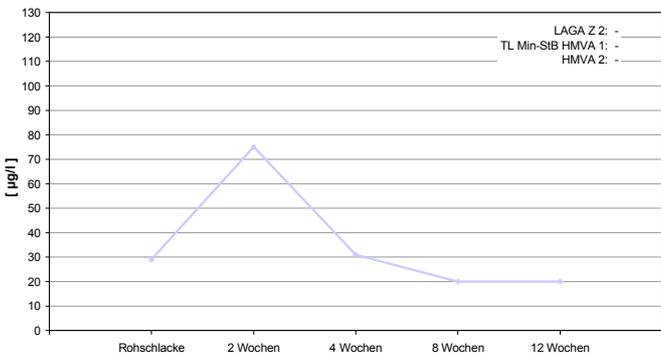
DEV S4-Test: Phenolindex



DEV S4-Test: Cyanid



DEV S4-Test: AOX



DEV S4-Test: DOC

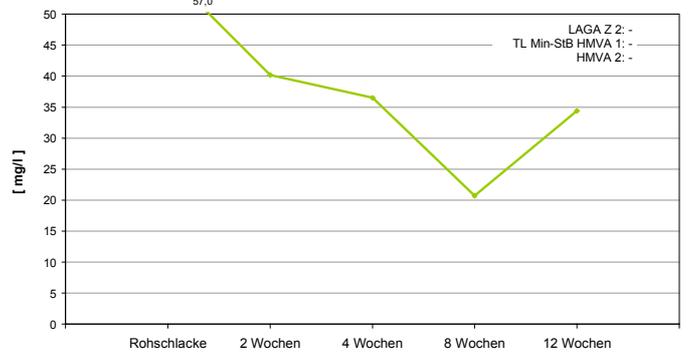


Abb. 112-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke G

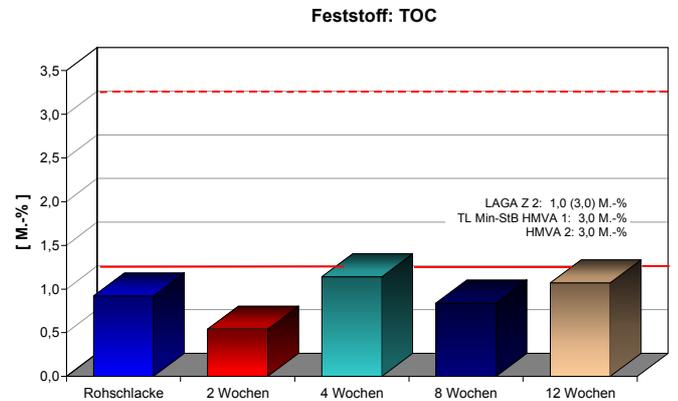
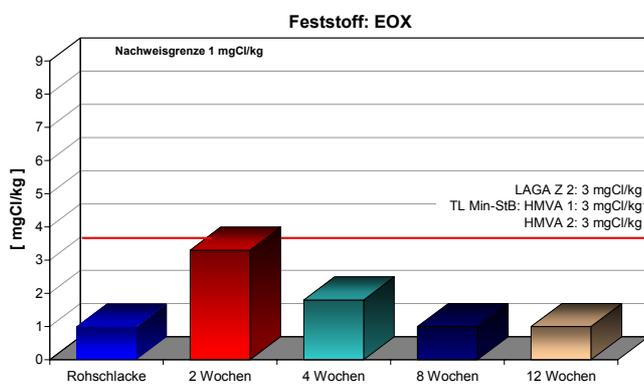
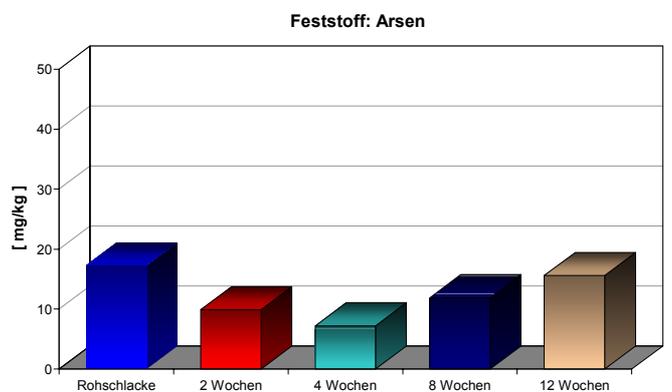
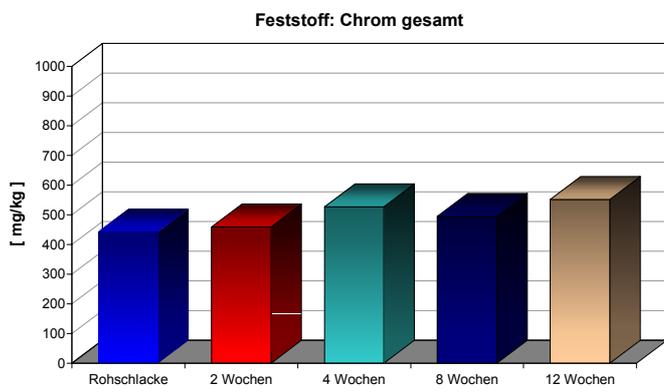
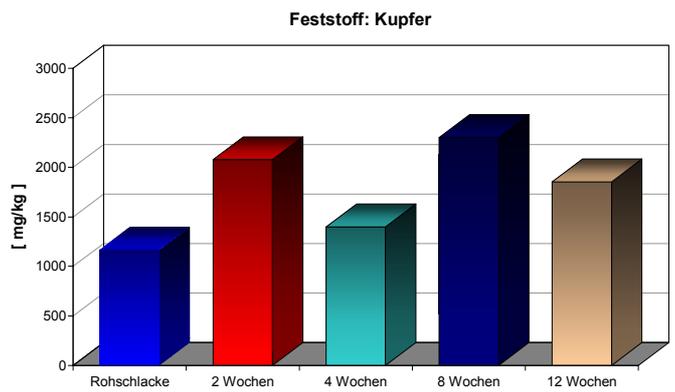
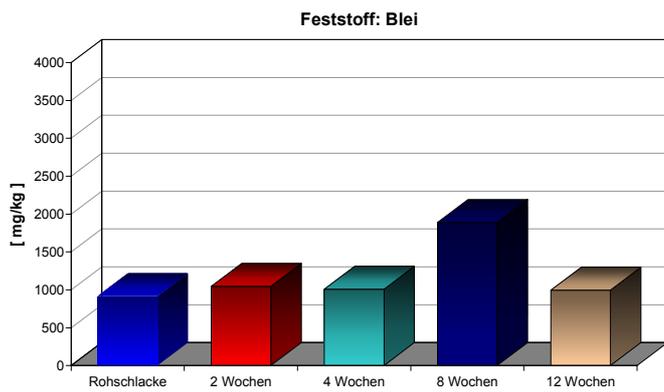
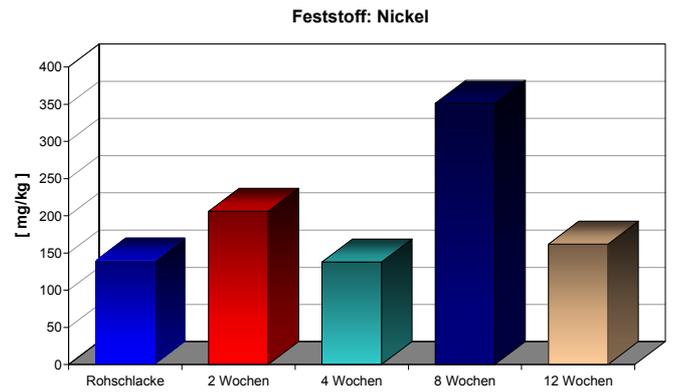
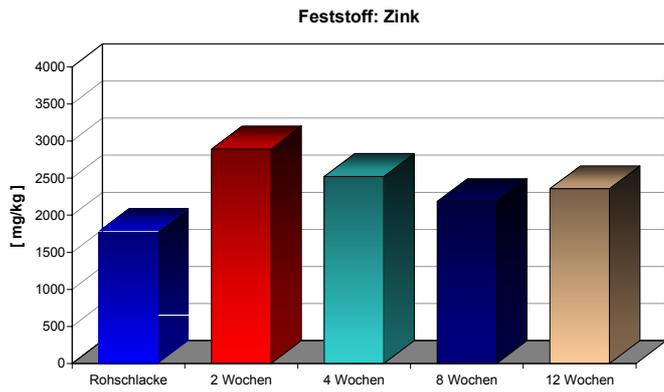
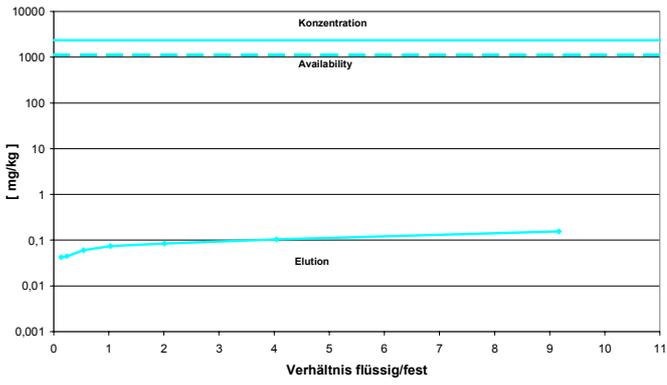
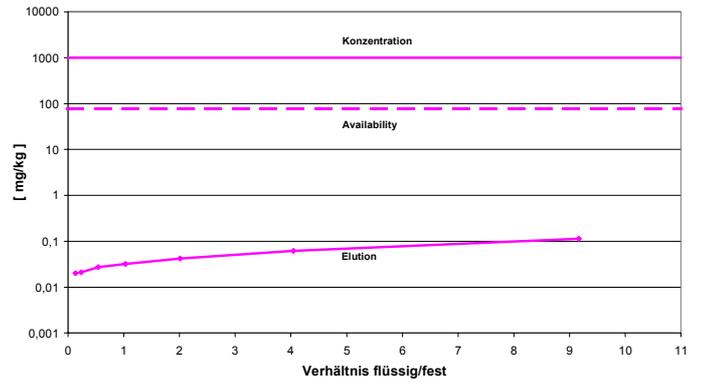


Abb. 113 Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen der MV-Schlacke G

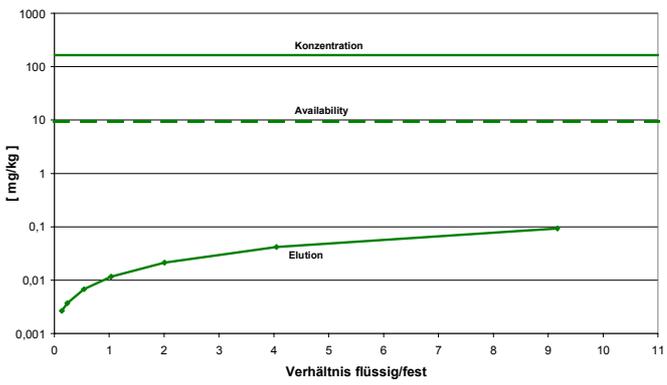
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



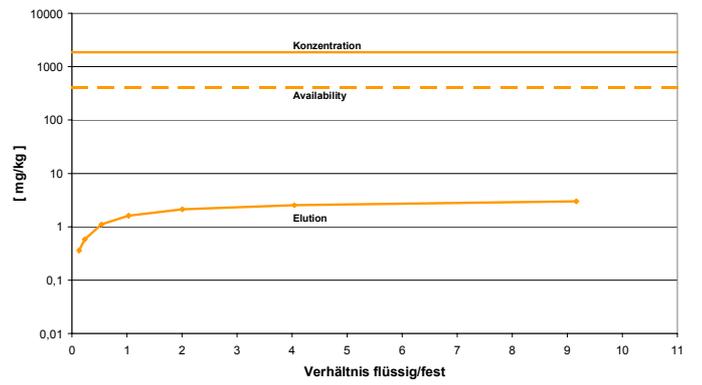
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



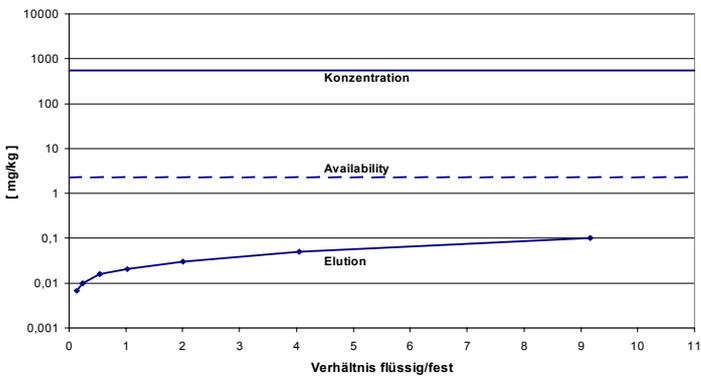
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



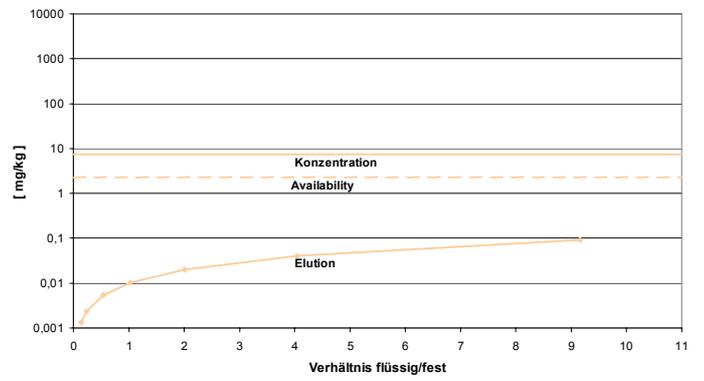
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



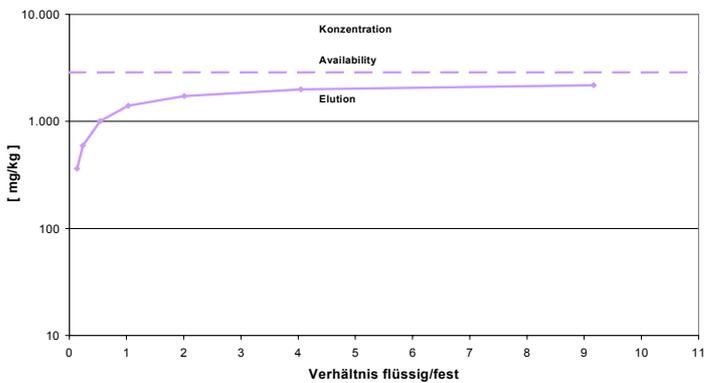
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

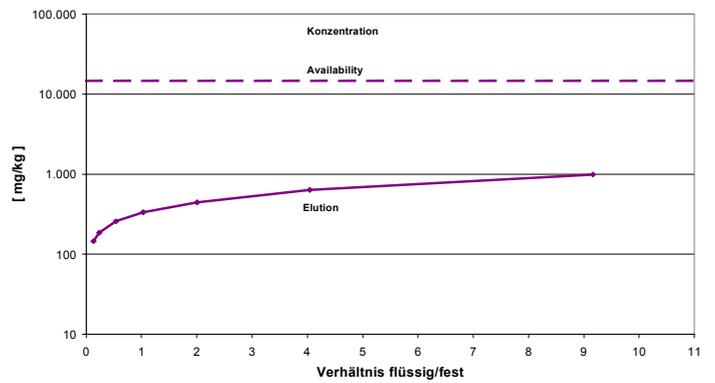


Abb. 114 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke G

5.2.7.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke G

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] beruht. Darüber hinaus erfolgen zusätzliche Untersuchungen, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken im Bereich des Deponiebaus und Erdbaus abschätzen zu können. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften einer drei Monate abgelagerten MV-Schlacke für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke G gehen aus Abb. 115 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke G haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilungen richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass auch die aufbereitete und drei Monate abgelagerte MV-Schlacke ab einer Korngröße von 8 mm oberhalb der Grenzsieblinien liegt, d.h. einen zu geringen Anteil an Grobkorn aufweist.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke G geht aus Abb. 116 hervor. Ein Vergleich der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 65 bis 70 M.-%) der stofflichen Zusammensetzung.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ M.-% werden von der MV-Schlacke G eingehalten (Ist-Werte: bis 0,3 M.-%). Der maximal erlaubte Metallanteil von 5,0 M.-% wird von der untersuchten MV-Schlacke G mit max. 1,8 M.-% eingehalten.

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichte der untersuchten MV-Schlacke liegt zwischen 1,65 und 1,718 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte schwanken zwischen bei 14,3 und 16,0 M.-% (Abb. 117). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke G, die sich auch in der Baupraxis bestätigt.

• Wassergehalt

Der Wassergehalt der frisch produzierten MV-Rohschlacke liegt bei 14,7 M.-% und verringert sich nach der dreimonatigen Ablagerung auf 10,3 M.-% (Tab. 55). Die Ablagerung der MV-Schlacke erfolgt in einer Halle, sodass die Abnahme der Wassergehalte, neben der Schwerkraftentwässerung und Verdunstungsvorgängen, auf Hydratationsreaktionen und die Bildung wasserhaltiger Mineralphasen zurückgeführt werden kann.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken stark zwischen 2,608 und 2,793 g/cm³, liegen jedoch innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 55).

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm ≤ 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 2,7 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke erfüllt.

Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 für die Gesamtkörnung lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke G eingehalten (Tab. 55).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, liegen zwischen 34,8 und 36,1 M.-% (Tab. 55). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke G erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Der Anteil an schlecht geformten Körnern der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke liegt bei 14,5 M.-%, womit die Anforderung der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt wird (Tab. 55).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 1,2 und 2,2 M.-%. Anforderungen an den Parameter Glühverlust gemäß TL Min-StB 2000 bestehen nicht (Tab. 55).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von den untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke G eingehalten werden.

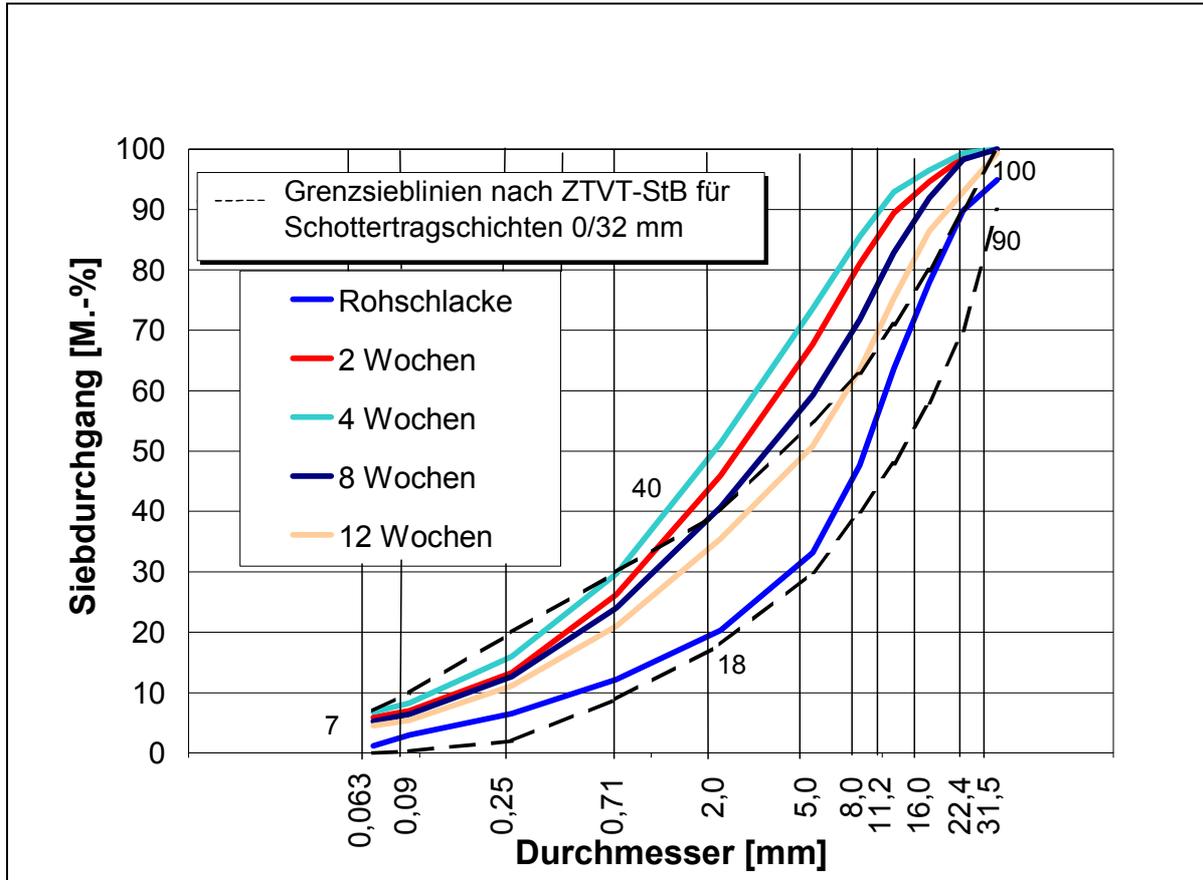


Abb. 115 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke G

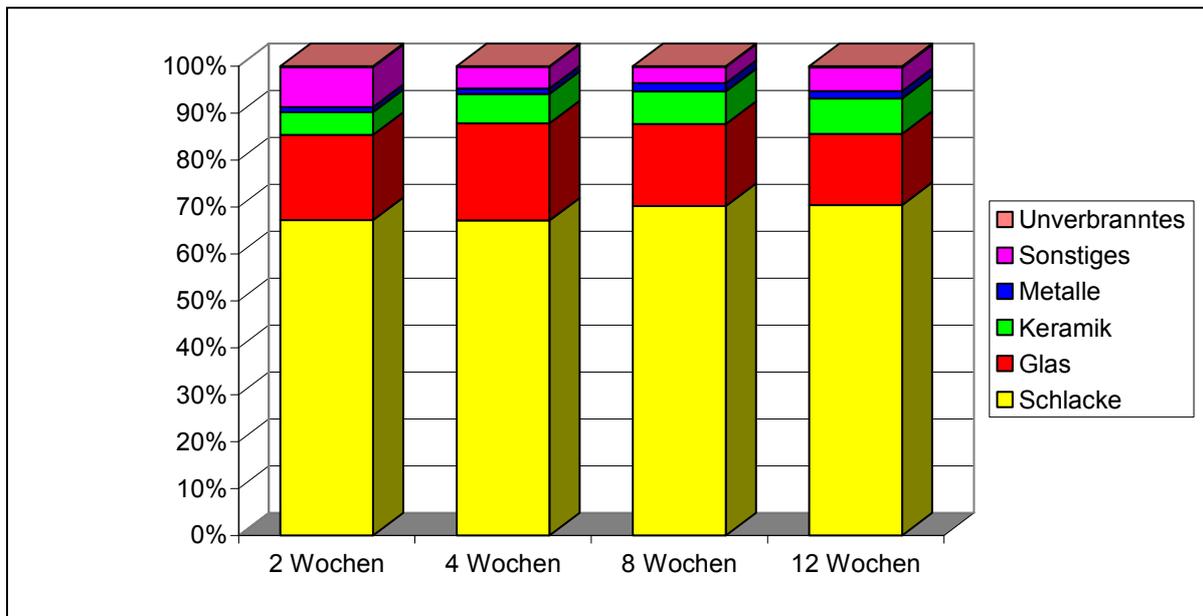


Abb. 116 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke G

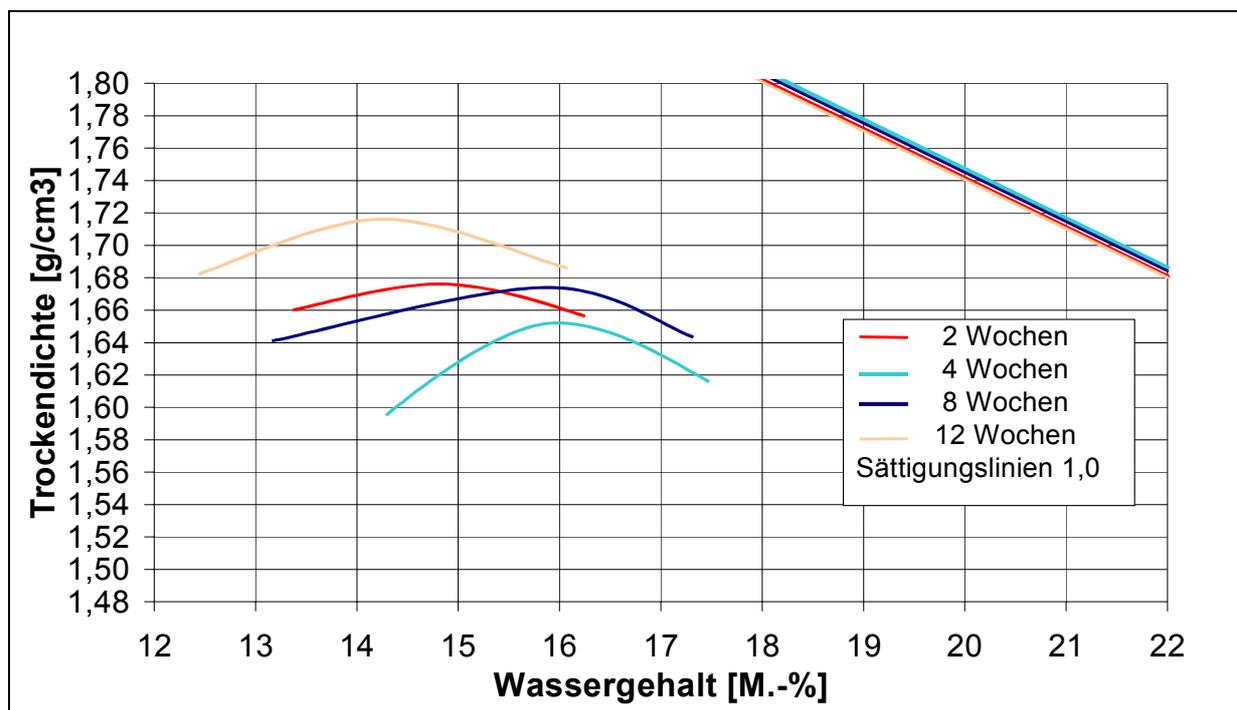


Abb. 117 Proctorkurve und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke G

Tab. 55 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke G

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	12,9	13,0	11,0	10,3	
Rohdichte	g/cm ³	2,674	2,793	2,780	2,703	
Schüttdichte	g/cm ³	1,131	1,198	n.b.	1,270	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16 mm)	< 5 mm < 0,71 mm M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	2,7	3 (5)
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	7,5	7,6	5,5	5,3	9
Widerstand gegen Schlag SZ 8/12	M.-%	35,5	35,6	34,8	36,1	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	14,5	50
Glühverlust	M.-%	1,2	2,2	1,6	1,7	

5.2.8 ANLAGE H

In der MVA H wurde ein Großversuch (MV-Schlacken H) durchgeführt.

- **Verfahrenstechnik der Müllverbrennungsanlage H**

Die verfahrenstechnischen Parameter der Müllverbrennungsanlage H gehen aus Tab. 56 hervor. Die untersuchten Schlackeproben stammen aus einem Kessel, der nach dem Gegenstrom-Überschub-Prinzip arbeitet und mit einer Gegenstromfeuerung ausgestattet ist.

Tab. 56 Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA H

Verfahrensparameter der MVA H	
Rostsystem	Gegenlauf-Überschub
Durchsatz [t/a]	56.000
Linien	1
Feuerung	Gegenstrom
Heizwert [kJ/kg]	11.400
Abfallarten	Hausmüll
	Gewerbeabfall
	Sperrmüll
	Klärschlamm
Schlackeanfall [t/a]	12.600

- **Müllinput**

Folgende Müllzusammensetzung wurde großtechnisch thermisch behandelt:

Tab. 57 Müllzusammensetzung während des Großversuches

Müllzusammensetzung während des Großversuches an der MVA H in M.-%	
Hausmüll / Gewerbeabfall	Sonstiges
80,5	19,5

- **Aufbereitungstechnik der MV-Schlacke H**

Die in der Müllverbrennungsanlage H produzierten MV-Rohschlacken werden per LKW zur angeschlossenen Schlackenaufbereitungsanlage transportiert.

Im Regelbetrieb werden die MV-Rohschlacken in separaten Boxen (1 Monatsproduktion) ca. 4 Wochen zur Reduktion des Feuchtegehaltes zwischengelagert bevor sie zu MV-Schlacken aufbereitet werden. Die Vorlagerung sowie die Nachlagerung findet im Freien statt. Die Aufbereitungsanlage befindet sich ebenfalls im Freien und verfügt über eine Siebanlage, sowie Trommel- und Überbandmagnete zur Entfernung von FE-Anteilen. Im Gegensatz zum Regelbetrieb konnte die Aufbereitung der MV-Rohschlacken für die Großversuche aus verfahrenstechnischen Gründen erst nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen erfolgen.

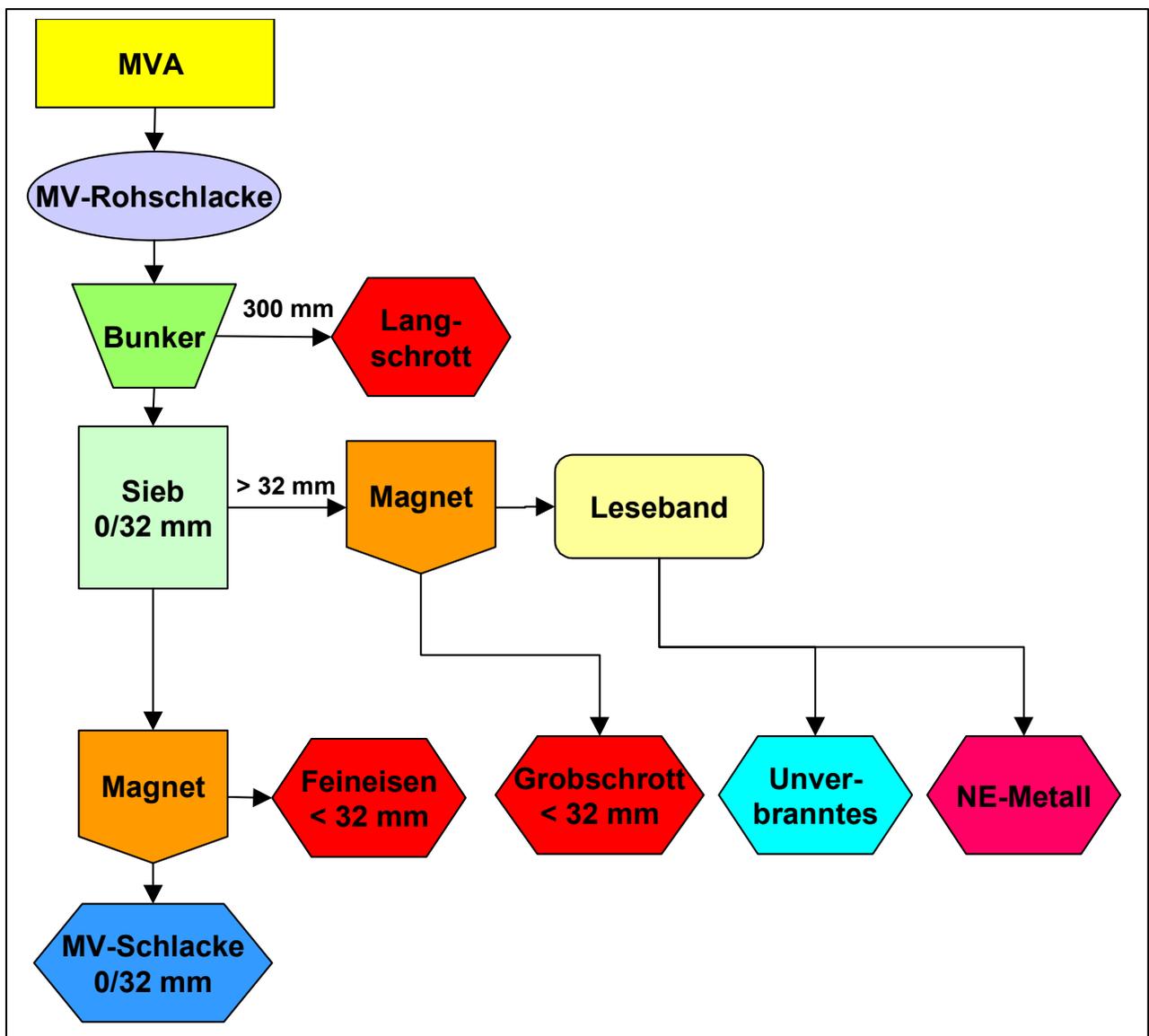


Abb. 118 Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA H

Die aufbereitete MV-Schlacke unterliegt der Güteüberwachung gemäß RG Min-StB 93 [30] und wird als Material für den Deponiebau verwendet.

5.2.8.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke H

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacken H geht aus Tab. 58, die der Grobfraktion aus Tab. 59 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 119).

Im Feinanteil der MV-Schlacke stellen das Oxid Quarz (SiO_2) und die neu gebildeten Glasphasen die mineralogischen Haupt- und Nebenphasen dar, während das Carbonat Calcit (CaCO_3) die mineralogische Nebenphase bildet. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie die Sulfate Anhydrit (CaSO_4) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) auf.

Tab. 58 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke H

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase/Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Nebenphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Spuren	Neubildung
$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	Gips	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Hauptphase/Nebenphase	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

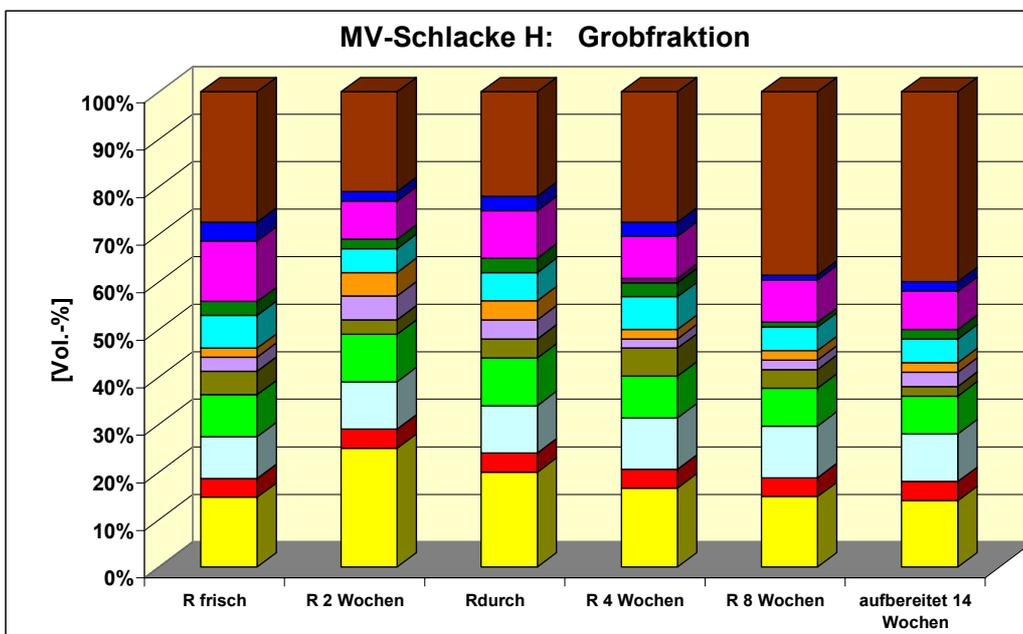
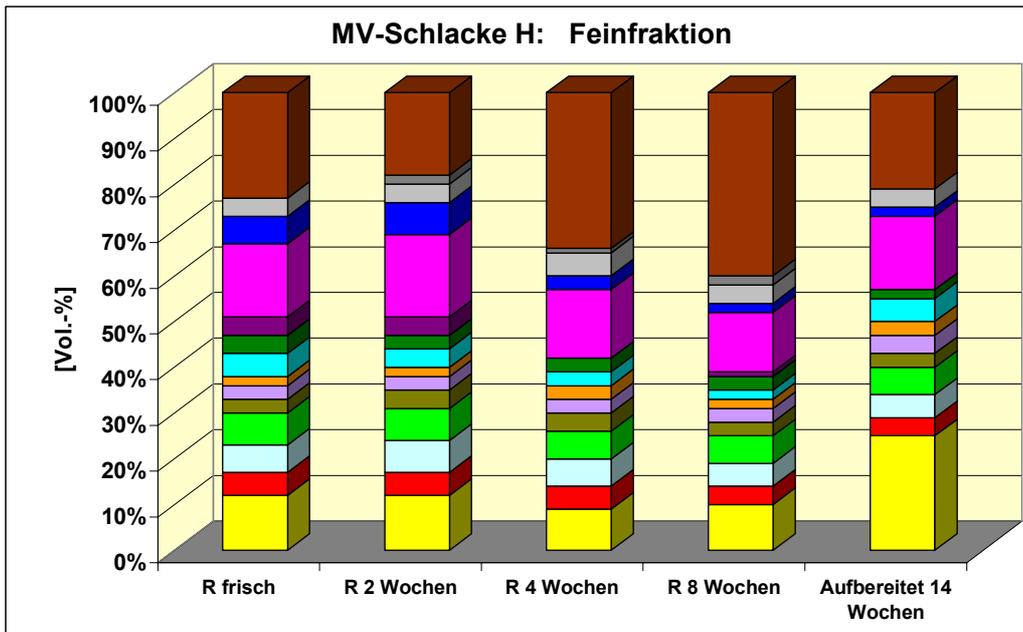
In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellen das Oxid Quarz (SiO_2) und die neu gebildeten Glasphasen die Haupt- und Nebenphasen dar, während das Carbonat Calcit (CaCO_3) lediglich als Nebenphase im Mineralbestand auftritt. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) und das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) auf.

Tab. 59 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke H

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase/Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Nebenphase	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Hauptphase/Nebenphase	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke H handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO_2) sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) dar, die größtenteils mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) wird nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker gebildet. Das Carbonat Calcit (CaCO_3) entsteht im Laufe der Ablagerung durch die Reaktion von Portlandit mit dem Luft- CO_2 .



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO ₂	■ Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)
■ Hämatit	α-Fe ₂ O ₃		
■ Magnetit	Fe ₃ O ₄	<u>Hydroxide:</u>	
<u>Silikate:</u>		■ Portlandit	Ca(OH) ₂
■ Gehlenit	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	<u>Carbonate</u>	
■ Äkermanit	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	■ Calcit	CaCO ₃
■ Kalifeldspat	KAlSi ₃ O ₈	<u>Sulfate:</u>	
■ Plagioklas	(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	■ Anhydrit	CaSO ₄
■ Diopsid	CaMgSi ₂ O ₆	■ Ettringit	Ca ₆ Al ₂ [(OH) ₂ SO ₄] ₃ x24H ₂ O
■ <u>Neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 119 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke H

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke H folgendes festgestellt (Abb. 120):

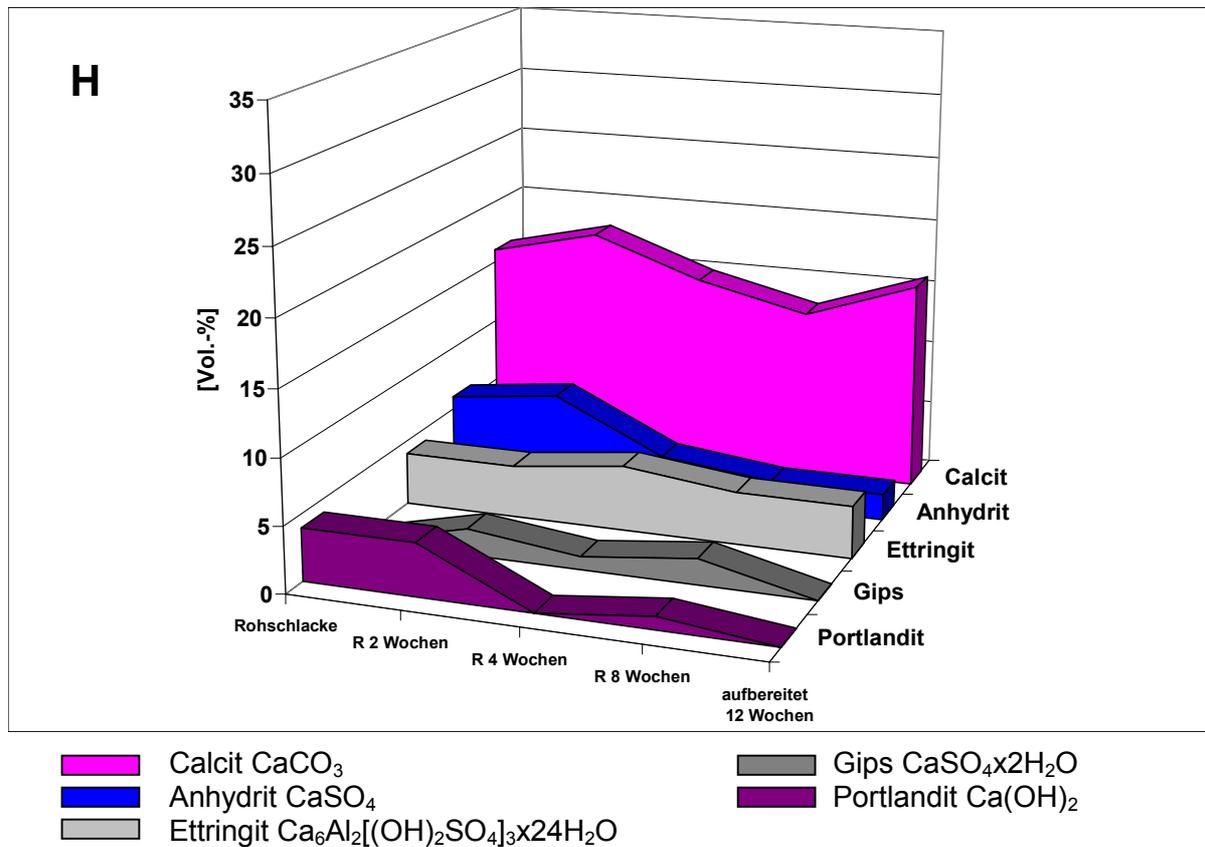


Abb. 120 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke H

- Das Carbonatisierungsverhalten bewirkt in der MV-Schlacke H nach einer Ablagerungszeit von 2 Wochen eine deutliche Abnahme des Portlandits $\text{Ca}(\text{OH})_2$, die jedoch erst in der 12 Wochen abgelagerten MV-Schlacke vollständig abgeschlossen ist. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO_3) gesteuert wird, lässt keine ausgeprägten Alterationsreaktionen im Verlaufe der Ablagerung erkennen, da keine Zunahme des Calcits festgestellt werden kann. Erst nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen erreichen die Calcitgehalte wieder die Ausgangsgehalte. Da diese am Ende der Ablagerungszeit nicht überschritten werden, weist die MV-Schlacke H ein mangelndes Carbonatisierungsvermögen auf.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO_4), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, nimmt in der untersuchten MV-Schlacke H während der Ablagerungszeit von 12 Wochen deutlich ab. Die MV-Schlacke kann zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung als reaktionsträge und damit als ausreichend raumbeständig eingestuft werden, da weitere Sulfatreaktionen nicht mehr erwartet werden.
- Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) tritt bereits in der MV-Rohschlacke sehr deutlich auf und verbleibt während der Ablagerung auf nahezu gleichem Niveau. Außerdem wird in der MV-Schlacke H das wasserhaltige Sulfat Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) in wechselnden Mengenverhältnissen angetroffen.

Die MV-Schlacke H weist zwar per Definition ein mangelndes Carbonatisierungsverhalten auf, jedoch liegen die Calcitgehalte in Bereichen (> 14 Vol.-%), die für eine bautechnisch stabile MV-Schlacke sprechen. Da auch die Sulfatreaktionen nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen abgeschlossen sind, kann die MV-Schlacke H, im mineralogischen Sinne, als raumbeständig eingestuft werden.

5.2.8.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke H

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt, der Aussagen über ein mögliches Gefährdungspotential eines bestimmten Stoffes liefert. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke H zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 121-a 1212-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit kontinuierlich von pH 12,4 auf 11,3 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit fallen während der Ablagerungszeit von 12 Wochen kontinuierlich von ca. 414 mS/m auf 157 mS/m. Sie liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Die Zinkwerte zeigen im Laufe der Ablagerungszeit von 12 Wochen eine starke Abnahme von ca. 692 µg/l auf 55 µg/l und unterschreiten die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l bereits nach 2 Wochen deutlich.
- Die Bleiwerte der MV-Schlacke nehmen in den ersten beiden Wochen der Ablagerung sehr stark von ca. 3.181 µg/l auf 96 mg/l ab und liegen nach drei Monaten unterhalb der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden somit von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.
- Die Kupferwerte reduzieren sich von 96 µg/l auf ca. 70 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden somit bereits von der frisch produzierten MV-Rohschlacke eingehalten.
- Die Chromgehalte steigen während der Ablagerung von 25 µg/l auf 124 µg/l an, liegen aber dennoch deutlich unter den Zuordnungswerten der LAGA von 200 µg/l, überschreiten jedoch den Grenzwert der TL Min-StB 2000 von 50 µg/l.
- Die Gehalte von Nickel, Arsen und Quecksilber liegen nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte von Chlorid variieren zwischen ca. 130 mg/l und 180 mg/l ohne eine eindeutige Tendenz aufzuweisen. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l werden unterschritten.
- Die Sulfatwerte zeigen nur geringe Schwankungen und liegen bei ca. 100 mg/l und unterschreiten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse der MV-Schlacke H zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten werden, mit Ausnahme des Parameters Chrom, der den Grenzwert der TL Min-StB 2000 von 50 µg/l überschreitet.

- **Chemische Untersuchungen im Feststoff**

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 122 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke H in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke H eingehalten.

- **Langzeitstabilität**

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 123 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

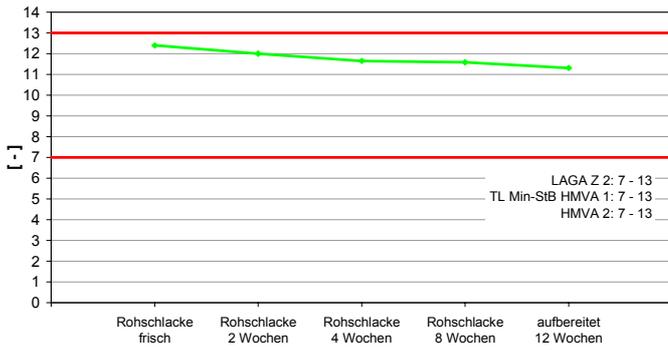
Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnen-tests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnen-tests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle, der Chloride und Sulfate abgeschätzt werden.

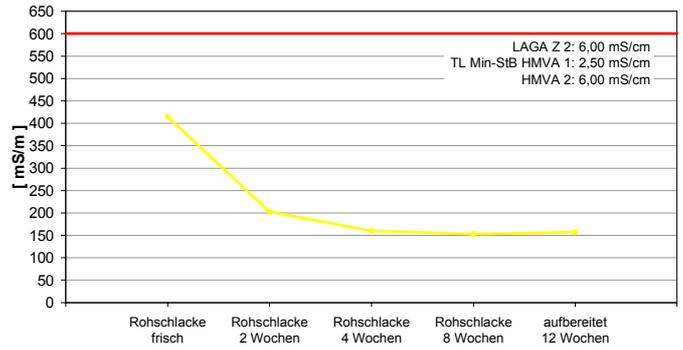
Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil der betrachteten Schwermetalle Zink, Kupfer und Blei weitaus höher ist als derjenige von Nickel, Chrom und Chrom, die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnen-tests jedoch in einer vergleichbaren Größenordnung liegen, mit Ausnahme des leicht erhöhten Gehaltes an Kupfer. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit von Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid, allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnen-tests, dass die eluierbaren Mengen von Chlorid sogar über denen von Sulfat liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungsvorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

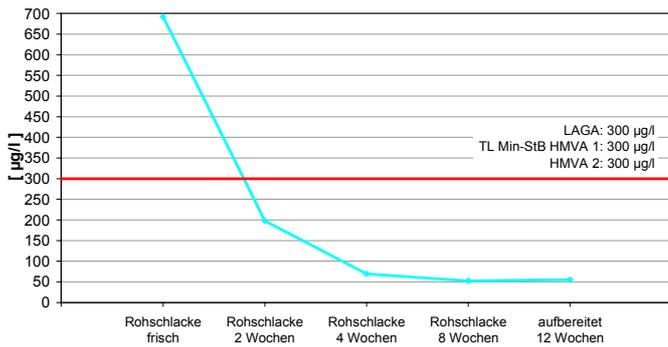
DEV S4-Test: pH-Wert



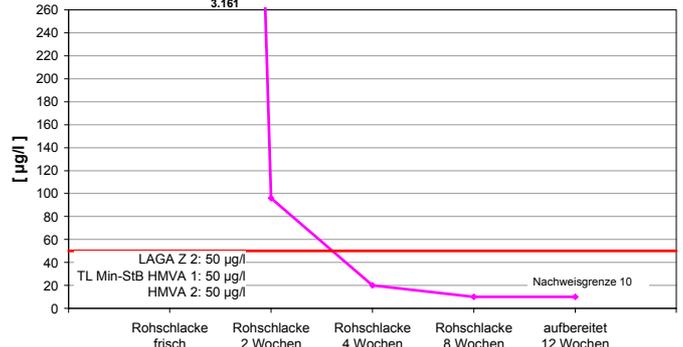
DEV S4-Test: Leitfähigkeit



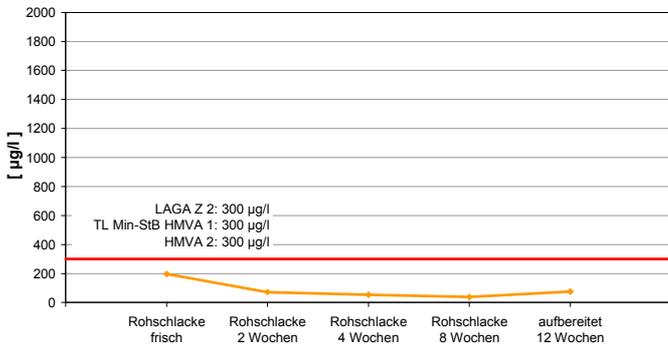
DEV S4-Test: Zink



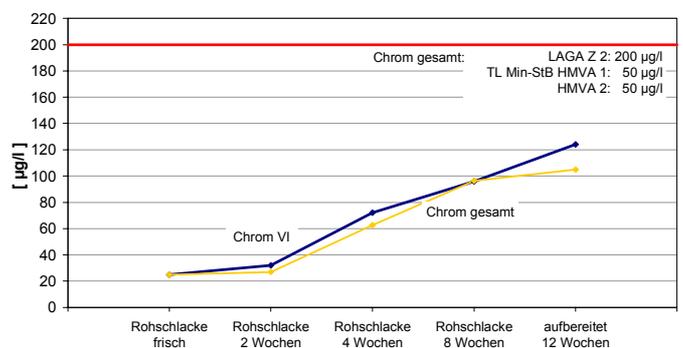
DEV S4-Test: Blei



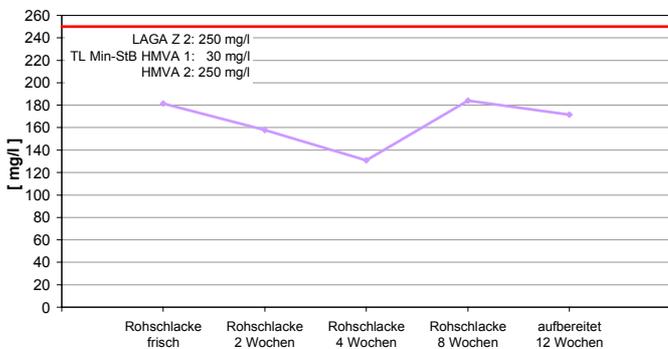
DEV S4-Test: Kupfer



DEV S4-Test: Chrom



DEV S4-Test: Chlorid



DEV S4-Test: Sulfat

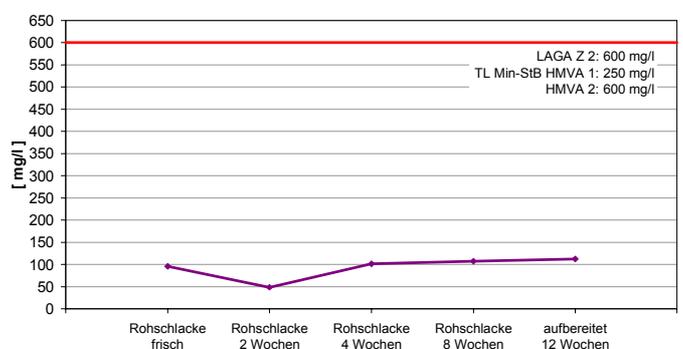


Abb. 121-a Ergebnis der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke H

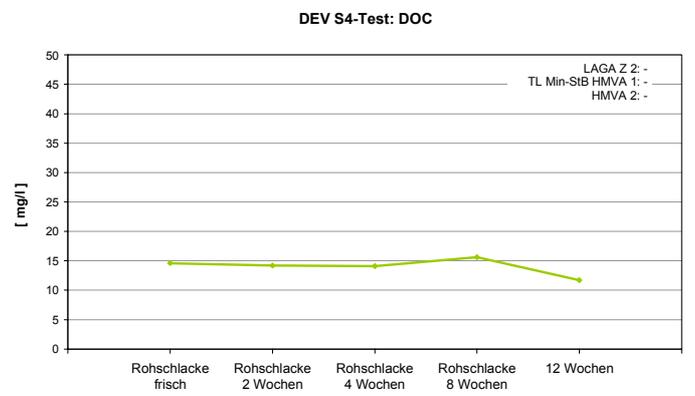
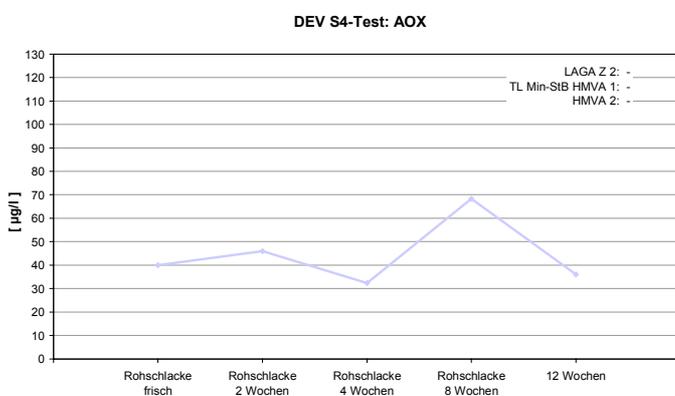
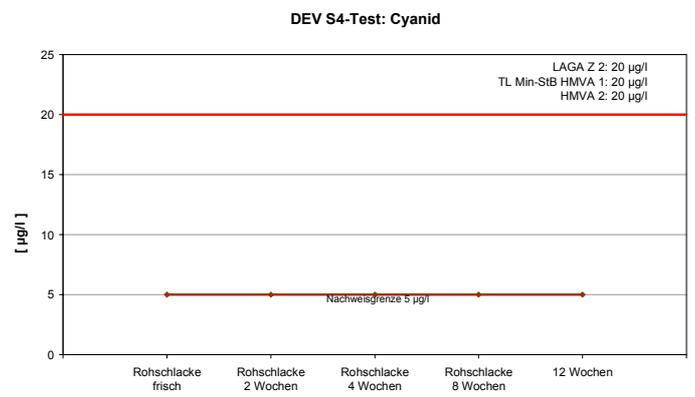
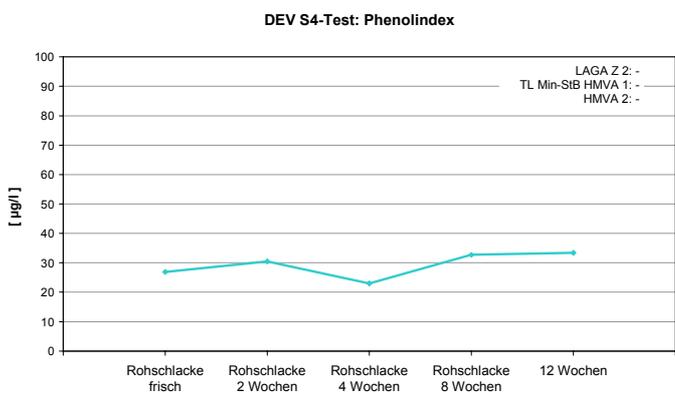
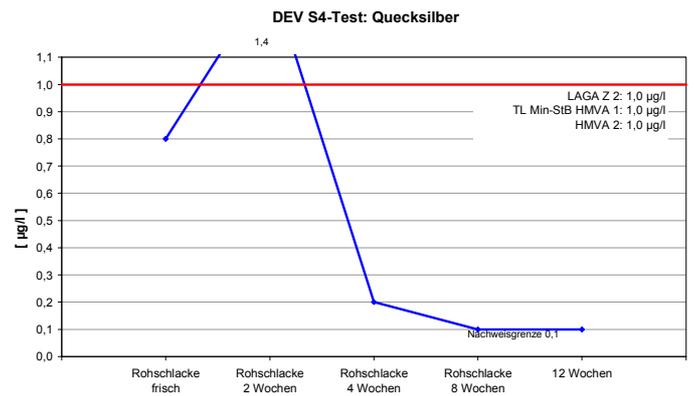
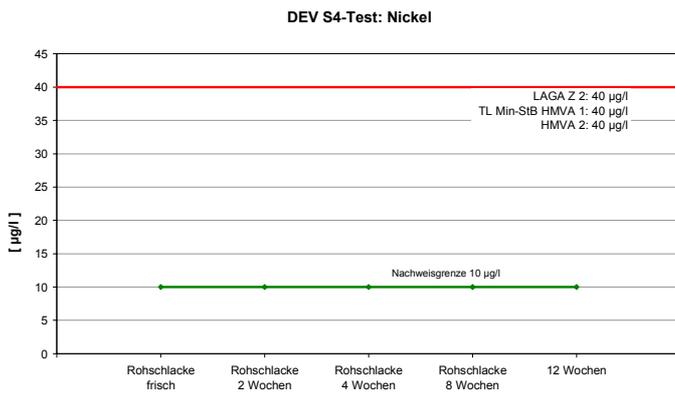
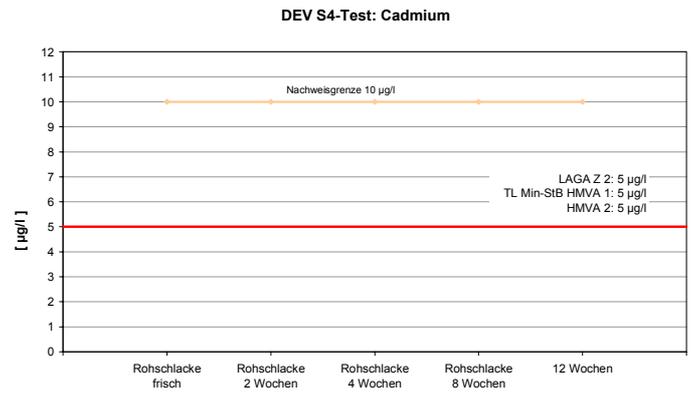
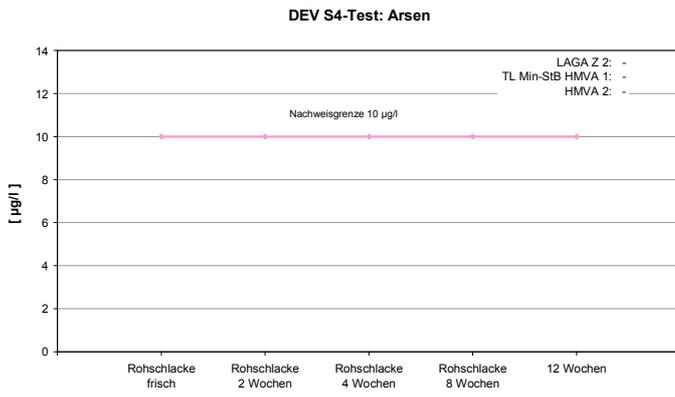


