



Publikationen des
Umweltbundesamtes

**Aufkommen, Qualität und
Verbleib mineralischer
Abfälle**
Endbericht

Forschungsprojekt im Auftrag des
Umweltbundesamtes
FuE-Vorhaben
Förderkennzeichen 204 33 325

**Günter Dehoust
Peter Küppers
Peter Gebhardt
Ulrike Rheinberger
Andreas Hermann**

Mai 2008

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle

FKZ 204 33 325

Darmstadt, Mai 2008

Endbericht

im Auftrag des Umweltbundesamts in Dessau

Autoren:

Günter Dehoust

Peter Küppers

Peter Gebhardt

Ulrike Rheinberger

Andreas Hermann

Öko-Institut e.V.
Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 6226
D-79038 Freiburg
Tel. +49 (0) 7 61 – 45 295-0
Fax +49 (0) 7 61 – 47 54 37

Hausadresse
Merzhauser Straße 173
D-79100 Freiburg
Tel. +49 (0) 761 – 45 295-0
Fax +49 (0) 761 – 47 295-88

Büro Darmstadt
Rheinstrasse 95
D-64295 Darmstadt
Tel. +49 (0) 6151 – 81 91 - 0
Fax +49 (0) 6151 – 81 91 33

Büro Berlin
Novalisstraße 10
D-10115 Berlin
Tel. +49 (0) 30 – 28 04 86-80
Fax +49 (0) 30 – 28 04 86-88

Berichts-Kennblatt

| | | |
|--|---|-----------------------------------|
| 1. Berichtsnummer UBA FB | 2. | 3. Abfallentsorgung |
| 4. Titel des Berichts Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle | | |
| 5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Dehoust, Günter; Küppers, Peter; Gebhardt, Peter; Rheinberger, Ulrike; Hermann, Andreas | 8. Abschlussdatum November 2007 Korrigierte Fassung