Abb. 121-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke H

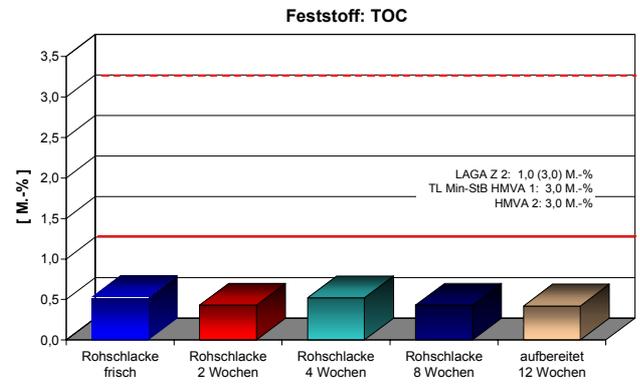
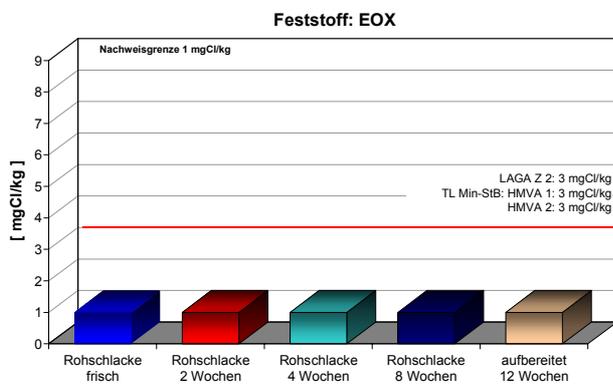
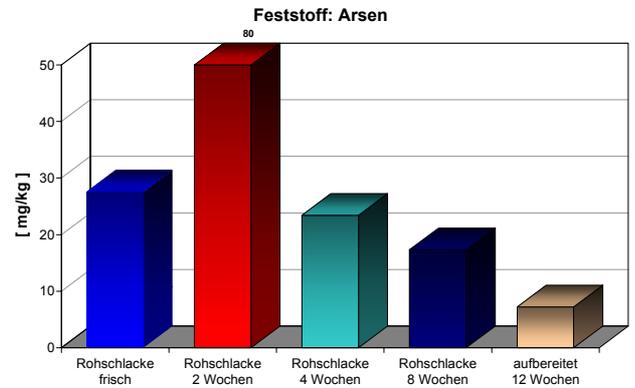
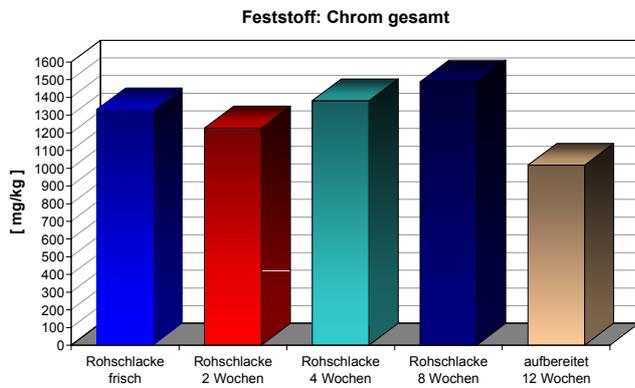
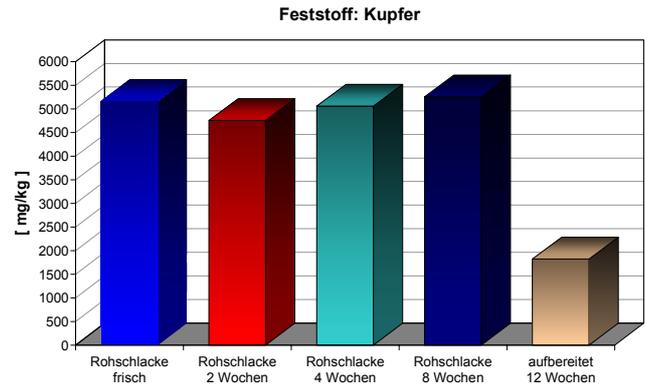
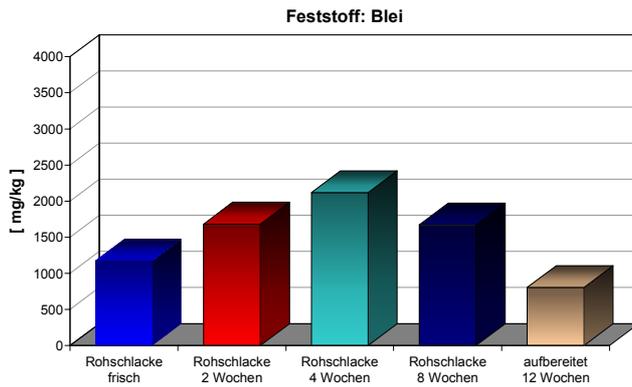
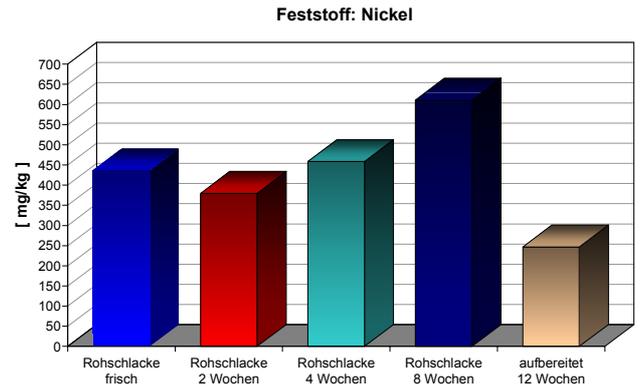
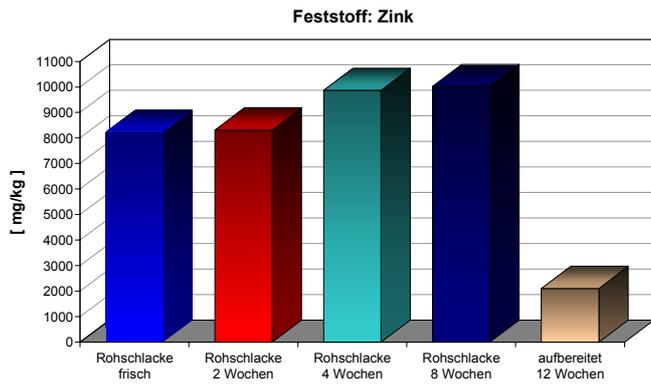
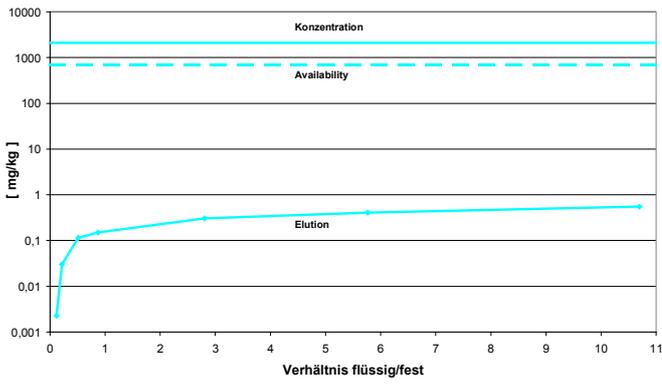
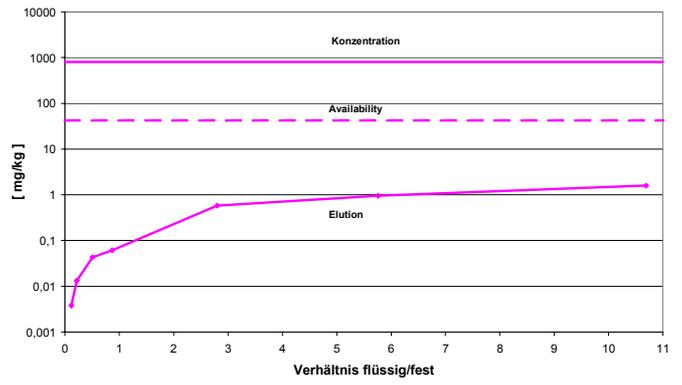


Abb. 122 Feststoffgehalte der untersuchten MV-Schlacke H

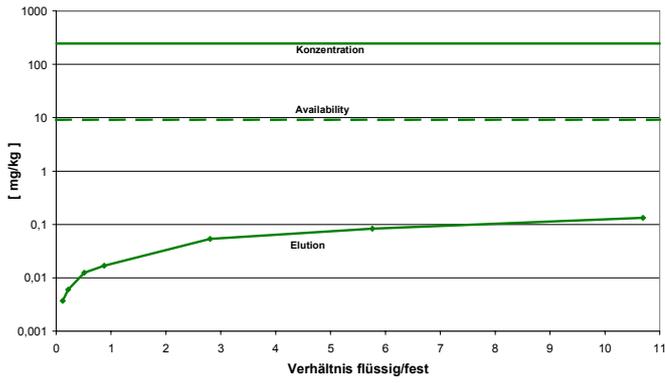
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



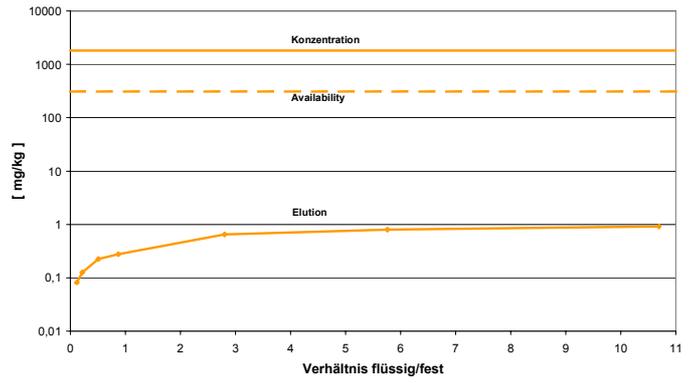
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



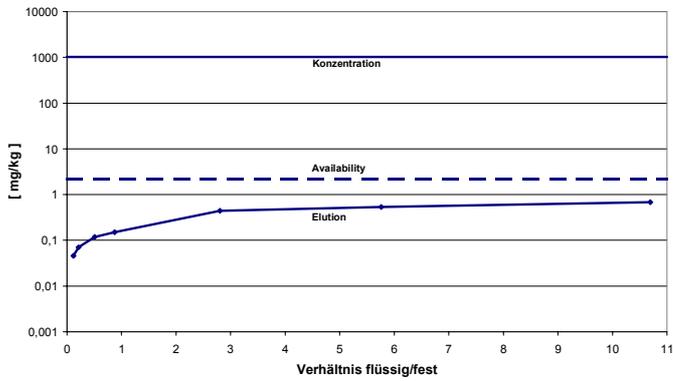
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



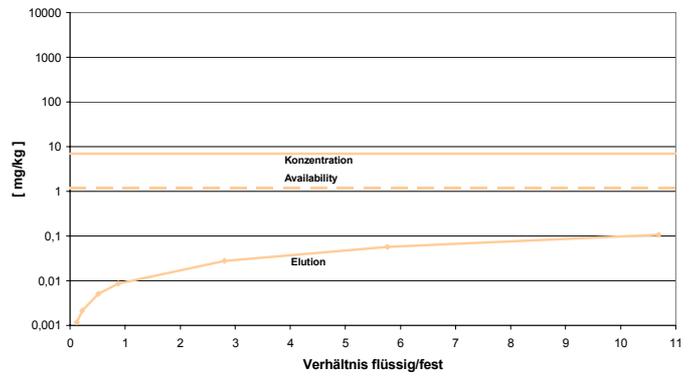
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



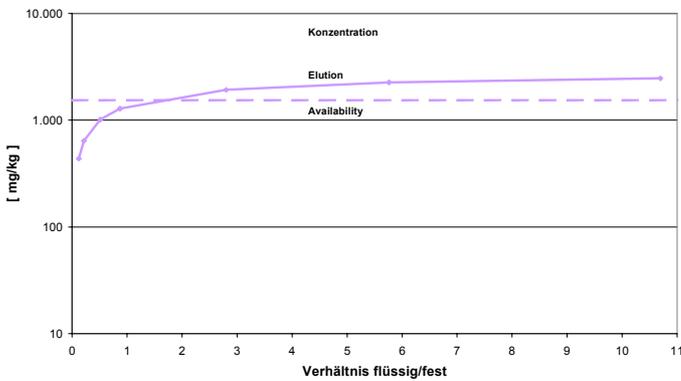
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

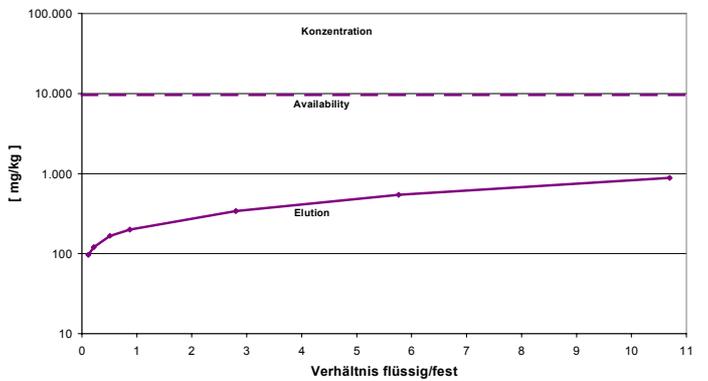


Abb. 123 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke H

5.2.8.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke H

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] beruht. Darüber hinaus erfolgen zusätzliche Untersuchungen, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken im Bereich des Deponiebaues und Erdbaus abschätzen zu können. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften einer drei Monate abgelagerten MV-Schlacke für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke H gehen aus Abb. 124 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Nach der Aufbereitung liegen die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacke in einem engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilungen richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 5 mm die aufbereitete und drei Monate abgelagerte MV-Schlacke H oberhalb der Grenzsieblinien liegt, d.h. einen zu geringen Anteil an Grobkorn aufweisen.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke H geht aus Abb. 125 hervor. Ein Vergleich der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 80 M.-%) der stofflichen Zusammensetzung.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ M.-%, sowie der maximale Metallanteil von 5,0 M.-% (Ist-Wert: 2,5 M.-%) werden von der untersuchten MV-Schlacke eingehalten.

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichte der 3 Monate abgelagerten MV-Schlacke liegt bei $1,710 \text{ g/cm}^3$, der dazugehörige optimale Wassergehalt bei 17,5 M.-% (Abb. 126). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke H.

• Wassergehalt

Der Wassergehalt der frisch produzierten MV-Rohschlacke liegt bei 8,5 M.-% und entspricht somit dem Endwassergehalt von 8,6 M.-%. Während der Ablagerung schwanken die Wassergehalte zwischen 5,1 und 11,0 M.-% (Tab. 59). Hierbei muss jedoch beachtet werden,

dass die Ablagerung der MV-Schlacke im Freiland erfolgte und somit der natürliche Niederschlag direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte einwirken konnte.

- **Rohdichte**

Die Rohdichte liegt bei 2,814 g/cm³ und befindet sich somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 60).

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm ≤ 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 3,5 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke erfüllt.

Die Anforderung an die Gesamtkörnung gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der aufbereiteten MV-Schlacke eingehalten (Ist-Werte: 5,7 M.-%) (Tab. 60).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Der ermittelte Wert für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, liegt bei 30,0 M.-% (Tab. 60). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke H erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Der Anteil an schlecht geformten Körnern liegt bei 8,3 M.-%, womit die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden (Tab. 60).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 0,9 und 2,2 M.-%. Anforderungen an den Parameter Glühverlust gemäß TL Min-StB 2000 bestehen nicht (Tab. 60).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke H eingehalten werden.

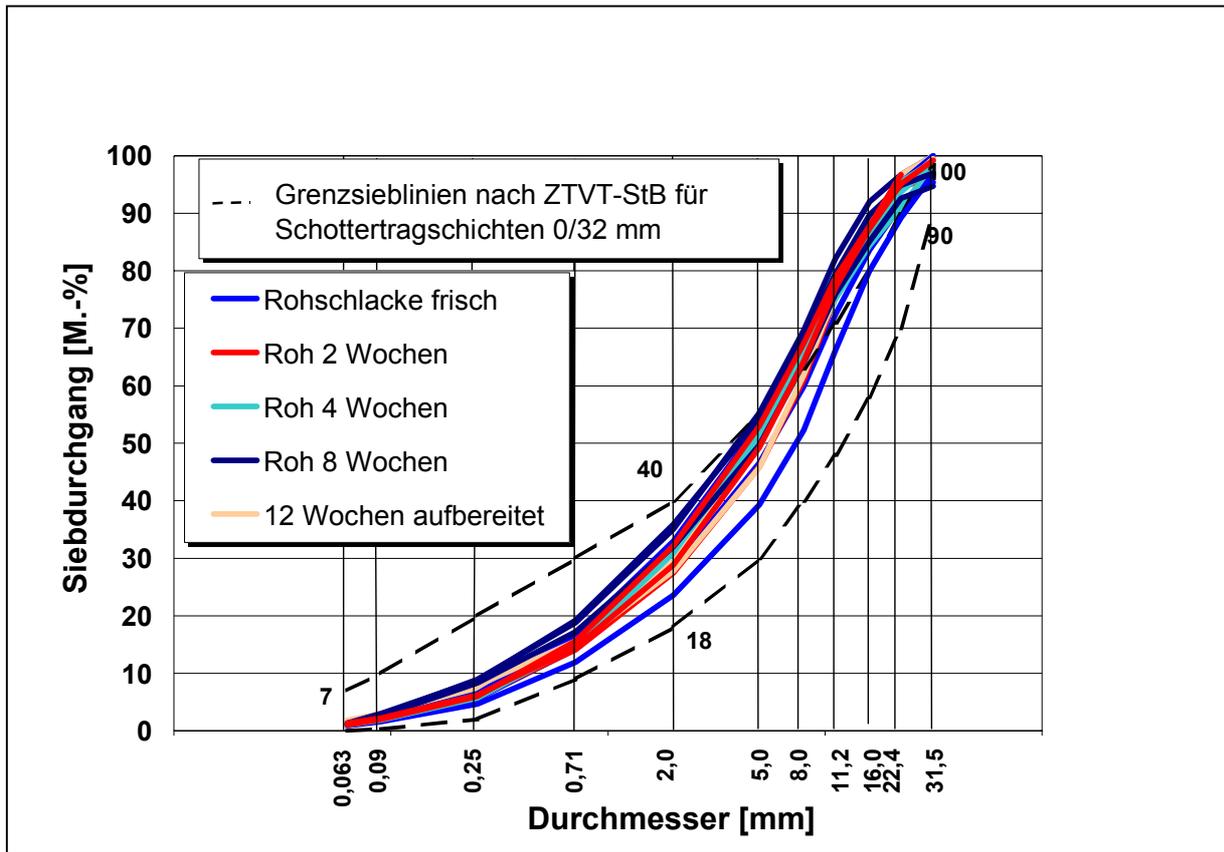


Abb. 124 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke H

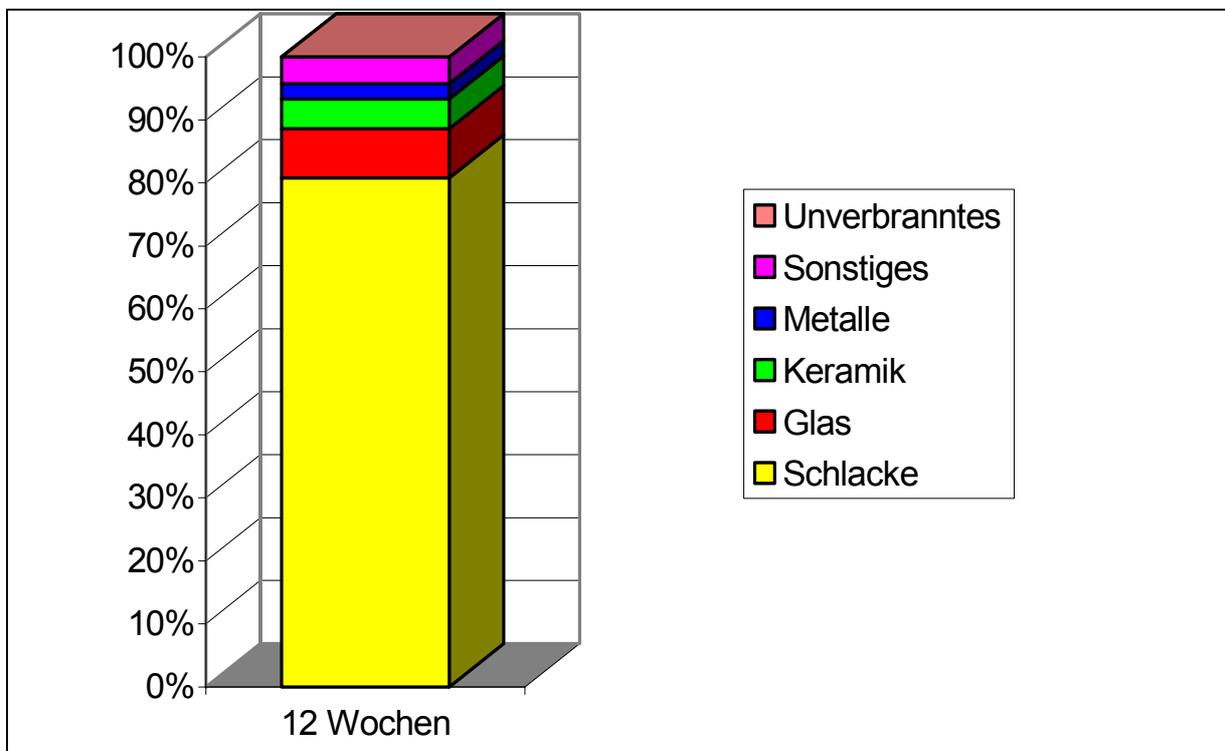


Abb. 125 Stoffliche Zusammensetzung der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacke H

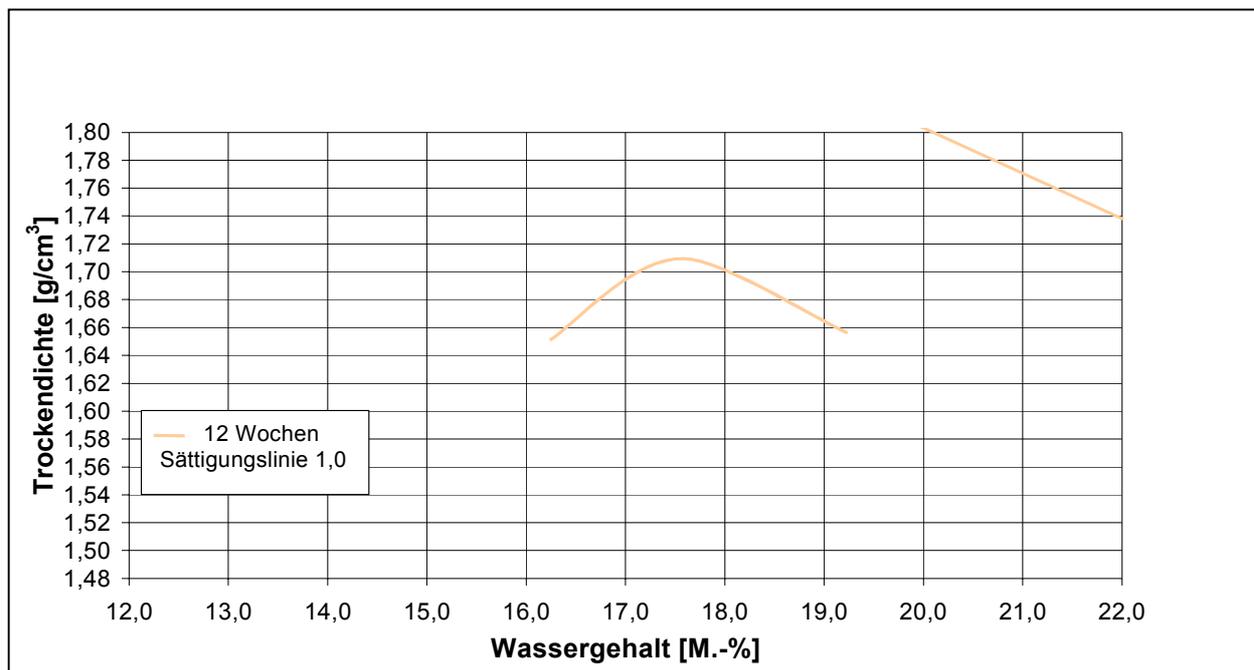


Abb. 126 Proctorkurve und optimaler Wassergehalt der MV-Schlacke H

Tab. 60 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke H

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	auf- bereitet	TL Min- StB 2000
Wassergehalt	M.-%	7,8	11,0	7,1	5,1	8,6	
Rohdichte	g/cm³	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	2,814	
Schüttdichte	g/cm³	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1,392	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16 mm)	< 5mm < 0,71 mm M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	3,5 1,6	3 (5) 2,5
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5,7	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	30,0	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	8,3	50
Glühverlust	M.-%	1,2	1,5	1,8	2,1	2,2	

5.2.9 ANLAGE I

In der MVA I wurde ein Großversuch (MV-Schlacken I) durchgeführt.

- **Verfahrenstechnik der Müllverbrennungsanlage I**

Die verfahrenstechnischen Parameter der Müllverbrennungsanlage I gehen aus Tab. 61 hervor. Die untersuchten Schlackeproben stammen aus einem Kessel mit einem Vorschubrost und einer Mittelstromfeuerung.

Tab. 61 Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA I

Verfahrensparameter der MVA I	
Rostsystem	Vorschubrost
Durchsatz [t/a]	192.000
Linien	2
Feuerung	Mittelstrom
Heizwert [kJ/kg]	9.600
Abfallarten	Hausmüll
	Gewerbeabfall
	Sperrmüll
Schlackeanfall [t/a]	50.100

- **Müllinput**

Folgende Müllzusammensetzung wurde großtechnisch thermisch behandelt:

Tab. 62 Müllzusammensetzung während des Großversuches

Müllzusammensetzung während des Großversuches an der MVA I in M.-%		
Hausmüll	Gewerbeabfall	Sperrmüll
58,7	37,4	3,9

- **Aufbereitungstechnik der MV-Schlacken I**

Die in der Müllverbrennungsanlage I produzierten MV-Rohschlacken werden nach dem Austrag über einen Nassentschlacker über ein Transportband in den Rohschlackebunker transportiert, in dem sie ca. 2 Wochen zur Reduktion des Feuchtegehaltes gelagert werden.

Die Aufbereitung besteht zunächst aus einer Überkornabtrennung > 40 mm und dem Abtrennen von groben Störstoffen mittels eines Lesebandes. Danach erfolgt eine Metallseparation mit einer Elektromagnettrommel. Die abgeschiedene Fe-Fraktion wird von Schlackeanhaftungen befreit und gemeinsam mit dem Siebdurchfall in die Fraktionen 0 – 8 mm und 8 – 40 mm getrennt. Die Feinfraktion 0 - 8 mm wird gelagert, die Grobfraktion wird windgesichtet und über einen Wirbelstrommoter die NE-Metalle separiert. Anschließend erfolgt eine Lagerung von drei Monaten in einer Halle.

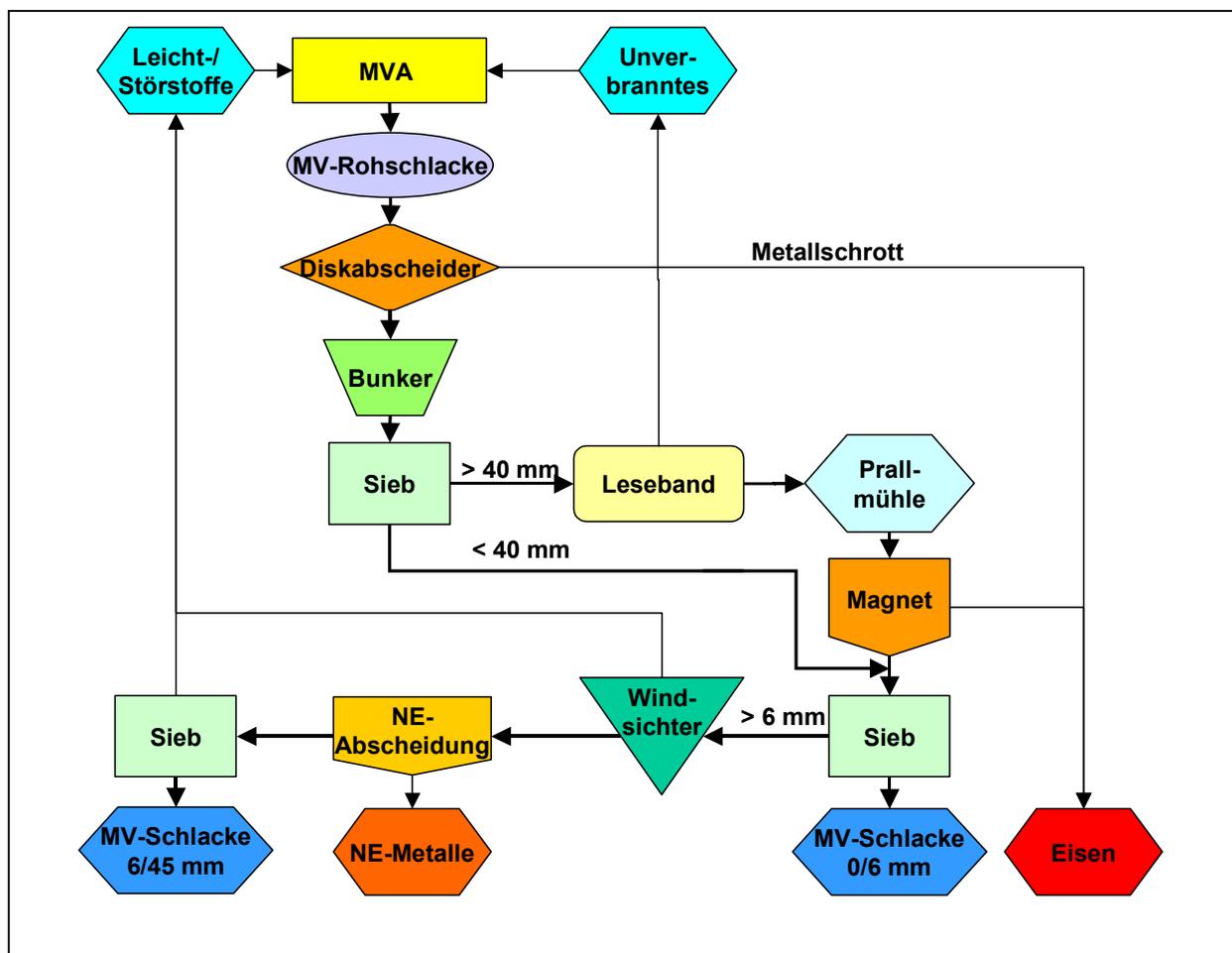


Abb. 127 Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses der angeschlossenen Aufbereitungsanlage der MVA I

Die aufbereitete MV-Schlacke unterliegt der Güteüberwachung gemäß RG Min-StB 93 [30] und wird als Material vorzugsweise für den Deponiebau verwendet. Weiterhin erfolgt eine Verwertung im Straßenbau.

Aus organisatorischen Gründen wurde der Versuchsablauf wie folgt geändert: Auf einer Deponie wurde ein Testfeld der Maße 4m x 12m x 60 cm mit aufbereiteten MV-Schlacken angelegt, wobei eine Mischung aus frisch aufbereiteten und bis zu 2 Wochen abgelagerten

MV-Schlacken verwendet und unter regulären Einbaubedingungen verdichtet wurde. Für die Beprobung wurde das Testfeld an drei Stellen in bestimmten Abständen geöffnet und die MV-Schlacken für die Versuche entnommen.

5.2.9.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke I

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke I geht aus Tab. 63, die der Grobfraktion aus Tab. 64 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 128).

Im Feinanteil der MV-Schlacke stellen das Oxid Quarz (SiO_2), das Carbonat Calcit (CaCO_3) und die neu gebildeten Glasphasen die mineralogischen Haupt- und Nebenphasen dar. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), die Sulfate Anhydrit (CaSO_4) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) sowie das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) auf.

Tab. 63 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke I

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Spuren	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Nebenphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Hauptphase/Nebenphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Spuren	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	Gips	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Akzessorie	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Hauptphase/Nebenphase	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

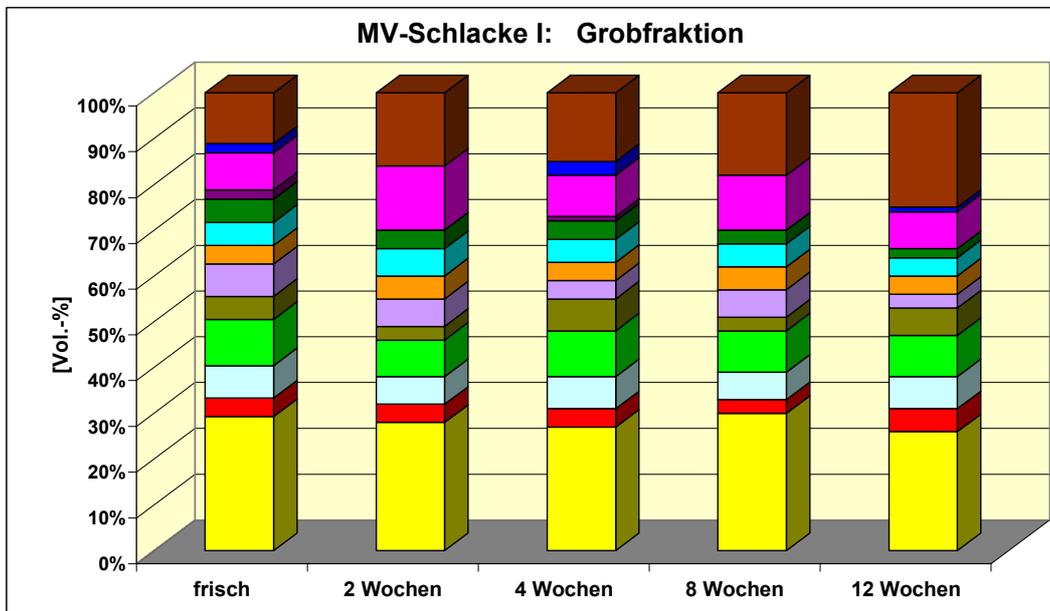
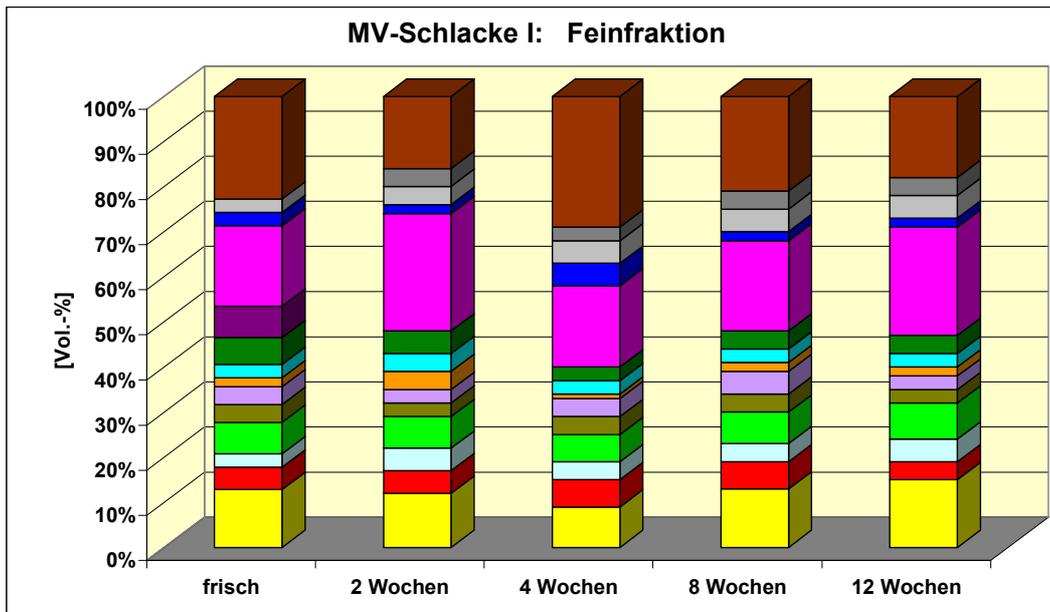
In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO_2) und die neu gebildeten Glasphasen die Haupt- und Nebenphasen dar, während das Carbonat Calcit (CaCO_3) und das Silikat Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) teilweise die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) und das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) auf.

Tab. 64 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke I

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Akzessorie/Spuren	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Akzessorie/Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Nebenphase/Akzessorie	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Hauptphase/Nebenphase	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke I handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO_2) sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) wird nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker gebildet. Das Carbonat Calcit (CaCO_3) entsteht im Laufe der Ablagerung durch die Reaktion von Portlandit mit dem Luft- CO_2 .



<u>Oxide:</u>		<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO_2	■ Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
■ Hämatit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe_3O_4	■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
<u>Silikate:</u>		<u>Carbonate</u>	
■ Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	■ Calcit	CaCO_3
■ Äkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi_3O_8	■ Anhydrit	CaSO_4
■ Plagioklas	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$
■ Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$		
■ <u>Neu gebildete Glasphase</u>			

Abb. 128 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke I

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacke I folgendes festgestellt (Abb. 129):

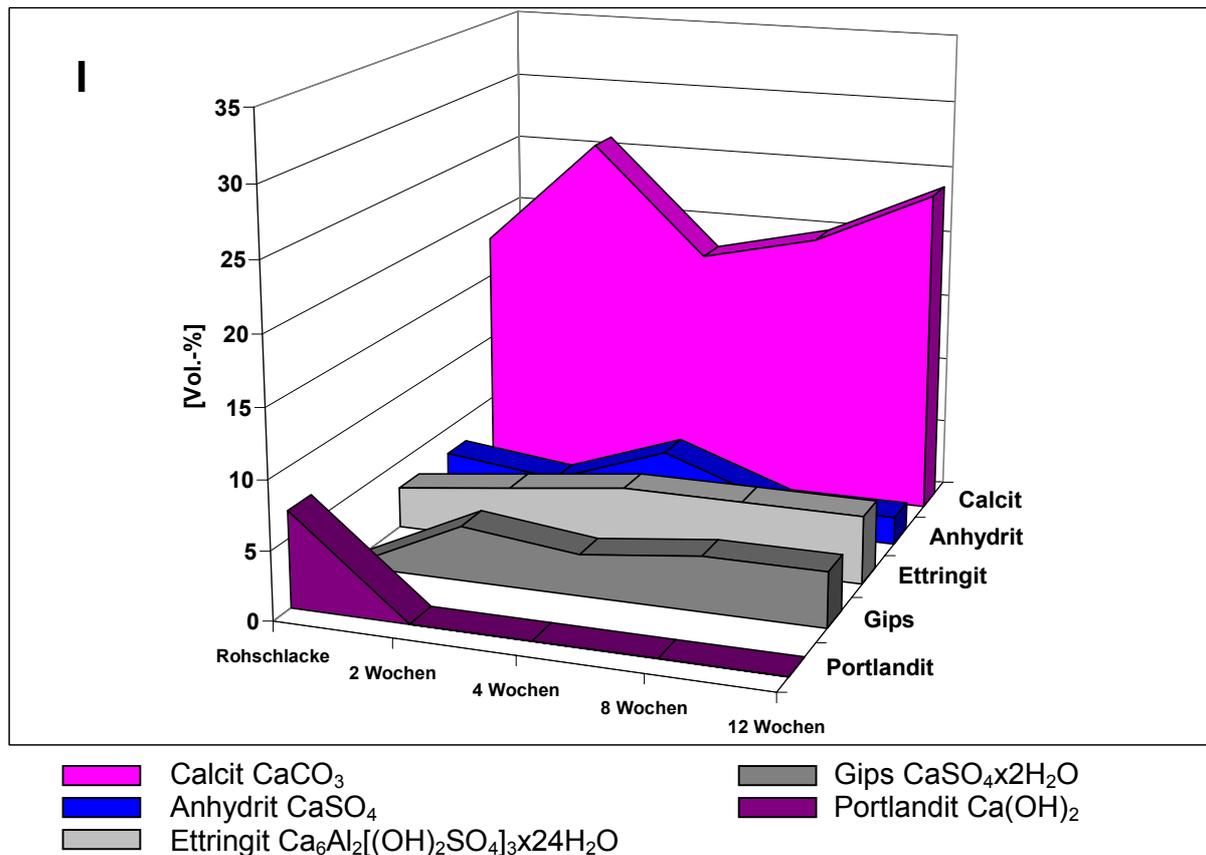


Abb. 129 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke I

- Das Carbonatisierungsverhalten zeigt in der MV-Schlacke I einen deutlichen Abbau des Portlandits ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), wobei in der MV-Schlacke nach einer Ablagerungszeit von zwei Wochen kein Portlandit mehr detektiert werden kann. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO_3) gesteuert wird, lässt durch die Ab- und erneute Zunahme des Calcits lediglich ein verzögertes Carbonatisierungsvermögen erkennen.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO_4), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, ist im Mineralbestand der MV-Rohschlacke in geringen Mengen vorhanden, die nach einer Ablagerungszeit von 4 Wochen leicht ansteigen. Da die Anhydritgehalte jedoch nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen wieder abgebaut sind, kann die MV-Schlacke I zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung als reaktionsträge und damit als ausreichend raumbeständig eingestuft werden, da weitere Sulfatreaktionen nur noch in geringem Umfang erwartet werden.
- Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) tritt bereits in der MV-Rohschlacke in deutlichen Mengen auf, die sich im weiteren Ablauf der Alteration nur wenig ändern. Gips ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) wird nach einer Ablagerungszeit von 2 Wochen im Mineralbestand der MV-Schlacke I festgestellt und verbleibt danach auf dem gleichen Niveau.

Bei der MV-Schlacke I handelt es sich um eine MV-Schlacke, die zwar ein verzögertes Carbonatisierungsvermögen aufweist, bei der jedoch nach einer Ablagerungszeit von 12 Wochen die Sulfatreaktionen weitgehend abgeschlossen sind. Somit kann die MV-Schlacke I

zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung, aus mineralogischer Sicht, als raumbeständig eingestuft werden.

5.2.9.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke I

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt, der Aussagen über ein mögliches Gefährdungspotential eines bestimmten Stoffes liefert. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke I zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 130-a und 130-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit kontinuierlich von pH 12,1 auf 11,1 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit fallen während der Ablagerungszeit von drei Monaten kontinuierlich von ca. 220 mS/m auf 100 mS/m. Sie liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Die Zinkwerte sind gering und zeigen im Laufe der Ablagerungszeit von 12 Wochen eine Abnahme von ca. 90 µg/l auf 25 µg/l und unterschreiten die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l bereits nach 2 Wochen deutlich.
- Die Bleiwerte der MV-Schlacken nehmen in den ersten beiden Wochen der Ablagerung sehr stark von ca. 220 µg/l auf 40 mg/l ab und liegen nach drei Monaten unterhalb der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden somit von der zur Verwertung anstehenden drei Monate abgelagerten MV-Schlacke eingehalten.
- Die Kupferwerte schwanken sehr stark und erreichen nach 2 Wochen Ablagerung ihren höchsten Wert von ca. 1.850 µg/l. Danach fallen sie auf ca. 500 µg/l und können somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l nicht einhalten.
- Die Chrom(gesamt)-Gehalte steigen während der Ablagerung von 25 µg/l auf 124 µg/l an, liegen jedoch deutlich unter den Zuordnungswerten der LAGA von 200 µg/l und den Grenzwerten der TL Min-StB 2000 von 50 µg/l.
- Die Gehalte von Nickel, Arsen und Quecksilber liegen nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten nahe der Nachweisgrenze und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid variieren zwischen ca. 70 mg/l und 100 mg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l werden unterschritten.
- Die Sulfatwerte steigen im Verlauf der Ablagerung von 170 auf 340 mg/l an. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l werden eingehalten.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von der drei Monate

abgelagerten MV-Schlacke, bis auf eine Überschreitung des Parameters Kupfer, eingehalten werden.

- **Chemische Untersuchungen im Feststoff**

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 131 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke I in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke I eingehalten.

- **Langzeitstabilität**

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 132 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnen-tests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnen-tests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil der betrachteten Schwermetalle Zink, Blei und Kupfer weitaus höher ist als derjenige von Nickel und Chrom, die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnen-tests jedoch in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

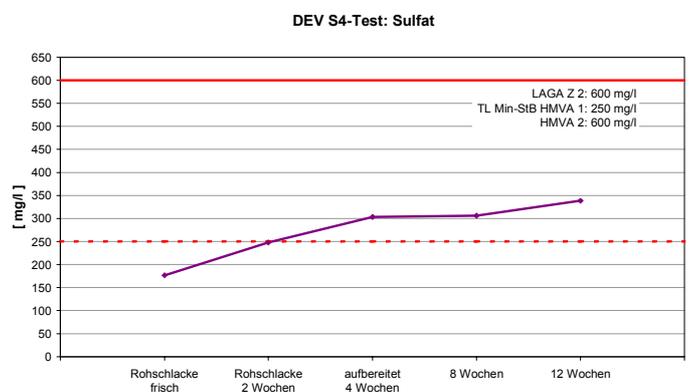
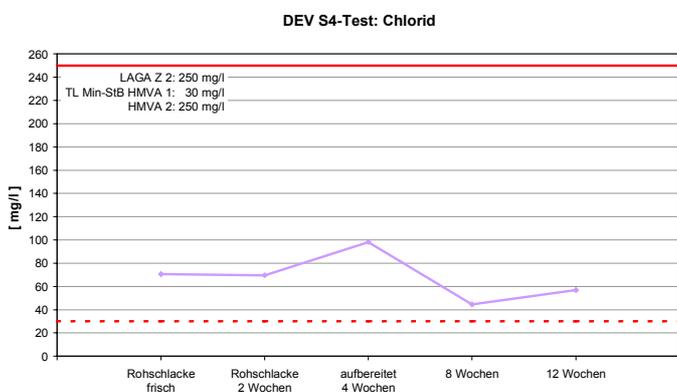
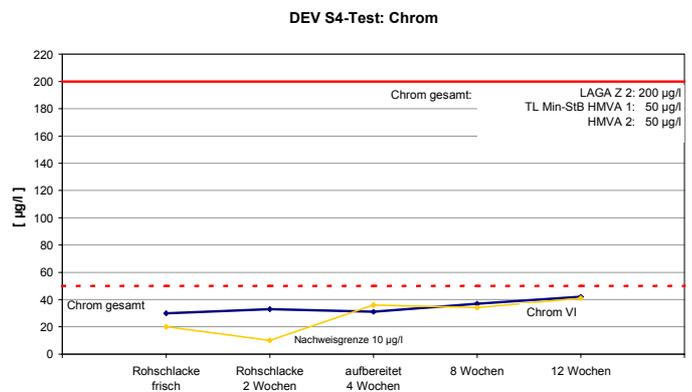
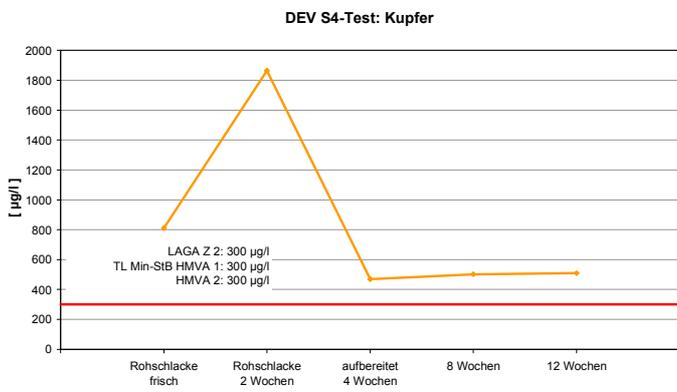
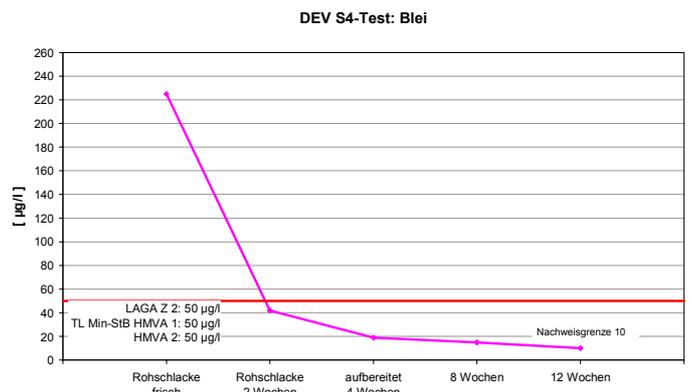
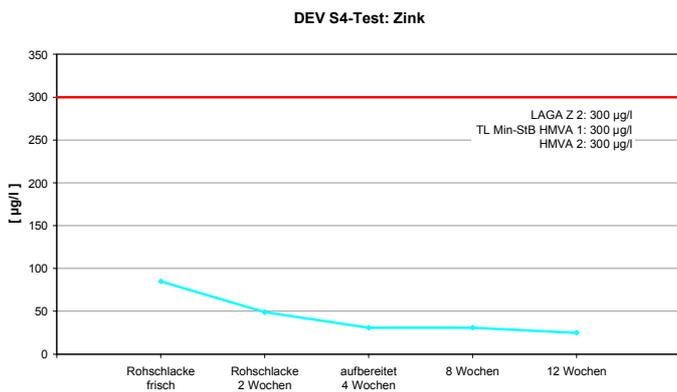
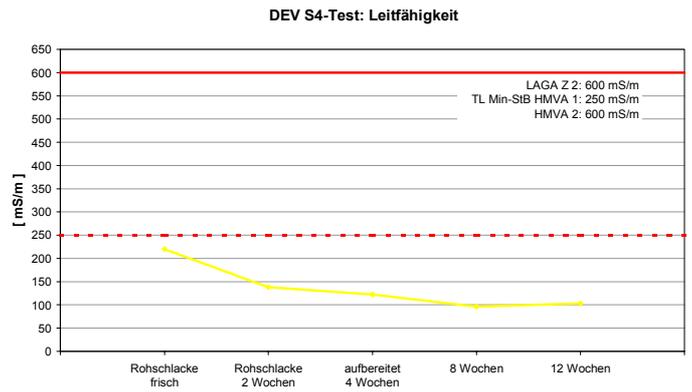
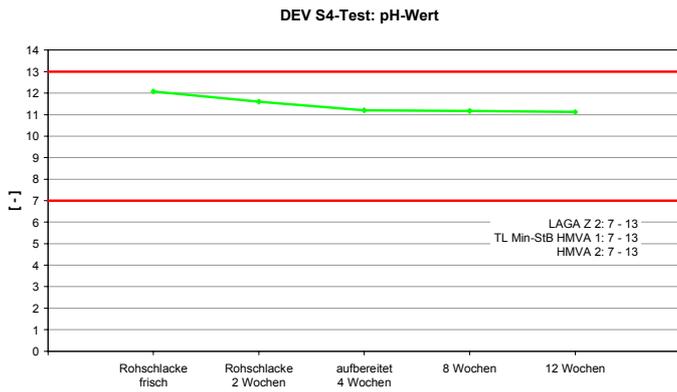


Abb. 130-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke I

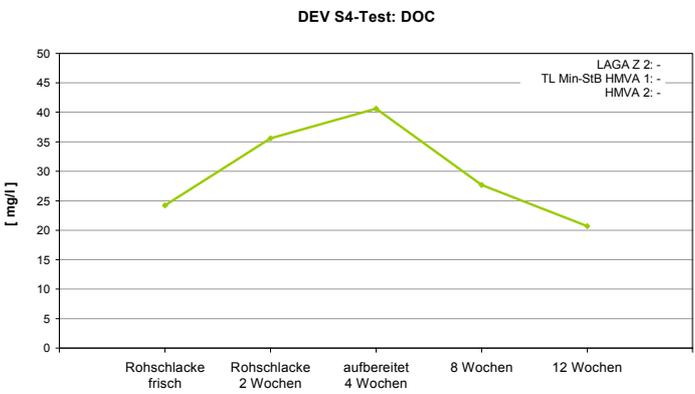
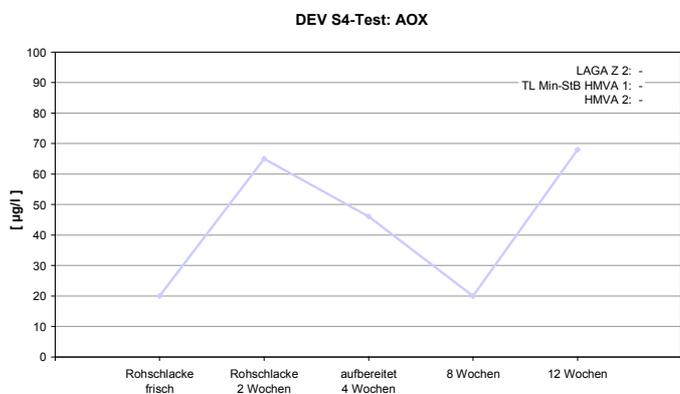
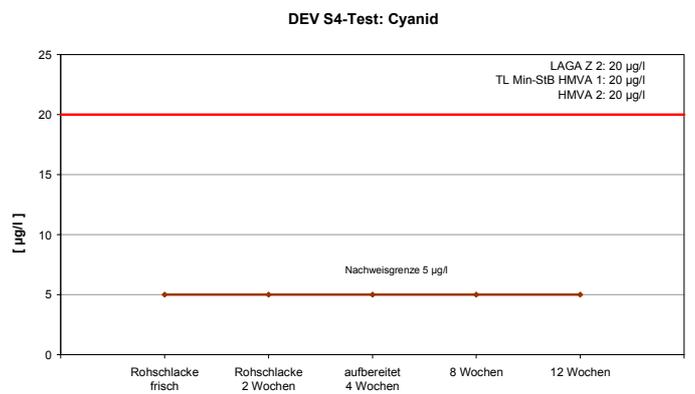
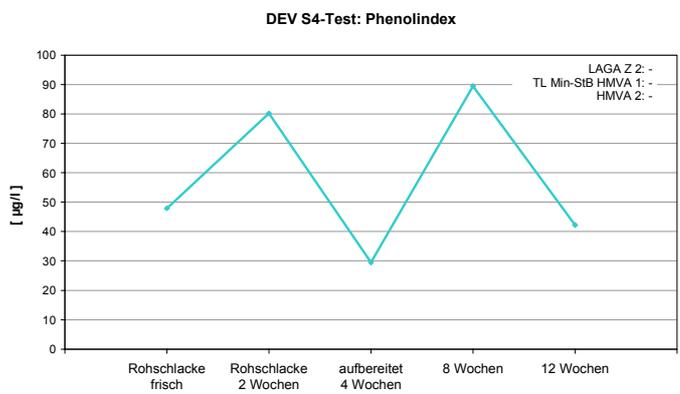
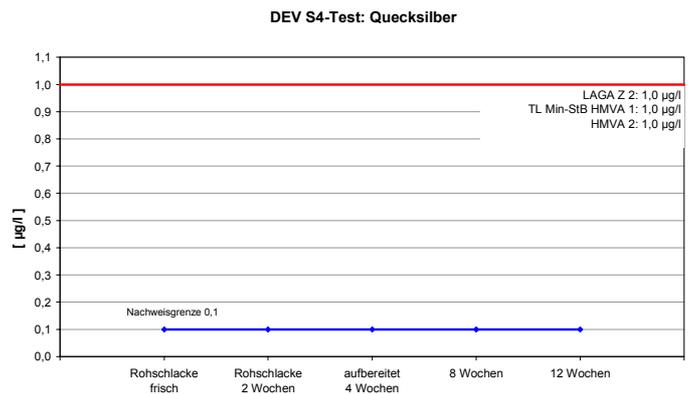
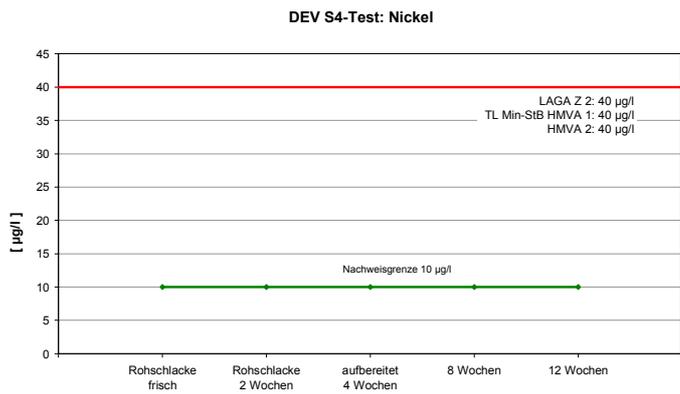
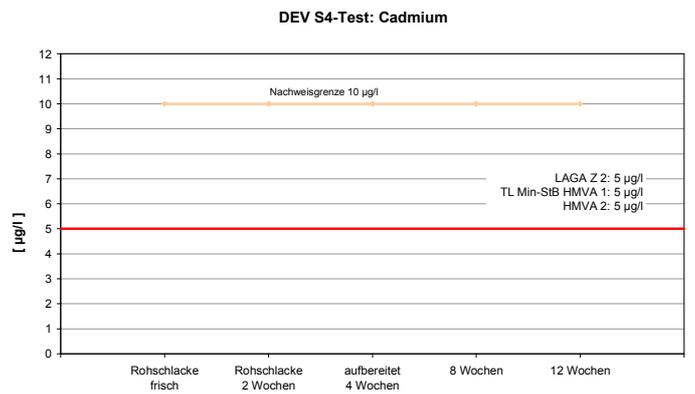
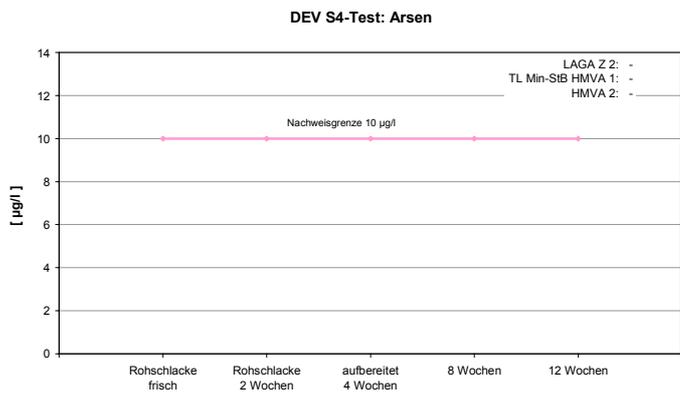


Abb. 130-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke I

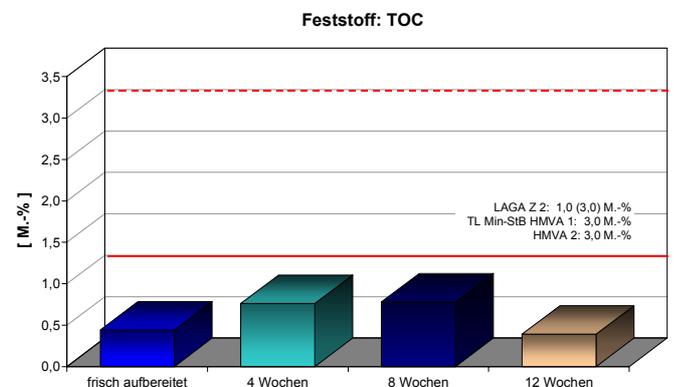
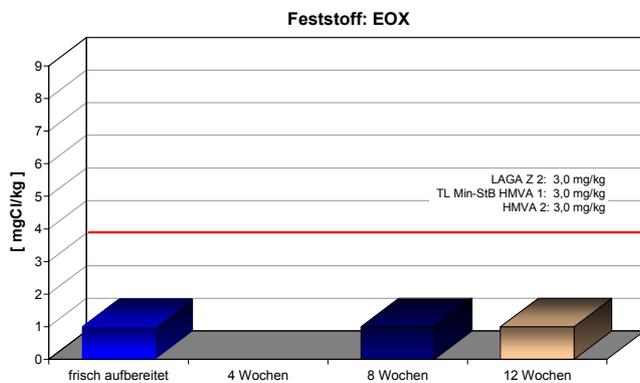
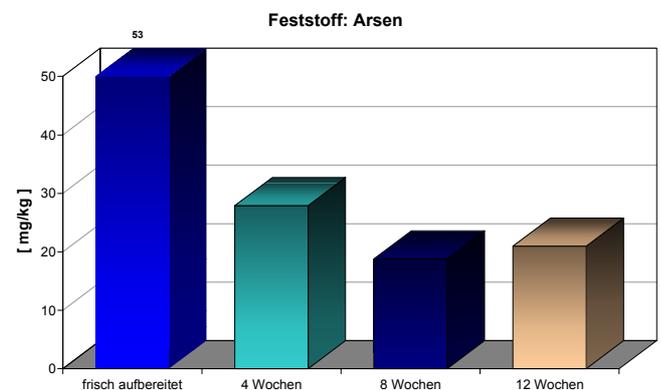
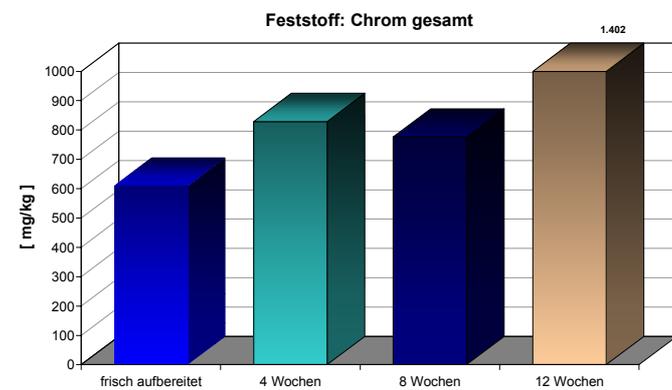
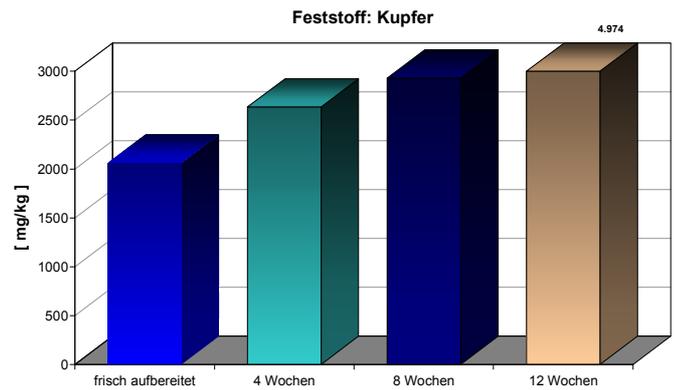
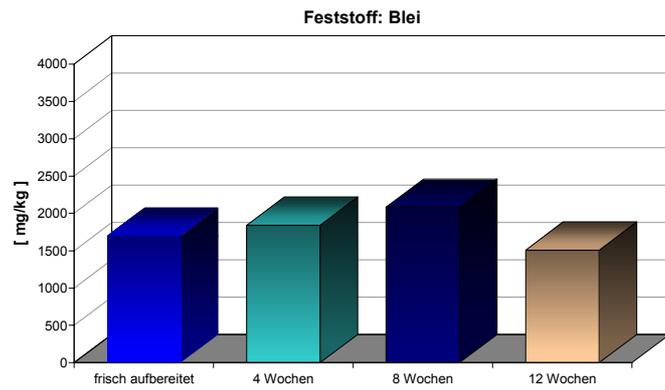
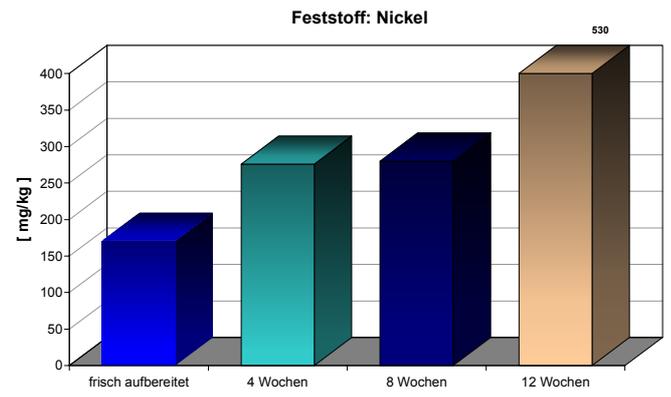
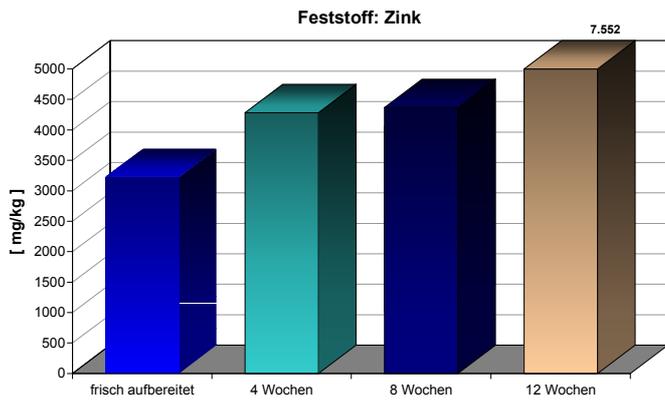
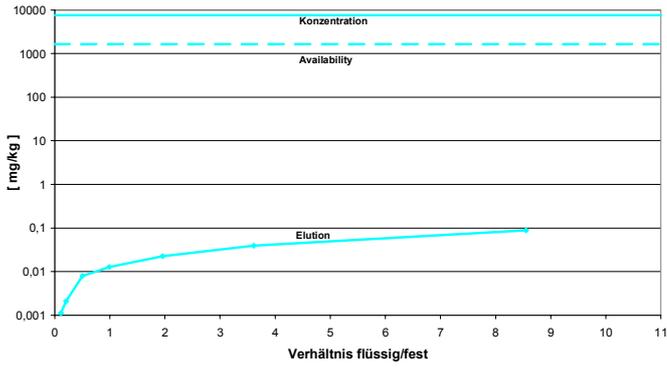
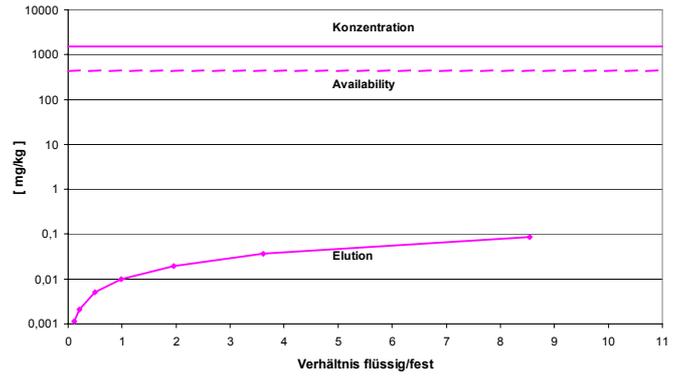


Abb. 131 Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen der MV-Schlacke I

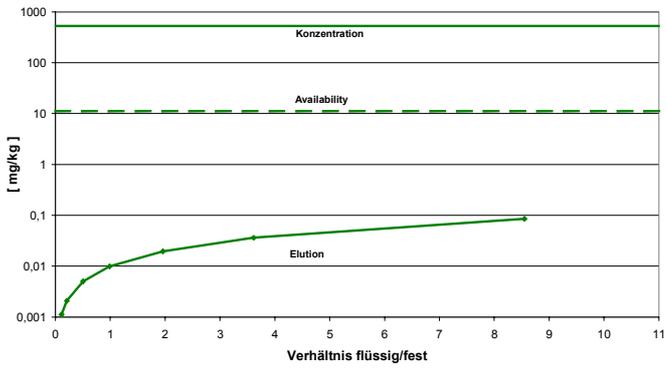
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



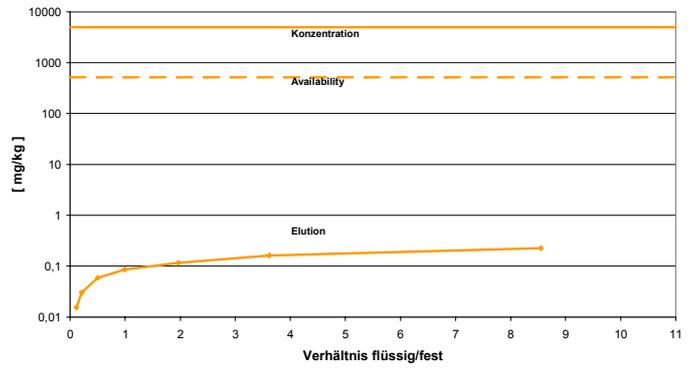
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



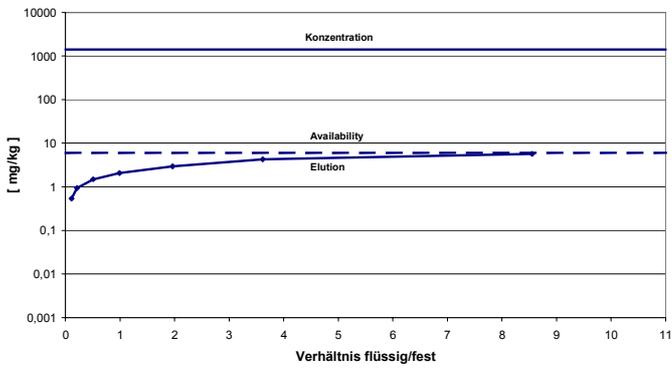
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium

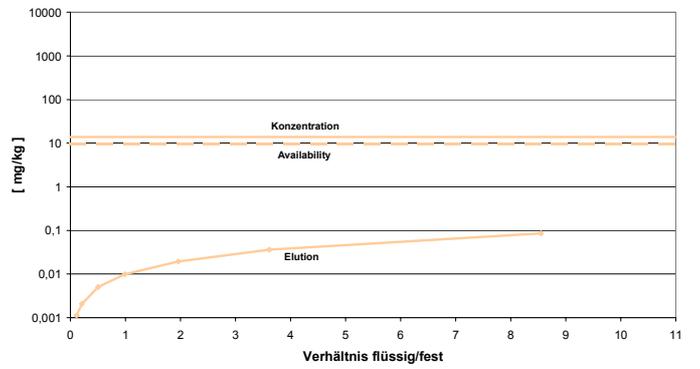


Abb. 132 Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke I

5.2.9.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacken I

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] beruht. Darüber hinaus erfolgen zusätzliche Untersuchungen, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken im Bereich des Deponiebaues und Erdbaues abschätzen zu können. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften einer drei Monate abgelagerten MV-Schlacke für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke I gehen aus Abb. 133 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Nach der Aufbereitung liegen die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacke in einem sehr engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass ab einer Korngröße von 2 mm die untersuchte MV-Schlacke I oberhalb der Grenzsieblinien liegen, d.h. einen zu geringen Anteil an Grobkorn aufweisen.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke I geht aus Abb. 134 hervor. Ein Vergleich der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 68 bis 73 M.-%) der stofflichen Zusammensetzung.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ M.-% werden von der MV-Schlacke I eingehalten (Ist-Werte: 0 bis 0,2 M.-%), während der maximal erlaubte Metallanteil von 5,0 M.-% von der vier und zwölf Monate abgelagerten MV-Schlacke mit 5,4 bzw. 7,0 M.-% überschritten wird.

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke liegen zwischen ca. 1,638 und 1,683 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 16,8 und 17,7 M.-% (Abb. 135). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke I, die sich auch in der Baupraxis zeigt.

• Wassergehalt

Der Wassergehalt der aufbereiteten MV-Schlacke schwankt zwischen 6,1 und 9,6 M.-% (Tab. 65). Da die MV-Schlacke I in Testfeldern im Freiland eingebaut wurde, gehen die Schwankungen in erster Linie auf witterungsbedingte Einflüsse zurück.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten nehmen von 2,653 g/cm³ auf 2,733 g/cm³ zu und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 65). Die Schwankungsbreite geht auf die unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke (z.B. Anteile an Metallen) zurück.

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm \leq 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 2,9 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke erfüllt.

Die Anforderung an die Gesamtkörnung gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke I eingehalten (Ist-Werte: 4,6 bis 7,3 M.-%) (Tab. 65).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, liegen zwischen 31,1 und 32,3 M.-% (Tab. 65). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke I erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Der Anteil an schlecht geformten Körnern liegt bei der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke bei 14,6 M.-%, womit die Anforderung der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt wird (Tab. 65).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 1,6 und 2,4 M.-%. Anforderungen an den Parameter Glühverlust gemäß TL Min-StB 2000 bestehen nicht (Tab. 65).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke I, bis auf eine Überschreitung des Parameters „Metallanteile“ bei der stofflichen Zusammensetzung, eingehalten werden.

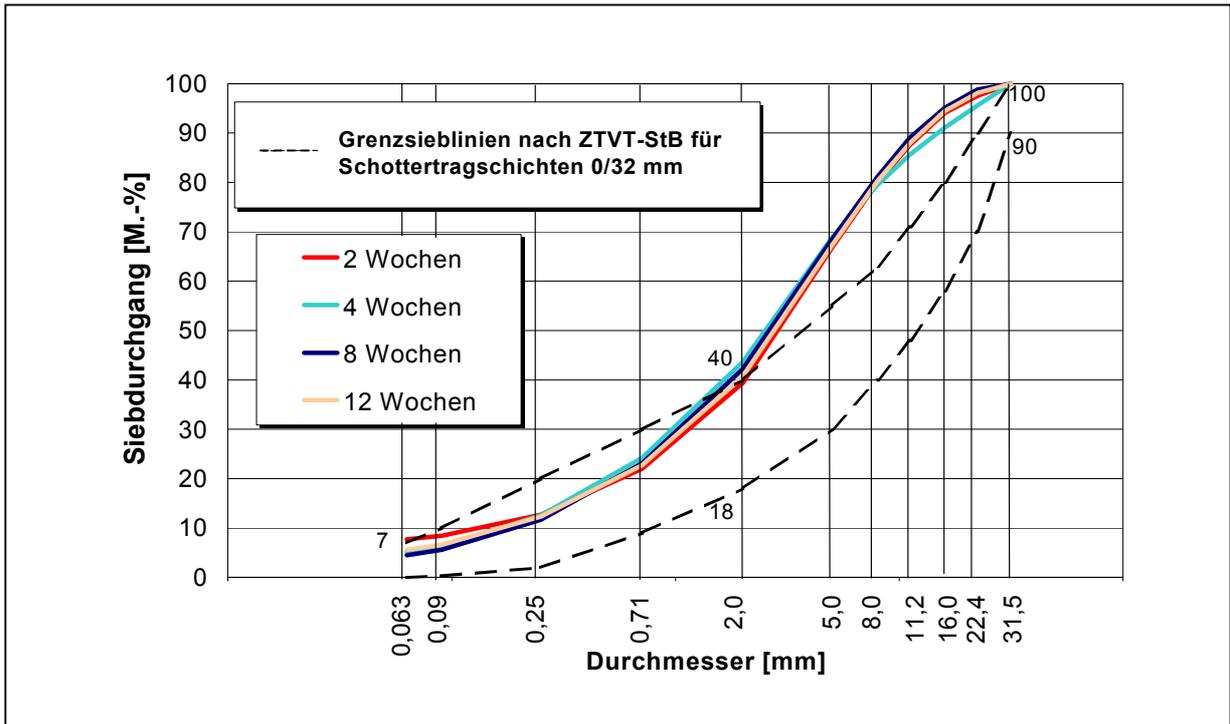


Abb. 133: Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke I

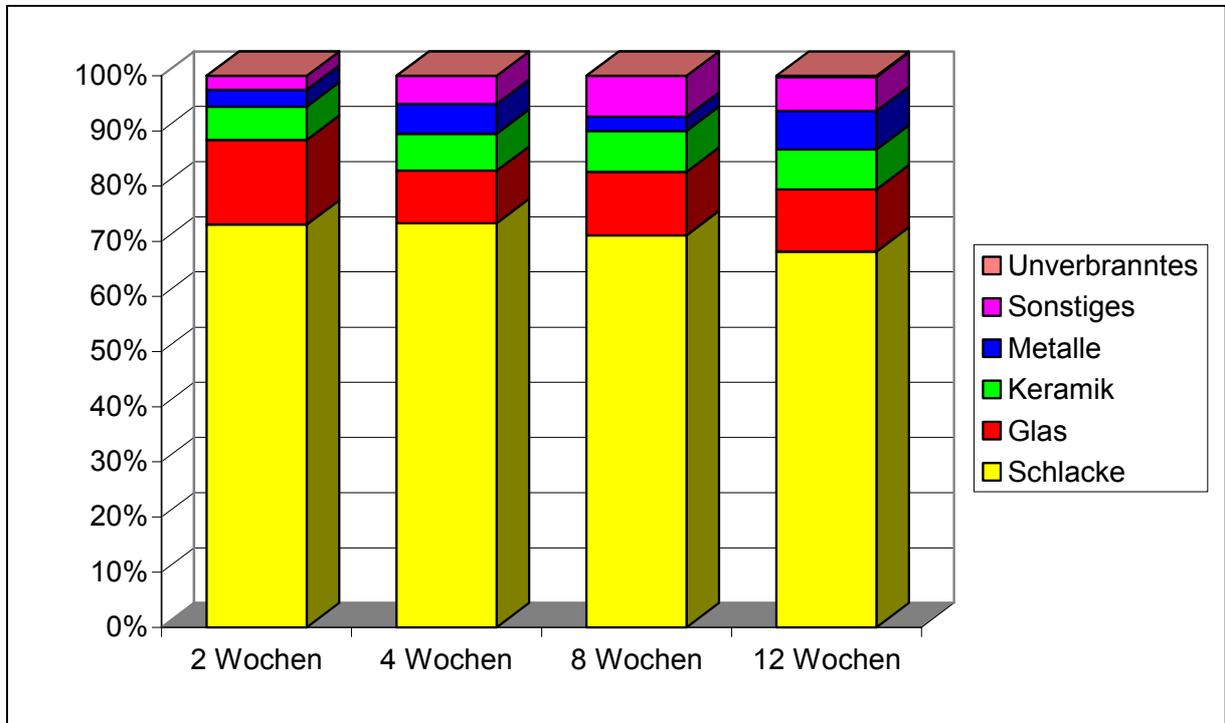


Abb. 134 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke I

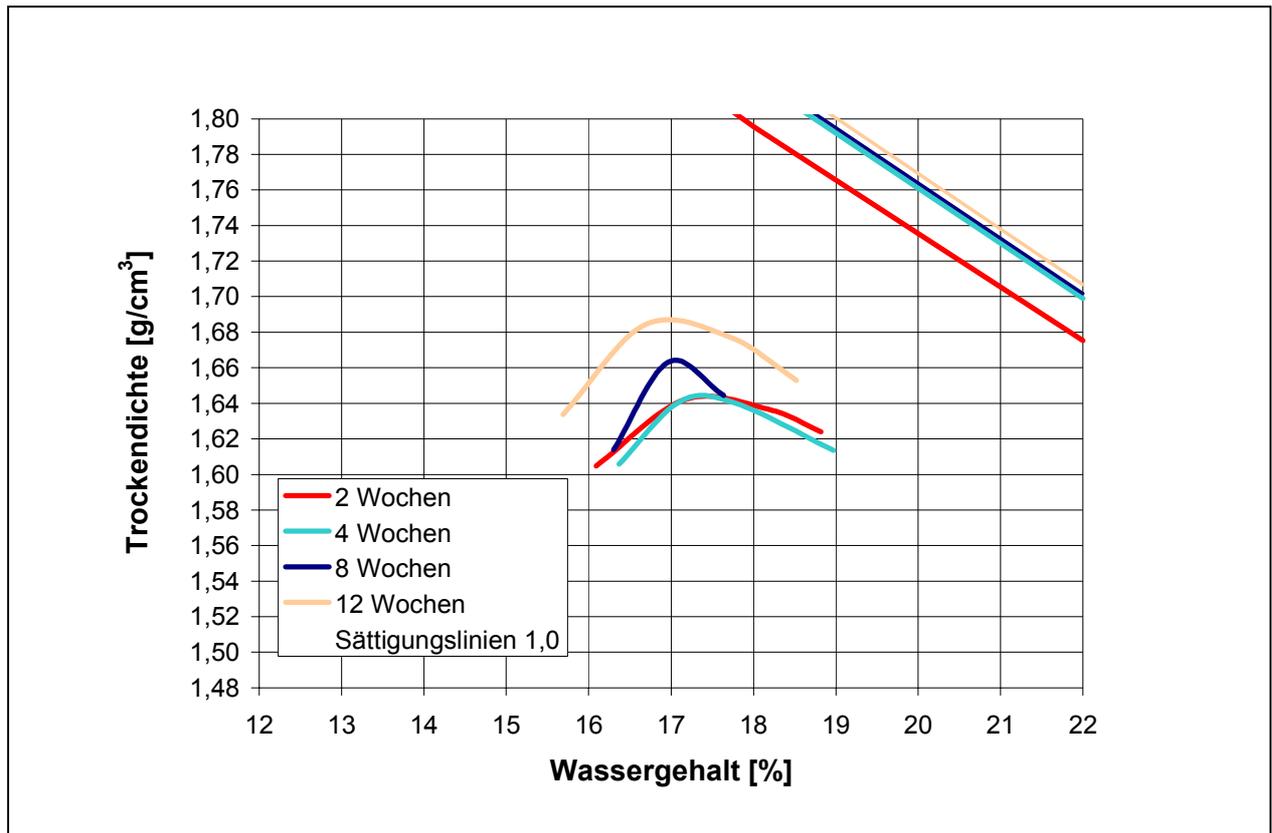


Abb. 135 Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacken I

Tab. 65 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke I

Parameter	Einheit	2 Wochen	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	6,2	8,1	9,6	6,1	
Rohdichte	g/cm ³	2,653	2,713	2,720	2,733	
Schüttdichte	g/cm ³	1,341	1,269	1,281	1,373	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16 mm)	< 5 mm < 0,71 mm M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	2,9	3 (5)
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	7,3	5,2	4,6	6,4	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	31,6	31,9	32,3	31,1	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	14,6	50
Glühverlust	M.-%	1,6	2,4	2,4	2,1	

5.2.10 ANLAGE J

In der MVA J wurde ein Großversuch (MV-Schlacke J) durchgeführt.

- **Verfahrenstechnik der Müllverbrennungsanlage J**

Die verfahrenstechnischen Parameter der Müllverbrennungsanlage gehen aus Tab. 66 hervor. Die untersuchten Schlackeproben stammen aus einem Kessel mit Vorschubrost und Mittelstromfeuerung.

Tab. 66 Verfahrensparameter und Müllzusammensetzung im Regelbetrieb der MVA J

Verfahrensparameter der MVA J	
Rostsystem	Vorschubrost
Durchsatz [t/a]	307.000
Linien	2
Feuerung	Mittelstrom
Heizwert [kJ/kg]	9.700
Abfallarten	Hausmüll
	Gewerbeabfall
	Sperrmüll
Schlackeanfall [t/a]	72.000

- **Müllinput**

Folgende Müllzusammensetzung wurde großtechnisch thermisch behandelt:

Tab. 67 Müllzusammensetzung während des Großversuchs

Müllzusammensetzung während des Großversuches in der MVA J in M.-%		
Hausmüll	Sperrmüll	Gewerbemüll
84,2	13,4	2,1

- **Aufbereitungstechnik der MV-Schlacken**

Die in der Müllverbrennungsanlage J produzierten MV-Rohschlacken werden in der angeschlossenen Aufbereitungsanlage nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker über Förderbänder der Aufbereitung zugeführt und zu MV-Schlacken aufbereitet. Die Aufbereitung besteht aus mehreren Siebanlagen zur Herstellung einer definierten Körnung, sowie Eisen- und Nichteisenabscheidungen. Die Nachlagerung findet in Boxen in einer Halle statt. Vor der Auslieferung werden die MV-Schlacken, als zusätzliches Instrument der Qualitätssicherung, nochmals über eine Siebanlage durchgesetzt.

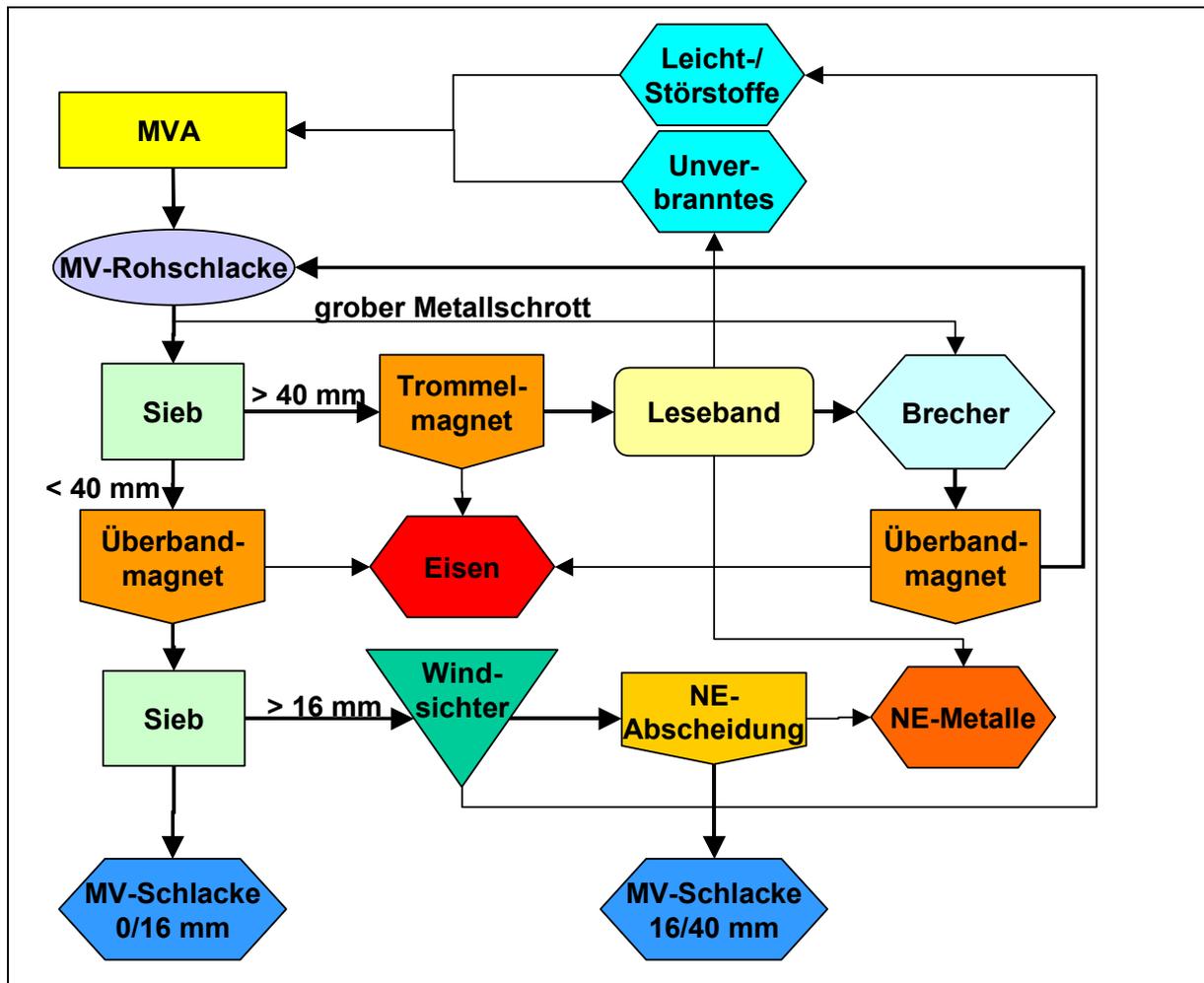


Abb. 136 Schematische Darstellung der Aufbereitungsanlage für die MV-Schlacke J

Die aufbereitete MV-Schlacke unterliegt der Güteüberwachung gemäß RG Min-StB 93 [30] und wird als Baustoff im Straßenbau und Erdbau verwertet.

5.2.10.1 Mineralogische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke J

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke geht aus Tab. 68, die der Grobfraktion aus Tab. 69 hervor, wobei die Mineralphasen aus den Gruppen der Silikate, Oxide, Carbonate, Sulfate, Phosphate und Hydroxide in den einzelnen Proben in wechselnden Mengenverhältnissen auftreten (Abb. 137).

Im Feinanteil der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO_2) die mineralogische Hauptphase dar, während das Carbonat Calcit (CaCO_3) sowie neu gebildete Glasphasen die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8), und Plagioklas ($(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$), die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), das Phosphat Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), das Hydroxid Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie die Sulfate Anhydrit (CaSO_4) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) auf.

Tab. 68 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Schlacke J

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi_3O_8	Kalifeldspat	Akzessorie/Spuren	Durchläufer
$(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$	Plagioklas	Akzessorie/Spuren	Durchläufer
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Äkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diopsid	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO_2	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe_3O_4	Magnetit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO_3	Calcit	Nebenphase	Neubildung
<u>Sulfate</u>			
CaSO_4	Anhydrit	Spuren	Neubildung
$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$	Ettringit	Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Apatit	Spuren	Neubildung
<u>Hydroxide</u>			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase/Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

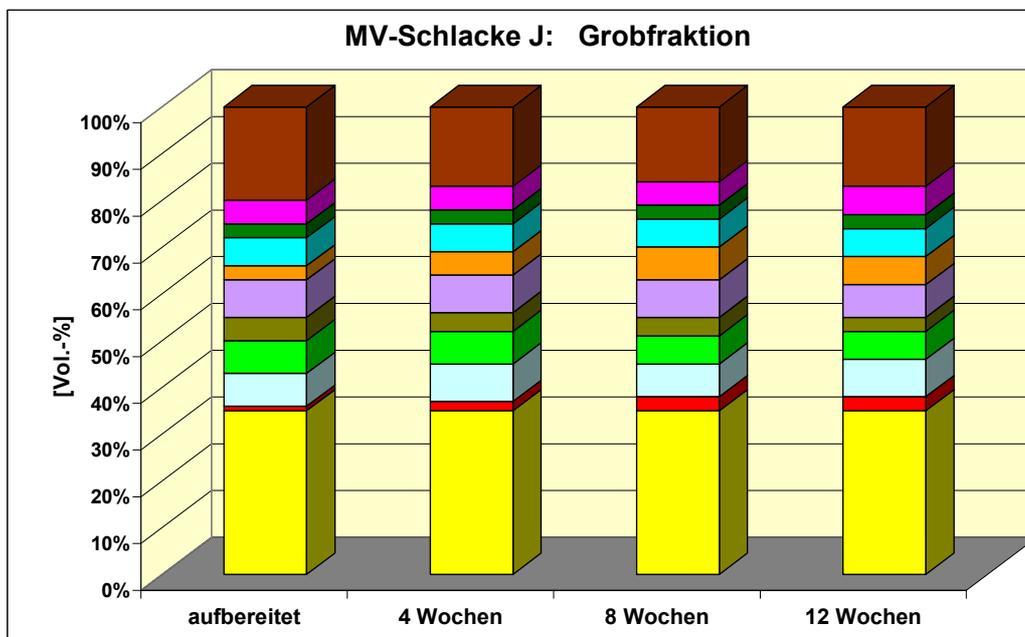
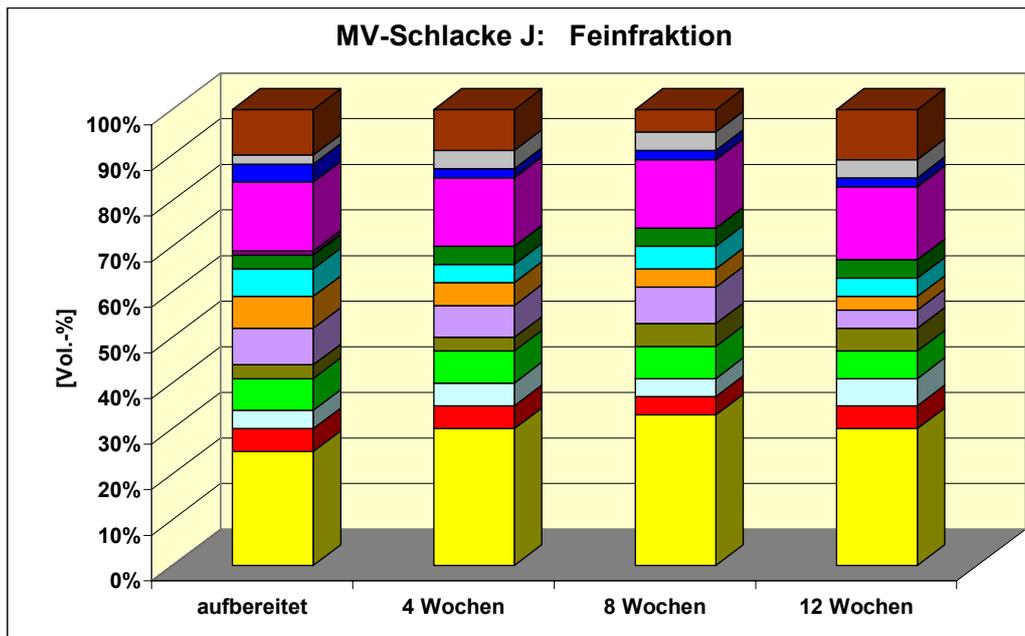
In der Grobfraktion der MV-Schlacke stellt das Oxid Quarz (SiO₂) die alleinige Hauptphase dar, während teilweise die neu gebildeten Glasphasen sowie die Silikate Kalifeldspat (KAlSi₃O₈) und Plagioklas (Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si₂O₈] die mineralogischen Nebenphasen bilden. Akzessorisch und im Spurenbereich treten die Silikate Gehlenit (Ca₂Al₂SiO₇), Äkermanit (Ca₂MgSi₂O₇) und Diopsid (CaMgSi₂O₆), das Carbonat Calcit (CaCO₃), die Oxide Magnetit (Fe₃O₄) und Hämatit (α-Fe₂O₃) und das Phosphat Apatit (Ca₅(PO₄)₃(OH)) auf.

Tab. 69 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der MV-Schlacke J

MINERAL	NAME	VORKOMMEN	ENTSTEHUNG
<u>Silikate</u>			
KAlSi ₃ O ₈	Kalifeldspat	Nebenphase/Akzessorie	Durchläufer
(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	Plagioklas	Nebenphase/Akzessorie	Durchläufer
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Gehlenit	Akzessorie	Neubildung
Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	Äkermanit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
CaMgSi ₂ O ₆	Diopsid	Akzessorie	Neubildung
<u>Oxide</u>			
SiO ₂	Quarz	Hauptphase	Durchläufer
Fe ₃ O ₄	Magnetit	Akzessorie	Neubildung
α-Fe ₂ O ₃	Hämatit	Spuren	Neubildung
<u>Carbonate</u>			
CaCO ₃	Calcit	Akzessorie/Spuren	Neubildung
<u>Phosphate</u>			
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	Apatit	Spuren	Neubildung
<u>neu gebildete Glasphase</u>		Nebenphase/Akzessorie	Neubildung

Hauptphase = > 20%, Nebenphase = 10-20%, Akzessorie = 5-10%, Spuren = < 5%

Bei den Mineralphasen der MV-Schlacke J handelt es sich vorwiegend um Neubildungen während des Verbrennungsprozesses auf dem Rost. Ausnahmen stellen das Oxid Quarz (SiO₂) sowie die Feldspäte Kalifeldspat (KAlSi₃O₈) und Plagioklas (Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si₂O₈] dar, die mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackenstruktur mit eingebaut werden. Daher werden sie als typische Durchläuferminerale angesehen. Das Hydroxid Portlandit Ca(OH)₂ entsteht durch den Kontakt von CaO mit dem Wasser aus dem Nassentschlacker. Das Sulfat Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) wird sofort nach dem Austrag aus dem Nassentschlacker und das Carbonat Calcit (CaCO₃) im Laufe der Ablagerung durch die zusätzliche Reaktion von Portlandit mit dem Luft-CO₂ gebildet.



<u>Oxide:</u>			<u>Phosphate:</u>	
■ Quarz	SiO ₂	■	Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)
■ Hämatit	α-Fe ₂ O ₃		<u>Hydroxide:</u>	
■ Magnetit	Fe ₃ O ₄	■	Portlandit	Ca(OH) ₂
<u>Silikate:</u>			<u>Carbonate:</u>	
■ Gehlenit	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	■	Calcit	CaCO ₃
■ Äkermanit	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇		<u>Sulfate:</u>	
■ Kalifeldspat	KAlSi ₃ O ₈	■	Anhydrit	CaSO ₄
■ Plagioklas	(Na,Ca)[Al(Al,Si)-Si ₂ O ₈]	■	Ettringit	Ca ₆ Al ₂ [(OH) ₂ SO ₄] ₃ ·24H ₂ O
■ Diopsid	CaMgSi ₂ O ₆			
■ <u>Neu gebildete Glasphase</u>				

Abb. 137 Mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der MV-Schlacke J

Bezüglich der Mineralumwandlungen/Mineralneubildungen während der Alteration (MV-Rohschlacke → MV-Schlacke) wird im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacken J folgendes festgestellt (Abb. 138):

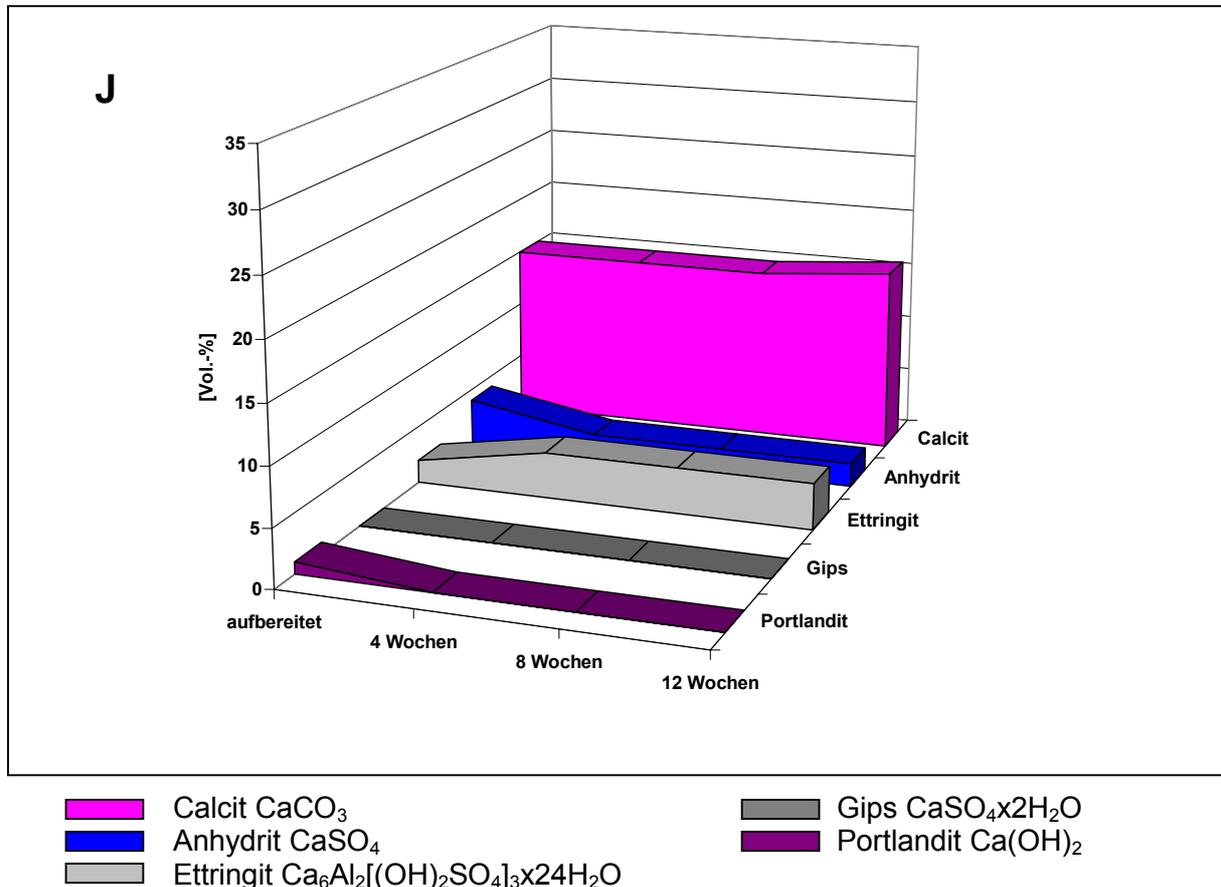


Abb. 138 Schematische Darstellung der Alterationsreaktionen der MV-Schlacke J

- Das Carbonatisierungsverhalten zeigt in der MV-Schlacke J eine deutliche Abnahme des Portlandits (Ca(OH)₂), wobei in der MV-Schlacke nach einer Ablagerungszeit von vier Wochen kein Portlandit mehr detektiert werden kann. Die weitere Carbonatisierung, die durch das Mineral Calcit (CaCO₃) gesteuert wird, lässt ausgeprägte Alterationsreaktionen im Verlaufe der Ablagerung erkennen, die sich in einer Zunahme des Calcits im Mineralbestand äußern. Die MV-Schlacke J weist somit ein gutes Carbonatisierungsvermögen auf.
- Das Sulfat Anhydrit (CaSO₄), das die Sulfatreaktionen im wesentlichen steuert und somit für die Beurteilung der Raumbeständigkeit mit verantwortlich ist, nimmt in der untersuchten MV-Schlacke J während der Ablagerungszeit von 12 Wochen deutlich ab. Die MV-Schlacke kann zu diesem Zeitpunkt der Ablagerung bezüglich der Sulfatreaktionen als reaktionsträge und damit als ausreichend raumbeständig eingestuft werden, da weitere Sulfatreaktionen nicht mehr erwartet werden.
- Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) tritt bereits in der MV-Rohschlacke auf und nimmt im weiteren Verlauf der Ablagerung weiter zu, während das Sulfat Gips (CaSO₄·2H₂O) im Mineralbestand nicht festgestellt werden kann.

Bei der MV-Schlacke J handelt es sich um eine MV-Schlacke, bei der die Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten abgeschlossen sind und die, aus mineralogischer Sicht, als ausreichend raumbeständig eingestuft werden kann.

5.2.10.2 Chemische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke J

• Chemische Untersuchungen im Eluat

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacke wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt, der Aussagen über ein mögliches Gefährdungspotential eines bestimmten Stoffes liefert. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die Konzentrationsverläufe der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Schlacke J zeigen während der Ablagerung von 12 Wochen (Abb. 139-a und 139-b):

- Die pH-Werte nehmen während der Ablagerungszeit in geringem Umfang von pH 11,8 auf 11,0 ab und liegen innerhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 - 13).
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit sind vergleichsweise gering und schwanken während der Lagerung lediglich zwischen 100 mS/m und 130 mS/m. Die Werte liegen unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (600 mS/m).
- Der Zinkgehalt ist bereits in der frisch aufbereiteten MV-Schlacke sehr gering (70 µg/l) und fällt während der Ablagerungszeit von 12 Wochen auf 20 µg/l im Eluat ab. Die Zinkwerte unterschreiten die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l deutlich.
- Der Bleiwert zeigt mit ca. 25 µg/l einen für frisch aufbereitete MV-Schlacken einen sehr geringen Anfangsgehalt und fällt im weiteren Verlauf der Ablagerung unter die gerätespezifische Nachweisgrenze von ca. 10 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l werden eingehalten.
- Die Kupferwerte schwanken während der Ablagerungszeit von ca. 50 µg/l bis 150 µg/l. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden von der MV-Schlacke J unterschritten.
- Die Chromgehalte steigen während der Ablagerung von ca. 20 auf 40 µg/l an, liegen jedoch unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 200 µg/l bzw. 50 µg/l.
- Die Gehalte der Schwermetalle Arsen, Nickel und teilweise Quecksilber liegen mit Ausnahme des Arsengehaltes der frisch aufbereiteten MV-Schlacke unterhalb der Nachweisgrenzen und halten die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.
- Die Gehalte an Chlorid steigen bis zu einer Ablagerungszeit von 8 Wochen deutlich von ca. 50 mg/l auf 240 mg/l an und fallen danach auf das Anfangsniveau zurück. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 für eine HMVA-2 von 250 mg/l werden unterschritten.

- Die Sulfatwerte nehmen von 100 mg/l auf 240 mg/l zu, halten jedoch auch nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l ein.

Eine zusammenfassende Bewertung der DEV S4-Eluatergebnisse zeigt, dass die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke J eingehalten werden.

• Chemische Untersuchungen im Feststoff

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] bezüglich der Feststoffgehalte beschränken sich auf die Parameter TOC und EOX. In Abb. 140 werden zusätzlich zu den geforderten Parametern ausgewählte Schwermetallgehalte der untersuchten MV-Schlacke J in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterationsstufe im Feststoff dargestellt.

Die Grenzwerte für die Parameter TOC und EOX werden für die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke J eingehalten.

• Langzeitstabilität

Die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der abgelagerten MV-Schlacke gehen aus Abb. 141 hervor.

In den Diagrammen geben die oberen Geraden die Gesamtkonzentrationen der Elemente im Feststoff an.

Ebenfalls als Geraden sind die Ergebnisse der Availability-Tests eingezeichnet, die eine Vorstellung darüber geben, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann (worst-case-Betrachtung). Die Kurvenverläufe der Kolonnentests liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [VEHLOW 1995].

Durch die Kombination der Ergebnisse der Feststoffgehalte, der Availability-Tests und der Kolonnentests kann die zeitabhängige Freisetzung der Schwermetalle, der Chloride und Sulfate abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der höchst mögliche verfügbare Anteil der betrachteten Schwermetalle Zink, Blei und Kupfer weitaus höher ist, als derjenige von Nickel und Chrom, jedoch die Eluatgehalte unter den Bedingungen des Kolonnentests in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Außerdem wird deutlich, dass die maximal verfügbare Schadstoffmenge in kurzen bis mittelfristigen Zeiträumen nicht erreicht wird und nur geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden.

Die Verfügbarkeit an Sulfat ist erheblich höher als diejenige von Chlorid. Allerdings zeigen die Ergebnisse des Kolonnentests, dass die eluierbaren Mengen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Während die Elution von Chlorid in erster Linie auf Auswaschungsvorgänge von leicht löslichen Chloriden zurückgeführt wird, wird die Löslichkeit der Sulfate von den vorliegenden Mineralphasen gesteuert, die unterschiedliche Löslichkeitsprodukte aufweisen.

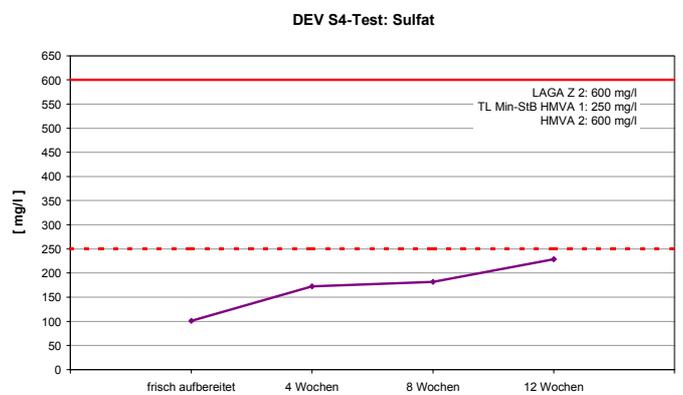
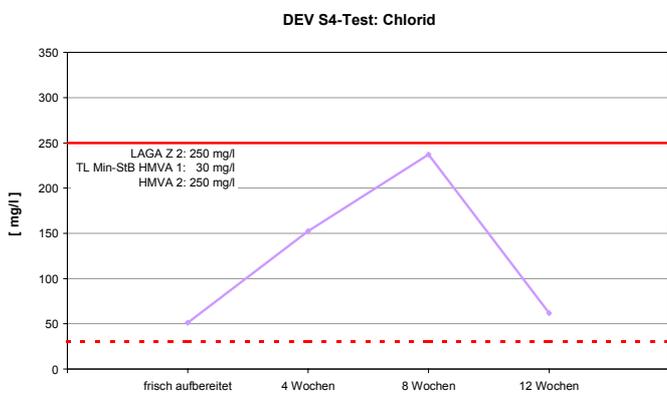
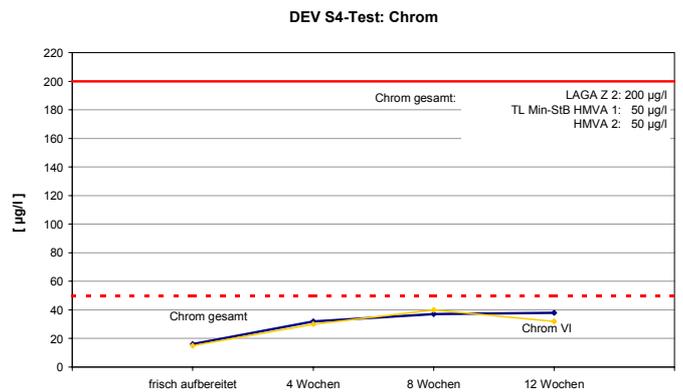
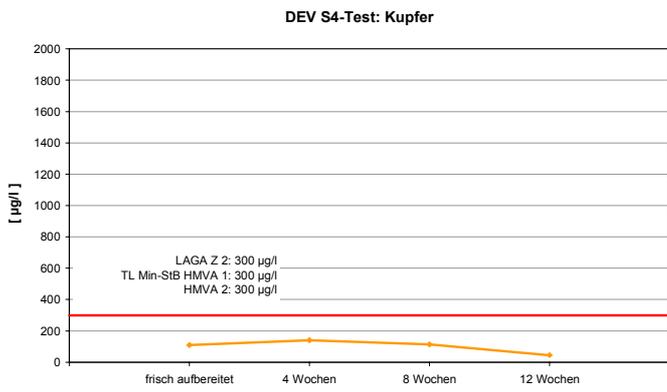
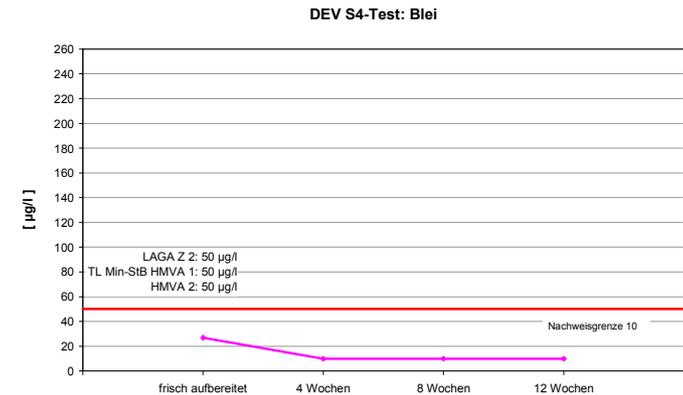
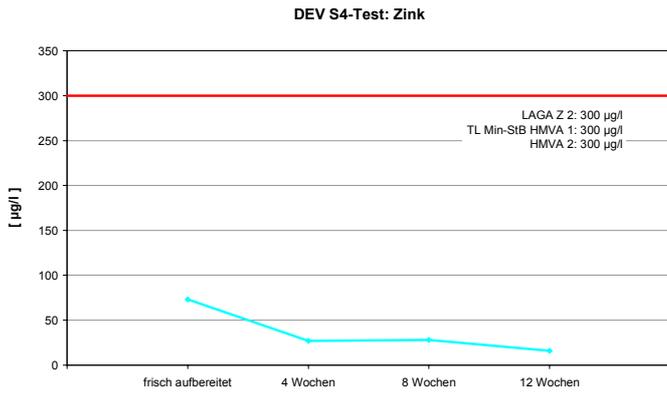
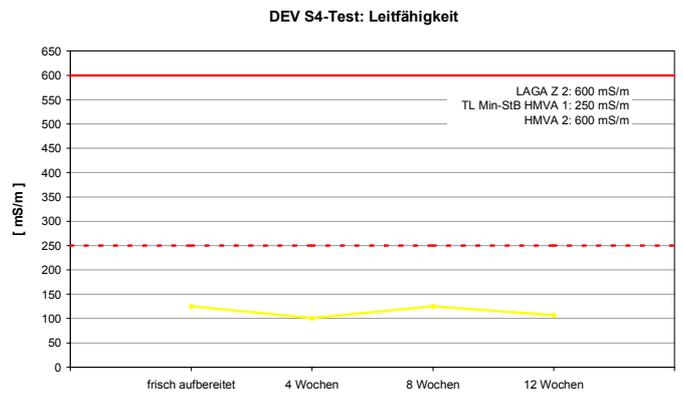
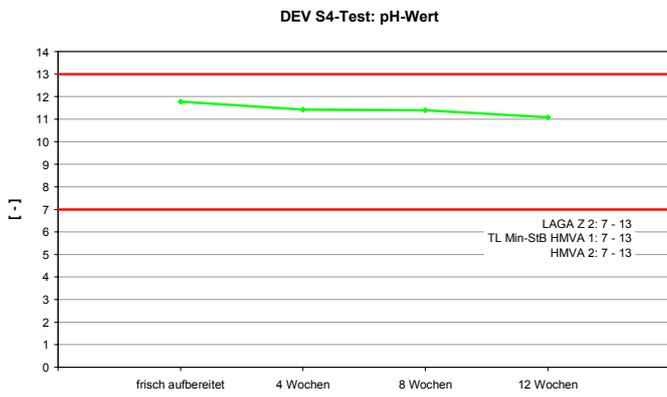


Abbildung 139-a Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke J

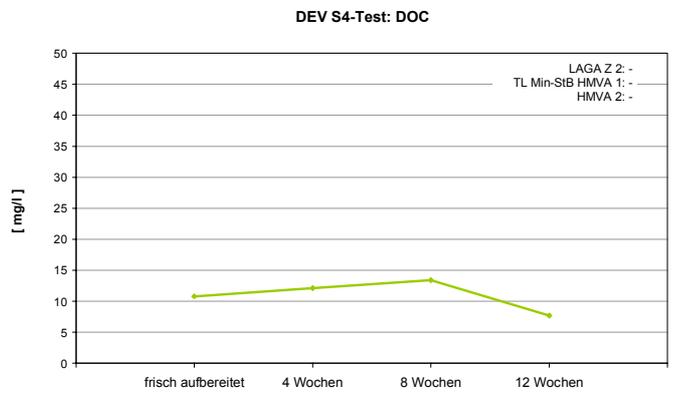
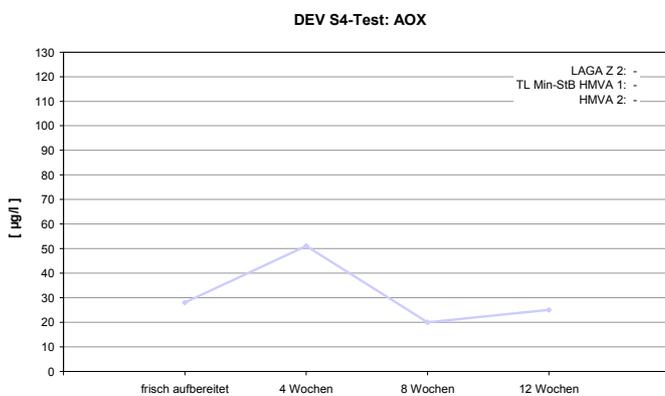
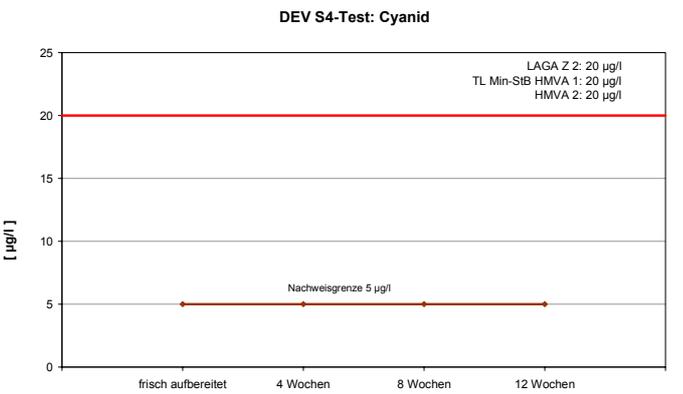
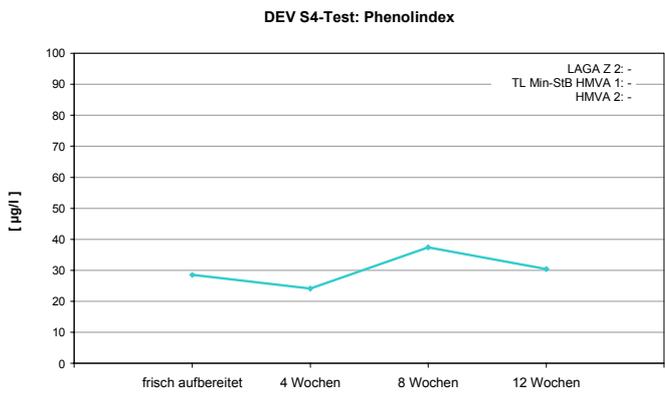
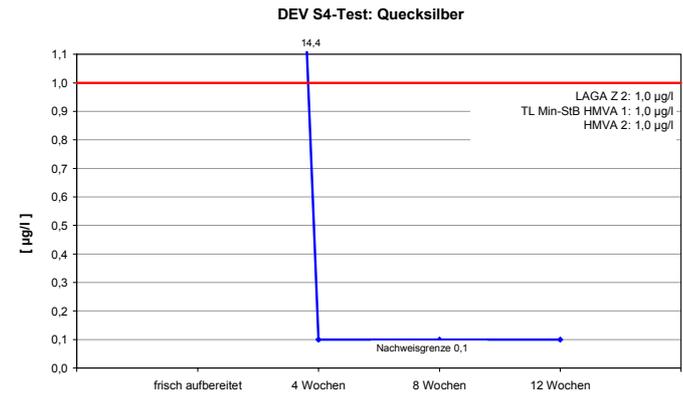
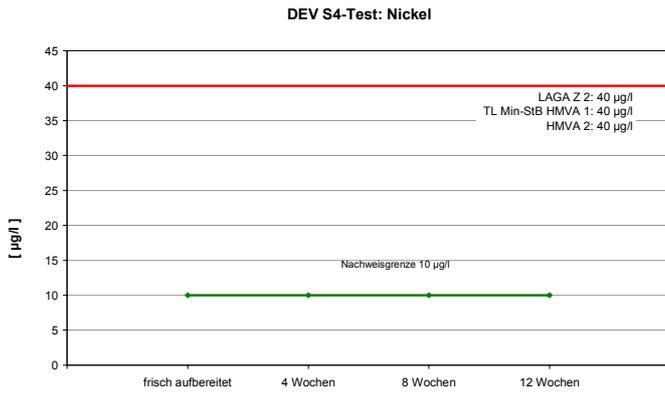
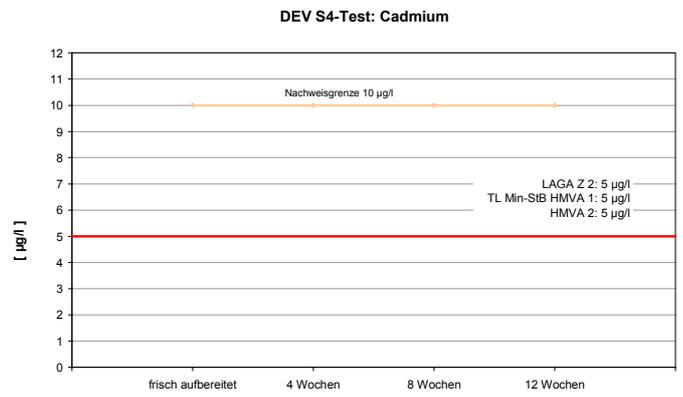
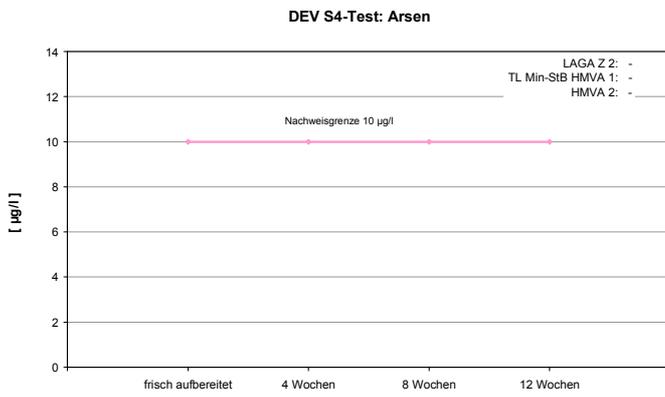


Abb. 139-b Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der MV-Schlacke J

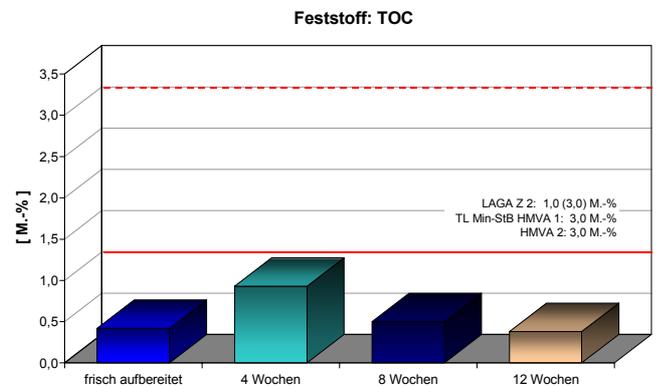
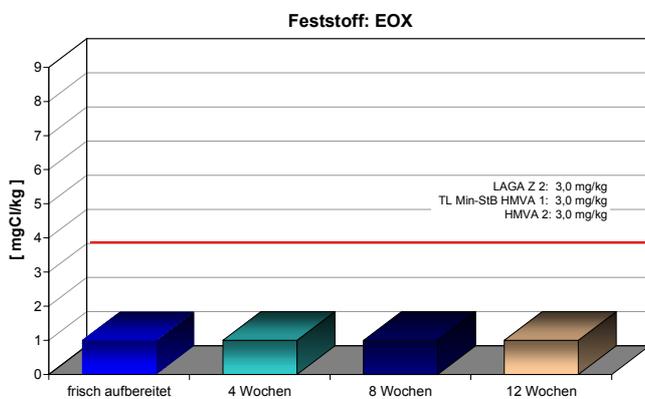
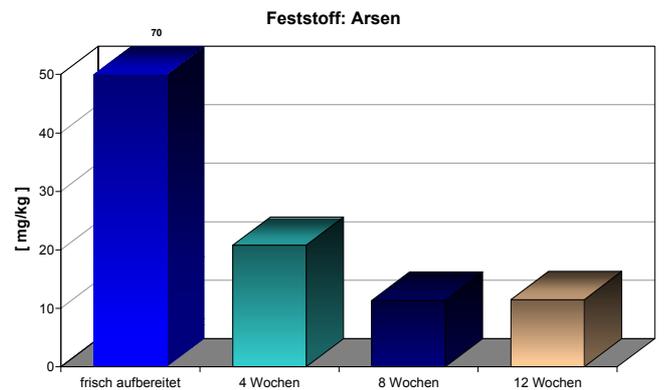
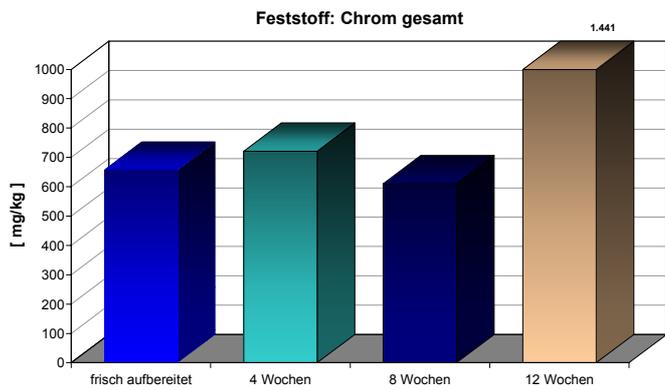
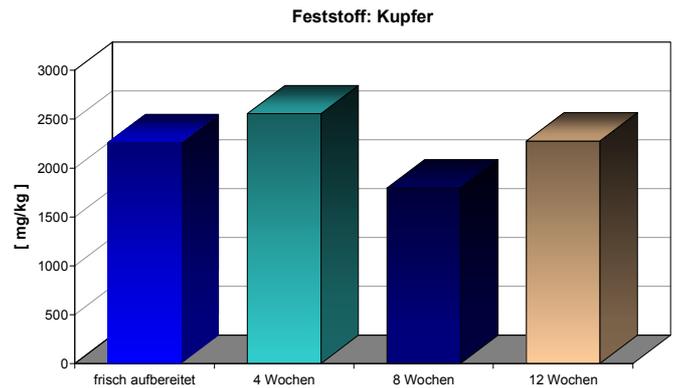
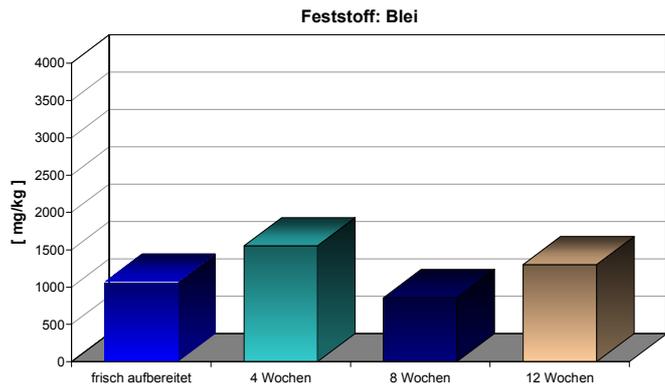
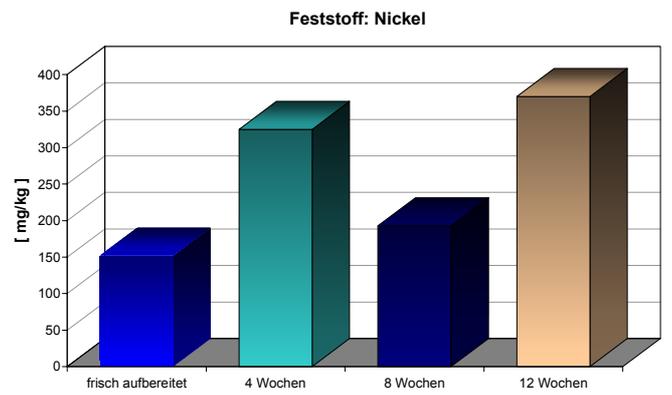
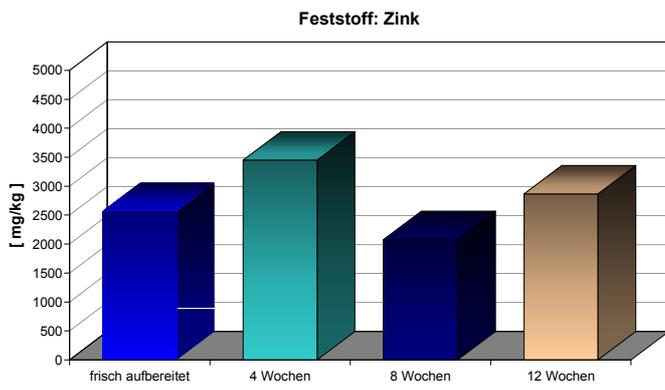
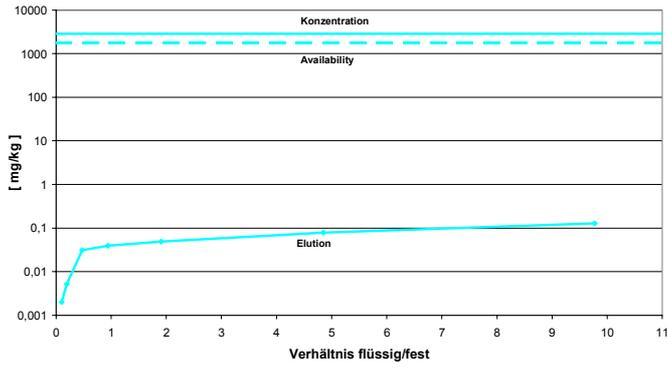
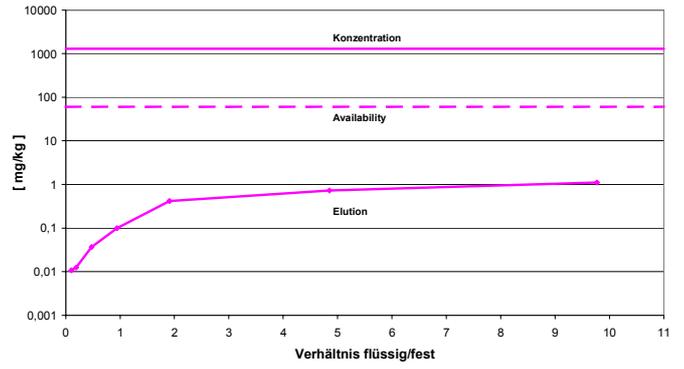


Abb. 140 Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen der MV-Schlacke J

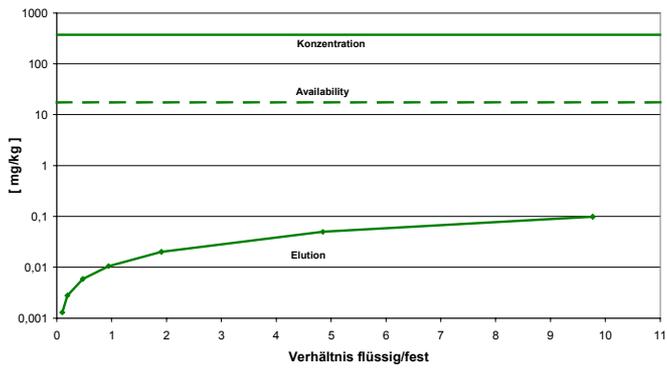
Kolonnen- und Availabilitytest: Zink



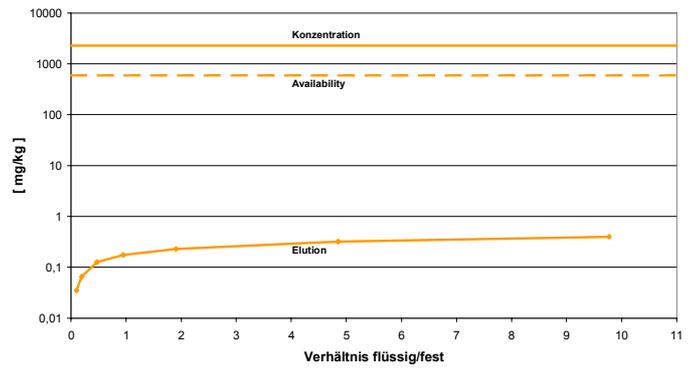
Kolonnen- und Availabilitytest: Blei



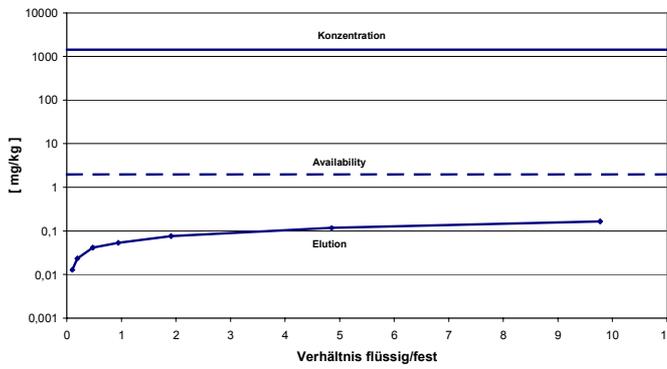
Kolonnen- und Availabilitytest: Nickel



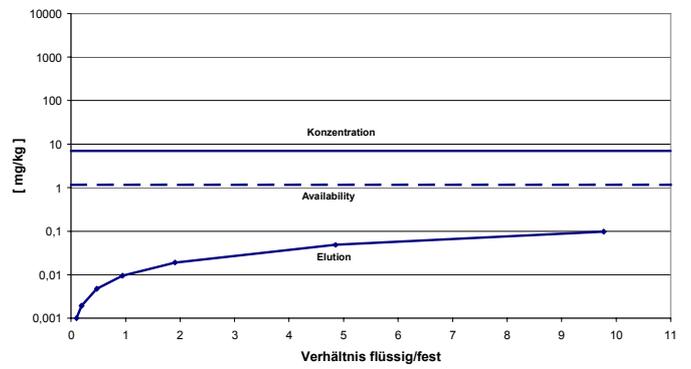
Kolonnen- und Availabilitytest: Kupfer



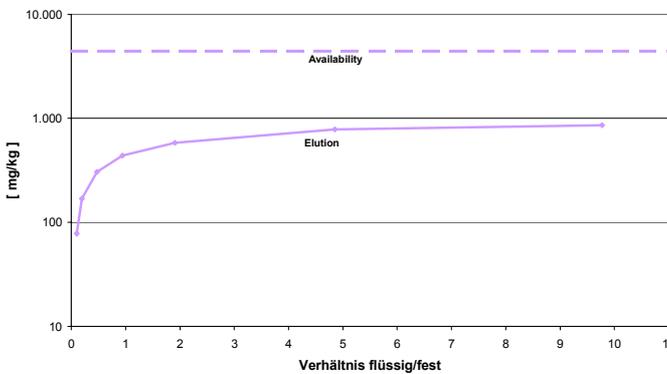
Kolonnen- und Availabilitytest: Chrom



Kolonnen- und Availabilitytest: Cadmium



Kolonnen- und Availabilitytest: Chlorid



Kolonnen- und Availabilitytest: Sulfat

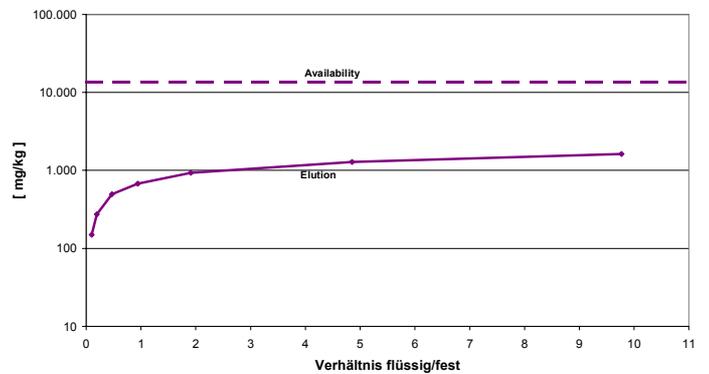


Abb. 141 Gesamtkonzentration der Elemente im Feststoff sowie die Ergebnisse des Kolonnen- und Availability-Tests der MV-Schlacke J

5.2.10.3 Bautechnische Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacke J

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] beruht. Darüber hinaus erfolgen zusätzliche Untersuchungen, um weitere Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken im Bereich des Deponiebaues und Erdbaues abschätzen zu können. Gemäß TL Min-StB 2000 [2] werden nur die Eigenschaften einer drei Monate abgelagerten MV-Schlacke für eine Beurteilung herangezogen.

• Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke J gehen aus Abb. 142 hervor. Ein Vergleich der ermittelten Korngrößenverteilungen zeigt:

- Nach der Aufbereitung liegen die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten MV-Schlacke in einem engen Sieblinienband, das auf eine sehr gleichmäßige und homogene Aufbereitung hinweist.
- Die Sieblinien der aufbereiteten MV-Schlacke haben die Gestalt von weitgestuften sandigen Kiesen.
- Die Anforderungen an die Korngrößenverteilungen richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Vorgaben gemäß der TL Min-StB 2000 existieren nicht. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass die drei Monate abgelagerte MV-Schlacke J teilweise unterhalb der Grenzsieblinie liegt.

• Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke J geht aus Abb. 143 hervor. Ein Vergleich der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung zeigt:

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden den größten Anteil (ca. 69 bis 74 M.-%) der stofflichen Zusammensetzung.
- Die Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an den Anteil an unverbranntem Material $\leq 0,5$ M.-% werden von der MV-Schlacke J eingehalten (Ist-Werte: 0,1 bis 0,4 M.-%), ebenso der maximal erlaubte Metallanteil von 5,0 M.-% (Ist-Werte: 1,9 bis 3,4 M.-%).

• Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Die Proctordichten der untersuchten MV-Schlacke liegen zwischen ca. 1,65 und 1,682 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen ca. 8,1 und 9,2 M.-% (Abb. 144). Der Kurvenverlauf ist glockenförmig und spricht für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacke J, die sich auch in der Baupraxis zeigt.

• Wassergehalt

Die Wassergehalte sind sehr gering und schwanken zwischen 5,8 und 8,3 M.-% (Tab. 70). Dabei muss beachtet werden, dass Aufbereitung und Ablagerung der MV-Schlacke J in einer Halle stattfindet und somit eine natürliche Wasserzufuhr durch Niederschlag nicht stattfindet.

- **Rohdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,712 g/cm³ und 2,776 g/cm³ und liegen somit innerhalb der Erfahrungswerte für MV-Schlacken (Tab. 70).

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung durchgeführt. Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm an der Körnung 8/16 mm \leq 3,0 M.-% nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch betragen. Beträgt der Anteil < 0,71 mm weniger als 2,5 M.-%, sind bis 5 M.-% erlaubt. Diese Anforderung wird mit 4,1 M.-% von der drei Monate abgelagerten MV-Schlacke erfüllt.

Die Anforderung an die Gesamtkörnung gemäß TL Min-StB 2000 lautet, dass der ursprüngliche Anteil < 0,063 mm zuzüglich dem neu entstandenen Anteil < 0,063 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung maximal 9,0 M.-% betragen darf. Diese Anforderung wird von der untersuchten MV-Schlacke J eingehalten (Ist-Werte: 1,8 bis 4,0 M.-%) (Tab. 70).

- **Widerstand gegen mechanische Beanspruchung**

Die ermittelten Werte für den Parameter „Widerstandsfähigkeit gegen Schlag“ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung, sind sehr homogen und liegen zwischen 32,8 und 36,5 M.-% (Tab. 70). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von der MV-Schlacke J erfüllt.

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Die Anteile an schlecht geformten Körnern liegen bei 9,6 M.-%, womit die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden (Tab. 70).

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste liegen zwischen 0,8 und 1,7 M.-%. Anforderungen an den Parameter Glühverlust gemäß TL Min-StB 2000 bestehen nicht (Tab. 70).

Eine zusammenfassende Bewertung der bautechnischen Parameter zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 [2] von der untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacke J eingehalten werden.

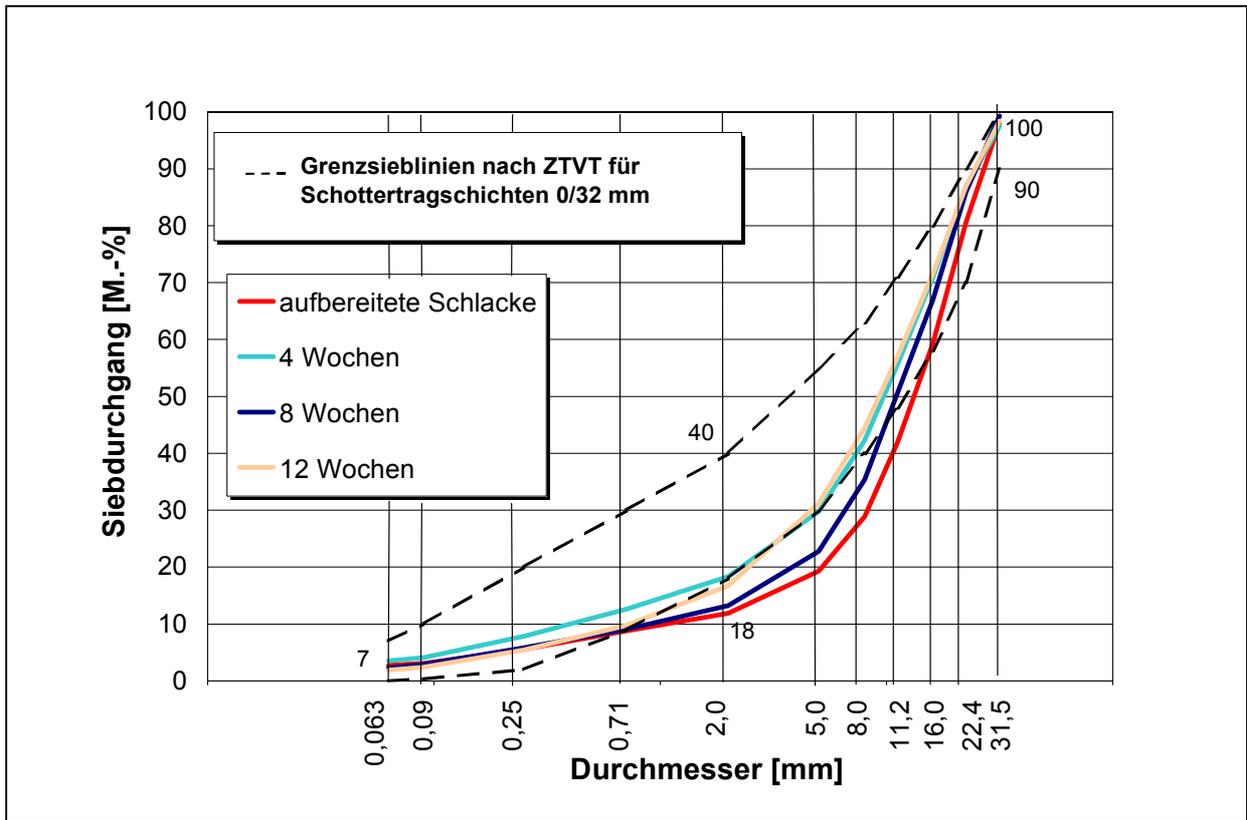


Abb. 142 Korngrößenverteilungen der MV-Schlacke J

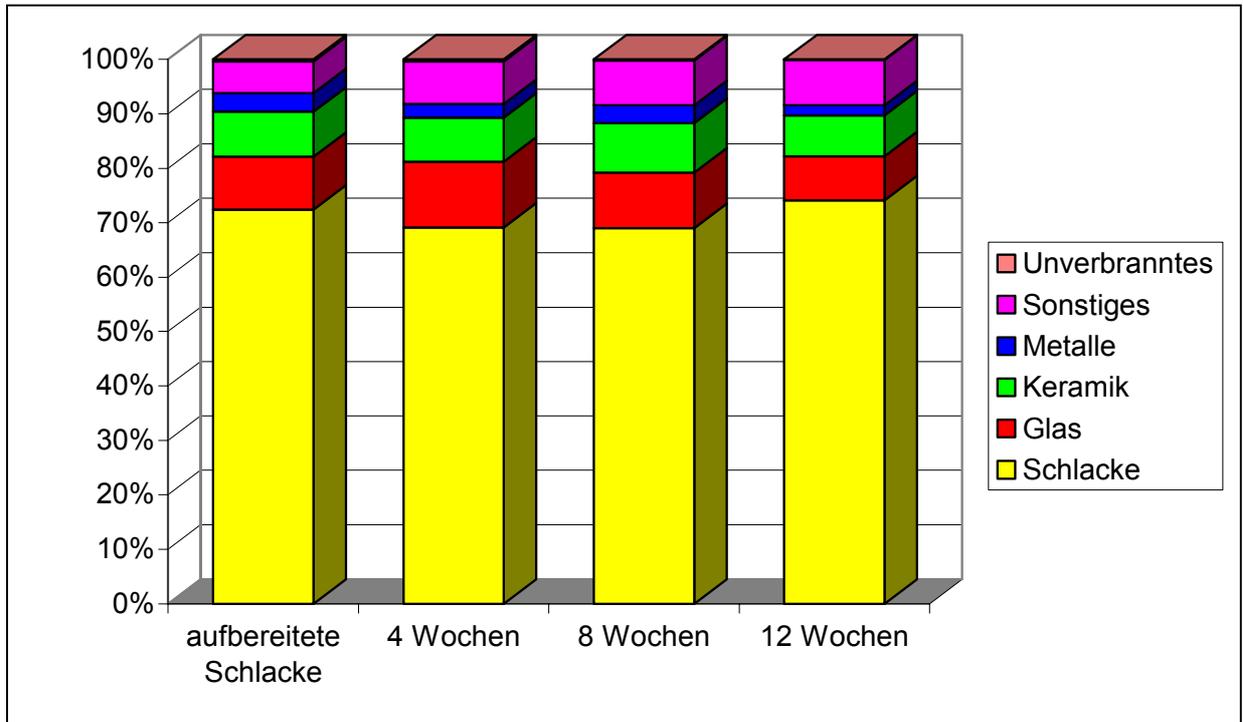


Abb. 143 Stoffliche Zusammensetzung der MV-Schlacke J

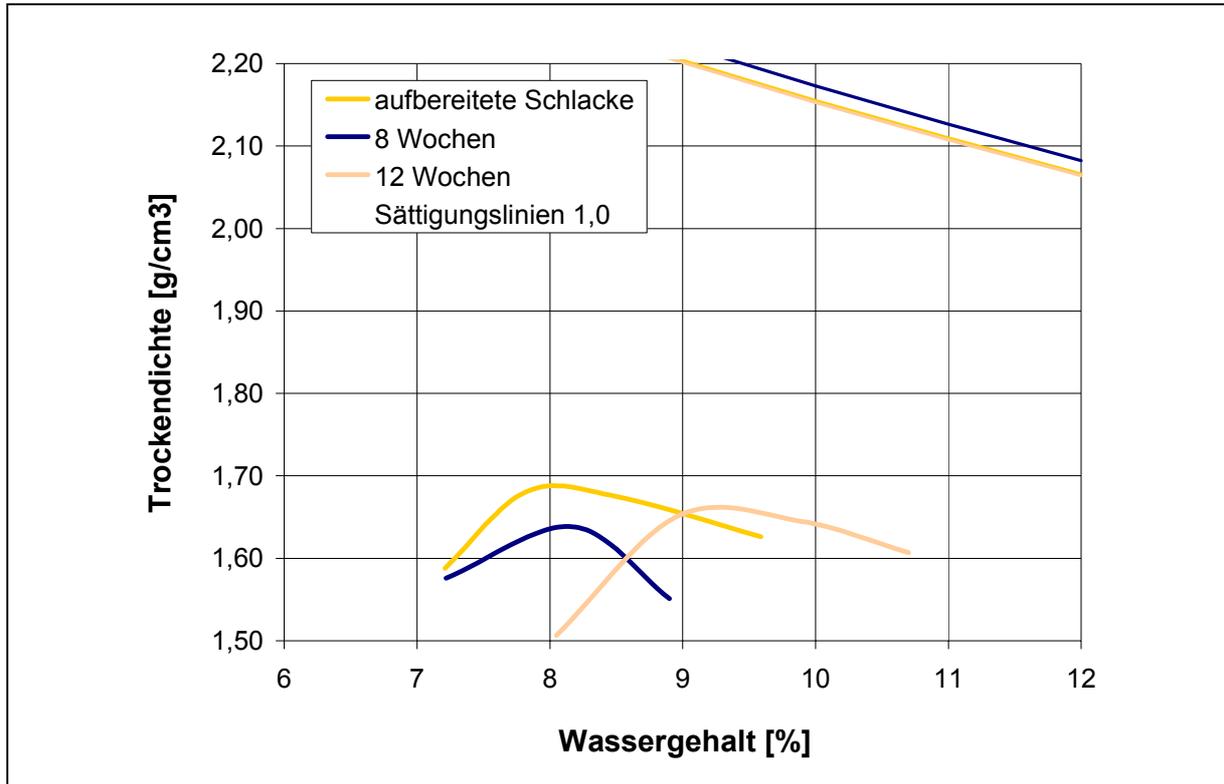


Abb. 144 Proctorkurven und optimale Wassergehalte der MV-Schlacke J

Tab. 70 Bautechnische Parameter der MV-Schlacke J

Parameter	Einheit	aufbereitete MV-Schlacke	4 Wochen	8 Wochen	12 Wochen	TL Min-StB 2000
Wassergehalt	M.-%	6,1	8,3	6,1	5,8	
Rohdichte	g/cm ³	2,747	2,712	2,776	2,744	
Schüttdichte	g/cm ³	1,307	1,299	1,299	1,273	
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Körnung 8/16 mm)	< 5 mm < 0,71 mm M.-%	2,9 2,0	n.b. n.b.	n.b. n.b.	4,1 2,4	3 (5) 2,5
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (Gesamtkörnung)	M.-%	1,8	4,0	2,3	2,4	9
Widerstand gegen Schlag (SZ 8/12)	M.-%	35,5	36,5	34,2	32,8	40
Anteil an schlecht geformten Körnern	M.-%	n.b.	n.b.	n.b.	9,6	50
Glühverlust	M.-%	0,8	1,0	1,3	1,7	5

6. BEWERTUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

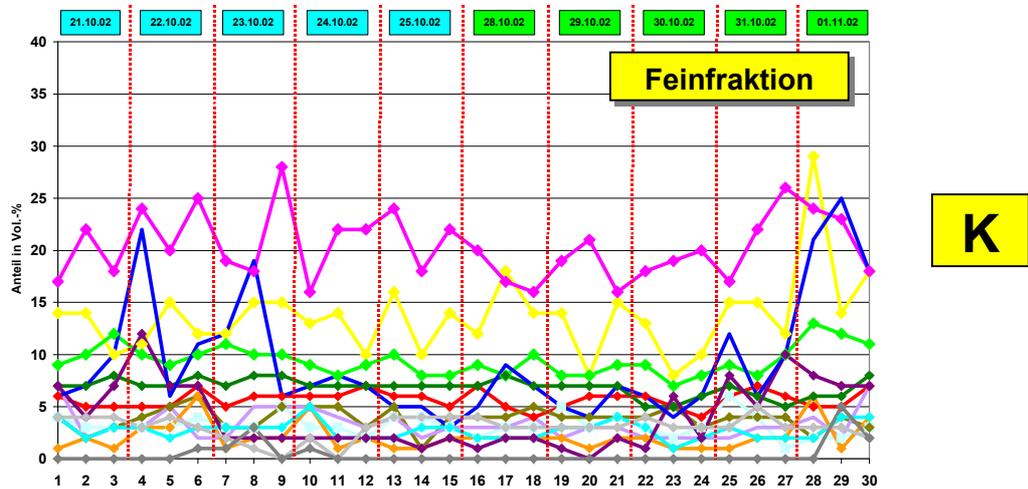
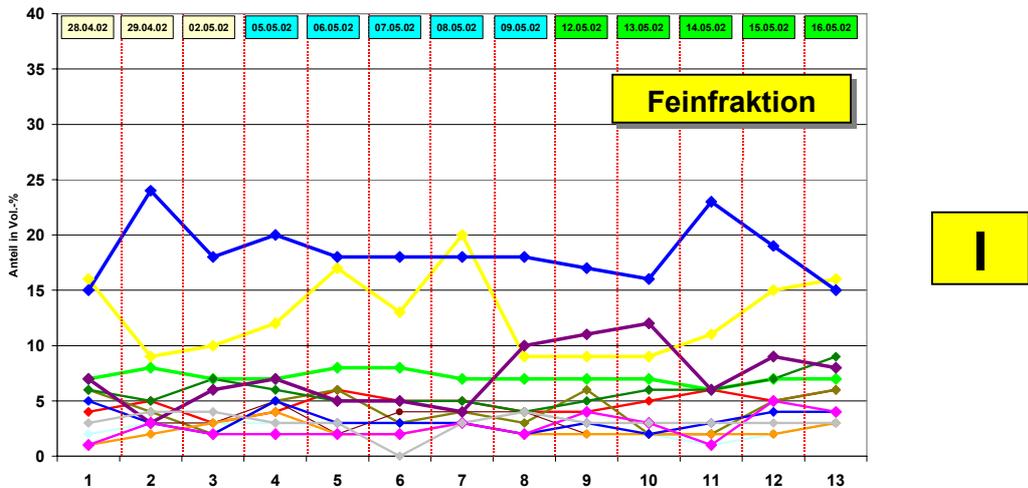
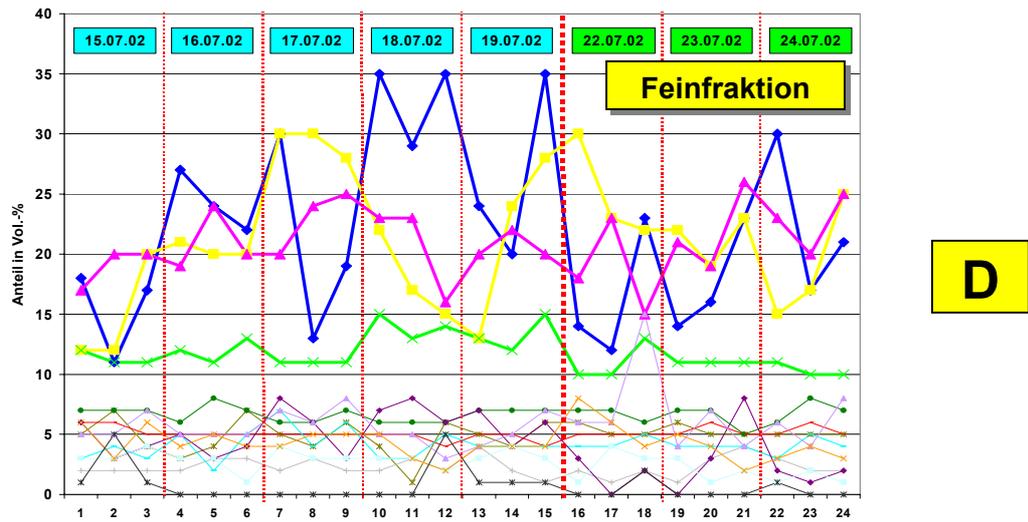
6.1 BEWERTUNG DER PERMANENTVERSUCHE

In den Müllverbrennungsanlagen D, I und K wurden während des regulären Betriebes frisch produzierte MV-Rohschlacken jeweils zwei Wochen in gleichen stündlichen Zeitabständen im Rohschlackebunker beprobt, um einen direkten Bezug zwischen Müllinput und den Schlackeeigenschaften herzustellen, wobei die kurzfristigen Schwankungsbreiten des Müllinputs auf die Schlackequalität berücksichtigt werden konnten.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen (Abb. 145-147, vgl. Kap. 5.1):

- Ein gleichbleibender Müllinput führt bei einer konstanten Fahrweise der Müllverbrennungsanlage zu einem homogenen Mineralbestand in den MV-Rohschlacken, der während des Verbrennungsprozesses neu gebildet wird (Anlagen I und K).
- Kurzzeitige Schwankungen im Müllinput spiegeln sich in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der beprobten MV-Rohschlacken wider, wobei die Änderungen im Müllinput besonders deutlich in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Feinfraktion zum Ausdruck kommen. So zeigt z.B. die MV-Schlacke D deutlich unterschiedliche Anhydritgehalte (CaSO_4), deren Zunahme zum einen durch die Mitverbrennung von sulfatreichen Industrieschlämmen und zum anderen durch eine gesteigerte Mitverbrennung von Gewerbeabfall und/oder Sperrmüll in den MV-Rohschlacken begünstigt wurde. Die gesteigerte Mitverbrennung von Gewerbeabfall und/oder Sperrmüll wird auch in den MV-Rohschlacken der Anlage I durch eine deutliche Zunahme der Anhydritgehalte festgestellt. Außerdem führt eine gesteigerte Mitverbrennung von Gewerbeabfall und/oder Sperrmüll zu einer Anreicherung des Carbonates Calcit (CaCO_3) in den MV-Rohschlacken.

In der Grobfraktion wird ein wechselnder Müllinput in erster Linie an den unterschiedlichen Gehalten der mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebrachten Relikte Quarz (SiO_2) und/oder Feldspäte (z.B. Kalifeldspat KAlSi_3O_8) festgestellt, während die Gehalte an neu gebildeten Silikaten und Oxiden nahezu gleich bleiben. Das silikatisch-oxidische Schlackengerüst der Grobfraktion entsteht im wesentlichen durch die thermische Behandlung der großen Stoffströme Hausmüll und Gewerbeabfall, die bei den Permanentversuchen in der Summe einen Anteil am Gesamtgemisch von ca. 85 bis 95 % betragen. Da auch bei unterschiedlichen Verhältnissen von Hausmüll zu Gewerbeabfall im Müllinput eine ähnliche mineralogische Phasenzusammensetzung in den MV-Rohschlacken festgestellt wird, kann von einem vergleichbaren Einfluss dieser beiden Müllfraktionen auf die entstehenden Mineralphasen in den MV-Rohschlacken ausgegangen werden.



- | | | |
|--|--|--|
| <u>Oxide:</u> | <u>Silikate:</u> | <u>Carbonate:</u> |
| Quarz SiO_2 | Gehlenit $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ | Calcit CaCO_3 |
| Hämatit $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ | Äkermanit $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ | |
| Magnetit Fe_3O_4 | Kalifeldspat KAlSi_3O_8 | <u>Hydroxide:</u> |
| | Plagioklas $(\text{Na,Ca})[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$ | Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ |
| <u>Sulfate:</u> | Diopsid $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ | |
| Anhydrit CaSO_4 | | <u>Phosphate:</u> |
| Ettringit $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{x}24\text{H}_2\text{O}$ | | Apatit $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ |

Abb. 145 Vergleich der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Feinfraktionen

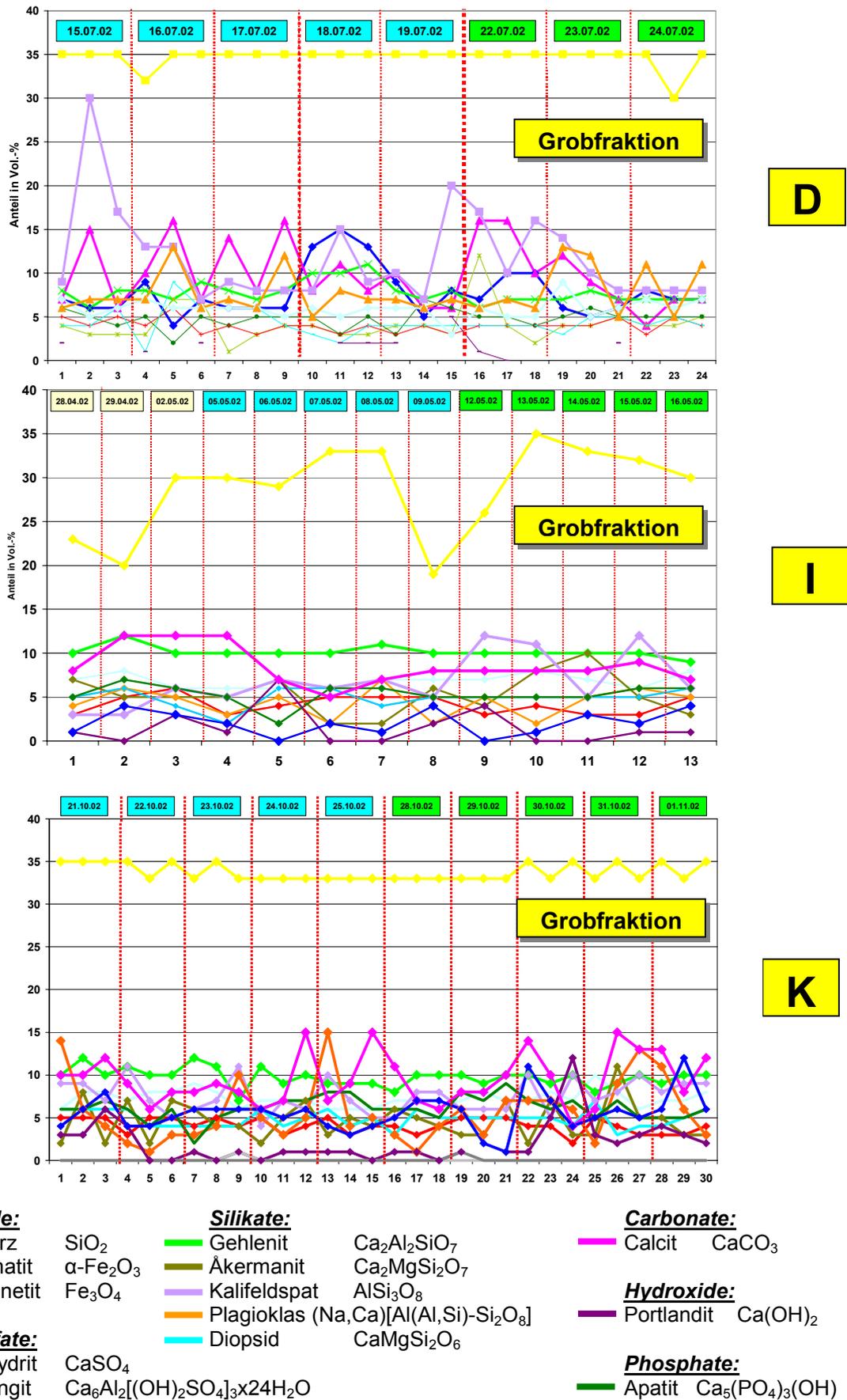


Abb. 146 Vergleich der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Grobfraktionen

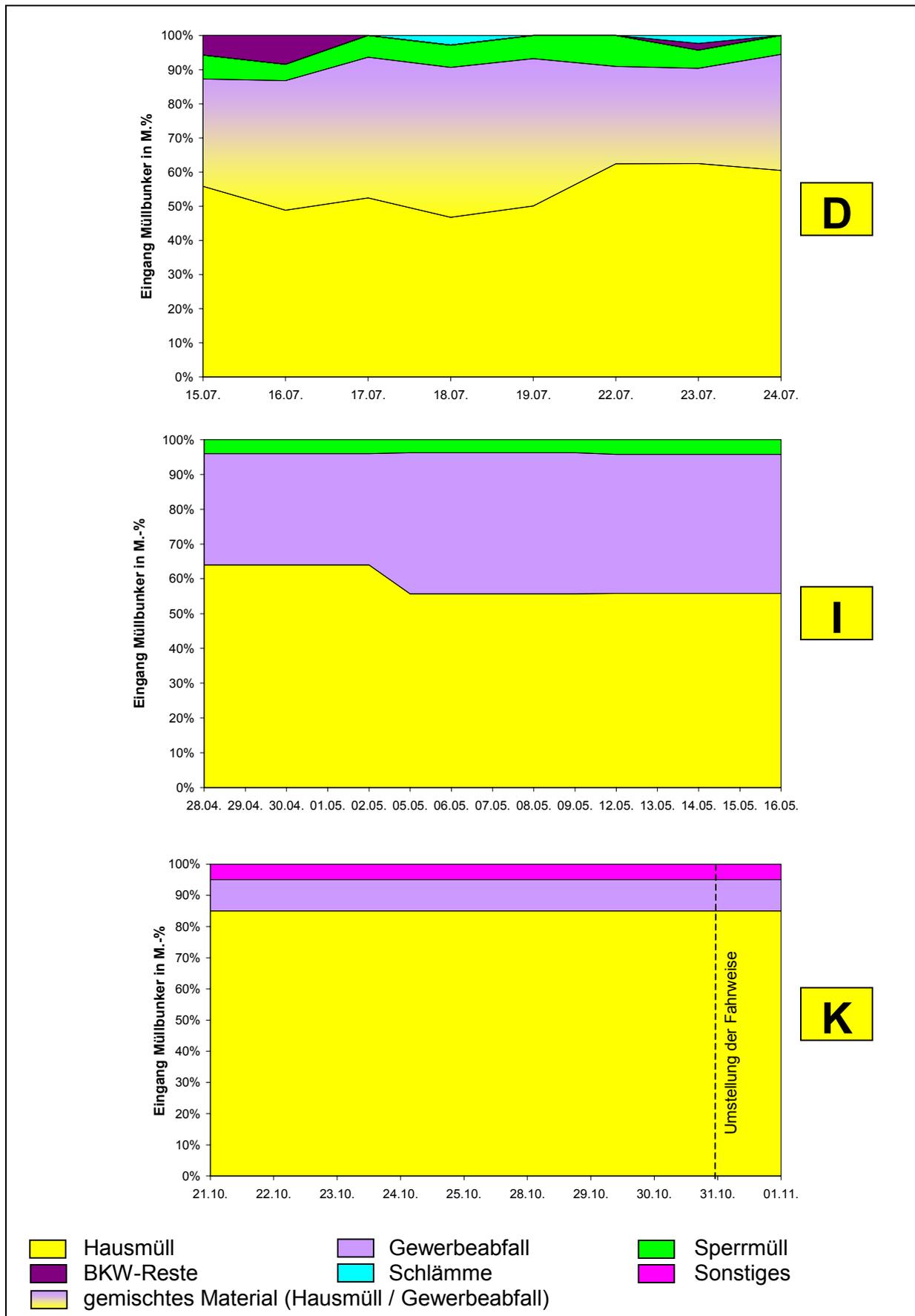


Abb. 147 Vergleich der Müllfraktionen während der Permanentversuche D-2, I und K

6.2 BEWERTUNG DER GROSSVERSUCHE

6.2.1 Mineralogie

6.2.1.1 Mineralogie der MV-Rohschlacken und Müllinput

In der Feinfraktion werden im allgemeinen die Sulfate, die in Abhängigkeit der jeweiligen Hydratationsstufe die Raumbeständigkeit mit beeinflussen sowie die Chloride, die in erster Linie die Salzfrachten steuern und die Carbonatphase Calcit (CaCO_3), die auf die Schlackebestandteile verfestigend wirkt und in deren Kristallgitter einige Schwermetalle, wie z.B. Blei und Zink fest eingebunden werden können, verstärkt angereichert.

In der Grobfraktion dagegen werden vorwiegend die stabilen Silikate und Oxide, die für die Stabilität und damit für die mechanischen Eigenschaften einer MV-Schlacke verantwortlich sind, angetroffen, wobei in erster Linie die Neubildung der Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Åkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) sowie der Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) eine bedeutende Rolle spielen. Daneben treten in der Grobfraktion der MV-Rohschlacken auch die sog. Durchläuferminerale wie z.B. Quarz (SiO_2), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) auf, die zum Teil als Relikte aus den aufgegebenen Müllfraktionen bei der Bildung der MV-Rohschlacken in die Schlackestruktur mit eingebaut werden.

Die Anteile der in den MV-Rohschlacken während des Verbrennungsprozesses neu gebildeten Glasphasen erlauben zusammen mit dem auftretenden Mineralspektrum sowie insbesondere mit den mengenmäßigen Anteilen des Sulfates Anhydrit (CaSO_4) eine Abschätzung der Gutbett-Temperatur bei der Schlackenbildung, wobei hohe Glasanteile und geringe Anhydritgehalte Temperaturen $> 1.000^\circ\text{C}$ anzeigen [33].

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der untersuchten MV-Rohschlacken sowie der jeweilige Müllinput, der während der Großversuche thermisch behandelt wurde, geht aus Abb. 148 und 149 hervor (vgl. Kap. 5.2).

Feinfraktion

- **Vergleich der Untersuchungsergebnisse der Mehrfachversuche in den Müllverbrennungsanlagen A, B und D**

In der **Müllverbrennungsanlage A** wurden 3 Großversuche mit vergleichbarem Müllinput durchgeführt, wobei während der Versuche A-1 und A-2 zusätzlich ca. 5 % Tiermehl thermisch behandelt wurden. Die MV-Rohschlacken A-1 und A-3 stammen aus einem Kessel mit Vorschubrost und Mittelstromfeuerung, die MV-Rohschlacke A-2 aus einem Kessel mit Vorschubrost und Gleichstromfeuerung. Ein Vergleich der mineralogischen Phasenzusammensetzung mit dem Müllinput zeigt, dass die MV-Rohschlacken A-1 und A-3 eine ähnliche mineralogische Phasenzusammensetzung aufweisen und somit kein Einfluss der zusätzlichen Mitverbrennung von ca. 5 % Tiermehl bei dem Versuch A-1 auf die Bildung der MV-Rohschlacken festgestellt werden kann, während die mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacke A-2 durch die höheren Glasanteile und niedrigeren Anhydritgehalte sowohl die zusätzliche Mitverbrennung von Tiermehl als auch die für den Müllkessel mit Vorschubrost und Gleichstromfeuerung aus früheren Untersuchungen bekannten höheren Verbrennungstemperaturen [8] erkennen lässt.

In der **Müllverbrennungsanlage B** wurden 2 Großversuche mit nahezu gleichem Müllinput bei gleicher Verfahrenstechnik (Walzenrost und Gleichstromfeuerung) durchgeführt. Ein Vergleich der mineralogischen Untersuchungsergebnisse zeigt, dass nach der thermischen Behandlung nahezu identische MV-Rohschlacken entstanden sind.

In der **Müllverbrennungsanlage D** wurden 3 Großversuche mit vergleichbarem Müllinput bei gleicher Verfahrenstechnik (Walzenrost und Gleichstromfeuerung) durchgeführt. Lediglich bei dem Versuch D-1 wurde zusätzlich ca. 4 % Tiermehl mitverbrannt. Die MV-Rohschlacken D-2 und D-3 zeigen eine nahezu identische mineralogische Phasenzusammensetzung, während die MV-Rohschlacke D-1 vergleichsweise niedrige Anhydritgehalte (CaSO_4) und hohe Calcitgehalte (CaCO_3) aufweist.

- **Vergleich der Untersuchungsergebnisse der Großversuche in den Müllverbrennungsanlagen A, B, C, D, E, F, G, H, I und J**

Ein Vergleich der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der untersuchten MV-Rohschlacken mit dem Müllinput, der während der Großversuche thermisch behandelt wurde, zeigt unter Berücksichtigung ausgewählter verfahrenstechnischer Parameter der einzelnen Müllverbrennungsanlagen:

Die **MV-Rohschlacken A-1, A-3, C, E und F** zeigen eine vergleichbare mineralogische Phasenzusammensetzung mit sehr geringen Glasanteilen, die auf relativ niedrige Gutbett-Temperaturen (ca. 900 bis ca. 950°C) bei der Entstehung der betrachteten MV-Rohschlacken schließen lassen. In den Müllverbrennungsanlagen A und C wurden zwischen 80 und 90 % Hausmüll sowie Gewerbeabfall und sonstiges Material thermisch behandelt. Während des Großversuches A-1 wurden außerdem noch zusätzliche geringe Mengen an Tiermehl mitverbrannt, die jedoch, neben den im Vergleich zu der MV-Rohschlacke A-3 geringeren Anhydritgehalten, keinen deutlichen Einfluss auf die mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken ausüben. Die Müllverbrennungsanlagen E und F behandeln neben Hausmüll größere Mengen an Gewerbemüll (> 30 %) sowie zwischen 8 und 15 % Sperrmüll. Auch diese Müllfraktion zeigt in der zugegebenen Menge keine nennenswerte Auswirkung auf die mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken. Mit Ausnahme der Anlage E, die mit einem Rückschubrost und einem Natur-Umlauf-Dampferzeuger ausgestattet ist, verfügen die Müllverbrennungsanlagen A, C und F über einen Vorschubrost mit Mittelstromfeuerung.

Die **MV-Rohschlacken B-1, B-2, D-2 und D-3** zeigen ebenfalls eine ähnliche mineralogische Phasenzusammensetzung, wobei die Anteile der neugebildeten Glasphasen deutlich über den Anteilen der MV-Rohschlacken aus den Müllverbrennungsanlagen A, C, E und F liegen. Auch werden in den MV-Rohschlacken B-1, B-2, D-2 und D-3 überwiegend deutlich geringere Anhydritgehalte festgestellt und es können Gutbett-Temperaturen von ca. 950 bis 1.000°C abgeschätzt werden. Während in der Anlage B fast ausschließlich Hausmüll mit geringen Anteilen an Gewerbeabfall thermisch behandelt wurde, wurde während der Versuche 2 und 3 in der Müllverbrennungsanlage D bis zu 10 % Sperrmüll und sonstiges Material mitverbrannt. Beide Müllverbrennungsanlagen sind mit einem Walzenrost mit Gleichstromfeuerung ausgestattet.

Auch die **MV-Rohschlacken A-2, G und J** zeigen eine vergleichbare mineralogische Phasenzusammensetzung und unterscheiden sich von den o.g. MV-Rohschlacken durch die Anteile der neugebildeten Glasphasen, die zwischen den Anteilen der MV-Rohschlacken A-1, A-3, C, E und F und B-1, B-2, D-2 und D-3 liegen und daher auf Gutbett-Temperaturen von ca. 950°C schließen lassen. Während der Müllinput bei den Versuchen A-2 und G nahezu identisch war und neben Hausmüll und Gewerbeabfall zusätzlich geringe Mengen Tiermehl mitverbrannt wurden, wurde in der Müllverbrennungsanlage J neben Hausmüll bis zu

20 % Sperrmüll thermisch behandelt. Alle drei Anlagen verfügen über einen Vorschubrost, wobei die Anlagen G und J mit einer Mittelstromfeuerung und die Anlage A mit einer Gleichstromfeuerung ausgestattet sind.

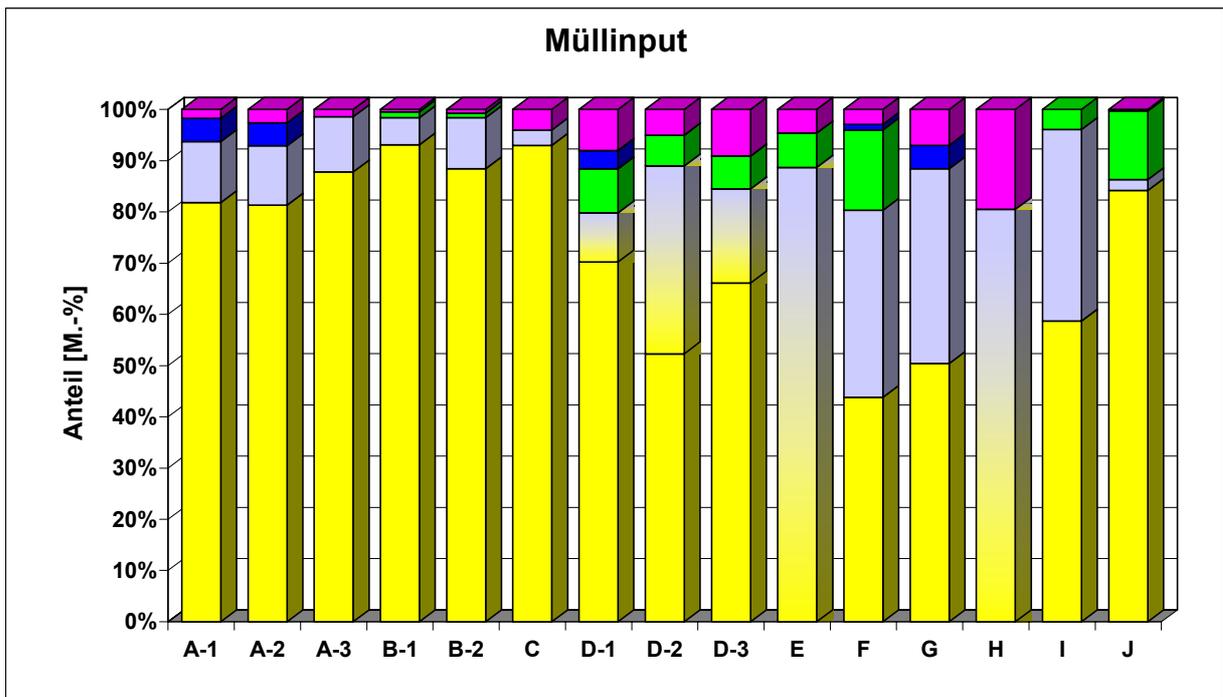
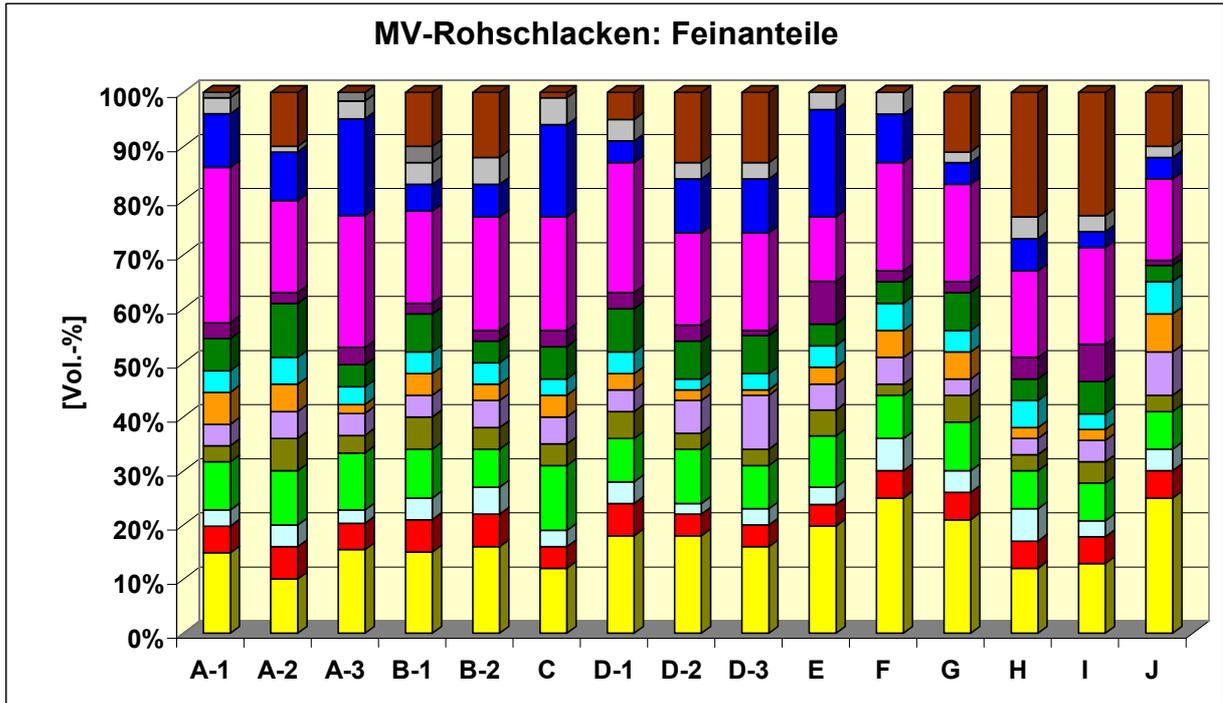
Die **MV-Rohschlacken H und I** zeigen ebenfalls ein nahezu identisches Mineralspektrum und weisen die höchsten neugebildeten Glasanteile sowie die niedrigsten Anhydritgehalte auf. Daher können die Gutbett-Temperaturen auf $> 1.000^{\circ}\text{C}$ geschätzt werden. Obwohl kaum Unterschiede im Mineralbestand der MV-Rohschlacken H und I festgestellt werden können, wurden in beiden Anlagen deutlich unterschiedliche Müllfraktionen thermisch behandelt. Die Anlage H ist mit einem Gegenlauf-Überschubrost mit Gegenstromfeuerung, die Anlage I mit einem Vorschubrost mit Mittelstromfeuerung ausgestattet.

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der **MV-Rohschlacke D-1** kann nicht einer anderen untersuchten MV-Rohschlacke zugeordnet werden. Aufgrund ihrer Glasanteile und Anhydritgehalte werden die Gutbett-Temperaturen auf ca. 930°C geschätzt. Neben Hausmüll und gemischten Abfällen wurden während des Versuchablaufes zusätzlich deutliche Mengen an Sperrmüll und sonstigem Material sowie geringe Mengen an Tiermehl mitverbrannt. Die Anlage D arbeitet mit einem Walzenrost mit Gegenstromfeuerung.

Grobfraktion

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion der untersuchten MV-Rohschlacken zeigt sehr deutlich, dass die während der Verbrennung neu gebildeten Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) sowie die Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) nur geringe Schwankungsbreiten aufweisen, während die Mineralphasen Quarz (SiO_2), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) deutlich größeren Schwankungen unterworfen sind. Diese Mineralphasen werden zum Teil mit den unterschiedlichen Müllfraktionen in den Verbrennungsraum eingebracht und als feste Bestandteile in die Schlackestruktur eingebaut und daher als typische Durchläuferminerale bezeichnet. Ebenfalls treten größere Unterschiede bei den Glasanteilen auf, die in der Grobfraktion der MV-Rohschlacken sowohl als neu gebildete Glasphasen als auch als Relikte von Bruchgläsern identifiziert werden. Bei den unterschiedlichen Anhydrit (CaSO_4)- und Calcit (CaCO_3)-gehalten handelt es sich hauptsächlich um Mineralphasen der Feinfraktion, die in die Poren der Schlackeanteile mit eingebaut wurden.

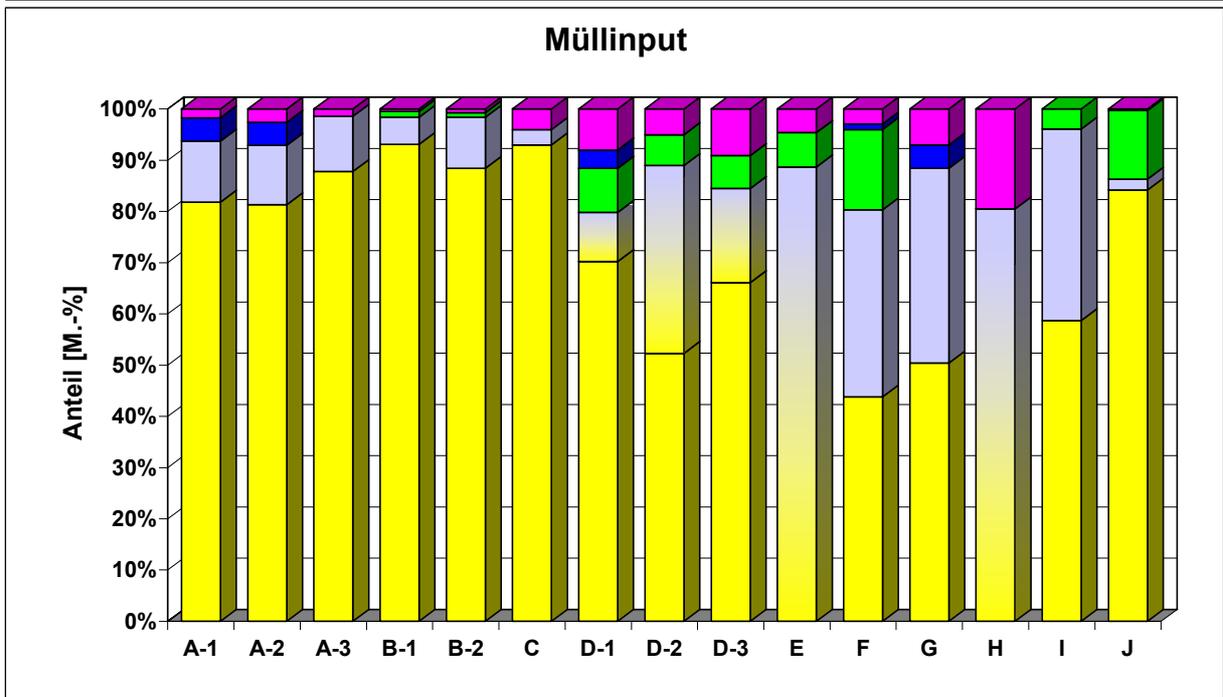
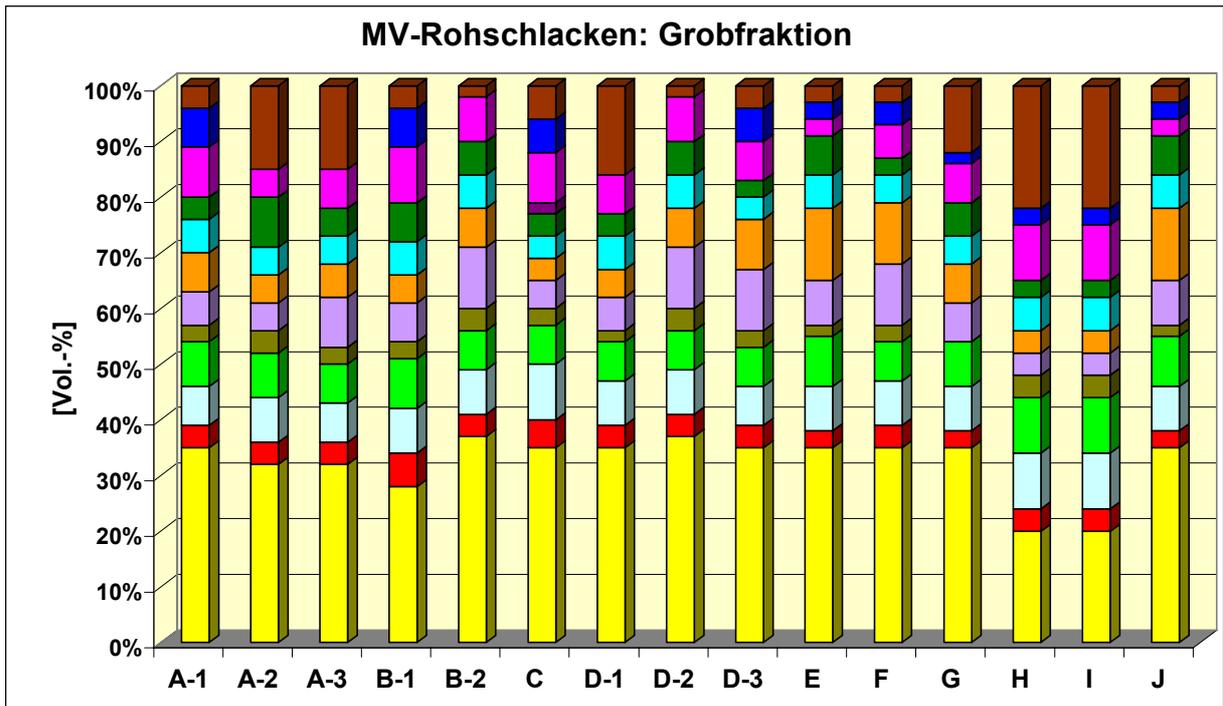
Damit bestätigen die Untersuchungsergebnisse die Resultate der Permanentversuche, wobei die mineralogische Phasenzusammensetzung der Grobfraktion in den untersuchten MV-Rohschlacken sehr ähnlich ist und in erster Linie von den großen Stoffströmen Hausmüll und Gewerbeabfall gesteuert wird, deren unterschiedliche Mengen im Müllinput keine wesentlichen Änderungen im Mineralspektrum der MV-Rohschlacken nach sich ziehen.



- | | | | |
|--|---|--|---|
| ■ Quarz | SiO_2 | ■ Apatit | $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ |
| ■ Hämatit | $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ | ■ Calcit | CaCO_3 |
| ■ Magnetit | Fe_3O_4 | ■ Portlandit | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ |
| ■ Gehlenit | $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ | ■ Anhydrit | CaSO_4 |
| ■ Äkermanit | $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ | ■ Gips | $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| ■ Kalifeldspat | KAlSi_3O_8 | ■ Ettringit | $\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ |
| ■ Plagioklas | $(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$ | ■ neu gebildete Glasphase | |
| ■ Diopsid | $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ | | |

- | | | |
|--|--|--|
| ■ Hausmüll | ■ Gewerbeabfall | ■ Gemischte Abfälle (Haus-/Gewerbeabfall) |
| ■ Sperrmüll | ■ Tiermehl | ■ Sonstiges (nicht näher definierbar) |

Abb. 148: Vergleich Mineralogie der Feinfraktion der MV-Rohschlacken und Müllinput



- | | | | |
|--|---|--|---|
| ■ Quarz | SiO_2 | ■ Apatit | $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ |
| ■ Hämatit | $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ | ■ Calcit | CaCO_3 |
| ■ Magnetit | Fe_3O_4 | ■ Portlandit | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ |
| ■ Gehlenit | $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ | ■ Anhydrit | CaSO_4 |
| ■ Äkermanit | $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ | ■ Gips | $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| ■ Kalifeldspat | KAlSi_3O_8 | ■ Ettringit | $\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ |
| ■ Plagioklas | $(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$ | ■ neu gebildete Glasphase | |
| ■ Diopsid | $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ | | |

- | | | |
|--|--|---|
| ■ Hausmüll | ■ Gewerbeabfall | ■ Gemischte Abfälle (Haus-/Gewerbeabfall) |
| ■ Sperrmüll | ■ Tiermehl | ■ Sonstiges (nicht näher definierbar) |

Abb. 149: Vergleich Mineralogie der Grobfraktion der MV-Rohschlacken und Müllinput

6.2.1.2 Alterationsverhalten und Raumbeständigkeit der MV-Schlacken

Bei der Ablagerung von MV-Schlacken spielen vor allem die Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen eine bedeutende Rolle, wobei vor allem die Carbonate und Sulfate im Mineralbestand der MV-Schlacken für das Alterationsverhalten und die Raumbeständigkeit verantwortlich sind, da während der Alteration Mineralneu- und Mineralumbildungen stattfinden, die im Bereich der Sulfate mit Volumenveränderungen verbunden sein können, die sich auf die Raumbeständigkeit der MV-Schlacken negativ auswirken. Da diese MV-Schlacken aufgrund ihrer unzureichenden Volumenkonstanz nur bedingt für bautechnische Zwecke eingesetzt werden können, müssen während der Ablagerung reaktionsträge MV-Schlacken hergestellt werden, die in der Bauwirtschaft uneingeschränkt eingesetzt werden können.

Bei einer optimalen Carbonatisierung der MV-Schlacken wird während der Ablagerungszeit eine deutliche Abnahme des Portlandits (Ca(OH)_2), verbunden mit einer Zunahme des Calcits (CaCO_3) festgestellt und die abgelagerten MV-Schlacken zeigen im Vergleich zu den MV-Rohschlacken meist einen deutlich höheren Carbonatanteil, der an den Intensitäten des Minerals Calcit (CaCO_3) im Röntgendiffraktogramm abgelesen werden kann. Neben einer Erhöhung der mechanischen Stabilität führt eine gesteigerte Carbonatisierung zu einem verstärkten Einbau und zu einer Fixierung von bestimmten Schwermetallen (z.B. Blei und Zink) im Kristallgitter des Carbonates Calcit (CaCO_3) [7,8]. Außerdem werden über die Carbonatisierungsreaktionen in hohem Maße die pH-Werte des umgebenden Milieus gesteuert.

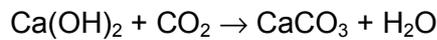
Bei einer optimalen Ablagerung der MV-Schlacken wird gleichzeitig neben einer guten Carbonatisierung eine Abnahme des wasserfreien Calciumsulfates Anhydrit (CaSO_4) durch Lösung oder zugunsten einer Bildung wasserhaltiger Calciumsulfatphasen, wie z.B. Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), festgestellt. Außerdem kann durch die Reaktion sulfathaltiger Porenwässer mit einer Calciumaluminatphase primärer Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) entstehen. Geringe Anhydritgehalte bzw. das Fehlen dieser Calciumsulfatphase sprechen für einen weit fortgeschrittenen Alterungsprozess und damit für eine reaktionsträge MV-Schlacke, die eine, aus mineralogischer Sicht, gute Raumbeständigkeit aufweist.

Sind die beschriebenen Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen noch nicht ausreichend abgeschlossen, liegt eine noch reaktionsfreudige MV-Schlacke vor, und es kann bei einem zu frühen bautechnischen Einsatz der MV-Schlacken, der oft mit einer zusätzlichen Wasserzugabe verbunden ist, zu Treiberscheinungen kommen, die das Bauwerk schädigen können. Sind die beschriebenen Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen jedoch abgeschlossen, kann von einer reaktionsträgen MV-Schlacke ausgegangen werden, bei der im weiteren Verlauf der Ablagerung oder während eines bautechnischen Einsatzes keine weiteren Mineralreaktionen zu erwarten sind, die die Raumbeständigkeit negativ beeinflussen.

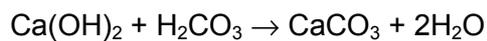
Das Alterationsverhalten und die Raumbeständigkeit der MV-Schlacken werden auf der einen Seite von der mineralogischen Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken bestimmt, deren Ausgangspotential an reaktionsfähigen Mineralphasen sowohl auf den unterschiedlichen Müllinput als auch auf die unterschiedliche Verfahrenstechnik bei der Rostfeuerung (Feuerraumgestaltung, Rostsystem, Gutbett-Temperatur, Nassentschlackensystem) zurückgeführt werden kann. Auf der anderen Seite spielen jedoch auch die Aufbereitungstechnik (Korngrößenverteilung, Abtrennung von FE- und NE-Metallen), die Art der Ablagerung (Freiland, Halle, Größe und Form der Mieten) und die Ablagerungszeit der MV-Schlacken eine bedeutende Rolle, wobei der Wassergehalt der Halden, die Möglichkeit der Zufuhr von Luft- CO_2 und der pH-Wert der Porenwässer die Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen direkt steuern und damit im besonderen Maße die Qualität der bautechnisch verwertbaren MV-Schlacken zu einem bestimmten Ablagerungszeitpunkt beeinflussen.

Demnach stellen der Wasserhaushalt innerhalb der MV-Schlackenhalde und das Luft-CO₂ entscheidende Parameter für das Alterationsverhalten der MV-Schlacken und damit für eine optimale MV-Schlackenalterung dar.

Die Carbonatisierungsreaktion, bei der als Endprodukt Calcit (CaCO₃) entsteht, kann in vereinfachter Form folgendermaßen formuliert werden [31]:



Dieser Vorgang kann jedoch nur ablaufen, wenn Feuchtigkeit vorhanden ist, die zur Bildung geringer Spuren von Kohlensäure führt, so dass die Reaktion genauer wie folgt formuliert werden muss:



Die Carbonatisierungsreaktionen benötigen zwar für ihren Verlauf Wasser, wird jedoch zu viel Wasser und zu wenig Luft-CO₂ (Luft enthält im Mittel nur 0,03 Vol.-% CO₂ [31]) angeboten, kann die Reaktion nicht vollständig ablaufen.

Werden während der Alteration der MV-Schlacken durch einen Wasserüberschuss Calciumionen in den Porenwässern freigesetzt, kann es bei Anwesenheit von Sulfat zu einer Neubildung von Anhydrit (CaSO₄) kommen, die die Alterationsreaktionen so stark verzögert, dass Ablagerungszeiten der MV-Schlacken von über drei Monaten erforderlich werden, um eine reaktionsträge, d.h. eine raumbeständige MV-Schlacke, herzustellen.

Das unterschiedliche Alterationsverhalten der untersuchten MV-Schlacken kann nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten wie folgt bewertet werden (Abb. 150-A bis 150-C):

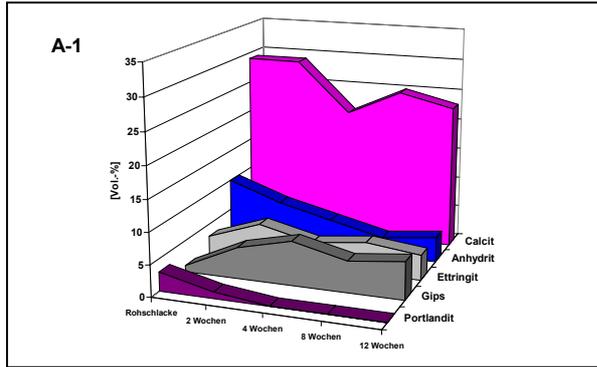
- Die Mehrfachversuche in den Müllverbrennungsanlagen A, B und D, die mit unterschiedlicher Müllzusammensetzung bei gleicher Verfahrenstechnik gefahren wurden, zeigen, dass die Qualität der MV-Rohschlacken innerhalb gewisser Bandbreiten immer Schwankungen unterworfen ist (MV-Schlacken A-1, A-2, A-3, B-1, B-2, D-1, D-2, D-3), die auf das Anfangspotential der alterationswirksamen Mineralphasen zurückgeführt werden können, die, neben dem Müllinput, besonders von den Verbrennungsbedingungen auf dem Rost und den Reaktionen im Nassentschlacker beeinflusst werden. Daneben zeigen die Mehrfachversuche jedoch auch sehr deutlich, dass der Aufbereitungstechnik der MV-Schlacken eine besondere Bedeutung zukommt, da während der Aufbereitung und Ablagerung der MV-Schlacken Homogenisierungseffekte innerhalb der MV-Schlackenhalde festgestellt werden, die nach einer bestimmten Ablagerungszeit vergleichbare Eigenschaften der unterschiedlichen MV-Rohschlacken erzeugen. Demnach können mit Hilfe einer optimierten Aufbereitungstechnik MV-Schlacken gleichbleibender Qualität dauerhaft hergestellt werden, da eine Optimierung des Verhältnisses von Luft-CO₂ : Wasser den Carbonatisierungsprozess und damit auch die für die Beurteilung der Raumbeständigkeit notwendigen Mineralreaktionen unter Berücksichtigung der jeweiligen spezifischen Randbedingungen gezielt steuern kann.
- Die Einzelversuche zeigen, dass die MV-Schlacken unterschiedliche Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen aufweisen, sodass nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten sowohl reaktionsträge (aus mineralogischer Sicht raumbeständige) als auch reaktive (aus mineralogischer Sicht nicht raumbeständige) MV-Schlacken vorliegen. Das Alterationsverhalten geht auf die unterschiedlichen Ausgangsgehalte der alterationswirksamen Mineralphasen Portlandit (Ca(OH)₂) und Anhydrit (CaSO₄) in den MV-Rohschlacken sowie auf die Bildungsraten von Calcit (CaCO₃), Ettringit (Ca₆Al₂[(OH)₂SO₄]₃·24H₂O) und Gips (CaSO₄·2H₂O) während der Ablagerungszeit der MV-Schlacken zurück, wobei die Art der Aufbereitung und Ablagerung der MV-Schlacken auf die Alterationsreaktionen einen wesentlichen Einfluss ausüben.

- Das unterschiedliche Carbonatisierungsverhalten während einer Ablagerungszeit von drei Monaten wird besonders an den verschiedenen Verläufen der Calcitbildung (CaCO_3) deutlich, wobei die MV-Schlacken A-2, B-1, B-2, D-1, D-2, D-3 und J ein gutes, die MV-Schlacken C, G, H und I ein verzögertes und die MV-Schlacken A-1, A-3, E und F ein mangelndes Carbonatisierungsverhalten aufweisen.

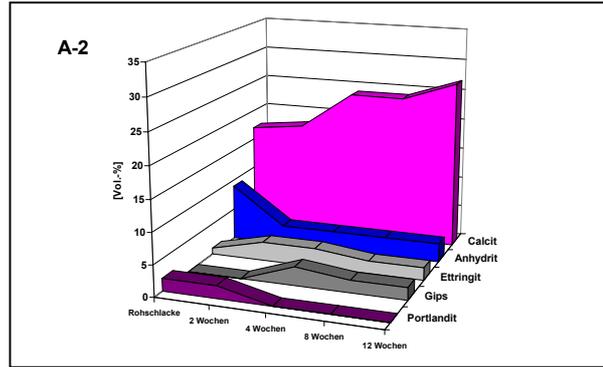
Das Carbonatisierungsverhalten der MV-Schlacken wird vor allem von der angebotenen Menge an Luft- CO_2 , dem Wassergehalt und der Durchlüftungsmöglichkeit der MV-Schlackenhalde beeinflusst.

- MV-Schlacken, die in Hallen abgelagert werden, zeigen tendenziell niedrigere Calcitgehalte (MV-Schlacken E, G, J), da die Zufuhr von Luft- CO_2 in den Halde oft aus Platzmangel nicht wie im Freiland gegeben ist. Die bei einer Hallenablagung teilweise praktizierte Haldebewässerung sollte nicht dauerhaft erfolgen, da zu hohe Wassergehalte während der Ablagerung der MV-Schlacken ungünstige Luft/Wasser-Verhältnisse nach sich ziehen, die die Alterationsreaktionen rapide verzögern. Daher kann eine permanente Bewässerung der MV-Schlacken in Hallen nicht empfohlen werden.
- MV-Schlacken, die im Freiland abgelagert werden, zeigen dagegen eine deutlich stärkere Calcitproduktion (MV-Schlacken A, B, C), da die Voraussetzungen für eine Luftzirkulation deutlich besser sind. Aufgrund der größeren Menge an Luft- CO_2 , die für die Bildung von Calcit (CaCO_3) zur Verfügung steht, wird auch bei höheren Wassergehalten der MV-Schlackenhalde, z.B. nach längeren Regenereignissen, ein gutes Carbonatisierungsverhalten festgestellt. Ein Umlagern der MV-Schlacken, wie es z.B. transportbedingt bei der MV-Schlacke D erfolgte, führt ebenfalls zu einem guten Carbonatisierungsverhalten.
- Als weiteres Kriterium für die Charakterisierung des Alterationsverhaltens wird die Reaktivität der MV-Schlacken nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten herangezogen, die vor allem von den Sulfatreaktionen gesteuert wird. Hier zeigen die MV-Schlacken A-1, A-2, A-3, B-1, B-2, C, D-1, G, H, I und J ein reaktionsträges Verhalten während lediglich die MV-Schlacken D-2, D-3, E und F als reaktiv eingestuft werden müssen. In diesen reaktiven MV-Schlacken muss noch mit weiteren Mineralreaktionen gerechnet werden, die mit Volumenänderungen verbunden sind.

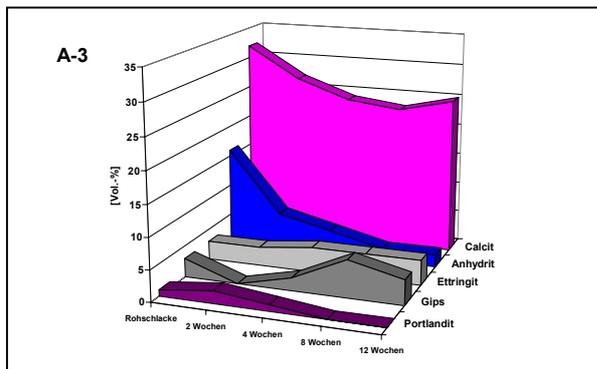
Die Reaktivität, und damit das Maß für die Beurteilung der Raumbeständigkeit, wird besonders von den Anhydritgehalten (CaSO_4) in den MV-Rohschlacken gesteuert. Daneben spielt die Geschwindigkeit, mit der die Auflösung bzw. die Umwandlung des Anhydrits in sekundäre Sulfatphasen abläuft, eine bedeutende Rolle, wobei besonders die gegenseitige Beeinflussung der Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen deutlich wird, da ein gutes Carbonatisierungsvermögen häufig mit einem kontinuierlichen Sulfatabbau verbunden ist (z.B. MV-Schlacken B-1, B-2, D-1, J). Hohe Anhydritgehalte in den MV-Rohschlacken können jedoch die Geschwindigkeit der Carbonatisierungsreaktionen (z.B. MV-Schlacken A-1, A-3, C) und den Anhydritabbau (z.B. MV-Schlacken E, F) verzögern.



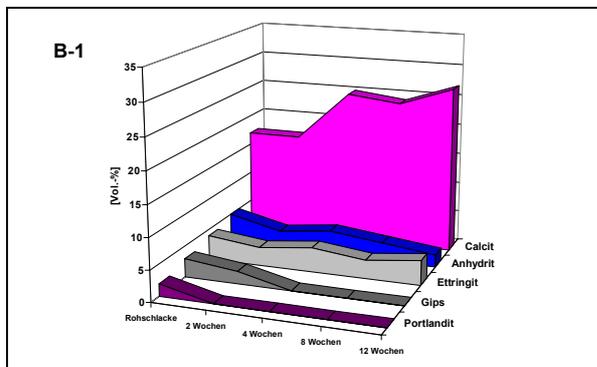
- mangelndes Carbonatisierungsverhalten
- reaktionsträge nach drei Monaten



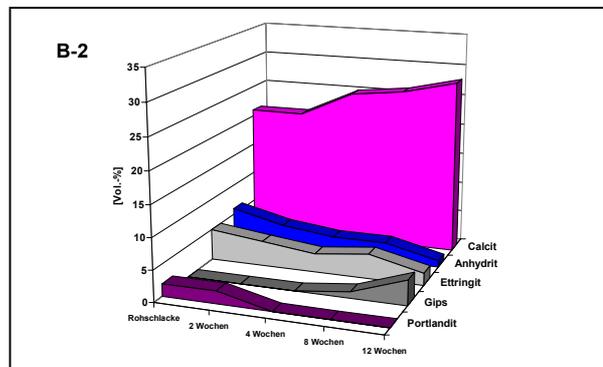
- gutes Carbonatisierungsverhalten
- reaktionsträge nach drei Monaten



- mangelhaftes Carbonatisierungsverhalten
- reaktionsträge nach drei Monaten



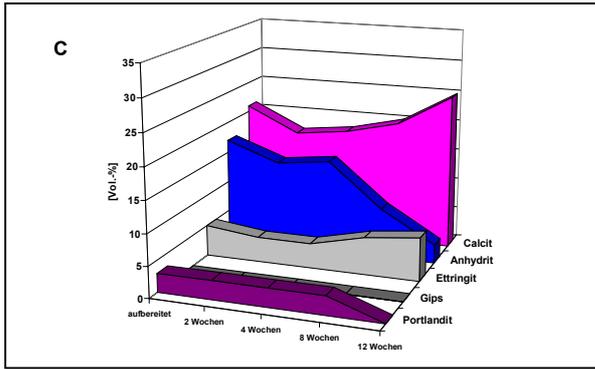
- gutes Carbonatisierungsverhalten
- reaktionsträge nach drei Monaten



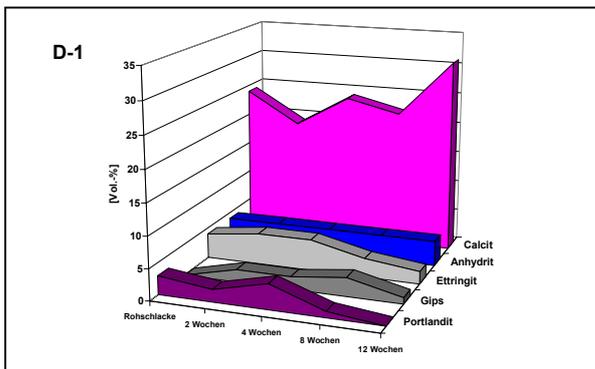
- gutes Carbonatisierungsverhalten
- reaktionsträge nach drei Monaten

 Calcit	CaCO_3
 Anhydrit	CaSO_4
 Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
 Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
 Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$

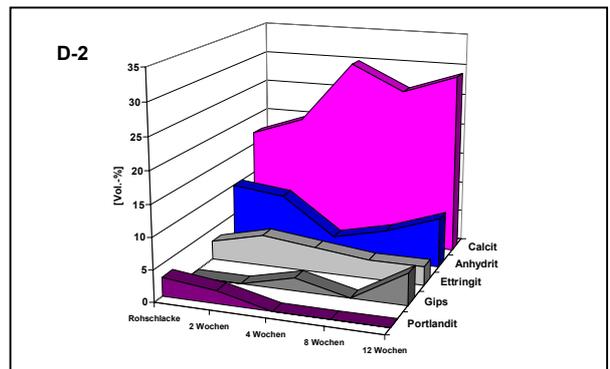
Abb. 150-A Alterationsverhalten der untersuchten MV-Schlacken A und B



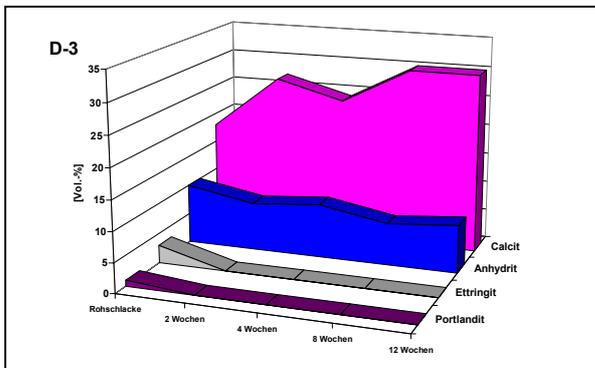
- verzögertes Carbonatisierungsverhalten
- reaktionsträge nach drei Monaten



- gutes Carbonatisierungsverhalten
- reaktionsträge nach drei Monaten



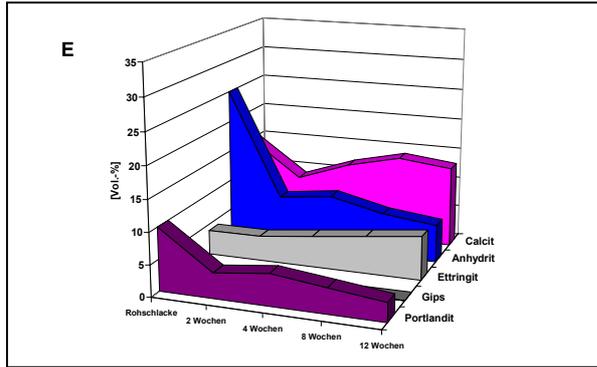
- gutes Carbonatisierungsverhalten
- reaktiv nach drei Monaten



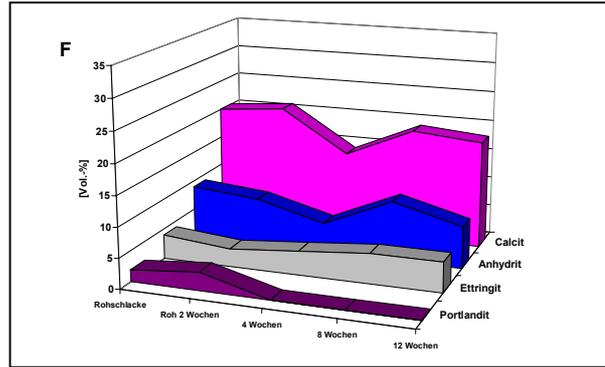
- gutes Carbonatisierungsverhalten
- reaktiv nach drei Monaten

■ Calcit	CaCO_3
■ Anhydrit	CaSO_4
■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$
■ Gips	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$
■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$

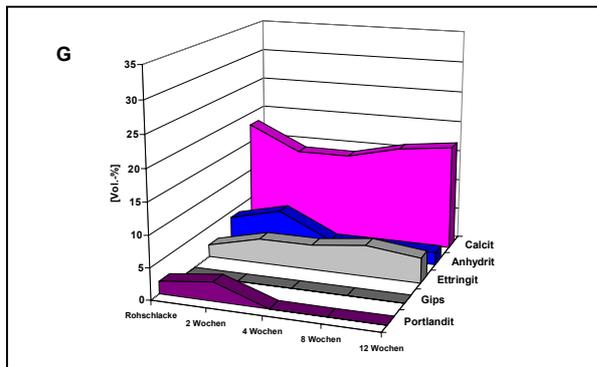
Abb. 150-B Alterationsverhalten der untersuchten MV-Schlacken C und D



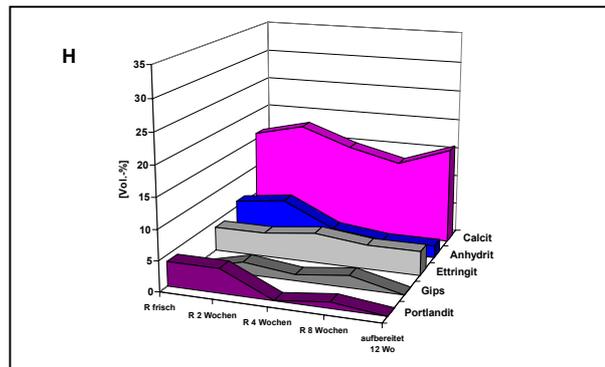
- mangelndes Carbonatisierungsverhalten
- reaktiv nach drei Monaten



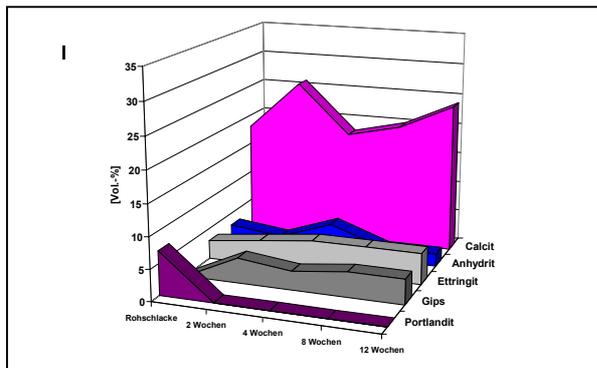
- mangelndes Carbonatisierungsverhalten
- reaktiv nach drei Monaten



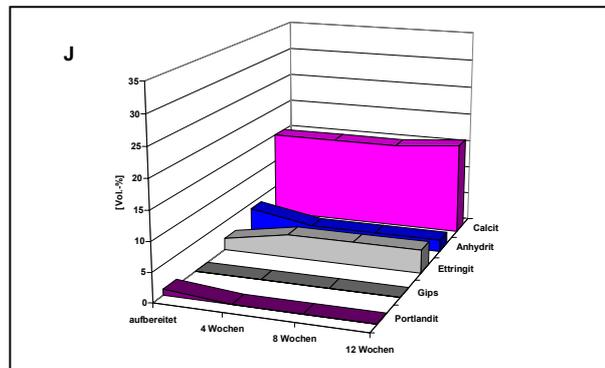
- verzögertes Carbonatisierungsverhalten
- reaktionsträge nach drei Monaten



- verzögertes Carbonatisierungsverhalten
- reaktionsträge nach drei Monaten



- verzögertes Carbonatisierungsverhalten
- reaktionsträge nach drei Monaten



- gutes Carbonatisierungsverhalten
- reaktionsträge nach drei Monaten

■ Calcit	CaCO_3
■ Anhydrit	CaSO_4
■ Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$
■ Gips	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$
■ Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$

Abb. 150-C Alterationsverhalten der untersuchten MV-Schlacken E, F, G, H, I und J

6.2.2 Umweltverträglichkeit

6.2.2.1 DEV S4-Eluatversuche

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacken wurde mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Ein Vergleich der Konzentrationen der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Rohschlacken mit den Konzentrationen der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken sowie mit dem Müllinput zeigt (Abb. 151-A; 151-B):

- Die pH-Werte der MV-Rohschlacken liegen zwischen 11,0 und 12,8 und gehen während der Ablagerung der MV-Schlacken auf Werte zwischen 9,3 und 11,8 zurück. Damit halten die pH-Werte der abgelagerten MV-Schlacken die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 – 13) ein.

Das Abfallen der pH-Werte während der Ablagerung der MV-Schlacken geht auf die unterschiedlich stark ausgeprägten Carbonatisierungsreaktionen während der Alteration zurück, wobei kein Zusammenhang zwischen Müllinput und den festgestellten pH-Werten in den MV-Rohschlacken beobachtet werden kann.

- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit sind in den unterschiedlichen MV-Rohschlacken sehr uneinheitlich und liegen zwischen 120 und 880 mS/m. Während der Ablagerungszeit von drei Monaten nehmen sie deutlich ab und erreichen Werte zwischen 98 und 178 mS/m und liegen somit deutlich unterhalb der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 für eine HMVA 1 von 250 mS/m (HMVA 2: 600 mS/m).

Die deutliche Abnahme der Werte der elektrischen Leitfähigkeit während der Ablagerung der MV-Schlacken liegt zum großen Teil an der Fixierung von Calcium im Kristallgitter des Carbonates Calcit (CaCO_3) während der Carbonatisierungsreaktionen sowie an der Bildung stabiler calciumhaltiger Sulfatphasen. Ebenso spielen aber auch die Auswaschvorgänge der Chloride eine entscheidende Rolle für das Absinken der Werte der elektrischen Leitfähigkeit während der Alteration der MV-Schlacken. Ein Zusammenhang zwischen Müllinput und den gemessenen Werten der elektrischen Leitfähigkeit in den MV-Rohschlacken besteht nicht.

- Die Zinkgehalte unterliegen in den unterschiedlichen MV-Rohschlacken sehr starken Schwankungen und erreichen Werte zwischen 18 $\mu\text{g/l}$ und 692 $\mu\text{g/l}$. Während der Ablagerungszeit von drei Monaten fallen sie in den MV-Schlacken jedoch in Bereiche, die die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 $\mu\text{g/l}$ deutlich unterschreiten (Ist-Werte max. 55 $\mu\text{g/l}$).

Die starke Abnahme der Zinkgehalte in den abgelagerten MV-Schlacken geht sowohl auf den Einbau von Zink in das Kristallgitter des Carbonates Calcit (CaCO_3) als auch auf das Abfallen der pH-Werte während der Ablagerungszeit der MV-Schlacken zurück. Ein Zusammenhang zwischen Müllinput und den gemessenen Zinkgehalten in den MV-Rohschlacken konnte nicht festgestellt werden.

- Die Bleiwerte der unterschiedlichen MV-Rohschlacken sind ebenfalls sehr uneinheitlich und zeigen Werte zwischen 27 $\mu\text{g/l}$ und 4.370 $\mu\text{g/l}$, während die drei Monate abgelagerten MV-Schlacken nur noch Werte von max. 34 $\mu\text{g/l}$ aufweisen und somit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 $\mu\text{g/l}$ ohne Ausnahme einhalten.

Das sehr starke Abfallen der Bleigehalte in den abgelagerten MV-Schlacken geht sowohl auf den Einbau von Blei in das Kristallgitter des Carbonates Calcit (CaCO_3) als auch auf das Abfallen der pH-Werte während der Ablagerungszeit der MV-Schlacken zurück, wobei ein Zusammenhang zwischen Müllinput und den gemessenen Bleiwerten in den MV-Rohschlacken nicht beobachtet werden konnte.

- Die Kupfergehalte der MV-Rohschlacken schwanken ebenfalls sehr stark in den DEV S4-Eluaten und erreichen Werte zwischen 70 und 1.300 $\mu\text{g/l}$. Im Verlauf der Ablagerung der MV-Schlacken nehmen sie jedoch deutlich ab und fallen nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten auf Werte zwischen 26 und 694 $\mu\text{g/l}$, wobei jedoch die MV-Schlacken B-2, D-3, E, F und G auch nach der vorgeschriebenen Ablagerungszeit die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 $\mu\text{g/l}$ überschreiten.

Ein Zusammenhang zwischen Müllinput und der gemessenen Kupfergehalte der MV-Rohschlacken konnte nicht festgestellt werden.

- Die Chromgehalte der MV-Rohschlacken liegen in einem Bereich von 13 bis 50 $\mu\text{g/l}$. Während der Ablagerung der MV-Schlacken werden Chromgehalte zwischen < 10 und 60 $\mu\text{g/l}$, in einer MV-Schlacke sogar Werte von 124 $\mu\text{g/l}$ festgestellt, ohne eine eindeutige Tendenz aufzuweisen. Die Zuordnungswerte der LAGA von 200 $\mu\text{g/l}$ werden nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten von allen untersuchten MV-Schlacken eingehalten, während die Grenzwerte der TL Min-StB 2000 von 50 $\mu\text{g/l}$ jedoch von den MV-Schlacken A-3, C, D-1 und H überschritten werden.

Ein Zusammenhang zwischen Müllinput und der gemessenen Chromgehalte der MV-Rohschlacken besteht nicht.

- Die Chloridwerte der MV-Rohschlacken variieren zwischen ca. 55 mg/l und 581 mg/l . Während die MV-Schlacken, die im Freiland abgelagert werden während der Alteration gleichbleibende bzw. deutlich fallende Chloridgehalte aufweisen, zeigen die MV-Schlacken, die in der Halle abgelagert werden während der Alteration gleichbleibende bzw. deutlich höhere Chloridgehalte.

Die Reduktion der Chloridgehalte der im Freiland abgelagerten MV-Schlacken geht auf Auswaschungseffekte durch auftretende Niederschläge zurück, während es bei der Hallenlagerung der MV-Schlacken zu einer Auskristallisation der Chloride aus den Porenwässern während der Ablagerung kommen kann. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 für eine HMVA 2 von 250 mg/l werden von den untersuchten MV-Schlacken unterschritten, während die Grenzwerte für eine HMVA 1 von 30 mg/l (Ist-Werte: 30 bis 237 mg/l) nicht eingehalten werden können.

Ein Zusammenhang zwischen Müllinput und der gemessenen Chloridgehalte der MV-Rohschlacken konnte nicht festgestellt werden.

- Die Sulfatwerte unterliegen sehr starken Schwankungen in den unterschiedlichen MV-Rohschlacken und liegen zwischen 60 mg/l und 473 mg/l , während in den abgelagerten MV-Schlacken Werte zwischen 80 und 546 mg/l auftreten. Im Laufe der Ablagerungszeit von drei Monaten wird in den MV-Schlacken A-3, B-1, B-2, C, D-1, D-3, E, F, G, H und J eine Zunahme der Sulfatgehalte beobachtet, die auf die Bildung von stärker löslichen wasserhaltigen Sulfatphasen zurückgeht. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 für eine HMVA 2 von 600 mg/l werden von den untersuchten MV-Schlacken eingehalten, während die Grenzwerte für eine HMVA 1 von 250 mg/l von den MV-Schlacken B-2, C, D-2, D-3, E, F und G überschritten werden.

Ein Zusammenhang zwischen Müllinput und der gemessenen Sulfatgehalte der MV-Rohschlacken besteht nicht.

- Die Eluatgehalte der Schwermetalle Arsen, Cadmium, Nickel und Quecksilber sowie von Cyanid liegen sowohl in den MV-Rohschlacken als auch in den MV-Schlacken nahe bzw. unterhalb der Nachweisgrenze. Eine Ausnahme stellt die MV-Rohschlacke der Anlage J dar, deren Quecksilbergehalt deutlich oberhalb der Nachweisgrenze liegt. Die Eluatgehalte der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken halten jedoch die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 ein.

Ein Zusammenhang zwischen Müllinput und der gemessenen Schwermetallgehalte der MV-Rohschlacken konnte nicht festgestellt werden.

- Die AOX-Gehalte der MV-Rohschlacken liegen in einem Bereich von 20 bis 126 µg/l, während in den MV-Schlacken Werte zwischen 90 und < 10 µg/l festgestellt werden, ohne erkennbare Tendenz während der Ablagerungszeit. Gemäß LAGA und TL Min-StB 2000 sind die AOX-Gehalte festzustellen, Grenz- oder Zuordnungswerte existieren jedoch nicht.

Ein Zusammenhang zwischen Müllinput und der gemessenen AOX-Gehalte der MV-Rohschlacken besteht nicht.

- Die DOC-Werte der MV-Rohschlacken variieren zwischen 31 und 139 mg/l. Während der Ablagerung der MV-Schlacken fallen sie auf Werte zwischen 5 und 34 mg/l. Gemäß LAGA und TL Min-StB 2000 sind die DOC-Gehalte festzustellen, Grenz- oder Zuordnungswerte existieren jedoch nicht.

Ein Zusammenhang zwischen Müllinput und der gemessenen DOC-Gehalte der MV-Rohschlacken konnte nicht festgestellt werden.

- Die lediglich zu Vergleichszwecken mit anderen Sekundärprodukten festgestellten Werte für den Phenolindex liegen für die MV-Rohschlacken zwischen 68 und 309 µg/l und fallen während der dreimonatigen Ablagerung der MV-Schlacken auf Werte zwischen 10 und 64 µg/l. Gemäß LAGA und TL Min-StB 2000 ist der Phenolindex nicht festzustellen.

Ein Zusammenhang zwischen Müllinput und der gemessenen Werte für den Phenolindex der MV-Rohschlacken besteht nicht.

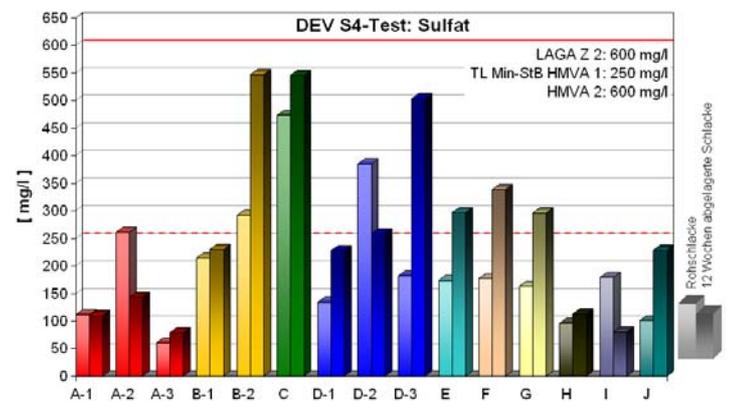
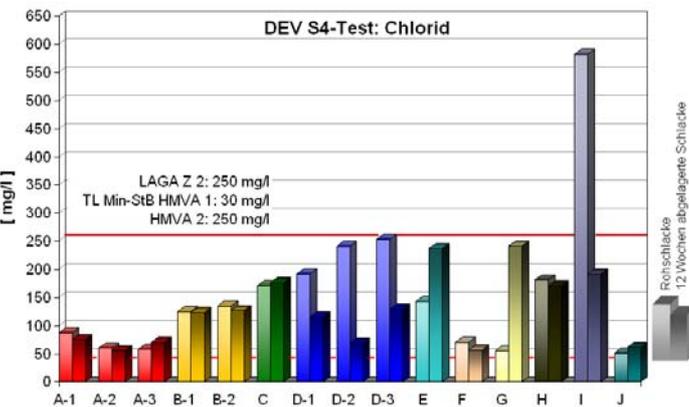
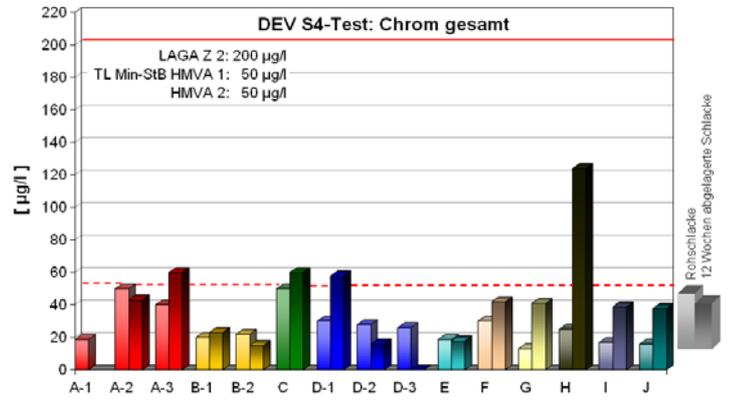
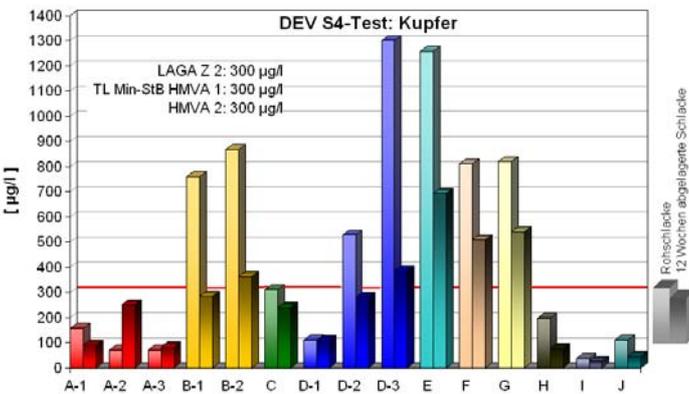
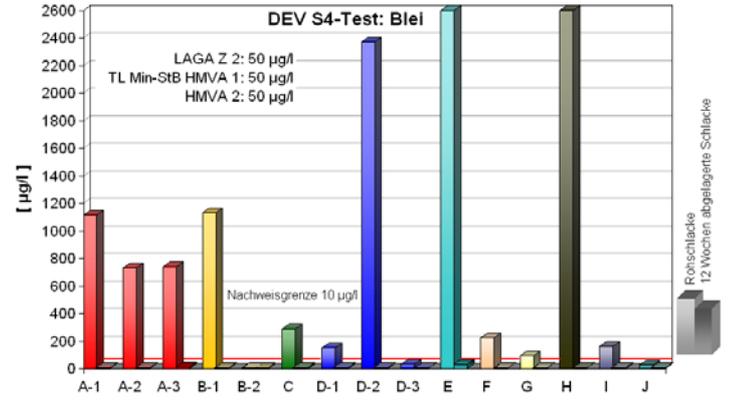
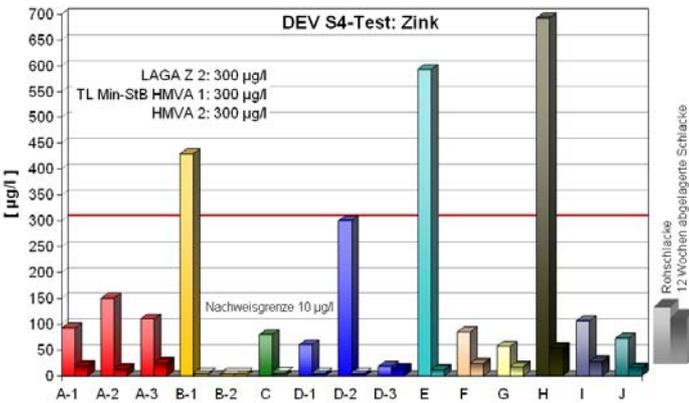
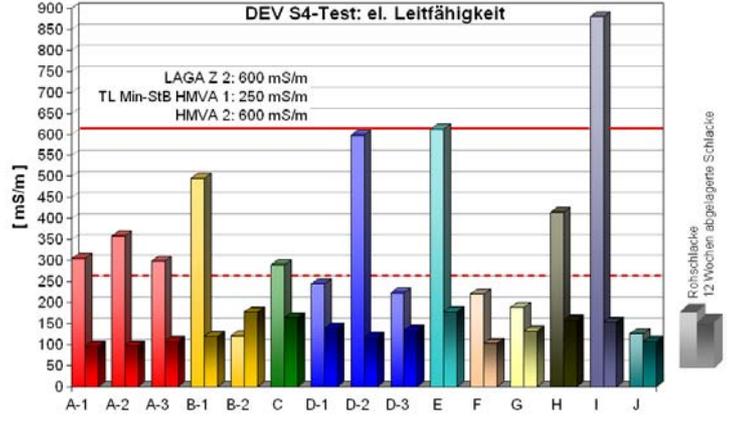
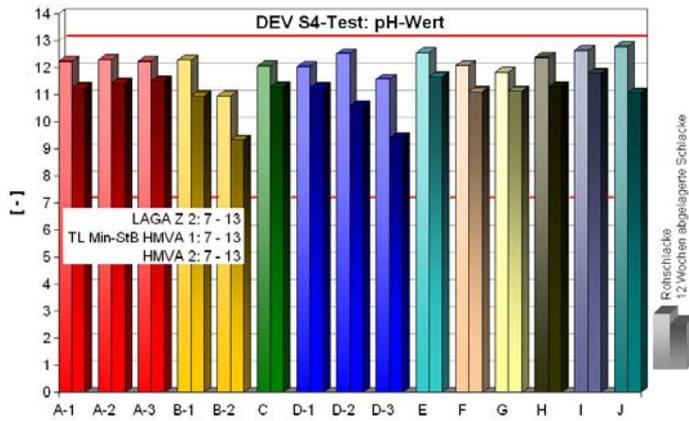


Abb. 151-A DEV S4-Eluatgehalte der untersuchten MV-Rohschlacken und der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken

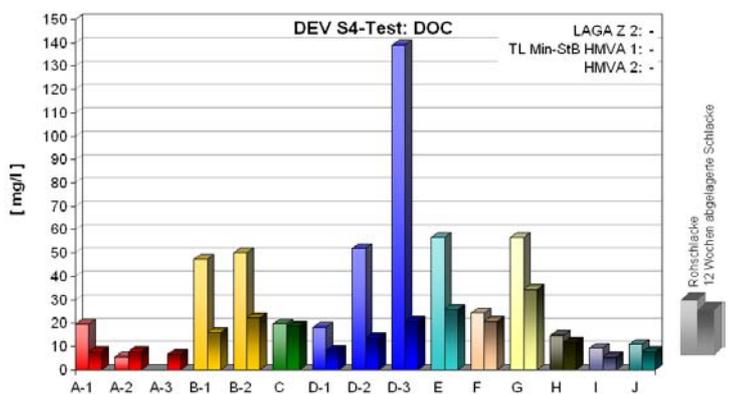
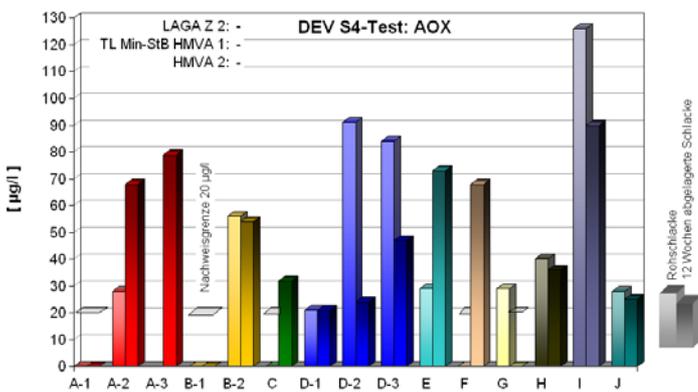
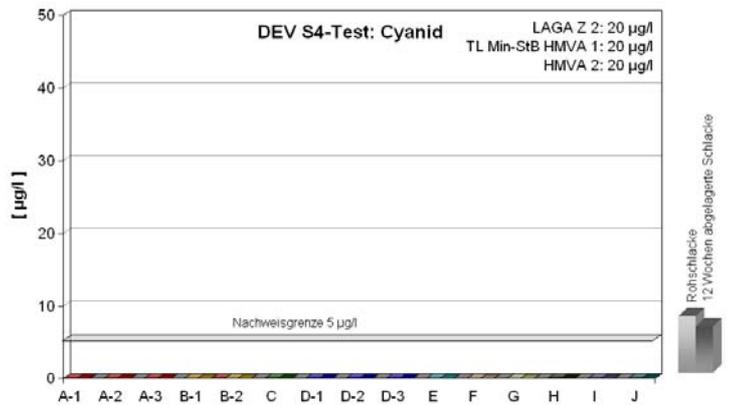
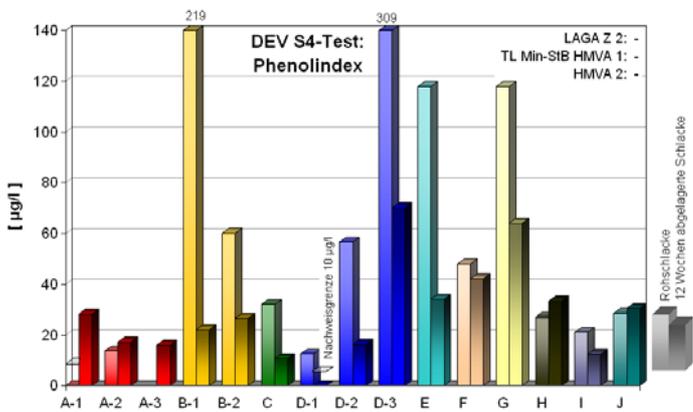
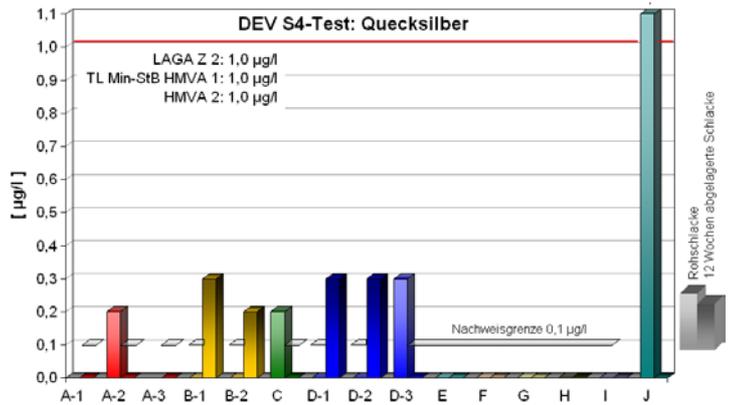
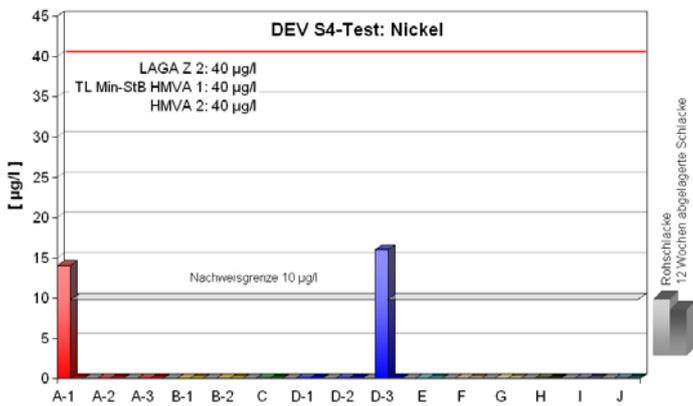
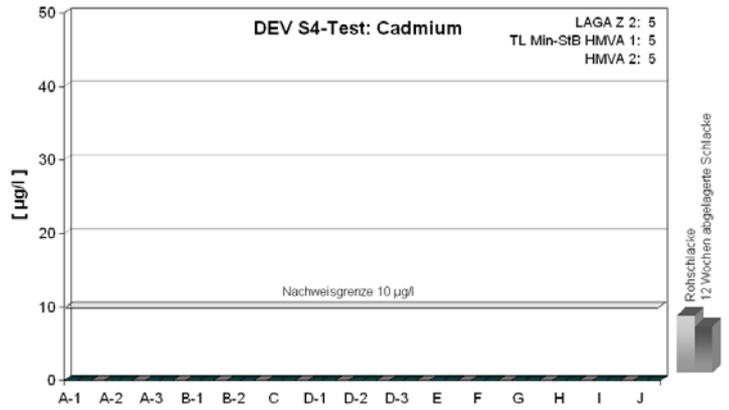
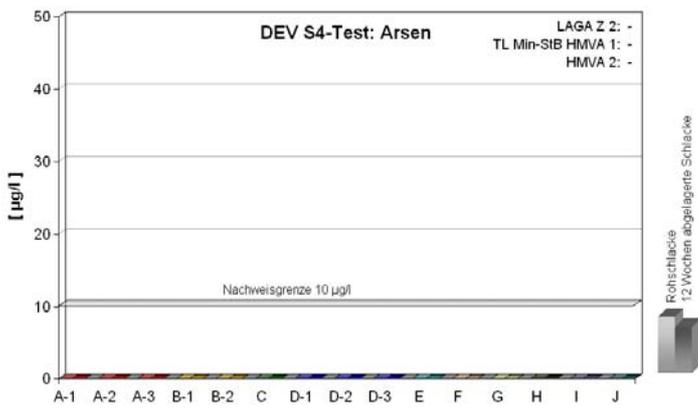


Abb. 151-B DEV S4-Eluatgehalte der untersuchten MV-Rohschlacken und der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken

6.2.2.2 Chemische Untersuchungen im Feststoff

Die Untersuchungen im Feststoff sind gemäß der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] auf die Parameter EOX und TOC für aufbereitete und drei Monate abgelagerte MV-Schlacken beschränkt. Zusätzlich wurden ausgewählte Schwermetalle im Feststoff in den MV-Rohschlacken und MV-Schlacken untersucht, deren Minimal- und Maximalwerte sowie der arithmetische Mittelwert aus Abb. 152 hervorgeht. Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse lässt folgendes erkennen:

- Die EOX-Gehalte der MV-Schlacken liegen größtenteils unterhalb der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 1,0 mgCl/kg. Eine Überschreitung der Zuordnungs- und Grenzwerte nach LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] von 3,0 mgCl/kg wird nur für die abgelagerten MV-Schlacken A-2 und A-3 festgestellt, wobei die untersuchte MV-Schlacke A-2 aus verfahrenstechnischen Gründen nicht aufbereitet werden konnte.
- Die TOC-Gehalte der MV-Schlacken variieren zwischen 0,21 und 2,37 M.-% und halten somit die Zuordnungs- und Grenzwerte nach LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2] für Altanlagen von 3,0 M.-% ein. Für neuere Anlagen gilt nach LAGA [3] ein Zuordnungswert von 1,0 M.-%, der von den MV-Schlacken der Anlagen B-1, D-3 und E überschritten wird. Da diese Anlagen jedoch vor 1973 in Betrieb gegangen sind, dürfen sie lediglich den von ihnen eingehaltenen Grenzwert von 3,0 M.-% nicht überschreiten.
- Die ausgewählten Schwermetallgehalte im Feststoff der untersuchten MV-Schlacken unterliegen großen Schwankungsbreiten (Tab. 71), eine Tatsache, die auch schon in früheren Untersuchungen festgestellt wurde [7,8]. Da die Ursache hierfür ist unter anderem in der Heterogenität der stofflichen Zusammensetzung der MV-Schlacken begründet.
- Die Ablagerungszeit von drei Monaten hat auf die ausgewählten Schwermetallgehalte im Feststoff der untersuchten MV-Schlacken keinen Einfluss.
- Einen Zusammenhang zwischen Müllinput und Feststoffgehalt konnte nicht festgestellt werden.

Tab. 71 Ausgewählte Schwermetallgehalte im Feststoff der untersuchten MV-Schlacken

	Minimalwert [mg/kg]	Maximalwert [mg/kg]	arith.Mittelwert [mg/kg]
Zink	1.800	8.250	3.000
Blei	725	2.490	1.450
Kupfer	1.150	5.170	2.060
Chrom	346	1.440	645
Nickel	108	530	196
Arsen	10	80	23

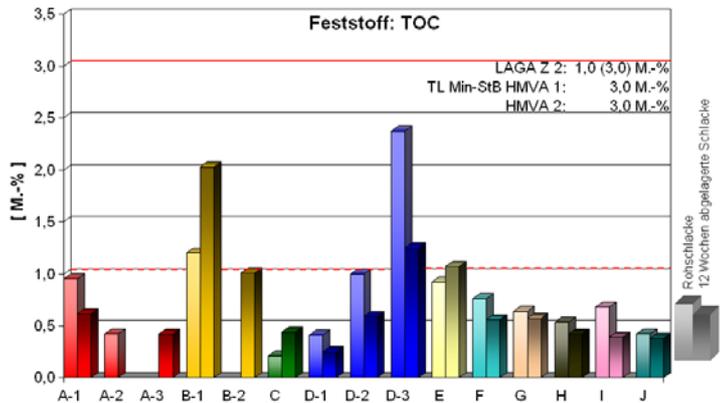
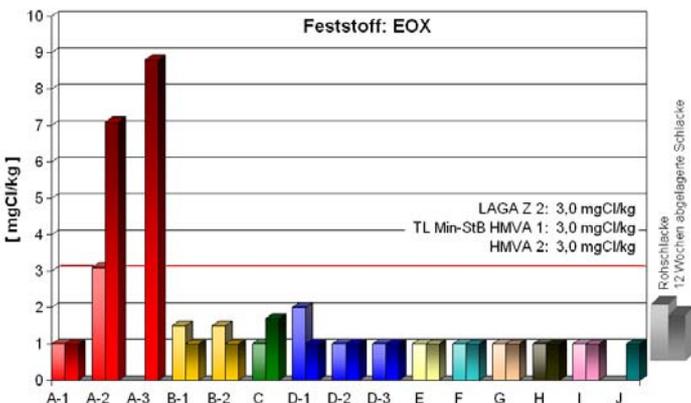
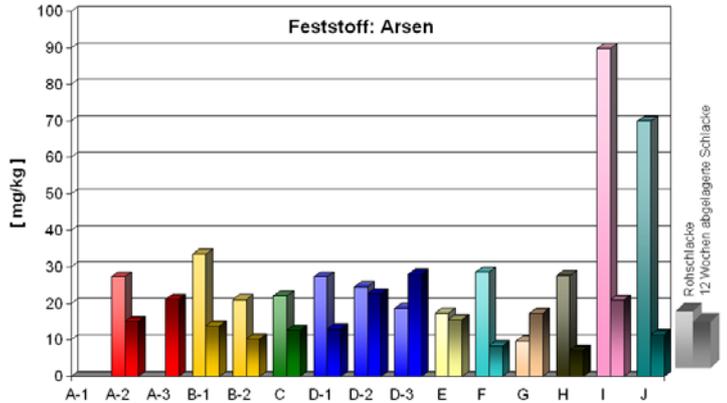
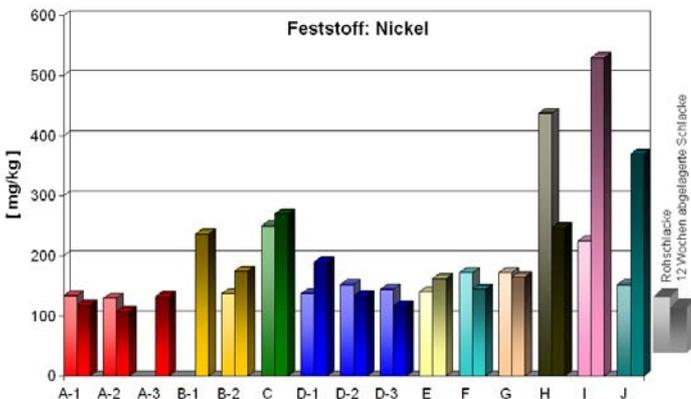
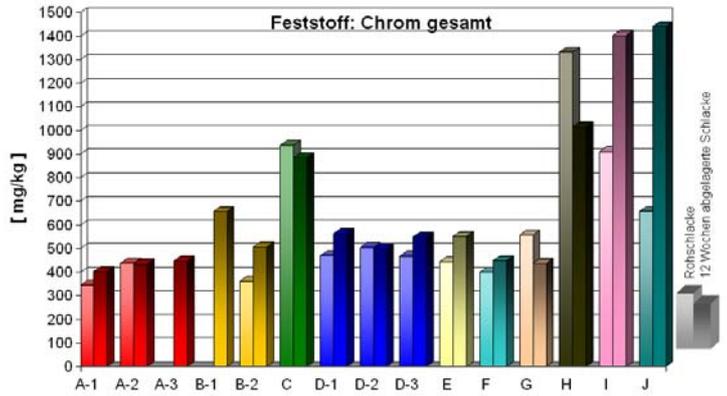
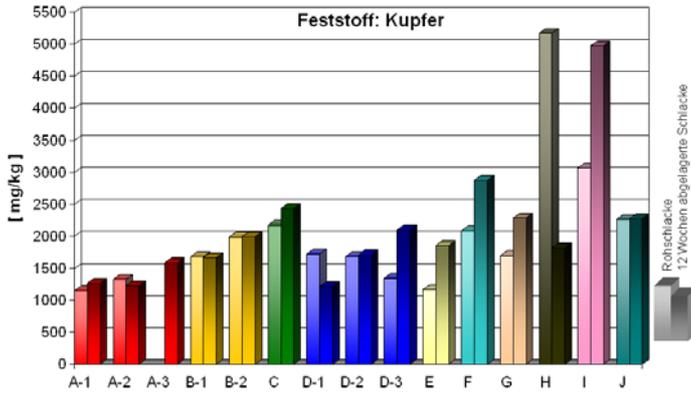
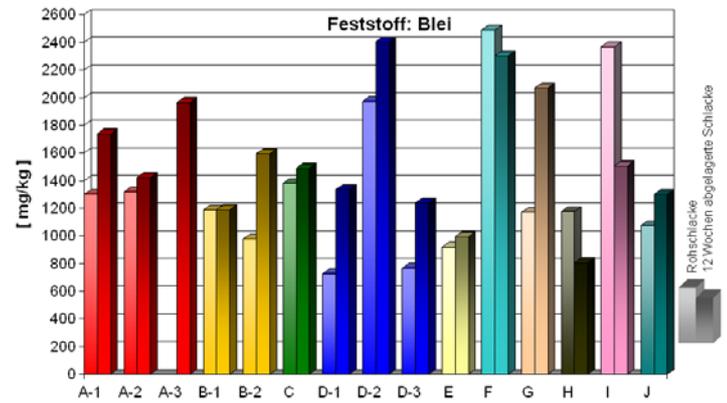
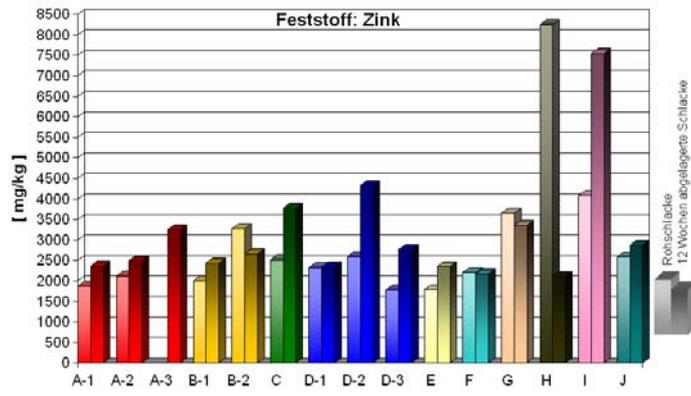


Abb. 152 Feststoffgehalte der MV-Rohschlacken und der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken

6.2.2.3 Availability-Test und Kolonnentest

Availability-Test (Verfügbarkeitstest)

Der in den Niederlanden entwickelte Availability-Test [15] gibt eine Vorstellung davon, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann und stellt somit eine worst case-Betrachtung dar, mit deren Hilfe die Langzeitstabilität eines Stoffes beschrieben und eingeschätzt werden kann.

Die ausgewählten Schwermetallgehalte im Feststoff sowie die Ergebnisse der Availability-Tests gehen für die aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken aus Abb. 153 hervor.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass von den betrachteten Schwermetallen, Zink den höchst möglich verfügbaren Anteil, der unter den Bedingungen des Availability-Tests aus dem Feststoff in den untersuchten MV-Schlacken freigesetzt werden kann, aufweist, gefolgt von Kupfer und Blei, während die Verfügbarkeit von Chrom, Nickel und Cadmium weitaus geringer ist. Insgesamt betrachtet, zeigen die MV-Schlacken nach Durchlaufen der Availability-Tests, im Gegensatz zu den großen Schwankungsbreiten der Feststoffgehalte, relativ homogene Werte.

In Bezug auf den Gesamtfeststoffgehalt können im Falle einer worst case-Betrachtung, die dem Availability-Test zugrunde liegt, nur sehr geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden, sodass von einer Langzeitstabilität der untersuchten MV-Schlacken ausgegangen werden kann.

Ein Zusammenhang der ermittelten Werte auf der Basis des Availability-Tests mit dem Müllinput konnte nicht festgestellt werden.

Kolonnentest

Die Kurvenverläufe des in den Niederlanden entwickelten Kolonnentests [14] liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten eines Stoffes, wobei die bei einem Flüssigkeits : Feststoff-Verhältnis von 10 bis 20 eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt [31].

Die Untersuchungsergebnisse der mit dem Kolonnentest geprüften Schwermetalle der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken gehen aus Abb. 154 hervor und zeigen, dass unter den Bedingungen des Kolonnentests nur sehr geringe Mengen der ausgewählten Schwermetalle freigesetzt werden können. Auch hier wurden keine größeren Schwankungsbreiten bei den einzelnen Schwermetallen festgestellt.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen des Availability-Tests und der Feststoffgehalte macht deutlich, dass von dem maximal verfügbaren Potential der untersuchten Schwermetalle nur sehr geringe Mengen freigesetzt werden können, und dass unter den Bedingungen des Kolonnentests von einer Elutionsstabilität der untersuchten MV-Schlacken für kurze bis mittelfristige Zeiträume ausgegangen werden kann.

Ein Zusammenhang der ermittelten Werte auf der Basis des Kolonnentests mit dem Müllinput konnte nicht festgestellt werden.

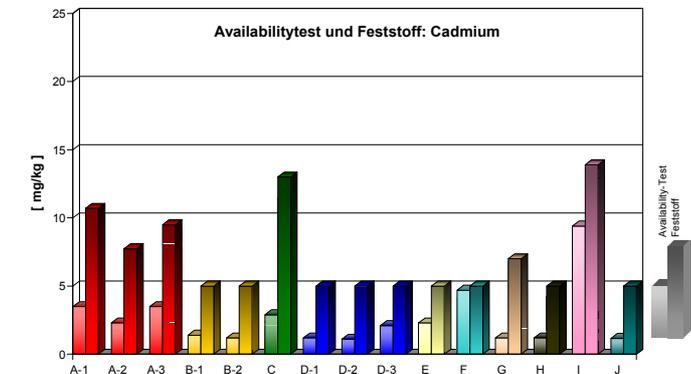
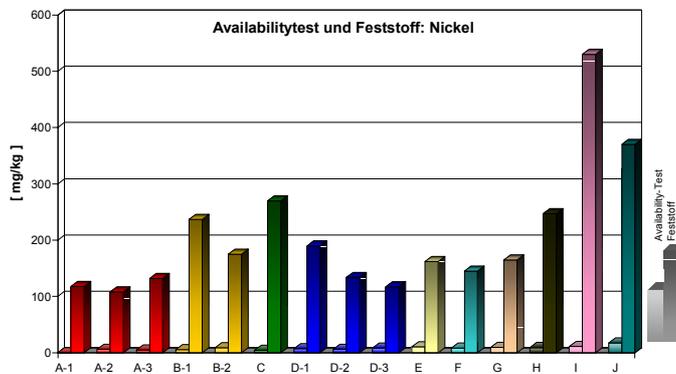
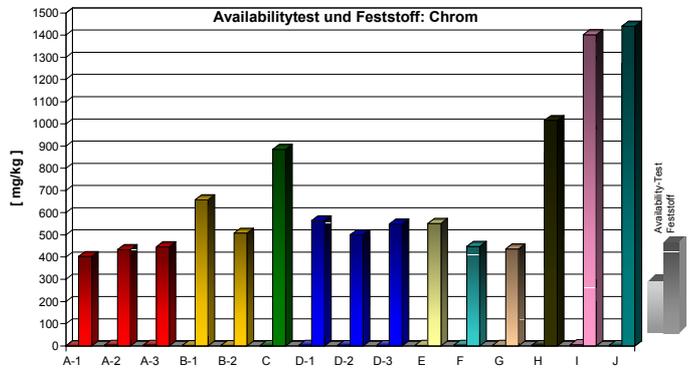
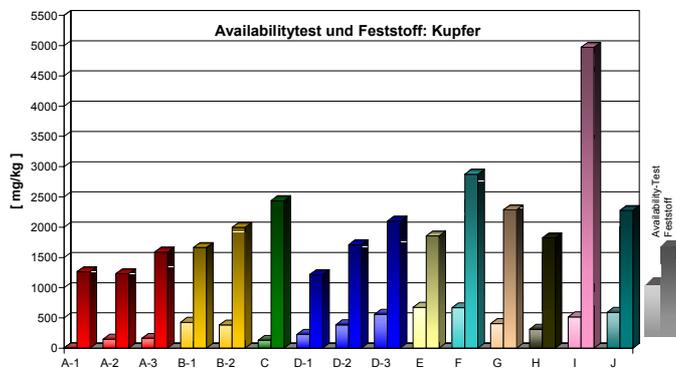
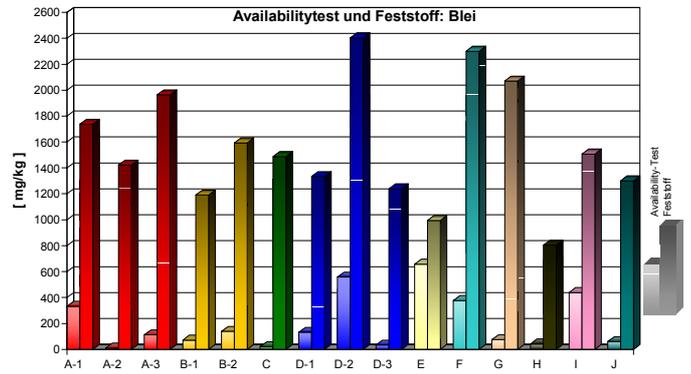
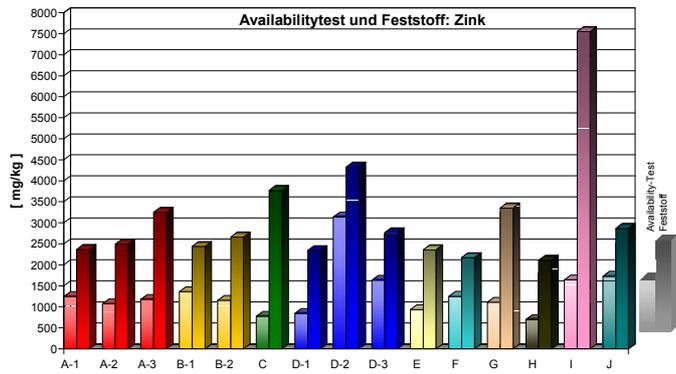


Abb. 153 Untersuchungsergebnisse der Availability-Tests und der Feststoffuntersuchungen der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken

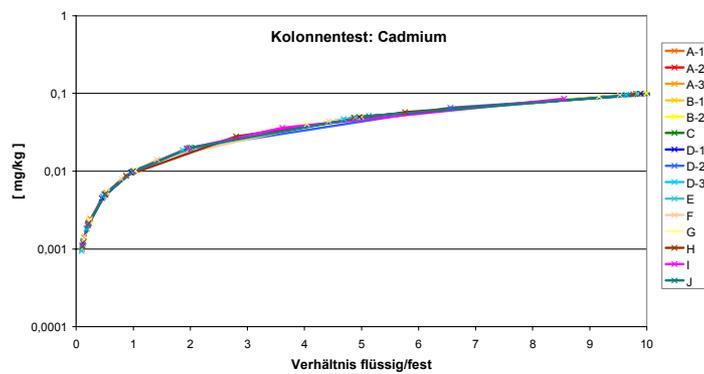
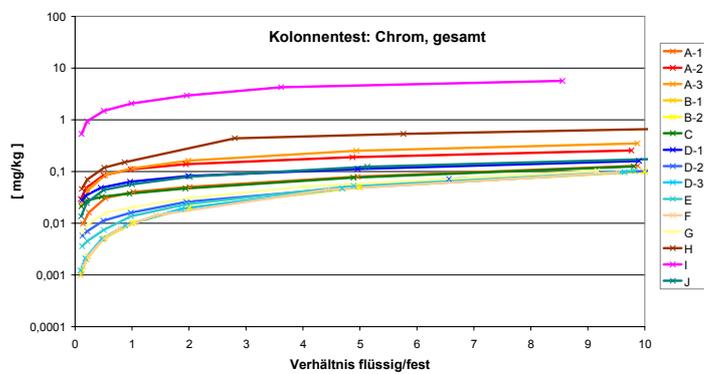
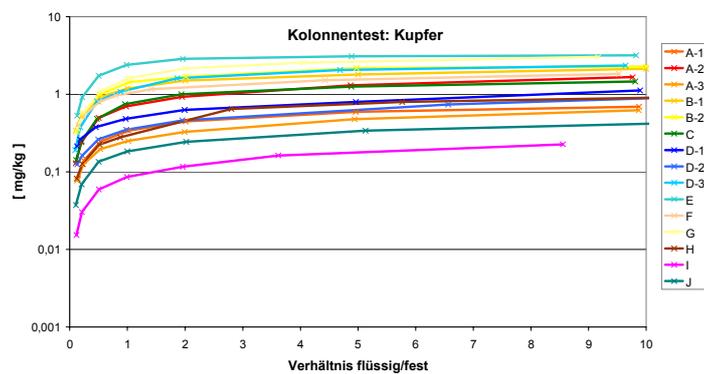
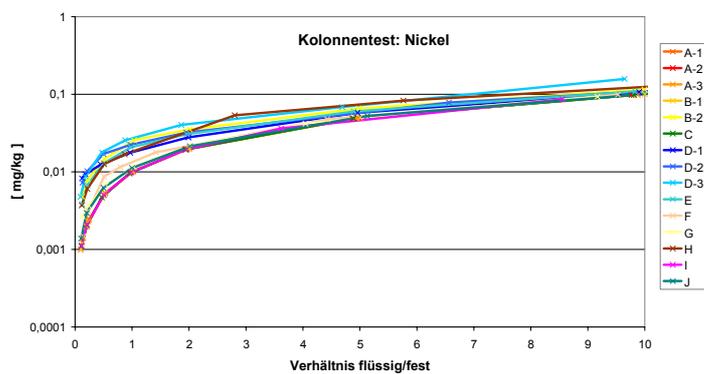
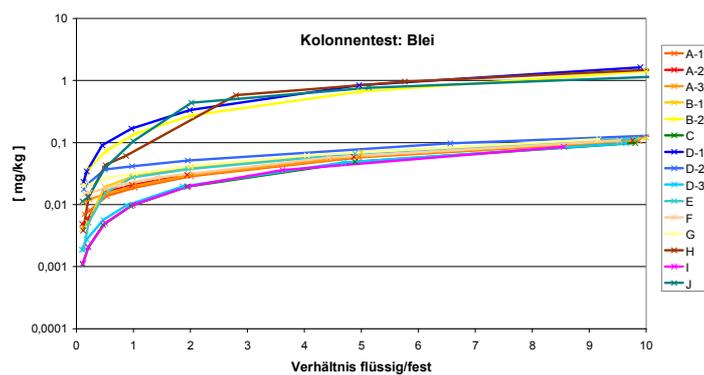
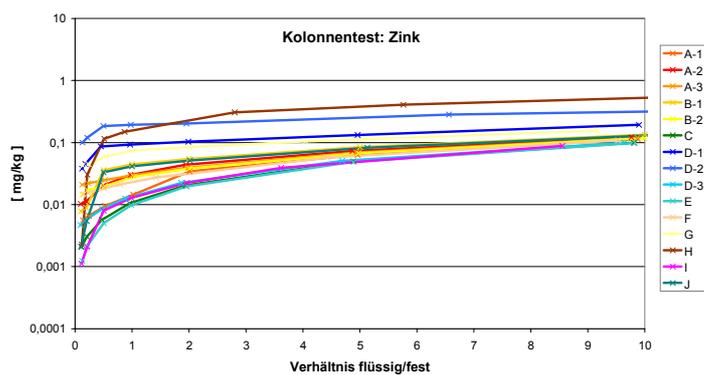


Abb. 154 Untersuchungsergebnisse des Kolonntests der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken

6.2.3 Bautechnik

Der Umfang der bautechnischen Untersuchungen richtet sich nach den Vorgaben der RG Min-StB 93 [30] für einen Einsatz der MV-Schlacken in Bereichen des Straßenbaus, wobei die Bewertung auf der Basis der Grenzwerte der TL Min-StB 2000 [2] erfolgt, in denen die Anforderungen an natürliche und künstliche Gesteinskörnungen sowie an Werksteine, die bei der Herstellung und Instandsetzung von Oberbauschichten im Straßen- und Wegebau verwendet werden, enthalten sind. Weitere anwendungsbezogene Anforderungen an die Gesteinskörnungen gehen aus den jeweiligen „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen“ gemäß TL Min-StB 2000 [2] hervor, die jedoch nur die Eigenschaften der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken für eine Beurteilung des betreffenden Materials berücksichtigen. Im Merkblatt „MV-Asche“ [17] werden außerdem zusätzliche Hinweise für eine bautechnische Anwendung der MV-Schlacken gegeben.

Bewertung gemäß TL Min-StB 2000

Die Untersuchungsergebnisse werden im Folgenden auf der Basis der Anforderungen der TL Min-StB 2000 an den bautechnischen Einsatz von MV-Schlacken dargestellt und zusätzlich mit den Erfahrungswerten des Merkblattes „MV-Asche“ verglichen.

Ergänzend wurden weitere bautechnische Untersuchungen an den MV-Schlacken durchgeführt, um weitere Verwertungsmöglichkeiten abzuschätzen zu können.

- **Korngrößenverteilung**

Die lediglich zur Orientierung dargestellten Korngrößenverteilungen der MV-Rohschlacken gehen aus Abb. 155 und die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken aus Abb. 156 hervor.

Gemäß TL Min-StB darf der Kornanteil $< 0,063$ mm eines Korngemisches bei Lieferung nicht mehr als 7,0 M.-% betragen, wobei weitere Anforderungen an den Sieblinienverlauf nicht bestehen. Die Anforderung von max. 7,0 M.-% wird von den untersuchten MV-Schlacken eingehalten.

Die Anforderungen an die Korngrößenverteilungen richten sich in der Baupraxis nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Ein Vergleich mit den lediglich zur Orientierung eingetragenen Grenzsieblinien für Schottertragschichten 0/32 mm gemäß ZTVT-StB 95 [16] zeigt jedoch, dass nur die MV-Schlacke der MVA J, mit einer geringen Abweichung bei Siebdurchgang 2 mm, innerhalb dieser Grenzsieblinien liegt, während die anderen untersuchten MV-Schlacken einen zu geringen Grobkornanteil aufweisen.

Bei der Bewertung der Korngrößenverteilungen muss jedoch beachtet werden, dass für die Korngrößenverteilung je nach Anwendungszweck verschiedene Grenzsieblinien existieren (z.B. 0/22 mm, 0/32 mm, 0/56 mm), die sich auch länderspezifisch unterscheiden können.

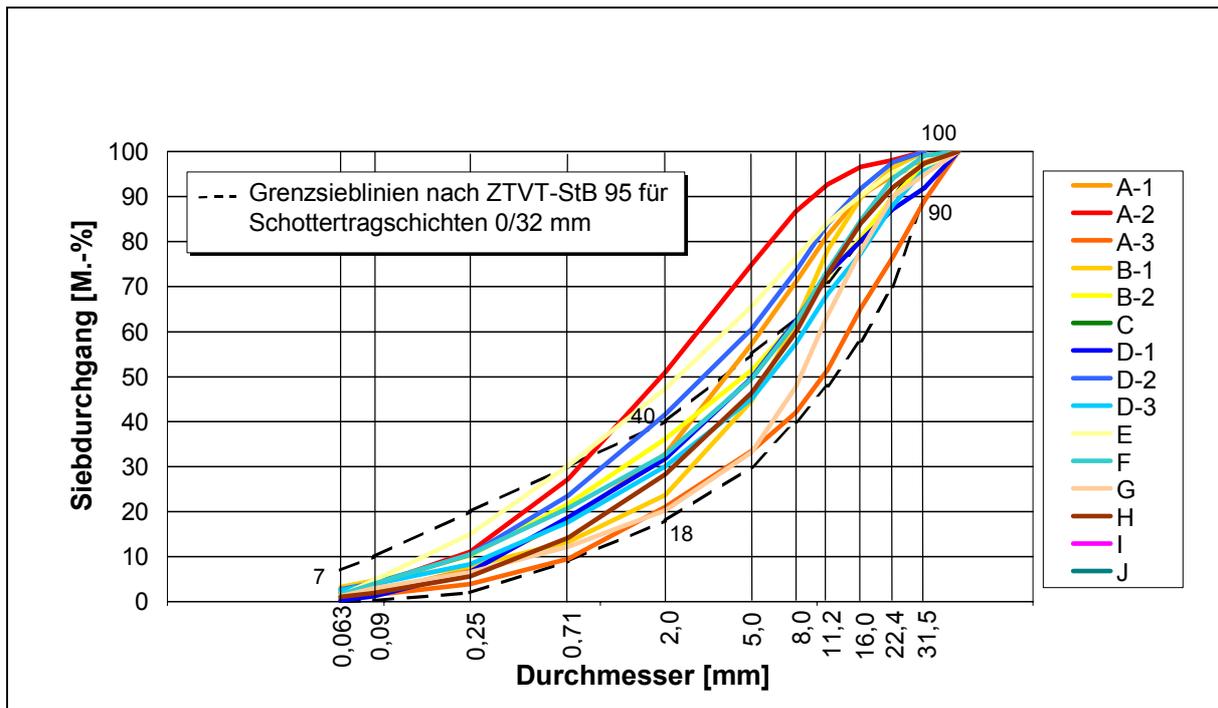


Abb. 155 Korngrößenverteilungen der frisch produzierten MV-Rohschlacken

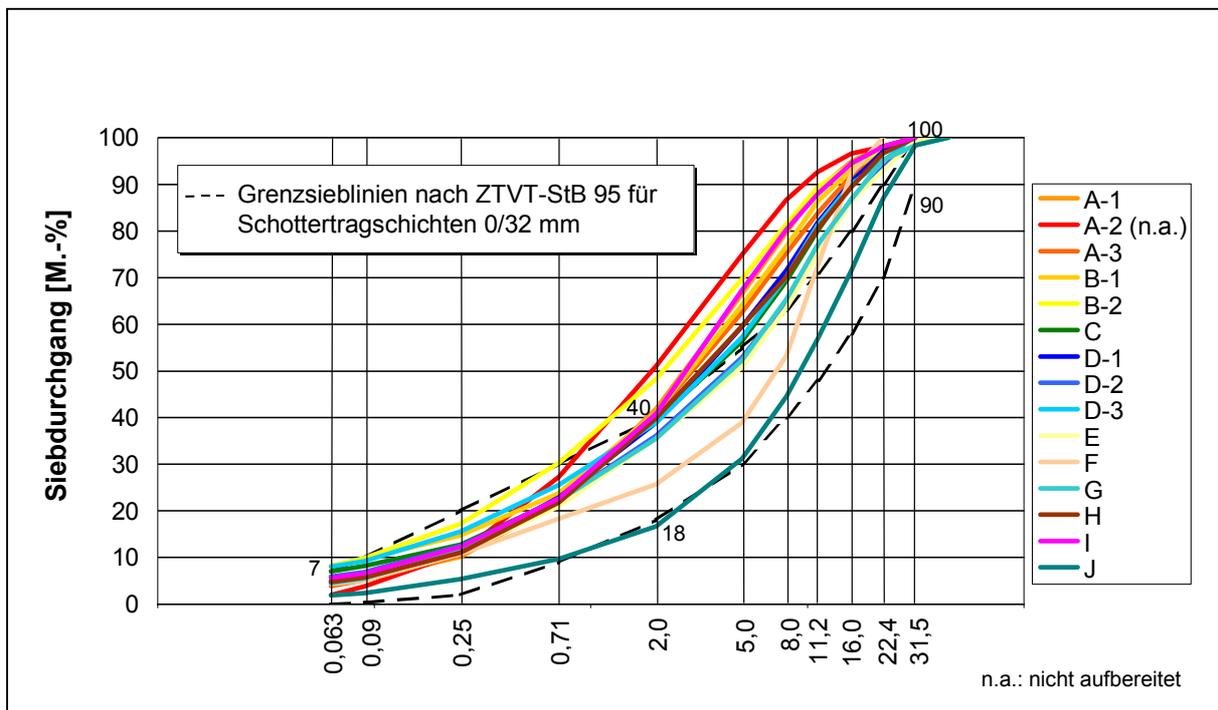


Abb. 156 Korngrößenverteilungen der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken

- **Stoffliche Zusammensetzung**

Gemäß TL Min-StB 2000 sind im Kornanteil > 4 mm der Metallanteil im Korngemisch auf max. 5,0 M.-% und der Anteil an unverbranntem Material auf 0,5 M.-% beschränkt.

Ein Vergleich der stofflichen Zusammensetzung der untersuchten MV-Schlacken zeigt (Abb. 157):

- Die während des Sinterprozesses auf dem Verbrennungsrost neu entstandenen Schlackenbestandteile bilden mit 40 bis 80 M.-% den größten Anteil der makroskopischen stofflichen Zusammensetzung (Erfahrungsbereich Merkblatt: 30 bis 80 M.-%).
- Glas nimmt einen Anteil von ca. 8 bis ca. 38 M.-% ein, während Keramik in einem Bereich von ca. 5 bis 14 M.-% liegt (Erfahrungsbereich Merkblatt für die Stoffgruppe Glas/Keramik: 0 bis 70 M.-%).
- Der Anteil der Metalle schwankt zwischen 1,6 bis 7,1 M.-%, wobei die untersuchten MV-Schlacken A-1, D-3 und I den Grenzwert von 5,0 M.-% überschreiten (Erfahrungsbereich Merkblatt: 0 bis 20 M.-%).
- Die Anteile an sonstigem Material (z.B. Steine) betragen zwischen ca. 4 bis ca. 8 M.-%. (Erfahrungsbereich Merkblatt: 0 bis 20 M.-%).
- Der Anteil an unverbranntem Material liegt zwischen 0 und 0,9 M.-%. Die Anforderung gemäß TL Min-StB von max. 0,5 M.-% wird von den MV-Schlacken B-1 (0,9 M.-%), D-2 (0,6 M.-%) und D-3 (0,6 M.-%) nicht eingehalten (Erfahrungsbereich Merkblatt: 0 bis 10 M.-%).

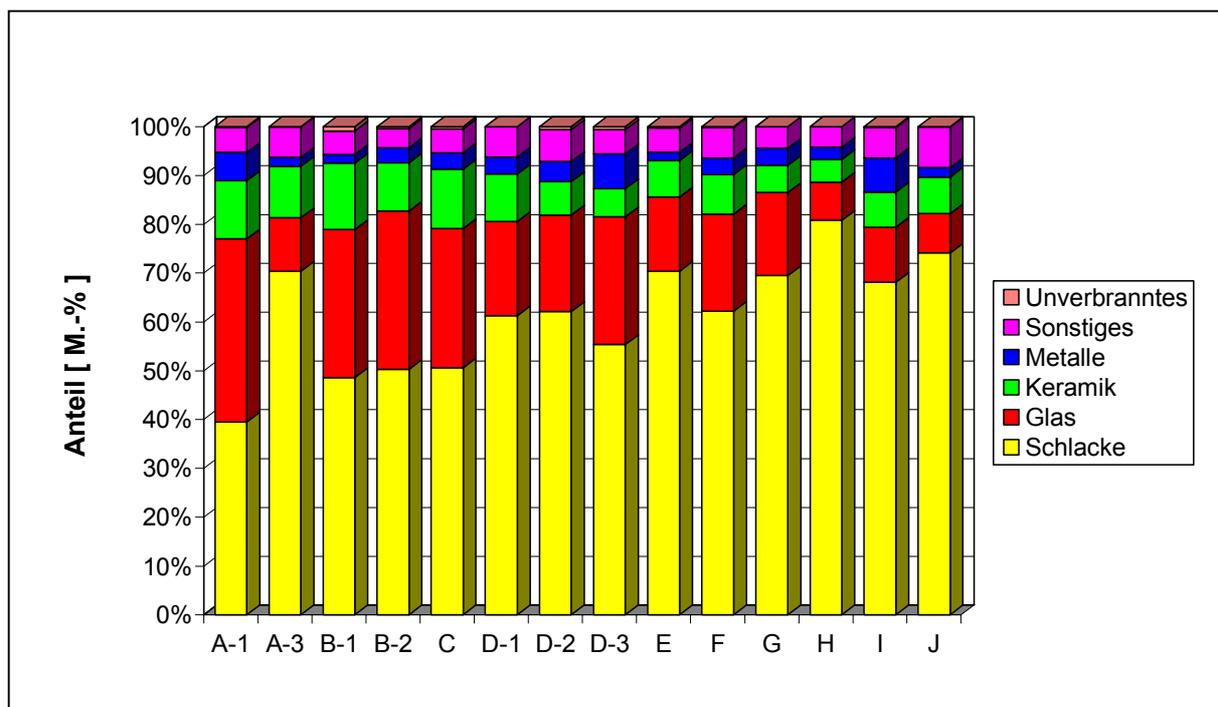


Abb. 157 Stoffliche Zusammensetzung der untersuchten MV-Schlacken

- **Proctordichte und optimaler Wassergehalt**

Die Ergebnisse der Proctorversuche gehen aus Abb. 158 hervor und zeigen für die untersuchten MV-Schlacken Proctordichten zwischen 1,583 und 1,761 g/cm³. Die dazugehörigen optimalen Wassergehalte variieren zwischen 13,6 und 19,2%. Eine Ausnahme stellt der optimale Wassergehalt von 8,3% dar, der bei einer Proctordichte von 1,66 g/cm³ in der MV-Schlacke J mit dem höchsten Grobkornanteil im Korngemisch ermittelt wurde.

Der Kurvenverlauf aller Proctorkurven ist glockenförmig und spricht damit für eine gute Verdichtbarkeit der MV-Schlacken, die auch aus der Baupraxis bestätigt wurde.

In den TL Min-StB 2000 werden keine Anforderungen für die Proctordichte und den optimalen Wassergehalt gestellt. Die Erfahrungswerte des Merkblattes liegen für den Proctorversuch bei 1,5 bis 1,9 g/cm³, für die Proctordichten bei optimalen Wassergehalten zwischen 11 und 18 %.

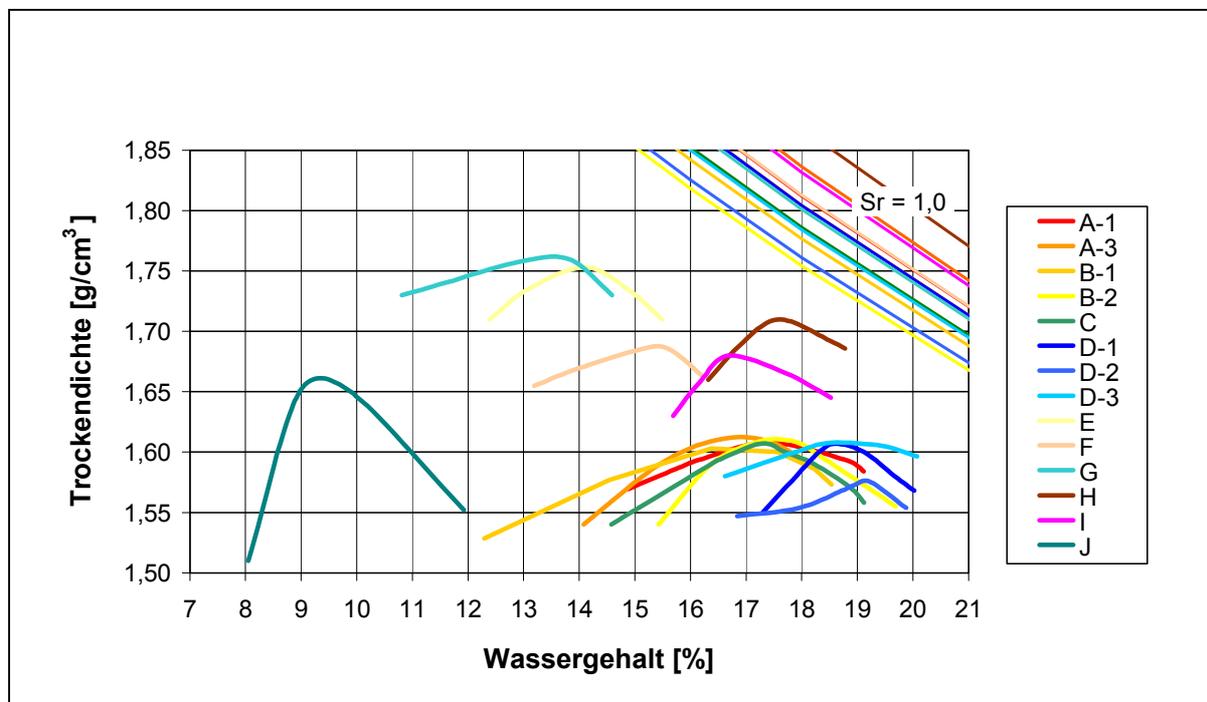


Abb. 158 Ergebnisse der Proctorversuche der untersuchten MV-Schlacken

- **Wassergehalt**

Die ermittelten Wassergehalte in den aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken gehen aus Abb. 159 hervor und zeigen sehr unterschiedliche Werte zwischen 6 und 20 M.-%. Bei der Beurteilung der Wassergehalte muss jedoch beachtet werden, dass die Lagerung der untersuchten MV-Schlacken überwiegend im Freiland erfolgte und somit die Witterungsbedingungen (z.B. natürlicher Niederschlag, Temperaturschwankungen) neben der Lagerungsart (z.B. Form und Größe der Halden, Art der Aufhaldung) direkt auf die Entwicklung der Wassergehalte Einfluss nehmen konnte.

Gemäß TL Min-StB 2000 darf bei der Auslieferung der MV-Schlacken der Wassergehalt 90% des optimalen Wassergehaltes nicht überschreiten.

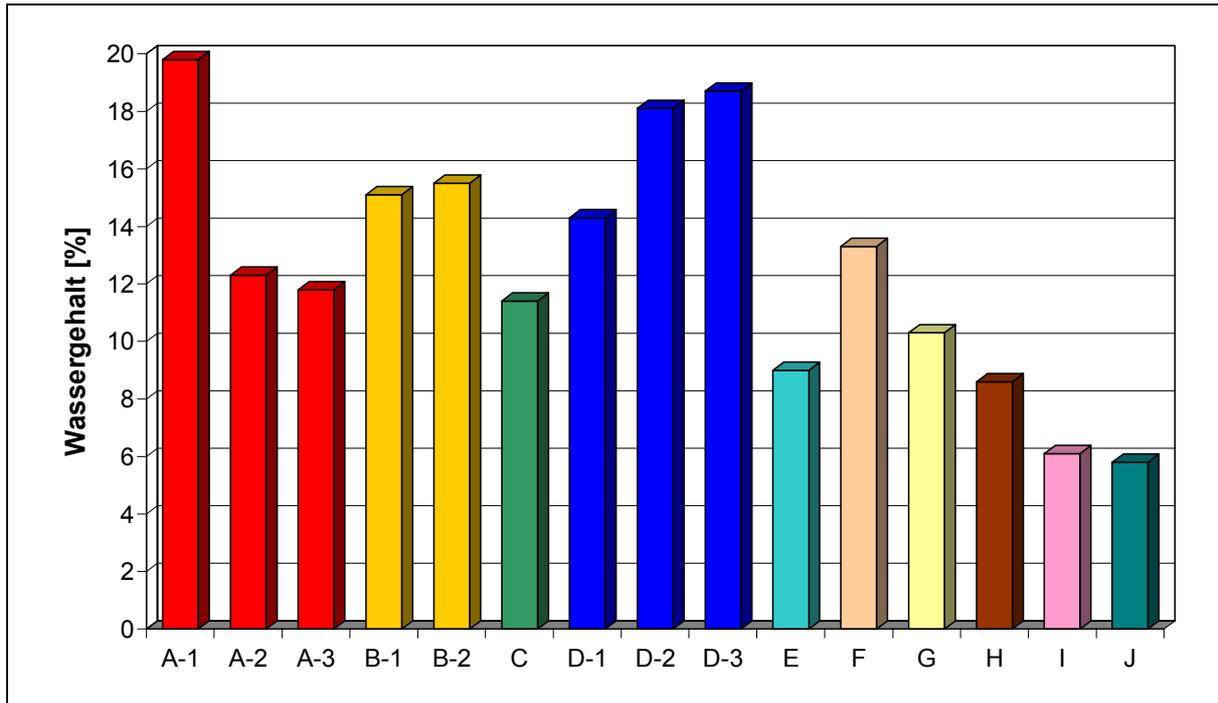


Abb. 159 Wassergehalte der untersuchten MV-Schlacken

- **Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel**

Die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ wurde sowohl an der Körnung 8/16 mm als auch an der Gesamtkörnung der MV-Schlacke durchgeführt.

Gemäß TL Min-StB 2000 ist eine ausreichende Frostbeständigkeit gegeben, wenn die Absplitterungen < 5 mm der Prüfkörnung 8/16 mm nach der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung max. 3,0 M.-% betragen. Eine Überschreitung bis 5,0 M.-% ist zulässig, wenn der Kornanteil < 0,71 mm maximal 2,5 M.-% beträgt. Die Prüfergebnisse zeigen, dass die MV-Schlacken A-3, B-2, C, D-3 und E diese Anforderung nicht einhalten (Abb. 160).

Liegen die Absplitterungen über den genannten Grenzwerten, wird die Prüfung „Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel“ zusätzlich an der Gesamtkörnung durchgeführt. Der im Befrostungsversuch an der Gesamtkörnung > 0,063 mm entstandene Anteil < 0,063 mm darf 2,0 M.-% nicht übersteigen. Die Summe aus dem ursprünglichen enthaltenen Anteil < 0,063 mm und den im Befrostungsversuch zusätzlich entstandenen Anteil darf nicht mehr als 9,0 M.-% betragen. Diese Anforderung wird von der MV-Schlacke B-2 nicht eingehalten (Abb. 161).

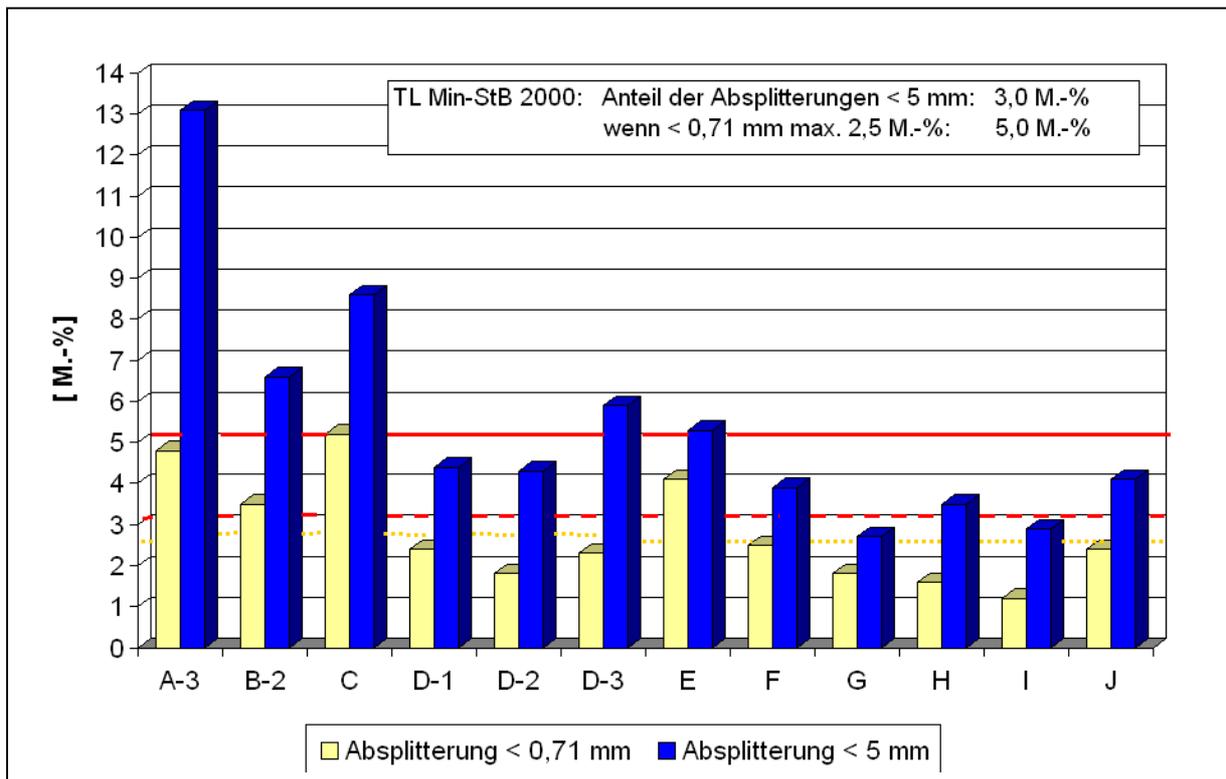


Abb. 160 Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel der untersuchten MV-Schlacken an der Prüfkörnung 8/16mm

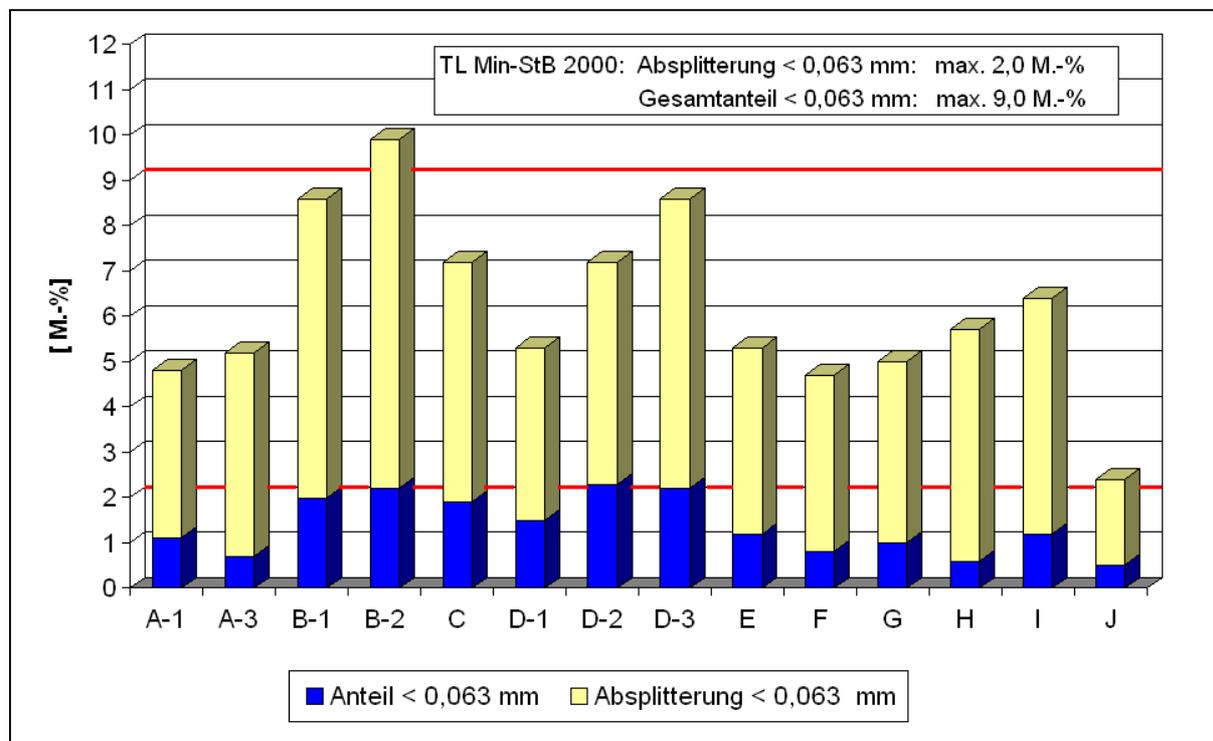


Abb. 161 Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel der untersuchten MV-Schlacken an der Gesamtkörnung

- **Rohdichte und Schüttdichte**

Die Rohdichten schwanken zwischen ca. 2,555 g/cm³ und 2,814 g/cm³ (Abb. 162) und gehen in erster Linie auf die unterschiedliche makroskopische stoffliche Zusammensetzung zurück. Das Merkblatt nennt einen Erfahrungsbereich von 2,2 bis 2,7 g/cm³

Die Schüttdichten variieren zwischen ca. 1,026 g/cm³ und 1,392 g/cm³ (Abb. 162). Im Merkblatt sind keine Erfahrungswerte genannt.

Anforderungen an die Rohdichte und Schüttdichte gemäß TL Min-StB 2000 existieren nicht.

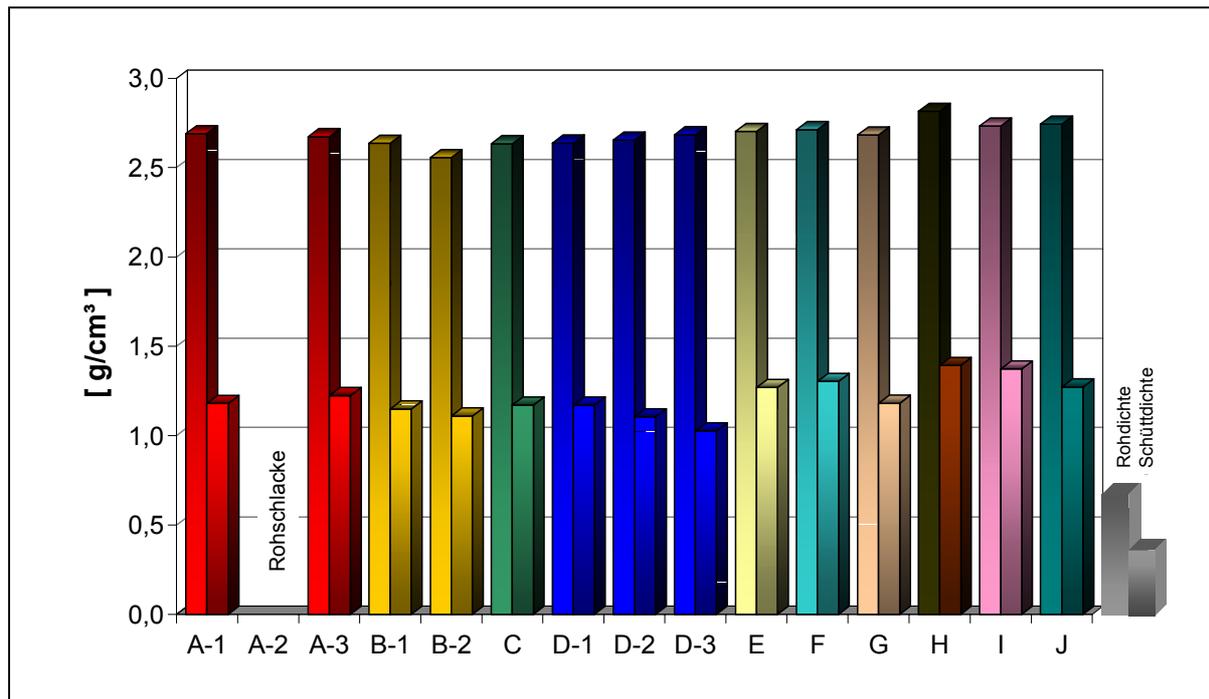


Abb. 162 Rohdichten und Schüttdichten der untersuchten MV-Schlacken

- **Widerstand gegen Schlag**

Die ermittelten Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12}$ als Maß für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung liegen zwischen 30,0 und 40,0 M.-% (Abb. 163). Die Anforderung gemäß TL Min-StB 2000 von max. 40 M.-% wird von den untersuchten MV-Schlacken erfüllt. Im Merkblatt werden Erfahrungswerte für die Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12}$ von 35 bis 44 M.-% aufgeführt.

Ergänzend wurde die Widerstandsfähigkeit gegen eine mechanische Beanspruchung mit dem Los-Angeles-Versuch ermittelt. Die festgestellten Werte liegen zwischen 29 und 39 %. Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 existieren nicht (Abb. 164).

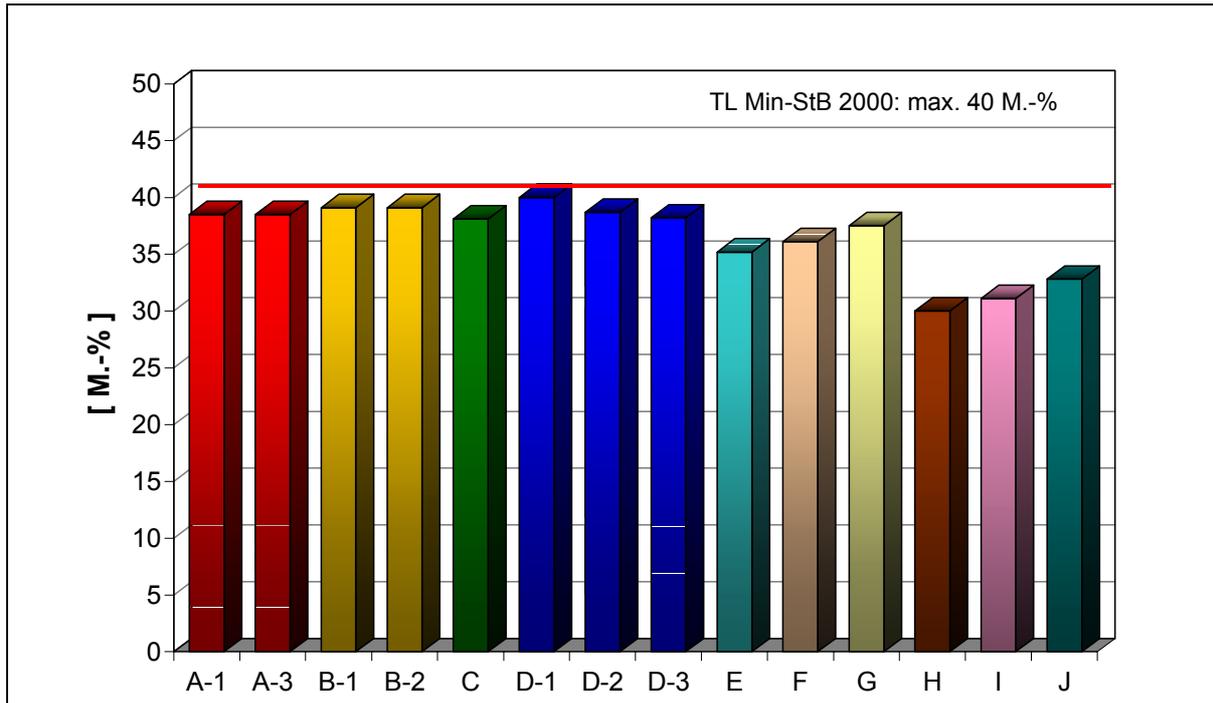


Abb. 163 Widerstand gegen Schlag der untersuchten MV-Schlacken

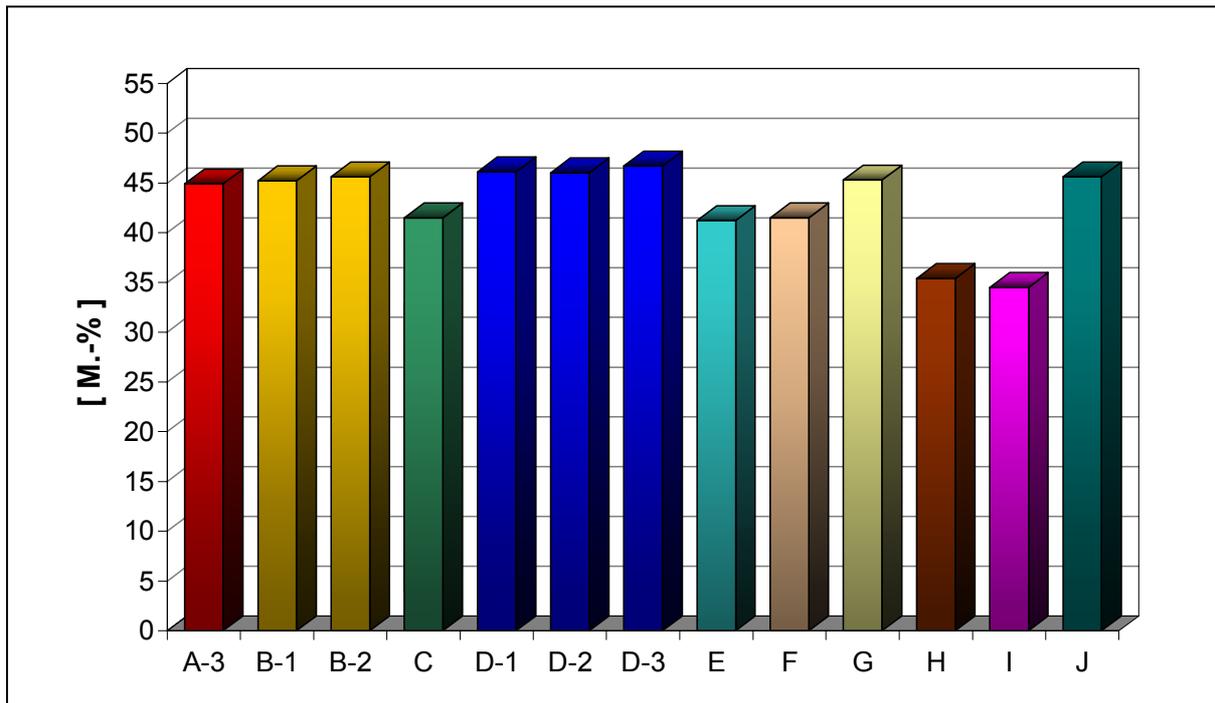


Abb. 164 Ergebnisse des Los-Angeles-Versuches

- **Anteil an schlecht geformten Körnern**

Der Anteil an schlecht geformten Körnern liegt bei den untersuchten MV-Schlacken zwischen 9,4 und 30,0 M.-%, womit die Anforderungen der TL Min-StB 2000 von 50 M.-% erfüllt werden (Abb. 165). Das Merkblatt führt Erfahrungswerte bis etwa 20 M.-% an.

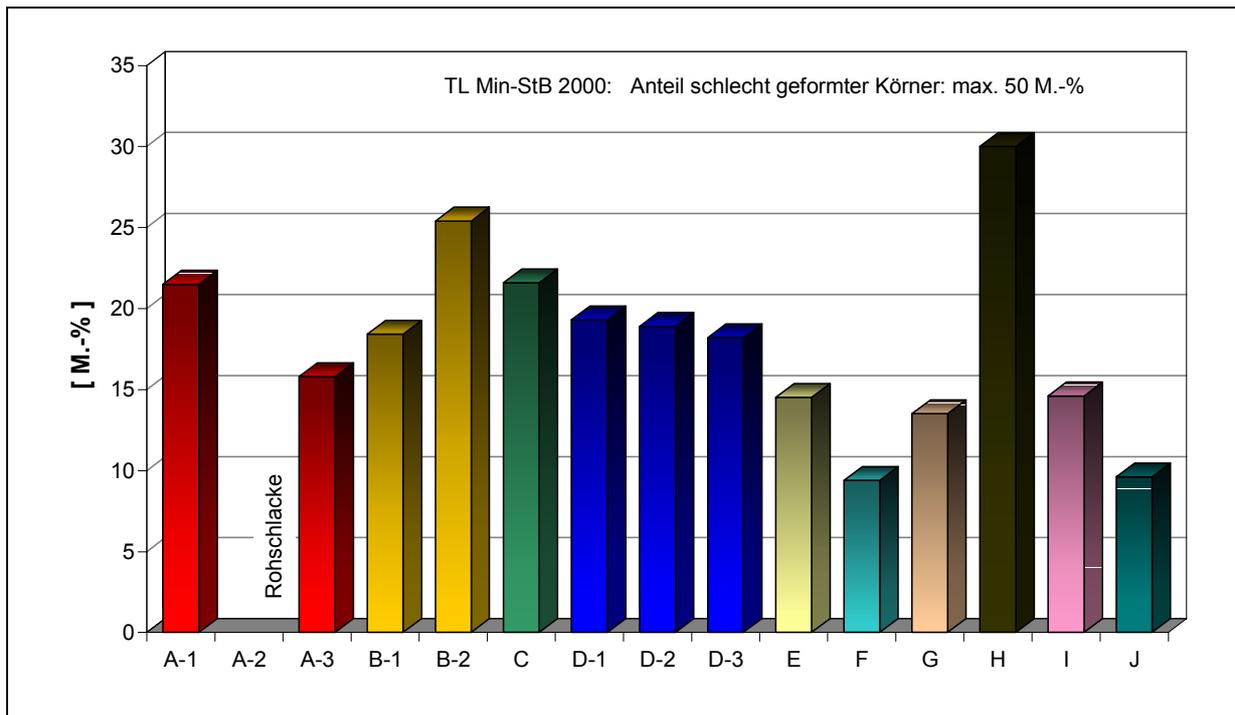


Abb. 165 Anteil an schlecht geformten Körnern der untersuchten MV-Schlacken

- **Glühverlust**

Die festgestellten Glühverluste als Maß für den erreichten Ausbrand liegen in den untersuchten MV-Schlacken zwischen 0,9 und 3,4 M.-%. Anforderungen an den Parameter Glühverlust gemäß TL Min-StB 2000 bestehen nicht (Abb. 166). Die im Merkblatt genannten Erfahrungswerte liegen zwischen 0 und 5 M.-%. Anforderungen gemäß TL Min-StB für den Glühverlust existieren nicht.

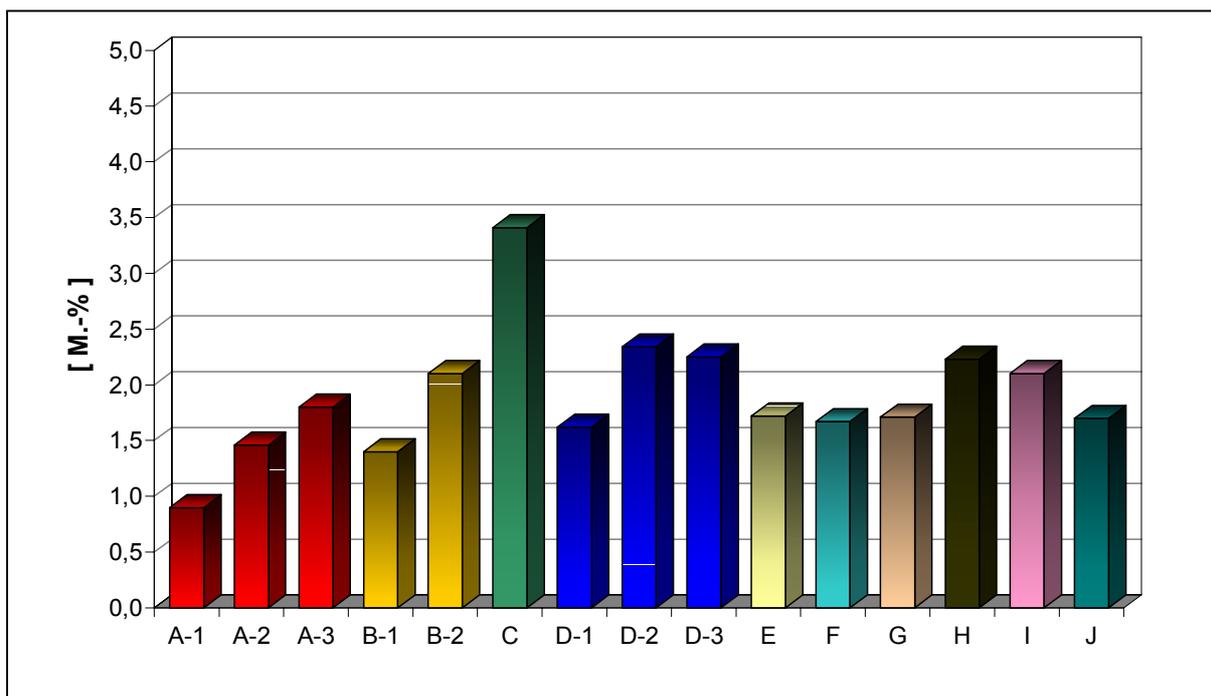


Abb. 166 Glühverluste der untersuchten MV-Schlacken

- **Scherversuch**

Scherversuche werden zur Ermittlung der Scherfestigkeit durchgeführt. Die Scherfestigkeit besitzt eine große Bedeutung, da sie maßgeblich die Standsicherheit, z.B. von Böschungen bestimmt. Sie wird durch die Scherparameter Reibungswinkel (φ) und Kohäsion (c) ausgedrückt und vorwiegend durch die Kornverteilung, Korngröße und Kornrauigkeit sowie durch die Lagerungsdichte bestimmt.

Die in der Abb. 167 dargestellten Scherversuche wurden unter den im Erd- und Straßenbau anzunehmenden Spannungsverhältnissen durchgeführt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die untersuchten MV-Schlacken sehr gute Reibungseigenschaften aufweisen. Die ermittelten Reibungswinkel (φ) liegen zwischen 48° und 58° über dem für natürliche Baustoffe (z.B. Feinsand $33 - 42^\circ$, Schotter $35 - 46^\circ$) zu erwartenden Bereich.

Anforderungen gemäß TL Min-StB 2000 an die Scherfestigkeit bestehen nicht.

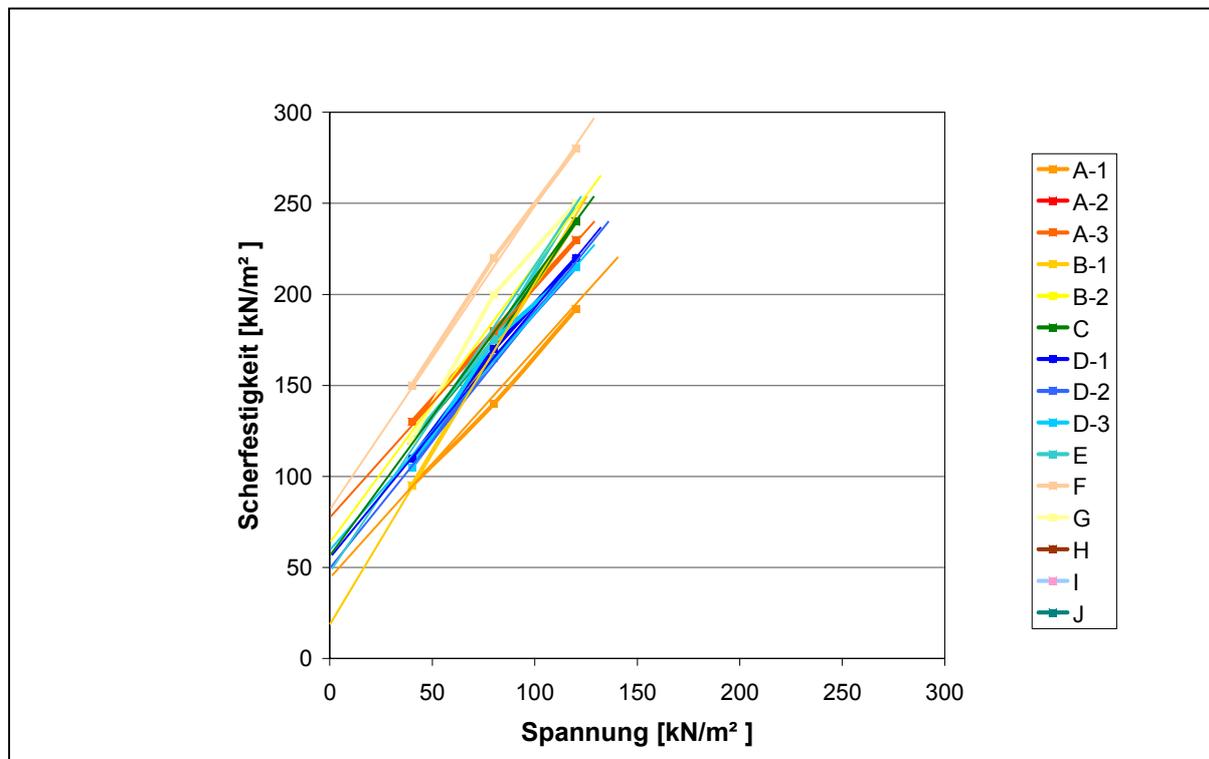


Abb. 167 Scherfestigkeit der untersuchten MV-Schlacken

- **Wasserdurchlässigkeit**

Die Werte für die Wasserdurchlässigkeit [27] gehen aus Abb. 168 hervor, wobei eine gute Wasserdurchlässigkeit für die untersuchten MV-Schlacken mit Werten zwischen $1 \cdot 10^{-4}$ und $2 \cdot 10^{-4}$ m/s festgestellt wird. Bei einem Minimalwert von $7,3 \cdot 10^{-5}$ m/s wird die mittlere Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-5}$ m/s für ungebundene Tragschichten im Straßenbau [31] übertroffen.

Anforderungen an die Wasserdurchlässigkeit bestehen nach der TL Min-StB 2000 nicht. Die Verwaltungsvorschrift des Landes Baden-Württemberg sieht bei Recycling-Material eine Mindestdurchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-5}$ m/s vor [32].

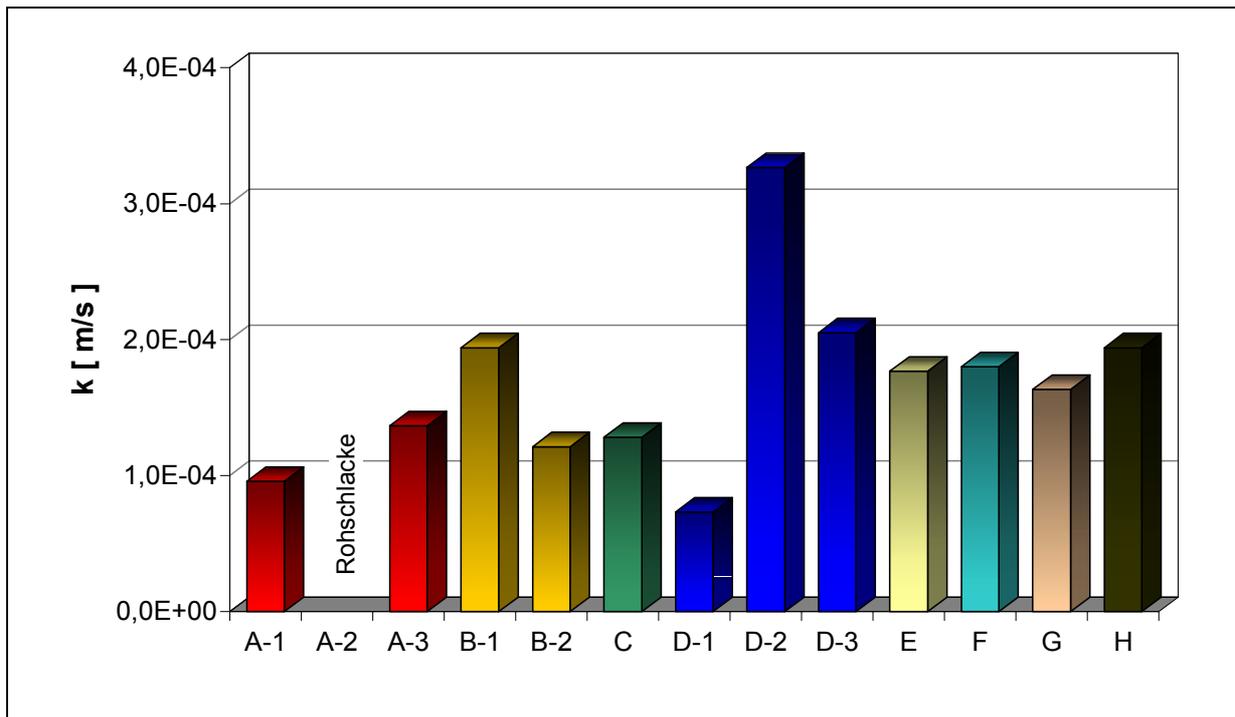


Abb. 168 Wasserdurchlässigkeit der untersuchten MV-Schlacken

7. VERGLEICH DER AKTUELL ERMITTELTEN VERSUCHSERGEBNISSE MIT VORLIEGENDEN DATENSÄTZEN

Zur Abschätzung der Veränderung der umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften der MV-Schlacken während der letzten 10 Jahre werden die aktuell ermittelten Untersuchungsergebnisse den Ergebnissen aus vorliegenden Datensätzen von aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken gegenübergestellt und bewertet. Die Datenerhebung erfolgte im Rahmen eines vom Land Baden-Württemberg geförderten Forschungsvorhabens (PWAB-Projekte Nr. PD 94 145 und PD 94 146) [8], das in den Jahren 1994 bis 1996 in Kooperation zwischen dem Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe und dem Institut für Technische Chemie/Bereich Thermische Abfallbehandlung des Forschungszentrums Karlsruhe durchgeführt wurde. Die aktuellen Untersuchungen konnten an MV-Schlacken aus 8 Müllverbrennungsanlagen, die auch in den Jahren von 1994 bis 1996 beprobt wurden, durchgeführt werden.

Die Umweltverträglichkeit der untersuchten MV-Schlacken wurde jeweils mit dem in Deutschland standardisierten DEV S4-Test [12] bestimmt, der Aussagen über ein mögliches Gefährdungspotential eines bestimmten Stoffes liefert. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgt im Hinblick auf die Veränderung der Konzentrationen ausgewählter Parameter auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA [3] und TL Min-StB 2000 [2]. Die bautechnischen Untersuchungen basieren auf ausgewählten Parametern der RG Min-StB [30], wobei die Bewertung anhand der Vorgaben der TL Min-StB 2000 erfolgte.

Im Folgenden werden die arithmetischen Mittelwerte sowie die Maximal- und Minimalwerte aufgeführt und vergleichend bewertet.

7.1 UMWELTVERTRÄGLICHKEIT

Ein Vergleich der Konzentrationen der DEV S4-Eluate der MV-Schlacken aus den Jahren 2002 bis 2004 mit den Ergebnissen aus den Jahren 1994 bis 1996 zeigt (Abb. 169):

- Die pH-Werte der aktuellen Daten sowie der PWAB-Daten sind sehr ähnlich und liegen jeweils zwischen ca. 9 und 12. Damit halten die pH-Werte der MV-Schlacken die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 (pH 7 - 13) ein.
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit zeigen eine deutliche Abnahme in den aktuell ermittelten Daten von ca. 220 auf 120 mS/m. Außerdem wird eine größere Spannweite der Minimal- und Maximalwerte in den PWAB-Daten festgestellt (120 - 880 mS/m). Der Zuordnungswert der LAGA von 600 mS/m und die Grenzwerte der TL Min-StB 2000 von 600 mS/m (HMVA 2) und 250 mS/m (HMVA 1) werden jedoch eingehalten.
- Die Zinkgehalte sind in den aktuellen Daten sehr gering und liegen häufig nahe der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Neben der starken Abnahme der Mittelwerte von ca. 100 auf 20 µg/l, wird auch eine deutliche Abnahme der Spannweiten beobachtet. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l werden jedoch in beiden Datensätzen deutlich unterschritten.
- Die Mittelwerte der Bleigehalte zeigen ebenfalls eine deutliche Abnahme in den aktuell ermittelten Daten, wobei die Eluatgehalte meistens unterhalb der Nachweisgrenze von 10 µg/l liegen. Die Maximalwerte erreichen 34 µg/l, während die Bleigehalte in den PWAB-Daten einen Mittelwert von 63 µg/l und erheblich größere Spannweiten aufweisen. Damit werden die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 50 µg/l nur von den Mittelwerten der aktuell ermittelten Daten eingehalten.

- Die Mittelwerte von Kupfer sind in den aktuellen Datensätzen deutlich von ca. 140 auf 270 µg/l angestiegen, wobei auch der Maximalwert deutlich erhöht ist (694 µg/l). Während die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 300 µg/l von den Mittelwerten eingehalten werden, überschreiten jedoch in 5 aktuell analysierten MV-Schlacken die Kupferwerte dieses Kriterium.
- Die Mittelwerte der Chromgehalte zeigen bei ebenfalls reduzierten Spannweiten eine Abnahme von ca. 100 auf 40 µg/l in den aktuell ermittelten Daten. Die Zuordnungswerte der LAGA von 200 µg/l werden von den Mittelwerten beider Datensätze eingehalten, während die Grenzwerte der TL Min-StB 2000 von 50 µg/l nur von den Mittelwerten der aktuell ermittelten Daten unterschritten werden. Jedoch wurde auch in den aktuell ermittelten Daten in 3 MV-Schlacken eine Überschreitung des Grenzwertes von 50 µg/l festgestellt.
- Die Konzentration von Nickel liegt in den aktuell ermittelten Datensätzen ohne Ausnahme unter der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Damit sind die Konzentrationen von Nickel im Vergleich zu den PWAB-Daten deutlich gesunken und halten im Gegensatz zu den PWAB-Datensätzen (Mittelwert: 63 µg/l) die Anforderungen der TL Min-StB 2000 und der LAGA von 40 µg/l ein.
- Die Konzentrationen von Arsen unterschreiten die gerätespezifische Nachweisgrenze von 10 µg/l. Eine Ausnahme stellt ein Wert mit 33 µg/l aus den Jahren 1994 – 1996 dar. Anforderungen von der LAGA und der TL Min-StB 2000 bestehen nicht.
- Die aktuellen Mittelwerte der Chloridkonzentrationen haben im Vergleich zu den PWAB-Datensätzen deutlich von ca. 180 auf 120 mg/l, bei ebenfalls merklich reduzierten Schwankungsbreiten, abgenommen und halten die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 250 mg/l ein, während die Maximalwerte der PWAB-Daten die Anforderungen deutlich überschreiten.
- Die Mittelwerte der Sulfatgehalte nehmen in den aktuell ermittelten Datensätzen im Vergleich zu den PWAB-Daten von ca. 300 auf 240 mg/l ab, jedoch werden größere Schwankungsbreiten festgestellt. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 von 600 mg/l werden deutlich unterschritten.

Ein zusammenfassender Vergleich der Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der aktuell ermittelten Daten mit den PWAB-Daten zeigt, dass die Mittelwerte der Parameter Zink, Blei, Chrom, Nickel, Chlorid, Sulfat sowie der elektrischen Leitfähigkeit deutliche Reduktionen aufweisen. Die gleiche Tendenz zeigt sich auch, mit Ausnahme der Sulfatgehalte, bei Betrachtung der Schwankungsbreiten. Bei den Kupfergehalten wird jedoch in den aktuell ermittelten Daten eine deutliche Zunahme der Mittelwerte und eine Vergrößerung der Schwankungsbreiten festgestellt.

Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 werden von den Mittelwerten der aktuell ermittelten DEV S4-Eluatgehalten eingehalten, während in den PWAB-Daten die Grenzwerte der TL Min-StB 2000 bei den Parametern Blei, Nickel und Chrom überschritten werden.

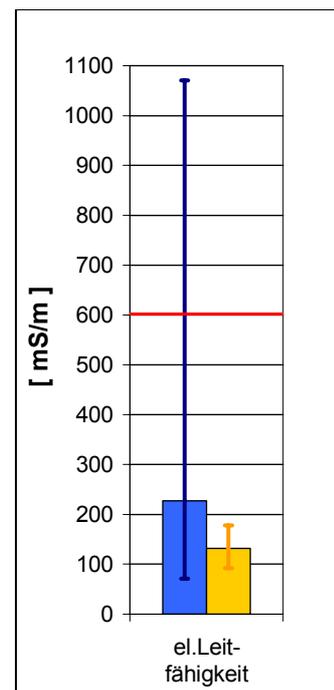
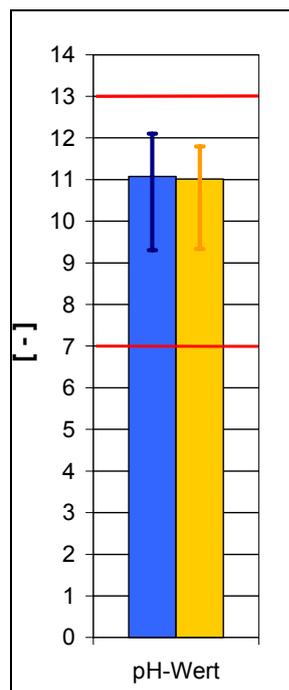
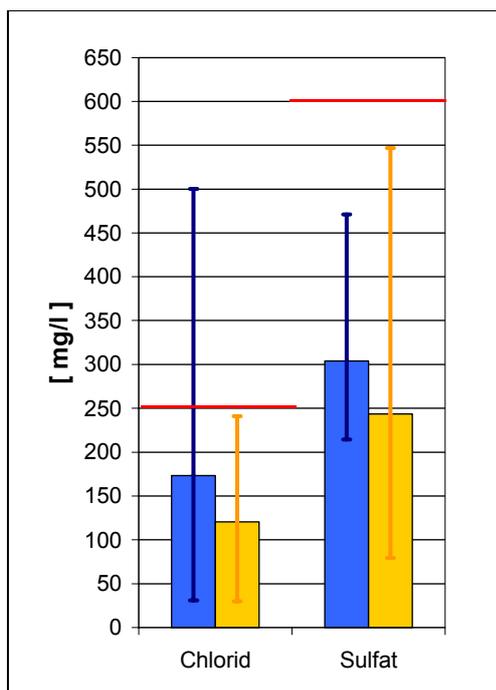
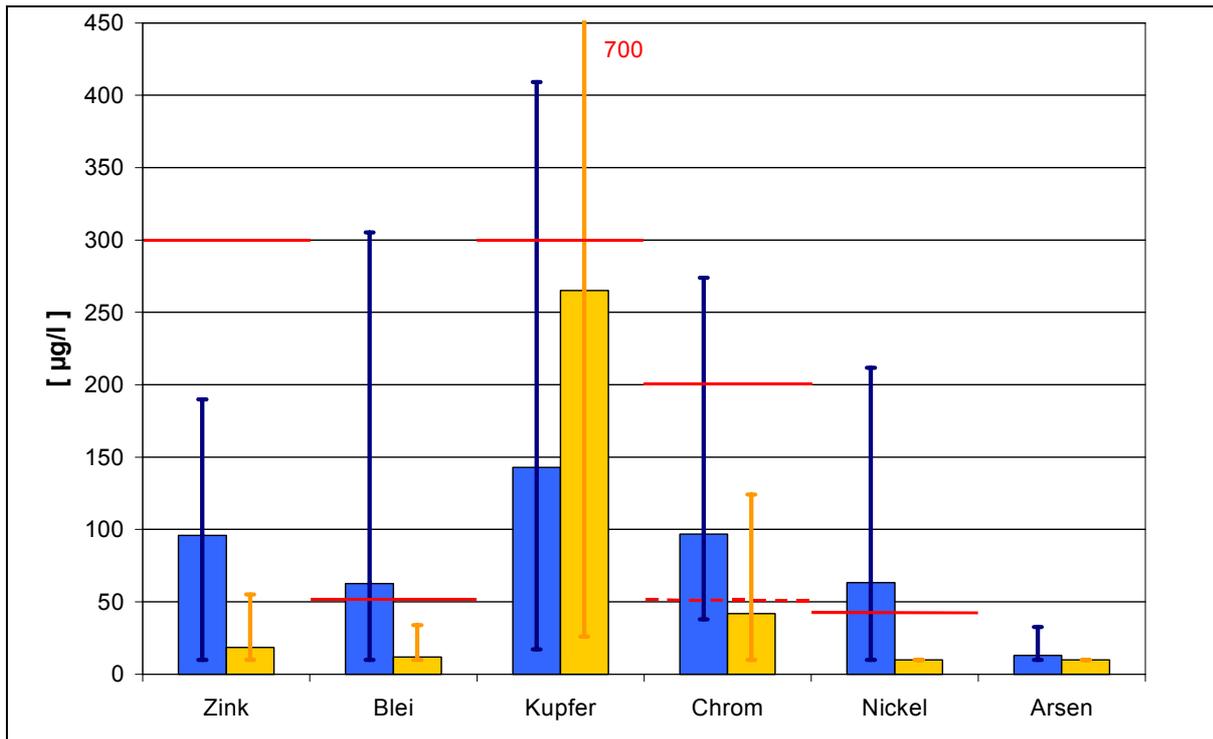


Abb. 169 Vergleich der Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der aktuell untersuchten MV-Schlacken (2002-2004) mit den MV-Schlacken aus den PWAB-Projekten (1994-1996)

7.2 BAUTECHNIK

Ein Vergleich ausgewählter bautechnischer Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacken aus den Jahren 2002 bis 2004 mit den Ergebnissen aus den Jahren 1994 bis 1996 zeigt (Abb. 170 - 172):

Die bautechnischen Parameter der aktuell ermittelten Daten und der PWAB-Daten der jeweils untersuchten MV-Schlacken zeigen nur sehr geringe Unterschiede. Die Korngrößenverteilungen der aktuell und der im Rahmen des PWAB-Projektes untersuchten MV-Schlacken sind bis auf ein geringes Ansteigen des Feinkornanteiles in den MV-Schlacken 2002 bis 2004 sehr ähnlich. Die Mittelwerte der Schlagfestigkeit, der Rohdichten, der Schüttdichten und der Proctordichten sind nahezu identisch, während sich bei den abschlämmbaren Bestandteilen und der Kornform geringfügige Zunahmen in den aktuell ermittelten Daten zeigen. Dasselbe trifft auch auf die Wassergehalte zu, die jedoch witterungsbedingt immer Schwankungen aufweisen können. Eine geringe Abnahme wird bei den Glühverlusten in den aktuell ermittelten Datensätzen festgestellt. Insgesamt betrachtet haben sich die bautechnischen Eigenschaften der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken in den letzten Jahren nicht auffallend geändert.

Ein Vergleich der Mittelwerte der aktuell ermittelten Daten und der PWAB-Daten mit den Grenzwerten der TL Min-StB 2000 zeigt, dass alle betrachteten bautechnischen Parameter die Vorgaben erfüllen. Ein bautechnischer Einsatz der MV-Schlacken ist somit auf der Grundlage der Anforderungen der TL Min-StB 2000 gegeben.

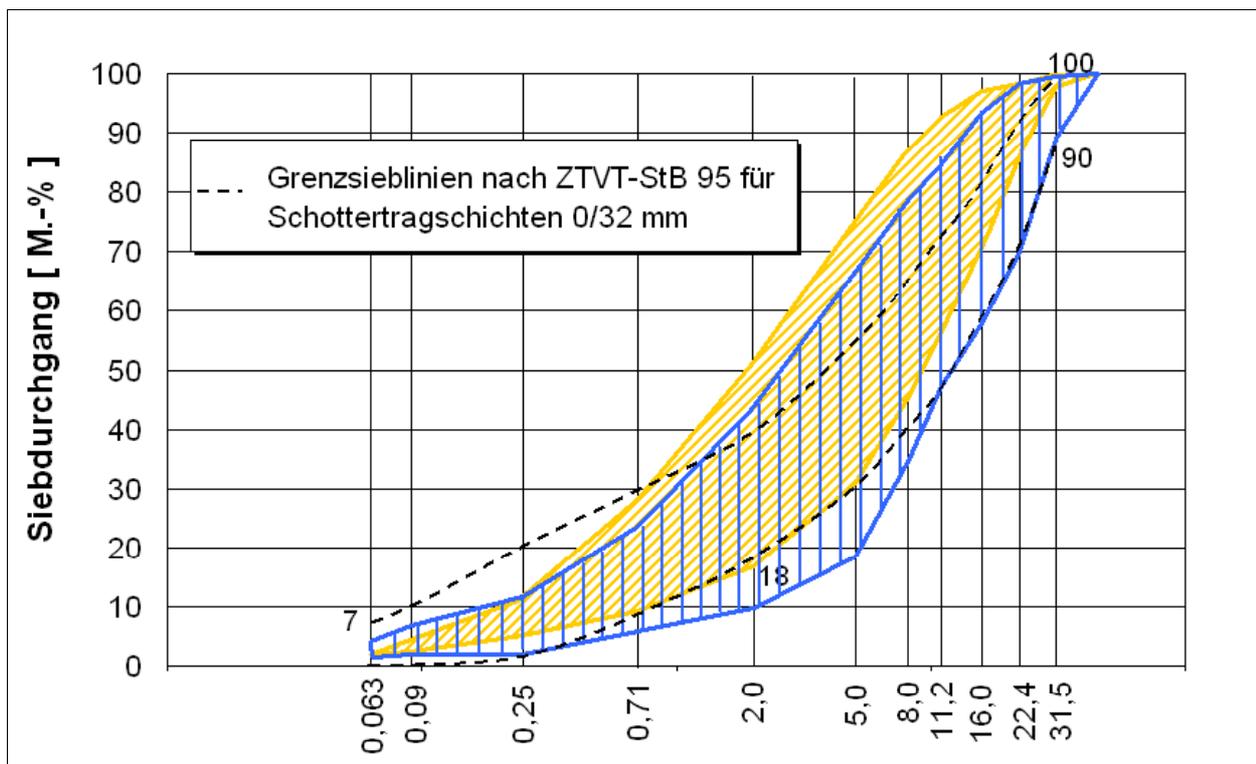


Abb. 170 Vergleich der Sieblinienbereiche der aktuell untersuchten MV-Schlacken (2002-2004) mit den MV-Schlacken aus den PWAB-Projekten (1994-1996)

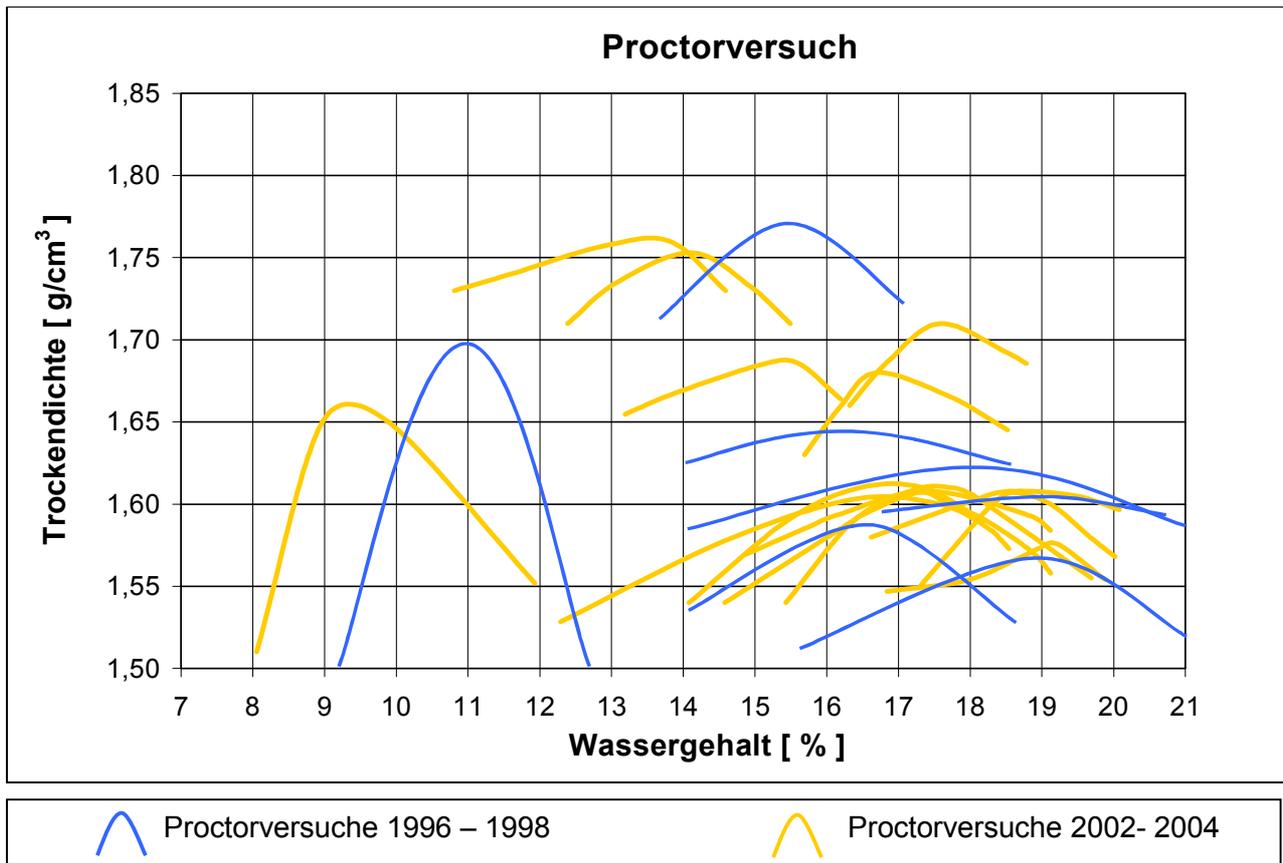


Abb. 171 Vergleich der Ergebnisse der Proctorversuche der aktuell untersuchten MV-Schlacken (2002-2004) mit den MV-Schlacken aus den PWAB-Projekten (1994-1996)

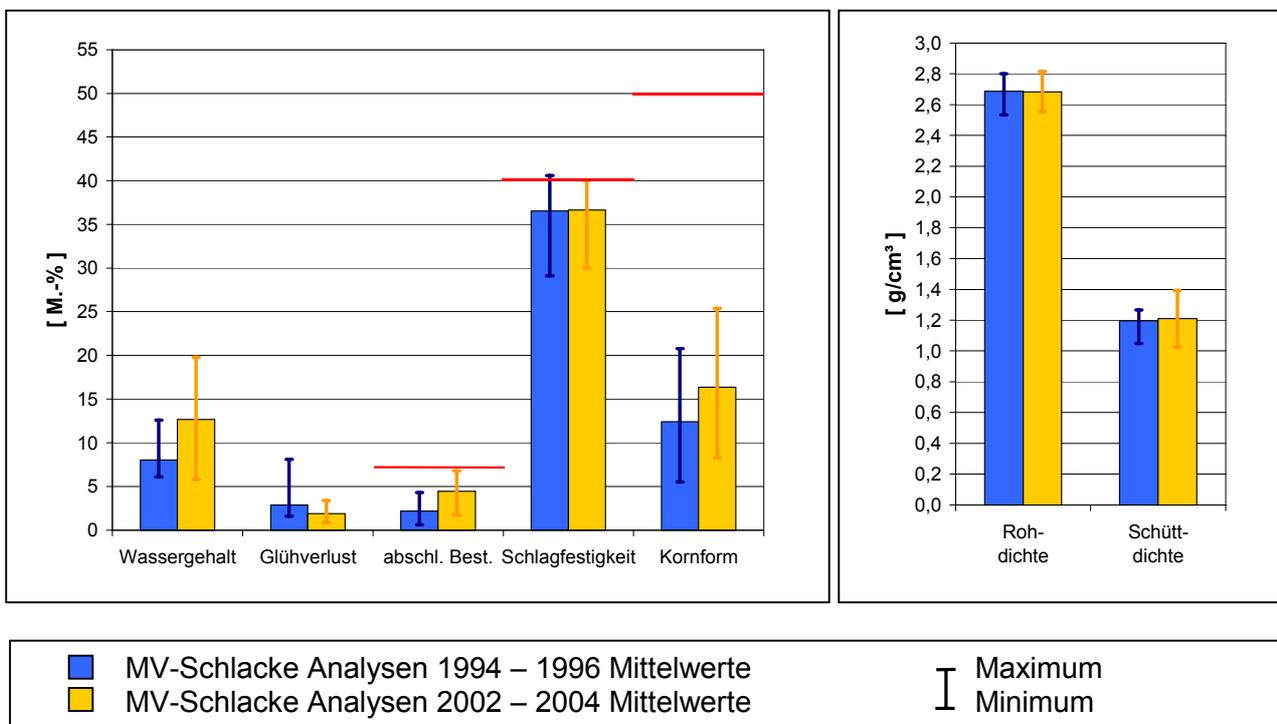


Abb. 172 Vergleich der bautechnischer Parameter der aktuell untersuchten MV-Schlacken (2002-2004) mit den MV-Schlacken aus den PWAB-Projekten (1994-1996)

8. VERGLEICH DER UMWELTVERTRÄGLICHKEIT DER UNTERSUCHTEN MV-SCHLACKEN MIT ANDEREN INDUSTRIELLEN NEBENPRODUKTEN

Zur Einordnung des Elutionspotentials der untersuchten MV-Schlacken wurden die Mittelwerte der 15 Einzeluntersuchungen der ermittelten DEV S4-Eluatgehalte den Daten anderer industrieller Nebenprodukte mit folgendem Ergebnis gegenübergestellt (Abb. 173):

- Die pH-Werte der industriellen Nebenprodukte liegen im basischen Bereich zwischen 8,5 und 12,2, während der Mittelwert der MV-Schlacken bei 11,0 liegt.
- Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit zeigen die größten Schwankungsbreiten von 3 bis 466 mS/m, wobei der höchste Wert bei der Steinkohlenflugasche gemessen wurde. Damit liegt der Mittelwert der elektrischen Leitfähigkeit der untersuchten MV-Schlacken mit ca. 130 mS/m erheblich unter dem Wert der Steinkohlenflugasche, jedoch auch deutlich über den festgestellten Werten der anderen industriellen Nebenprodukten.
- Die Zinkgehalte sind in allen untersuchten Materialien sehr gering und liegen zwischen der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l und ca. 18 µg/l (Mittelwert der MV-Schlacken).
- Die festgestellten Bleigehalte sind ebenfalls in allen untersuchten Materialien sehr niedrig und liegen zwischen der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l und 28 µg/l, die für Schmelzkammergranulat und Hochtemperaturschlacken festgestellt werden. Die Mittelwerte der untersuchten MV-Schlacken liegen mit 12 µg/l im mittleren Bereich.
- Die Kupfergehalte der industriellen Nebenprodukte sind sehr niedrig und bewegen sich nahe der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l. Der Mittelwert der untersuchten MV-Schlacken zeigt hier mit ca. 260 µg/l gegenüber den anderen industriellen Nebenprodukten deutlich höhere Werte.
- Die Chromgehalte der untersuchten Materialien liegen zwischen der gerätespezifischen Nachweisgrenze von 10 µg/l und 60 µg/l der Elektroofenschlacke. Für die Steinkohlenflugasche wurde hier mit ca. 380 µg/l ein sehr hoher Wert ermittelt. Die Mittelwerte der untersuchten MV-Schlacken liegen bei ca. 40 µg/l.
- Der deutlich höchste Chloridgehalt wird beim Mittelwert der untersuchten MV-Schlacken mit ca. 120 mg/l festgestellt, während die Chloridgehalte der anderen industriellen Nebenprodukten sehr niedrig sind und max. 8 mg/l betragen.
- Der deutlich höchste Sulfatgehalt wird in der Steinkohlenflugasche mit ca. 1.050 mg/l gemessen, während der Mittelwert der MV-Schlacken bei 210 mg/l liegt und die restlichen industriellen Nebenprodukte Werte zwischen 1 mg/l und ca. 70 mg/l aufweisen.

Zusammenfassend zeigen die Mittelwerte der ausgewählten Parameter der DEV S4-Eluate der untersuchten MV-Schlacken vergleichbare Werte mit anderen industriellen Nebenprodukten. Lediglich für Kupfer und Chlorid werden in den untersuchten MV-Schlacken deutlich höhere Werte im Vergleich zu den anderen industriellen Nebenprodukten festgestellt, wobei jedoch die Zuordnungswerte der LAGA und die Grenzwerte der TL Min-StB für MV-Schlacken eingehalten werden.

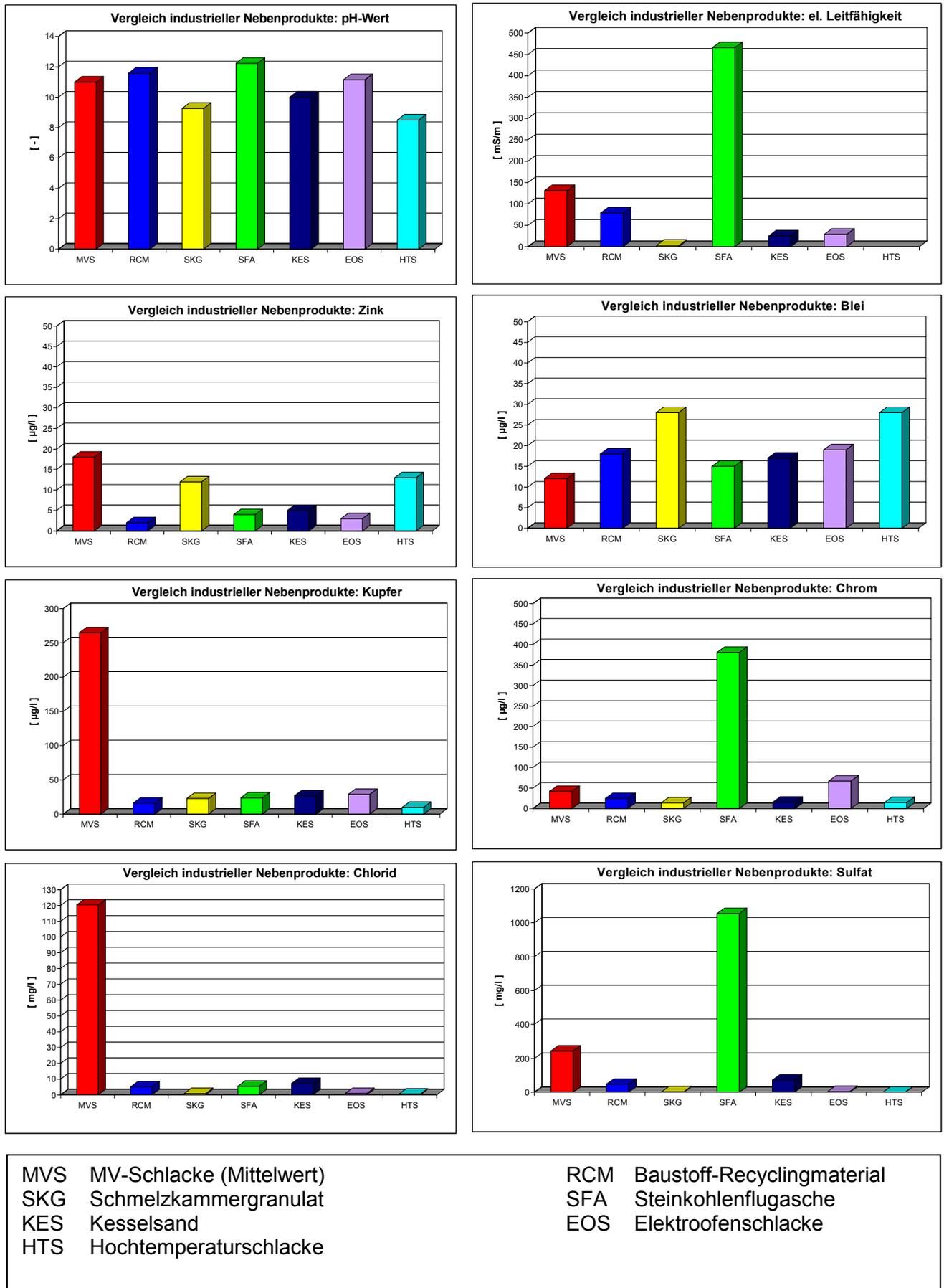


Abb. 173 DEV S4-Eluatgehalte der untersuchten MV-Schlacken sowie verschiedener industrieller Nebenprodukte

9. EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Die Ergebnisse der Permanentversuche sowie der Großversuche an MV-Schlacken zeigen, dass ein gleichbleibender Müllinput bei einer konstanten Fahrweise einer Müllverbrennungsanlage zu einem homogenen Mineralbestand in den MV-Rohschlacken führt. Kurzzeitige Schwankungen in der Müllzusammensetzung spiegeln sich in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraction der MV-Rohschlacken wider, wobei die Änderungen im Müllinput besonders deutlich in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Feinfraction zum Ausdruck kommen.

Die Anteile der in den MV-Rohschlacken während des Verbrennungsprozesses neu gebildeten Glasphasen erlauben zusammen mit dem auftretenden Mineralspektrum sowie insbesondere den mengenmäßigen Anteilen des Sulfates Anhydrit (CaSO_4) und bestimmten Silikaten, wie Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), eine Abschätzung der Gutbett-Temperatur bei der Schlackenbildung. Regelmäßige mineralogische Untersuchungen der MV-Rohschlacken können somit zur Optimierung der Gutbett-Temperaturen und des Verbrennungsprozesses beitragen. Außerdem können durch mineralogische Untersuchungen die Auswirkungen einer Änderung in der Verfahrenstechnik auf die Schlackenstruktur erkannt und als Instrument zur Qualitätssicherung von MV-Rohschlacken eingesetzt werden.

Ein wechselnder Müllinput beeinflusst in erster Linie die mineralogische Phasenzusammensetzung des Feinkornanteiles der MV-Rohschlacken, was sich besonders in den unterschiedlichen Anhydritgehalten (CaSO_4) äußert. Insbesondere die Mitverbrennung von sulfatreichen Sonderfraktionen, wie z.B. größere Mengen an bestimmtem Sperrmüll- oder Gewerbeabfall, können zu einer Zunahme der Anhydritgehalte im Mineralbestand der MV-Rohschlacken führen. Die unterschiedlichen Anhydritgehalte in den MV-Rohschlacken spielen besonders im Hinblick auf das Alterationsverhalten, und damit verbunden, auf die notwendige Ablagerungszeit bis zu einem uneingeschränkten bautechnischen Einsatz einer MV-Schlacke eine bedeutende Rolle, da hohe Anhydritgehalte in der MV-Rohschlacke in der Regel zu längeren Ablagerungszeiten zum Erreichen einer reaktionsträgen, d.h. raumbeständigen MV-Schlacke führen. Die Mitverbrennung von stark sulfathaltigen Stoffströmen (z.B. bestimmte Sperrmüllfraktionen, Tiermehl) in größeren Mengen sollte somit vermieden werden, um die Raumbeständigkeit der MV-Schlacken nicht negativ zu beeinflussen, da die Gewährleistung der Raumbeständigkeit eine unabdingbare Voraussetzung für einen schadensfreien bautechnischen Einsatz einer MV-Schlacke darstellt.

Der silikatisch-oxidische Mineralbestand der Grobfraction, der für die mechanischen Eigenschaften einer MV-Schlacke verantwortlich ist, zeigt in den untersuchten MV-Rohschlacken einen sehr ähnlichen Aufbau und wird in erster Linie von den großen Stoffströmen Hausmüll und Gewerbeabfall gesteuert, wobei unterschiedliche Anteile dieser Fraktionen im Müllinput keine wesentlichen Änderungen im Mineralspektrum nach sich ziehen. Die mechanischen Eigenschaften der MV-Schlacken können somit, auch bei Änderungen in der Zusammensetzung der großen Stoffströme Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall und Gewerbeabfall, innerhalb bestimmter Schwankungsbreiten als vergleichbar betrachtet werden.

Im Hinblick auf eine Anlagensoptimierung und nachhaltige Qualitätssicherung sollte der Einfluss einer Mitverbrennung, insbesondere von Sonderfraktionen, weiter untersucht werden. Da ein großer Einfluss der jeweiligen Verfahrenstechnik auf die Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken festgestellt wurde, dürfen die Untersuchungsergebnisse jedoch nur anlagenspezifisch betrachtet werden und können daher nur in geringem Umfang auf Müllverbrennungsanlagen mit unterschiedlicher Verfahrenstechnik übertragen werden. Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine Änderung der Zusammensetzung der großen Müllfraktionen Hausmüll, Gewerbeabfall und hausmüllähnlicher Gewerbeabfall tendenziell einen geringeren Einfluss auf die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinfraction der MV-Rohschlacken ausübt als eine unterschiedliche Verfahrenstechnik. Da sich hieraus erhebliche Optimierungspotentiale für einzelne Verfahrenstechniken

ableiten lassen, können zusätzlich durchgeführte Versuche die festgestellten Ergebnisse (z.B. höhere Gutbett-Temperaturen bei Anlagen mit Walzenrost/ Gleichstromfeuerung als bei Anlagen mit Vorschubrost/Mittelstromfeuerung) überprüfen bzw. verifizieren.

Eine regelmäßige Feststellung der mineralogischen Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken kann sowohl als Kontrollinstrument für die Bestimmung der Gutbett-Temperaturen auf dem Verbrennungsrost als auch für die Bestimmung anlagenspezifischer Einflüsse des Müllinputs auf die Schlackequalität eingesetzt werden.

Die Untersuchungen zum Alterationsverhalten und zur Bewertung der Raumbeständigkeit zeigen, dass die MV-Schlacken unterschiedliche Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen aufweisen, d.h. nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten sowohl reaktionsträge (aus mineralogischer Sicht raumbeständige) als auch reaktive (aus mineralogischer Sicht nicht raumbeständige) MV-Schlacken vorliegen. Da die einflussnehmenden Parameter auf das Alterationsverhalten und die Raumbeständigkeit von MV-Schlacken die mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken, die Aufbereitungstechnik und die Art der Ablagerung der MV-Schlacken sind, ergeben sich hieraus folgende Optimierungspotentiale:

- Eine regelmäßige Feststellung der mineralogischen Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken dient der Qualitätssicherung und damit einer ersten Einschätzung des Alterationsverhaltens.
- Außerdem kann durch eine regelmäßige Feststellung der mineralogischen Phasenzusammensetzung der aufbereiteten MV-Schlacken (z.B. nach 4, 8 und 12 Wochen) das jeweilige Potential an alterationsrelevanten Mineralphasen festgestellt werden, auf dessen Grundlage die Aufbereitungsprozesse sowie die Art der Ablagerung anlagenspezifisch optimiert werden können.
- Auf der Basis der schlackespezifischen Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen, die direkt vom Wasserhaushalt und der Möglichkeit des Zutritts von Luft-CO₂ zu den abgelagerten MV-Schlacken abhängen, können Steuerungsmechanismen für den optimalen Ablauf der Alterationsprozesse in Schlackenhalde entwickelt werden, die folgende Parameter berücksichtigen: eine schlackenspezifische Vorlagerung bis zur Aufbereitung, eine Kontrolle des Feuchtegehaltes der abgelagerten MV-Schlacken, eine optimierte NE-Abscheidung sowie eine angepasste Größe und Form der Halde der aufbereiteten MV-Schlacken.
- Das Carbonatisierungsverhalten der MV-Schlacken wird vor allem von der angebotenen Menge an Luft-CO₂, dem Wassergehalt und der Durchlüftungsmöglichkeit der MV-Schlackenhalde beeinflusst. MV-Schlacken, die in Hallen abgelagert werden, zeigen tendenziell geringere Calcitgehalte, da die Zufuhr von Luft-CO₂ in den Halde oft aus Platzmangel nicht wie im Freiland gegeben ist. Die bei einer Hallenablagung teilweise praktizierte Haldebewässerung sollte nicht dauerhaft erfolgen, da zu hohe Wassergehalte während der Ablagerung der MV-Schlacken ungünstige Luft/Wasser-Verhältnisse nach sich ziehen, die die Alterationsreaktionen rapide verzögern. Daher kann eine permanente Bewässerung der MV-Schlacken in Hallen nicht empfohlen werden.
- MV-Schlacken, die im Freiland abgelagert werden, zeigen dagegen häufig eine deutlich stärkere Calcitproduktion, da die Voraussetzungen für eine Luftzirkulation deutlich besser sind. Aufgrund der größeren Menge an Luft-CO₂, die für die Bildung von Calcit (CaCO₃) zur Verfügung steht, wird auch bei höheren Wassergehalten der MV-Schlackenhalde, z.B. nach längeren Regenereignissen, ein gutes Carbonatisierungsverhalten festgestellt. Dauerhaft hohe Wassergehalte (> 20 M.-%) können jedoch auch bei MV-Schlacken, die im Freien abgelagert werden, zu einem verzögerten Alterationsverhalten führen. Aus diesem Grund wird in diesen Fällen ein Umlagern der MV-Schlacken empfohlen, da auf-

grund der Durchmischung der Schlackenhalde ebenfalls ein gutes Carbonatisierungsverhalten erwartet werden kann.

- Eine regelmäßige Charakterisierung des jeweiligen reaktionsträgen/reaktiven Stadiums der MV-Schlacken durch die Bestimmung der alterationsrelevanten Mineralphasen während der Ablagerung der aufbereiteten MV-Schlacken, dient, neben der Kontrolle der Alterationsprozesse, auch als Mittel der Qualitätssicherung, da sichergestellt wird, dass nur raumbeständige MV-Schlacken als Material im Bereich des Bauwesens eingesetzt werden.
- Die Feststellung des jeweiligen Alterationsstadiums kann die bisher vorgeschriebene Ablagerungszeit von drei Monaten durch ein messbares Kriterium zur Beurteilung des Reifegrades einer MV-Schlacke ersetzen und damit die Ablagerungszeit und die dafür entstehenden Kosten für qualitativ höherwertige MV-Schlacken reduzieren.
- Ein dauerhaft bautechnischer Einsatz der MV-Schlacken auf der Basis der bestehenden Regelwerke sowie in der Zukunft höherwertige Einsatzmöglichkeiten von MV-Schlacken, können nur dann gewährleistet werden, wenn die Raumbeständigkeit der MV-Schlacken garantiert werden kann. Insbesondere im Hinblick auf die praxisrelevanten Erfordernisse im Baustellenbetrieb, sollte die Bestimmung der Raumbeständigkeit mit einem Verfahren erfolgen, das möglichst kurzfristig Aussagen zur Raumbeständigkeit zulässt. Ein solches Verfahren ist die Bestimmung der Raumbeständigkeit anhand der Charakterisierung des Reifegrades einer MV-Schlacke, wobei es durch die Feststellung alterationsrelevanter Mineralphasen im Mineralbestand der MV-Schlacken möglich ist, sehr schnell zwischen reaktionsträgen, d.h. im mineralogischen Sinne raumbeständigen MV-Schlacken, sowie reaktiven, d.h. im mineralogischen Sinne nicht raumbeständigen MV-Schlacken, zu unterscheiden. MV-Schlacken im reaktiven Stadium können in Kombination mit erhöhten Metallanteilen wie z.B. Aluminium, bei entsprechenden Milieubedingungen, zu Hydroxidbildungen neigen und zu volumenverändernden Treibreaktionen führen, die das Bauwerk schädigen können. Eine regelmäßige Bestimmung der alterationsrelevanten Mineralphasen dient demnach einerseits zur Qualitätssicherung und andererseits zur Dokumentation der Qualität der jeweils eingebauten MV-Schlacken.

Während stellenweise ein Zusammenhang zwischen Müllinput und bestimmten Eigenschaften der MV-Rohschlacken festgestellt werden kann (z.B. mineralogische Phasenzusammensetzung), ist ein direkter Zusammenhang zwischen Müllinput und den umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken, wie sie als Material im Bereich des Bauwesens eingesetzt werden, nicht eindeutig zu erkennen.

Die Ursachen hierfür liegen an Homogenisierungseffekten, die durch die Vermischung großer Mengen von MV-Rohschlacken im Schlackebunker, während des Transportes der MV-Rohschlacken zur Aufbereitungsanlage, durch die Abtrennung des Überkorns und der Vermischung der MV-Schlacken während der Siebvorgänge bei der Herstellung definierter Körnungen sowie durch Vermischungen beim Aufbau von großen Halde aus aufbereiteten MV-Schlacken im Bereich des MV-Nachlagers stattfinden. Außerdem kommt es durch chemisch-mineralogische Reaktionen während der Ablagerungszeit zu Veränderungen in den mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften der MV-Schlacken. Die teilweise großen Schwankungsbreiten der Eigenschaften der MV-Rohschlacken, die z.B. bei den Permanentversuchen festgestellt wurden, werden durch die Vermischung der MV-Schlacken während des Aufbereitungs- und Ablagerungsprozesses zum großen Teil ausgeglichen, sodass der Einfluss des Müllinputs auf die Eigenschaften der aufbereiteten und abgelagerten MV-Schlacken nicht mehr zu erkennen ist.

Außerdem führen die Homogenisierungseffekte in den großen MV-Schlackenhalde, die in einem bestimmten Zeitraum produziert wurden, in bezug auf die mineralogischen, umweltre-

levanten und bautechnischen Eigenschaften zu einheitlichen MV-Schlacken, die als relativ homogen betrachtet werden können. Daher sollten für die Bewertung einer bautechnischen Verwertung der MV-Schlacken nur die Eigenschaften der aufbereiteten und abgelagerten MV-Schlacken herangezogen werden.

Die Untersuchungsergebnisse der MV-Schlacken zeigen, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 und der LAGA für die umweltrelevanten und bautechnischen Parameter, mit Ausnahme einzelner Überschreitungen, in den MV-Schlacken eingehalten werden und somit ein Einsatz der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken entsprechend den technischen Regelwerken erfolgen kann.

10. WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Die mineralogischen Untersuchungen der MV-Schlacken zeigen, dass sowohl die Fahrweise der Müllverbrennungsanlage (Verfahrenstechnik) als auch die Zusammensetzung des Müllinputs einen sehr starken Einfluss auf die Schlackequalität ausüben. Daher können systematische Untersuchungen beider Parameter, wobei unter Konstanthaltung des einen Parameters, der zweite Parameter kontinuierlich verändert wird, **anlagenspezifische Einflussgrößen** definiert und die Grundlage für weitere Optimierungsprozesse geschaffen werden.

Systematische Untersuchungen zum **mineralogischen Kreislauf** der Feststoffe in einer Müllverbrennungsanlage können Optimierungsmöglichkeiten in den verschiedensten Anlagenbereichen aufzeigen (Abb. 166).

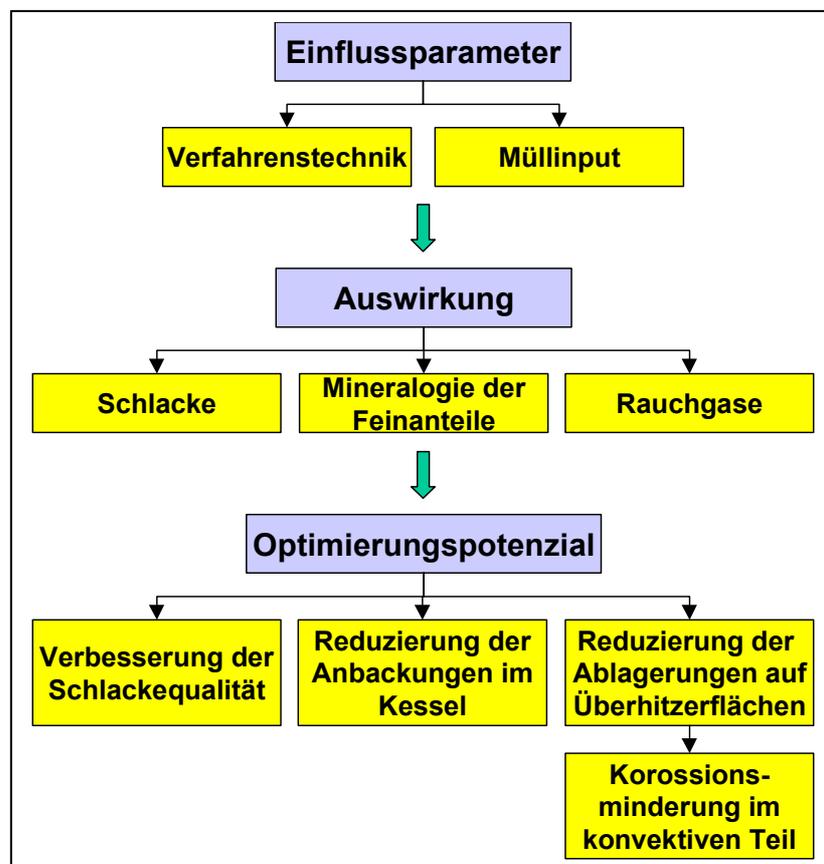


Abb. 174 Optimierungspotentiale in einer Müllverbrennungsanlage

Grundsätzliche Untersuchungen zur Entstehung der Mineralphasen bei spezifischen Gutbett-Temperaturen auf dem Verbrennungsrost stellen, unter Einbeziehungen der jeweiligen verfahrenstechnischen Randbedingungen, wie z.B. Rostsystem oder Feuerraumgestaltung, nicht nur die Voraussetzung zur Optimierung der Schlackenbildung dar, sondern schaffen auch die Voraussetzung für eine Optimierung des Feststoffkreislaufes der gesamten Müllverbrennungsanlage.

So stellen z.B. die Feinanteile der MV-Schlacken den Ausgangsstoff für die Bildung von Anbackungen im Verbrennungsraum dar, da sie mit dem Rauchgasstrom aus dem Gutbett ausgetrieben werden und zusammen mit den Rauchgasen an den Kesselwänden anhaften. Da gerade diese Feinanteile in besonderem Maße von dem aufgegebenen Müllinput und von

den verfahrenstechnischen Randbedingungen abhängig sind, können gezielte Untersuchungen der Einflussmöglichkeiten des Müllinputs auf die aus dem Gutbett ausgetriebenen Feinanteile, die Bildungsmechanismen der Anbackungen im Verbrennungsraum verdeutlichen. Mit Hilfe einer gezielten Steuerung der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Feinanteile, könnten die Verschlackungen im Kesselbereich reduziert und dadurch die Revisionskosten deutlich gesenkt werden.

Außerdem entstehen durch die Reaktionen der metallischen Oberfläche mit den Rauchgasen und den festen Bestandteilen (Feinanteile der MV-Schlacken) des Rauchgasstromes die Ablagerungen auf den Überhitzerflächen und Economizern. In Kombination mit den Rauchgasen verursachen in diesem Bereich der Müllverbrennungsanlage mineralogische Reaktionen innerhalb der Beläge Korrosionen an den Heizflächen, wobei auch hier, neben der Gaszusammensetzung, die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinanteile eine bedeutende Rolle spielt und beide Parameter entscheidend von dem zur thermischen Behandlung aufgegebenen Müllinput sowie von der Verfahrenstechnik gesteuert werden.

11. ZUSAMMENFASSUNG

Da der Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die zukünftige Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von MV-Schlacken bisher weitgehend unbekannt ist, sollte im Rahmen dieses Forschungsprojektes, das vom Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe und dem Institut für Technische Chemie/Thermische Abfallbehandlung des Forschungszentrums Karlsruhe in Kooperation durchgeführt wurde, eine Korrelation zwischen Müllzusammensetzung und den resultierenden mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften der MV-Schlacken hergestellt werden, wobei **folgende Zielsetzungen** im Vordergrund standen:

- Den Einfluss einzelner Stoffgruppen des thermisch zu behandelnden Restmülls auf die Eigenschaften der MV-Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik zu untersuchen,
- eine Bewertung der aktuellen Schlackequitäten und der damit verbundenen Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken durch eine Charakterisierung der frisch produzierten MV-Rohschlacken sowie der aufbereiteten und abgelagerten MV-Schlacken in den Bereichen Mineralogie (Phasenzusammensetzung, Alterationsverhalten, Reaktivität, Raumbeständigkeit), Umweltverträglichkeit (Feststoffchemismus, Elutionsverhalten, Prognose der Langzeitstabilität) und Bautechnik (Eignungsprüfungen für den Einsatz im Straßen und Erdbau) durchzuführen,
- eine mögliche Veränderung der mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften der MV-Schlacken, die im Rahmen dieses Projektes untersucht wurden, durch einen Vergleich mit Daten von MV-Schlacken aus 8 unterschiedlichen Müllverbrennungsanlagen, die aus den Jahren 1994-1996 vorliegen, festzustellen,
- eine Einschätzung der Umweltverträglichkeit der MV-Schlacken durch einen Vergleich von umweltrelevanten Parametern an den untersuchten MV-Schlacken mit anderen in der Baupraxis eingesetzten industriellen Nebenprodukten vorzunehmen sowie
- Empfehlungen für Betreiber von Müllverbrennungsanlagen und Aufbereitungsanlagen von MV-Schlacken zur Verbesserung der MV-Schlackenqualität abzugeben, mit dem Ziel, eine nachhaltige Verwertung der MV-Schlacken als Baustoff im Bereich der Bauindustrie zu gewährleisten.

Die Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von MV-Schlacken werden von den mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften bestimmt, die im wesentlichen von der unterschiedlichen Zusammensetzung des Müllinputs, der jeweiligen Verfahrenstechnik bei der Rostfeuerung, der Art des Aufbereitungsprozesses und der Art und Dauer der Ablagerung beeinflusst werden. Das **Untersuchungsprogramm** wurde nach folgendem Schema ausgearbeitet:

- In 10 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik wurden jeweils bis zu zwei Wochen während des regulären Betriebes anlagenspezifische Müllfraktionen in den Verbrennungsraum eingebracht und unter definierten Verfahrensparametern thermisch behandelt (**Großversuche**).
- In drei Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik wurden zusätzlich während des regulären Betriebes die frisch produzierten MV-Rohschlacken jeweils zwei Wochen in gleichen stündlichen Zeitabständen beprobt, um den kurzfristigen Einfluss des Müllinputs auf die Qualität der MV-Schlacken bestimmen zu können (**Permanentversuche**).

- Während die Großversuche die Eigenschaften von homogenen Schlackenhalde aus einem größeren Produktionszeitraum abbilden, können mit den Permanentbeprobungen kurzfristige Qualitätsschwankungen der MV-Rohschlacken während der Produktion erfasst werden.
- Außerdem wurden in drei Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik während des regulären Betriebes Mehrfachversuche mit unterschiedlicher Müllzusammensetzung jeweils bis zu zwei Wochen durchgeführt, um den Einfluss des Müllinputs bei gleicher Verfahrenstechnik untersuchen zu können.
- Nach der Ausbringung der MV-Rohschlacken aus dem Nassentschlacker wurden diese in den angeschlossenen Aufbereitungsanlagen unter definierten Randbedingungen aufbereitet und in Halde von bis zu 300 t drei Monate abgelagert.
- Die mineralogischen, umweltrelevanten und bautechnischen Untersuchungen erfolgten zur Charakterisierung des Alterationsverhaltens an den frisch produzierten MV-Rohschlacken sowie an den aufbereiteten MV-Schlacken nach einer Ablagerungszeit von 2, 4, 8 und 12 Wochen.

Die Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der **Mineralogie der MV-Rohschlacken** und dem Müllinput zeigen folgende grundsätzliche Zusammenhänge:

- In der Feinfraktion werden im allgemeinen die Sulfate, die in Abhängigkeit der jeweiligen Hydratationsstufe die Raumbeständigkeit mit beeinflussen, sowie die Chloride, die in erster Linie die Salzfrachten steuern, und die Carbonatphase Calcit (CaCO_3), die auf die Schlackebestandteile verfestigend wirkt und in deren Kristallgitter einige Schwermetalle, wie z.B. Blei und Zink fest eingebunden werden können, verstärkt angereichert.
- In der Grobfraktion dagegen werden vorwiegend die stabilen Silikate und Oxide, die für die Stabilität und damit für die mechanischen Eigenschaften einer MV-Schlacke verantwortlich sind, angetroffen, wobei in erster Linie die Neubildung der Silikate Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Äkermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) sowie der Oxide Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) eine bedeutende Rolle spielen. Daneben treten in der Grobfraktion der MV-Rohschlacken auch die sog. Durchläuferminerale wie z.B. Quarz (SiO_2), Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) und Plagioklas ($\text{Na,Ca}[\text{Al}(\text{Al,Si})\text{-Si}_2\text{O}_8]$) auf, die zum Teil als Relikte aus den aufgegebenen Müllfraktionen bei der Bildung der MV-Rohschlacken in die Schlackestruktur mit eingebaut werden.
- Die Anteile der in den MV-Rohschlacken während des Verbrennungsprozesses neu gebildeten Glasphasen erlauben zusammen mit dem auftretenden Mineralspektrum sowie insbesondere mit den mengenmäßigen Anteilen des Sulfates Anhydrit (CaSO_4) eine Abschätzung der Gutbett-Temperatur bei der Schlackenbildung, wobei hohe Glasanteile und geringe Anhydritgehalte Temperaturen $> 1.000^\circ\text{C}$ anzeigen.

Die Ergebnisse der **Permanentversuche** in drei Müllverbrennungsanlagen, die kurzfristige Schwankungen in der Müllzusammensetzung berücksichtigen, zeigen:

- Ein gleichbleibender Müllinput führt bei einer konstanten Fahrweise der Müllverbrennungsanlage zu einem homogenen Mineralbestand in den MV-Rohschlacken.
- Kurzzeitige Schwankungen im Müllinput spiegeln sich in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraktion der beprobten MV-Rohschlacken wider, wobei die Änderungen im Müllinput besonders deutlich in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Feinfraktion zum Ausdruck kommen. Besonders deutlich wird dies in unterschiedlichen Anhydritgehalten (CaSO_4) in den MV-Rohschlacken, die

zum einen durch die Mitverbrennung von sulfatreichen Industrieschlämmen und zum anderen durch eine gesteigerte Mitverbrennung von Gewerbeabfall und/oder Sperrmüll begünstigt wurden. Außerdem kann eine gesteigerte Mitverbrennung von Gewerbeabfall und/oder Sperrmüll zu einer Anreicherung des Carbonates Calcit (CaCO_3) in den MV-Rohschlacken führen.

- In der Grobfraction wird ein wechselnder Müllinput in erster Linie an den unterschiedlichen Gehalten der mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebrachten Relikte Quarz (SiO_2) und/oder Feldspäte (z.B. Kalifeldspat KAlSi_3O_8) festgestellt, während die Gehalte an neu gebildeten Silikaten und Oxiden nahezu gleich bleiben. Das silikatisch-oxidische Schlackengerüst der Grobfraction entsteht im wesentlichen durch die thermische Behandlung der großen Stoffströme Hausmüll und Gewerbeabfall. Da auch bei unterschiedlichen Verhältnissen von Hausmüll zu Gewerbeabfall im Müllinput eine ähnliche mineralogische Phasenzusammensetzung in den MV-Rohschlacken festgestellt wird, kann von einem vergleichbaren Einfluss dieser beiden Müllfraktionen auf die entstehenden Mineralphasen in den MV-Rohschlacken ausgegangen werden.

Die **Großversuche** wurden in 10 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik durchgeführt, wobei in drei Müllverbrennungsanlagen Mehrfachversuche durchgeführt wurden.

Die Ergebnisse der drei **Mehrfachversuche** in jeweils der **gleichen Müllverbrennungsanlage** A, B und D zeigen:

- Ein vergleichbarer Müllinput führt bei gleicher Verfahrenstechnik zu einer nahezu identischen mineralogischen Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Rohschlacken.
- Ein vergleichbarer Müllinput führt bei unterschiedlicher Verfahrenstechnik zu einer geänderten mineralogischen Phasenzusammensetzung der Feinfraktion der MV-Rohschlacken.

Ein Vergleich der **Großversuche in den Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik** A, B, C, D, E, F, G, H, I und J macht deutlich:

- Die **MV-Rohschlacken A-1, A-3, C, E und F** zeigen eine vergleichbare mineralogische Phasenzusammensetzung mit sehr geringen Glasanteilen, die auf relativ niedrige Gutbett-Temperaturen (ca. 900 bis ca. 950°C) bei der Entstehung der betrachteten MV-Rohschlacken schließen lassen. In den Müllverbrennungsanlagen A und C wurden zwischen 80 und 90 % Hausmüll sowie Gewerbeabfall und sonstiges Material thermisch behandelt. Während des Großversuches A-1 wurden außerdem noch zusätzlich geringe Mengen an Tiermehl mitverbrannt, die jedoch, neben den im Vergleich zu der MV-Rohschlacke A-3 geringeren Anhydritgehalten, keinen deutlichen Einfluss auf die mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken ausüben. Die Müllverbrennungsanlagen E und F behandeln neben Hausmüll größere Mengen an Gewerbemüll (> 30 %) sowie zwischen 8 und 15 % Sperrmüll. Auch diese Müllfraktion zeigt in der zugegebenen Menge keine nennenswerte Auswirkung auf die mineralogische Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken. Mit Ausnahme der Anlage E, die mit einem Rückschubrost und einem Natur-Umlauf-Dampferzeuger ausgestattet ist, verfügen die Müllverbrennungsanlagen A, C und F über einen Vorschubrost mit Mittelstromfeuerung.
- Die **MV-Rohschlacken B-1, B-2, D-2 und D-3** zeigen ebenfalls eine ähnliche mineralogische Phasenzusammensetzung, wobei die Anteile der neugebildeten Glasphasen deutlich über den Anteilen der MV-Rohschlacken aus den Müllverbrennungsanlagen A, C, E und F liegen. Auch werden in den MV-Rohschlacken B-1, B-2, D-2 und D-3 überwiegend deutlich geringere Anhydritgehalte festgestellt und es können Gutbett-Temperaturen von

ca. 950 bis 1.000°C abgeschätzt werden. Während in der Anlage B fast ausschließlich Hausmüll mit geringen Anteilen an Gewerbeabfall thermisch behandelt wurde, wurde während der Versuche 2 und 3 in der Müllverbrennungsanlage D bis zu 10 % Sperrmüll und sonstiges Material mitverbrannt. Beide Müllverbrennungsanlagen sind mit einem Walzenrost mit Gleichstromfeuerung ausgestattet.

- Auch die **MV-Rohschlacken A-2, G und J** zeigen eine vergleichbare mineralogische Phasenzusammensetzung und unterscheiden sich von den o.g. MV-Rohschlacken durch die Anteile der neugebildeten Glasphasen, die zwischen den Anteilen der MV-Rohschlacken A-1, A-3, C, E und F und B-1, B-2, D-2 und D-3 liegen und daher auf Gutbett-Temperaturen von ca. 950°C schließen lassen. Während der Müllinput bei den Versuchen A-2 und G nahezu identisch war und neben Hausmüll und Gewerbeabfall zusätzlich geringe Mengen Tiermehl mitverbrannt wurden, wurde in der Müllverbrennungsanlage J neben Hausmüll bis zu 20 % Sperrmüll thermisch behandelt. Alle drei Anlagen verfügen über einen Vorschubrost, wobei die Anlagen G und J mit einer Mittelstromfeuerung und die Anlage A mit einer Gleichstromfeuerung ausgestattet sind.
- Die **MV-Rohschlacken H und I** zeigen ebenfalls ein nahezu identisches Mineralspektrum und weisen die höchsten neugebildeten Glasanteile sowie die niedrigsten Anhydritgehalte auf. Daher können die Gutbett-Temperaturen auf > 1.000°C geschätzt werden. Obwohl kaum Unterschiede im Mineralbestand der MV-Rohschlacken H und I festgestellt werden können, wurden in beiden Anlagen deutlich unterschiedliche Müllfraktionen thermisch behandelt. Die Anlage H ist mit einem Gegenlauf-Überschubrost mit Gegenstromfeuerung, die Anlage I mit einem Vorschubrost mit Mittelstromfeuerung ausgestattet.
- Die mineralogische Phasenzusammensetzung der **MV-Rohschlacke D-1** kann nicht einer anderen untersuchten MV-Rohschlacke zugeordnet werden. Aufgrund ihrer Glasanteile und Anhydritgehalte werden die Gutbett-Temperaturen auf ca. 930°C geschätzt. Neben Hausmüll und gemischten Abfällen wurden während des Versuchablaufes zusätzlich deutliche Mengen an Sperrmüll und sonstigem Material sowie geringe Mengen an Tiermehl mitverbrannt. Die Anlage D arbeitet mit einem Walzenrost mit Gegenstromfeuerung.

Bei der Ablagerung von MV-Schlacken spielen vor allem die Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen eine bedeutende Rolle, wobei vor allem die Carbonate und Sulfate im Mineralbestand der MV-Schlacken für das Alterationsverhalten und die Raumbeständigkeit verantwortlich sind, da während der Alteration Mineralneu- und Mineralumbildungen stattfinden, die im Bereich der Sulfate mit Volumenveränderungen verbunden sein können, die sich auf die Raumbeständigkeit der MV-Schlacken negativ auswirken.

Bei einer optimalen Carbonatisierung der MV-Schlacken wird während der Ablagerungszeit eine deutliche Abnahme des Portlandits ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), verbunden mit einer Zunahme des Calcits (CaCO_3) festgestellt und die abgelagerten MV-Schlacken zeigen im Vergleich zu den MV-Rohschlacken meist einen deutlich höheren Carbonatanteil. Bei einer optimalen Ablagerung der MV-Schlacken wird gleichzeitig neben einer guten Carbonatisierung eine Abnahme des wasserfreien Calciumsulfates Anhydrit (CaSO_4) durch Lösung oder zugunsten einer Bildung wasserhaltiger Calciumsulfatphasen, wie z.B. Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), festgestellt. Außerdem kann durch die Reaktion sulfathaltiger Porenwässer mit einer Calciumaluminatphase primärer Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) entstehen. Geringe Anhydritgehalte bzw. das Fehlen dieser Calciumsulfatphase sprechen für einen weit fortgeschrittenen Alterungsprozess und damit für eine reaktionsträge MV-Schlacke, die eine, aus mineralogischer Sicht, gute Raumbeständigkeit aufweist.

Sind die beschriebenen Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen noch nicht ausreichend abgeschlossen, liegt eine noch reaktionsfreudige MV-Schlacke vor, und es kann bei einem zu frühen bautechnischen Einsatz der MV-Schlacken, der oft mit einer zusätzlichen Wasserzugabe verbunden ist, zu Treiberscheinungen kommen, die das Bauwerk schädigen können.

Sind die beschriebenen Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen jedoch abgeschlossen, kann von einer reaktionsträgen MV-Schlacke ausgegangen werden, bei der im weiteren Verlauf der Ablagerung oder während eines bautechnischen Einsatzes keine weiteren Mineralreaktionen zu erwarten sind, die die Raumbeständigkeit negativ beeinflussen.

Das Alterationsverhalten und die Raumbeständigkeit der MV-Schlacken werden auf der einen Seite von der mineralogischen Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken bestimmt, deren Ausgangspotential an reaktionsfähigen Mineralphasen sowohl auf den unterschiedlichen Müllinput als auch auf die unterschiedliche Verfahrenstechnik bei der Rostfeuerung zurückgeführt werden kann. Auf der anderen Seite spielen jedoch auch die Aufbereitungstechnik, die Art der Ablagerung und die Ablagerungszeit der MV-Schlacken eine bedeutende Rolle, wobei der Wassergehalt der Halden, die Möglichkeit der Zufuhr von Luft-CO₂ und der pH-Wert der Porenwässer die Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen direkt steuern und damit im besonderen Maße die Qualität der bautechnisch verwertbaren MV-Schlacken zu einem bestimmten Ablagerungszeitpunkt beeinflussen.

Das unterschiedliche Alterationsverhalten der untersuchten MV-Schlacken kann nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten wie folgt bewertet werden:

- Die Mehrfachversuche in den Müllverbrennungsanlagen, die mit unterschiedlicher Müllzusammensetzung bei gleicher Verfahrenstechnik gefahren wurden, zeigen, dass die Qualität der MV-Rohschlacken innerhalb gewisser Bandbreiten immer Schwankungen unterworfen ist, die auf das Anfangspotential der alterationswirksamen Mineralphasen zurückgeführt werden können, die, neben dem Müllinput, besonders von den Verbrennungsbedingungen auf dem Rost und den Reaktionen im Nassentschlacker beeinflusst werden. Daneben zeigen die Mehrfachversuche jedoch auch sehr deutlich, dass der Aufbereitungstechnik der MV-Schlacken eine besondere Bedeutung zukommt, da während der Aufbereitung und Ablagerung der MV-Schlacken Homogenisierungseffekte innerhalb der MV-Schlackenhalde festgestellt werden, die nach einer bestimmten Ablagerungszeit vergleichbare Eigenschaften der unterschiedlichen MV-Rohschlacken erzeugen.
- Die Einzelversuche zeigen, dass die MV-Schlacken unterschiedliche Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen aufweisen, sodass nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten sowohl reaktionsträge (aus mineralogischer Sicht raumbeständige) als auch reaktive (aus mineralogischer Sicht nicht raumbeständige) MV-Schlacken vorliegen.
- Das unterschiedliche Carbonatisierungsverhalten während einer Ablagerungszeit von drei Monaten wird besonders an den verschiedenen Verläufen der Calcitbildung (CaCO₃) deutlich, wobei 7 MV-Schlacken ein gutes, 4 MV-Schlacken ein verzögertes und 4 MV-Schlacken ein mangelndes Carbonatisierungsverhalten aufweisen. Das Carbonatisierungsverhalten der MV-Schlacken wird vor allem von der angebotenen Menge an Luft-CO₂, dem Wassergehalt und der Durchlüftungsmöglichkeit der MV-Schlackenhalde beeinflusst.
- Als weiteres Kriterium für die Charakterisierung des Alterationsverhaltens wird die Reaktivität der MV-Schlacken nach einer Ablagerungszeit von drei Monaten herangezogen, die vor allem von den Sulfatreaktionen gesteuert wird. Hier zeigen 11 MV-Schlacken ein reaktionsträges Verhalten während lediglich 4 MV-Schlacken als reaktiv eingestuft werden müssen. In diesen reaktiven MV-Schlacken muss noch mit weiteren Mineralreaktionen gerechnet werden, die mit Volumenänderungen verbunden sind. Die Reaktivität, und damit das Maß für die Beurteilung der Raumbeständigkeit, wird besonders von den Anhydritgehalten (CaSO₄) in den MV-Rohschlacken gesteuert. Daneben spielt die Geschwindigkeit, mit der die Auflösung bzw. die Umwandlung des Anhydrits in sekundäre Sulfatphasen abläuft, eine bedeutende Rolle, wobei besonders die gegenseitige Beeinflussung der Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen deutlich wird, da ein gutes Carbonatisierungsvermögen häufig mit einem kontinuierlichen Sulfatabbau verbunden ist. Hohe

Anhydritgehalte in den MV-Rohschlacken können jedoch die Geschwindigkeit der Carbonatisierungsreaktionen und den Anhydritabbau verzögern.

Die **Umweltverträglichkeit** der untersuchten MV-Schlacken wurde mit dem in Deutschland standardisierten **DEV S4-Test** bestimmt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit erfolgte auf Basis der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und der TL Min-StB 2000. Ein Vergleich der Konzentrationen der DEV S4-Eluatgehalte der MV-Rohschlacken mit den Konzentrationen der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken sowie mit dem Müllinput zeigt:

- Die DEV S4-Eluatgehalte der MV-Rohschlacken und der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken unterscheiden sich sehr stark, da durch die Ablagerung eine deutliche Verbesserung der Umweltverträglichkeit in den abgelagerten MV-Schlacken erreicht wird.
- Während der Ablagerungszeit von drei Monaten kommt es in den Eluaten der MV-Schlacken zu einem Abfallen der pH-Werte infolge der unterschiedlich stark ausgeprägten Carbonatisierungsreaktionen sowie zu einer Reduktion der Werte der el. Leitfähigkeit, die auf Mineralbildungsreaktionen und Auswaschungsvorgänge zurückgeführt werden kann.
- Die sehr deutliche Abnahme der Schwermetallgehalte Zink, Blei und Kupfer in den DEV S4-Eluaten während der Ablagerung der MV-Schlacken geht sowohl auf den Einbau von Zink und Blei in das Kristallgitter des Carbonates Calcit (CaCO_3) als auch auf das Abfallen der pH-Werte zurück.
- Die Eluatgehalte der Schwermetalle Chrom, Arsen, Cadmium, Nickel und Quecksilber werden durch der Ablagerung der MV-Schlacken nicht beeinflusst.
- Während die MV-Schlacken, die im Freiland abgelagert werden, im Laufe der Alteration gleichbleibende bzw. deutlich fallende Chloridgehalte aufweisen, zeigen die MV-Schlacken, die in der Halle abgelagert werden, während der Alteration gleichbleibende bzw. deutlich höhere Chloridgehalte. Die Reduktion der Chloridgehalte der im Freiland abgelagerten MV-Schlacken geht auf Auswaschungseffekte durch auftretende Niederschläge zurück, während es bei der Hallenlagerung der MV-Schlacken zu einer Auskristallisation der Chloride aus den Porenwässern im Laufe der Ablagerung kommen kann. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 für eine HMVA 2 von 250 mg/l werden von den untersuchten MV-Schlacken unterschritten, während die Grenzwerte für eine HMVA 1 von 30 mg/l nicht eingehalten werden können.
- Die Sulfatwerte unterliegen in den MV-Rohschlacken sehr starken Schwankungen. Im Laufe der Ablagerungszeit von drei Monaten wird in den MV-Schlacken größtenteils eine Zunahme der Sulfatgehalte beobachtet, die auf die Bildung von stärker löslichen wasserhaltigen Sulfatphasen zurückgeht. Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 für eine HMVA 2 von 600 mg/l werden von den untersuchten MV-Schlacken eingehalten, während die Grenzwerte für eine HMVA 1 von 250 mg/l von den 7 MV-Schlacken überschritten werden.
- Die Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 für eine HMVA 2 werden von den pH-Werten, der el Leitfähigkeit sowie von den Metallen der drei Monate abgelagerten MV-Schlacken eingehalten, nur vereinzelt treten Überschreitungen des Parameters Kupfer auf. Bei Zugrundelegung der Anforderungen der TL Min-StB 2000 für eine HMVA 1 werden jedoch auch sporadisch Überschreitungen für Chrom festgestellt.
- Insgesamt betrachtet, erfüllen die drei Monate abgelagerten MV-Schlacken mit Ausnahme vereinzelter Überschreitungen, die Vorgaben der Zuordnungs- und Grenzwerte der

LAGA und TL Min-StB 2000 für eine HMVA 2 und können aus der Sicht der Umweltverträglichkeitsprüfung entsprechend den Vorgaben der Regelwerke als Baustoff eingesetzt werden.

- Ein Zusammenhang zwischen Müllinput und den untersuchten Parametern der Umweltverträglichkeitsprüfungen gemäß DEV S4 konnte nicht festgestellt werden.

Die Anforderungen der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000 beschränken sich bezüglich der **Feststoffgehalte** auf die Parameter EOX und TOC für aufbereitete und drei Monate abgelagerte MV-Schlacken, die von den untersuchten MV-Schlacken eingehalten werden. Einen Zusammenhang zwischen Müllinput und Feststoffgehalt konnte nicht festgestellt werden.

Der **Availability-Test** gibt eine Vorstellung davon, welche Menge eines Elementes unter natürlichen Bedingungen maximal in Lösung gehen kann und stellt somit eine worst case-Betrachtung dar, mit deren Hilfe die Langzeitstabilität eines Stoffes beschrieben und eingeschätzt werden kann. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass von den betrachteten Schwermetallen Zink den höchst möglich verfügbaren Anteil, der aus dem Feststoff in den untersuchten MV-Schlacken freigesetzt werden kann, aufweist, gefolgt von Kupfer und Blei, während die Verfügbarkeit von Chrom, Nickel und Cadmium weitaus geringer ist. In bezug auf den Gesamtfeststoffgehalt können im Falle einer worst case-Betrachtung, die dem Availability-Test zugrunde liegt, nur sehr geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt werden, sodass von einer Langzeitstabilität der untersuchten MV-Schlacken ausgegangen werden kann. Ein Zusammenhang der ermittelten Werte auf der Basis des Availability-Tests mit dem Müllinput konnte nicht festgestellt werden.

Die Kurvenverläufe des **Kolonntests** liefern Informationen über das zeitabhängige Lösungsverhalten eines Stoffes, wobei die eluierte Menge eine Abschätzung des Geschehens über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren erlaubt. Die Untersuchungsergebnisse der mit dem Kolonntest geprüften Schwermetalle der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken zeigen, dass nur sehr geringe Mengen der ausgewählten Schwermetalle freigesetzt werden können. Ein Zusammenhang der ermittelten Werte mit dem Müllinput konnte nicht festgestellt werden.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen des Availability-Tests und der Feststoffgehalte macht deutlich, dass von dem maximal verfügbaren Potential der untersuchten Schwermetalle nur sehr geringe Mengen freigesetzt werden können, und dass unter den Bedingungen des Kolonntests von einer Elutionsstabilität der untersuchten MV-Schlacken für kurze bis mittelfristige Zeiträume ausgegangen werden kann.

Eine Bewertung der festgestellten **bautechnischen Parameter** zeigt, dass die Grenzwerte gemäß TL Min-StB 2000 für einen Einsatz im Bereich des Straßenbaus von den untersuchten drei Monate abgelagerten MV-Schlacken im wesentlichen eingehalten werden.

Nur vereinzelt treten Überschreitungen bei der Frost-Tau-Wechsel-Stabilität auf, die jedoch im Erfahrungsbereich auch anderer industrieller Nebenprodukte, wie z.B. Recycling-Material, liegen und nicht von systematischer Natur sind. Außerdem werden bei einigen MV-Schlacken geringe Überschreitungen der Vorgaben für die stoffliche Zusammensetzung festgestellt (Anteile an Metallen und Unverbrannten), die jedoch durch entsprechende Änderungen in der Aufbereitungstechnik (Metallabscheidung, Siebung, Lagerung) leicht zu beheben sind.

Aus bautechnischer Sicht kann somit ein Einsatz der untersuchten MV-Schlacken im Bereich des Straßenbaus entsprechend den Anwendungsbereichen des Merkblattes „MV-Asche“ empfohlen werden.

Zusammenhänge zwischen den ermittelten bautechnischen Prüfergebnissen und dem Müll-input konnten nicht festgestellt werden.

Eine **Vergleich der Umweltverträglichkeit** der untersuchten MV-Schlacken mit anderen in der Bauwirtschaft als Baumaterial eingesetzten **industriellen Nebenprodukten** zeigt, dass die Mittelwerte der festgestellten Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Zink, Blei, Kupfer, Chrom, Chlorid und Sulfat der DEV S4-Eluate der untersuchten MV-Schlacken mit den DEV S4-Eluatwerten von Bauschutt-Recyclingmaterial, Steinkohlenflugaschen, Schmelzkammergranulat, Kesselsand, Elektroofenschlacke und Hochtemperaturschlacken vergleichbar sind. Lediglich für Kupfer und Chlorid werden in den untersuchten MV-Schlacken deutlich höhere Werte im Vergleich zu den anderen industriellen Nebenprodukten ermittelt.

Zur **Abschätzung der Veränderung der umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften** der MV-Schlacken während der letzten 10 Jahre wurden die aktuell ermittelten Untersuchungsergebnisse den Ergebnissen aus vorliegenden Datensätzen von aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken (PWAB-Daten) gegenübergestellt.

Ein Vergleich der Ergebnisse der DEV S4-Eluatuntersuchungen der aktuell ermittelten Daten mit den PWAB-Daten zeigt, dass die Mittelwerte der Parameter Zink, Blei, Chrom, Nickel, Chlorid, Sulfat sowie der elektrischen Leitfähigkeit deutliche Reduktionen aufweisen. Die gleiche Tendenz zeigt sich auch, mit Ausnahme der Sulfatgehalte, bei Betrachtung der Schwankungsbreiten. Bei den Kupfergehalten wird jedoch in den aktuell ermittelten Daten eine deutliche Zunahme der Mittelwerte und eine Vergrößerung der Schwankungsbreiten festgestellt.

Die bautechnischen Parameter der aktuell ermittelten Daten und der PWAB-Daten der jeweils untersuchten MV-Schlacken zeigen nur sehr geringe Unterschiede. Die Korngrößenverteilungen der aktuell und der im Rahmen des PWAB-Projektes untersuchten MV-Schlacken sind bis auf ein geringes Ansteigen des Feinkornanteiles in den MV-Schlacken 2002 bis 2004 sehr ähnlich. Die Mittelwerte der Schlagfestigkeit, der Rohdichten, der Schüttdichten und der Proctordichten sind nahezu identisch, während sich bei den abschlämmbaren Bestandteilen und der Kornform geringfügige Zunahmen in den aktuell ermittelten Daten zeigen. Dasselbe trifft auch auf die Wassergehalte zu, die jedoch witterungsbedingt immer Schwankungen aufweisen können. Eine geringe Abnahme wird bei den Glühverlusten in den aktuell ermittelten Datensätzen festgestellt. Insgesamt betrachtet haben sich die bautechnischen Eigenschaften der aufbereiteten und drei Monate abgelagerten MV-Schlacken in den letzten Jahren nicht auffallend geändert.

Auf der Basis der Untersuchungsergebnisse können folgende **Empfehlungen für die Praxis** gegeben werden:

Die Anteile der in den MV-Rohschlacken während des Verbrennungsprozesses neu gebildeten Glasphasen erlauben zusammen mit dem auftretenden Mineralspektrum sowie insbesondere den mengenmäßigen Anteilen des Sulfates Anhydrit (CaSO_4) und bestimmten Silikaten, wie Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) und Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), eine Abschätzung der Gutbett-Temperatur bei der Schlackenbildung. Regelmäßige mineralogische Untersuchungen der MV-Rohschlacken können somit zur Optimierung der Gutbett-Temperaturen und des Verbrennungsprozesses beitragen. Außerdem können durch mineralogische Untersuchungen die Auswirkungen einer Änderung in der Verfahrenstechnik auf die Schlackenstruktur erkannt und als Instrument zur Qualitätssicherung von MV-Rohschlacken eingesetzt werden.

Die Mitverbrennung von stark sulfathaltigen Stoffströmen (z.B. bestimmte Sperrmüllfraktionen, Tiermehl) sollte bei der thermischen Behandlung von Hausmüll in größeren Mengen vermieden werden, um einer Entstehung größerer Sulfatmengen in den MV-Rohschlacken auszuweichen, damit die Raumbeständigkeit der MV-Schlacken nicht negativ beeinflusst

werden kann, da die Gewährleistung der Raumbeständigkeit eine unabdingbare Voraussetzung für einen schadensfreien bautechnischen Einsatz einer MV-Schlacke darstellt.

Im Hinblick auf eine Anlagenoptimierung und nachhaltige Qualitätssicherung sollte der Einfluss einer Mitverbrennung, insbesondere von Sonderfraktionen, weiter untersucht werden. Da ein großer Einfluss der jeweiligen Verfahrenstechnik auf die Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten der MV-Schlacken festgestellt wurde, dürfen die Untersuchungsergebnisse jedoch nur anlagenspezifisch betrachtet werden.

Eine regelmäßige Feststellung der mineralogischen Phasenzusammensetzung der MV-Rohschlacken dient neben einer Qualitätssicherung auch einer ersten Einschätzung des Alterationsverhaltens. Außerdem kann durch eine regelmäßige Feststellung der mineralogischen Phasenzusammensetzung der aufbereiteten MV-Schlacken (z.B. nach 4, 8 und 12 Wochen) das jeweilige Potential an alterationsrelevanten Mineralphasen festgestellt werden, auf dessen Grundlage die Aufbereitungsprozesse sowie die Art der Ablagerung anlagenspezifisch optimiert werden können.

Auf der Basis der schlackespezifischen Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen, die direkt vom Wasserhaushalt und der Möglichkeit des Zutritts von Luft-CO₂ zu den abgelagerten MV-Schlacken abhängen, können Steuerungsmechanismen für den optimalen Ablauf der Alterationsprozesse in Schlackenhalden entwickelt werden, die folgende Parameter berücksichtigen: eine schlackenspezifische Vorlagerung bis zur Aufbereitung, eine Kontrolle des Feuchtegehaltes der abgelagerten MV-Schlacken, eine optimierte NE-Abscheidung sowie eine angepaßte Größe und Form der Halde der aufbereiteten MV-Schlacken.

Eine regelmäßige Charakterisierung des jeweiligen reaktionsträger/reaktiven Stadiums der MV-Schlacken durch die Bestimmung der alterationsrelevanten Mineralphasen während der Ablagerung der aufbereiteten MV-Schlacken, dient, neben der Kontrolle der Alterationsprozesse, auch als Mittel der Qualitätssicherung, da sichergestellt wird, dass nur raumbeständige MV-Schlacken als Material im Bereich des Bauwesens eingesetzt werden.

Die Feststellung des jeweiligen Alterationsstadiums kann die bisher vorgeschriebene Ablagerungszeit von drei Monaten durch ein messbares Kriterium zur Beurteilung des Reifegrades einer MV-Schlacke ersetzen und damit die Ablagerungszeit und die dafür entstehenden Kosten für qualitativ höherwertige MV-Schlacken reduzieren.

Im Hinblick auf die praxisrelevanten Erfordernisse im Baustellenbetrieb, sollte die Bestimmung der Raumbeständigkeit mit einem Verfahren erfolgen, das möglichst kurzfristige Aussagen zur Raumbeständigkeit zuläßt. Ein solches Verfahren ist die Bestimmung der Raumbeständigkeit anhand der Charakterisierung des Reifegrades einer MV-Schlacke, wobei es durch die Feststellung alterationsrelevanter Mineralphasen im Mineralbestand der MV-Schlacken möglich ist, sehr schnell zwischen reaktionsträger, d.h. im mineralogischen Sinne raumbeständigen MV-Schlacken, sowie reaktiven, d.h. im mineralogischen Sinne nicht raumbeständigen MV-Schlacken, zu unterscheiden.

Weitergehende Forschungen sollten systematische Untersuchungen zum mineralogischen Kreislauf der Feststoffe in einer Müllverbrennungsanlage zum Inhalt haben, da sie Optimierungsmöglichkeiten in den verschiedensten Anlagenbereichen aufzeigen können.

Grundsätzliche Untersuchungen zur Entstehung der Mineralphasen bei spezifischen Gutbett-Temperaturen auf dem Verbrennungsrost stellen, unter Einbeziehungen der jeweiligen verfahrenstechnischen Randbedingungen, wie z.B. Rostsystem oder Feuerraumgestaltung, nicht nur die Voraussetzung zur Optimierung der Schlackenbildung dar, sondern schaffen auch die Voraussetzung für eine Optimierung des Feststoffkreislaufes der gesamten Müllverbrennungsanlage.

So stellen z.B. die Feinanteile der MV-Schlacken den Ausgangsstoff für die Bildung von Anbackungen im Verbrennungsraum dar, da sie mit dem Rauchgasstrom aus dem Gutbett ausgetrieben werden und zusammen mit den Rauchgasen an den Kesselwänden anhaften. Da gerade diese Feinanteile in besonderem Maße von dem aufgegebenen Müllinput und von den verfahrenstechnischen Randbedingungen abhängig sind, können gezielte Untersuchungen der Einflussmöglichkeiten des Müllinputs auf die aus dem Gutbett ausgetriebenen Feinanteile, die Bildungsmechanismen der Anbackungen im Verbrennungsraum verdeutlichen. Mit Hilfe einer gezielten Steuerung der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Feinanteile, könnten die Verschlackungen im Kesselbereich reduziert und dadurch die Revisionskosten deutlich gesenkt werden.

Außerdem entstehen durch die Reaktionen der metallischen Oberfläche mit den Rauchgasen und den festen Bestandteilen (Feinanteile der MV-Schlacken) des Rauchgasstromes die Ablagerungen auf den Überhitzerflächen und Economizern. In Kombination mit den Rauchgasen verursachen in diesem Bereich der Müllverbrennungsanlage mineralogische Reaktionen innerhalb der Beläge Korrosionen an den Heizflächen, wobei auch hier, neben der Gaszusammensetzung, die mineralogische Phasenzusammensetzung der Feinanteile eine bedeutende Rolle spielt und beide Parameter entscheidend von dem zur thermischen Behandlung aufgegebenen Müllinput sowie von der Verfahrenstechnik gesteuert werden.

Literatur

- [1] Reimann, D.O. & Hammerli, H. (1995): Verbrennungstechnik für Abfälle in Theorie und Praxis, Schriftenreihe Umweltschutz, Bamberg.
- [2] Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 2000), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2000.
- [3] Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Heft 20, Merkblatt über Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, Technische Regeln. Erich Schmidt-Verlag, Neuburg, 1995.
- [4] Länderausschuß Bergbau: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen als Versatz unter Tage. LA Bergbau, 21./22.November, 1996.
- [5] Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall), vom 14.05.1993.
- [6] Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (KrW-/AbfG) vom 27. September 1994, geändert durch Gesetz vom 12. September 1996.
- [7] Pfrang-Stotz, G. & Reichelt, J.: Langzeitverhalten und bautechnische Eignung von Müllverbrennungsreststoffen. Unveröffentlichter Abschlussbericht zu den PWAB-Projekten PD 94 145 und PD 94 146, 130 S., 1996.
- [8] Pfrang-Stotz, G. & Reichelt, J.: Qualitätsverbesserung von Müllverbrennungsschlacken. Unveröffentlichter Abschlussbericht zu den PWAB-Projekten PD 96 183 und PD 96 184, 117 S., 1999.
- [9] Pfrang-Stotz, G., Reichelt, J., Roos, R., Seifert, H.: Erste Untersuchungsergebnisse zum Thema: Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die zukünftige Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacken. Tagungsband: VGB-Workshop „Produkte aus der thermischen Verwertung“, Berlin, 18.09.2002.
- [10] Pfrang-Stotz, G. & Reichelt, J. (1999): Charakterisierung und Bewertung von Müllverbrennungsschlacken aus 15 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik. Müll & Abfall 5, 262-268.
- [11] Pfrang-Stotz, G. & Reichelt, J. (2000): Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Bottom Ash: Characteristics and the Use in Road Construction. In: Dhir, R.K. et. al.: Sustainable Construction: Use of Incinerator Ash. Proceedings of the International Symposium organised by the Concrete Technology Unit, University of Dundee on 20-21 March 2000, UK, p. 235-246.
- [12] DIN 38 414, Teil 4: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4), Beuth-Verlag, Berlin, 1984.
- [13] Pfrang-Stotz, G., Reichelt, J. (2002): Technical Properties and Environmental Compatibility of MSWI Bottom Ashes and Other Industrial By-products used as Recycled Materials in Road Construction. IT3 Conference, Proceedings, Incineration & Thermal Treatment Technologies, New Orleans, Louisiana, USA.

- [14] NEN 7341: Determination of leaching characteristics of inorganic components from granular (waste) materials. Netherlands Standardization Institute (NNI), Delft, 1993.
- [15] NEN 7345: Determination of the release of inorganic constituents from construction materials and stabilized waste products. Netherlands Standardization Institute (NNI),
- [16] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau (ZTVT-StB 95); Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1995
- [17] Merkblatt über die Verwendung von Müllverbrennungsasche im Straßenbau, Teil: Müllverbrennungsasche (MV-Asche), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 1986.
- [18] DIN 52 098: Prüfung von Gesteinskörnungen; Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebanalyse, Beuth-Verlag, Berlin, 1990.
- [19] DIN 52 114: Prüfung von Gesteinskörnungen; Bestimmung der Kornform mit dem Kornform-Meßschieber, Beuth-Verlag, Berlin, 1988
- [20] DIN 18 121: Untersuchung von Bodenproben - Wassergehalt - Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung, Beuth-Verlag, Berlin, 1984.
- [21] DIN 52 104: Prüfung von Naturstein; Frost-Tau-Wechsel-Versuch, Verfahren N, Beuth-Verlag, Berlin, 1984.
- [22] DIN 52 115: Prüfung von Gesteinskörnungen; Schlagversuch, Beuth-Verlag, Berlin, 1988
- [23] DIN 52 102: Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Bestimmung von Dichte, Trockendichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität, Beuth-Verlag, Berlin, 1988.
- [24] DIN 52 110: Prüfung von Naturstein; Bestimmung der Schüttdichte von Gesteinskörnungen, Beuth-Verlag, Berlin, 1985.
- [25] DIN 18 127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Proctorversuch, Beuth-Verlag, Berlin, 1997
- [26] DIN 18 137: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Scherfestigkeit; Triaxialversuch, Beuth-Verlag, Berlin, 1990
- [27] DIN 18 130 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit Teil 1: Laborversuche, Beuth-Verlag, Berlin, 1998
- [28] Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Heft 32; LAGA PN 98, Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, Erich Schmidt-Verlag, Neuburg, 2002
- [29] EN 932-2: Prüfung für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 2: Verfahren zum Einengen von Laboratoriumsproben, Beuth-Verlag, Berlin, 1999.
- [30] Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau RG Min-StB 93, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2000.

- [31] Kaltenböck, H. et al. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung, Heft 484: Durchlässigkeitsprüfung ungebundener Tragschichten, Wien 1999
- [32] Verwaltungsvorschrift des Verkehrsministeriums und des Ministeriums für Umwelt über vorläufige Lieferbedingungen für aufbereiteten Straßenaufbruch und Bauschutt zur Verwendung im Straßenbau Baden-Württemberg, 1997
- [33] PFRANG-STOTZ, G., REICHEL, J., ROOS, R. & SEIFERT, H. (2003): Coherence between the Quality of MSWI Bottom Ashes and the Fuel Bed Temperature. Third International Symposium on Waste Treatment Technologies (Thermal, Non-Thermal and Gas Clean-up), June 29-2 July, 2003, Sheffield University, United Kingdom, Flue Gas Treatment, Session 5, p. 1-11.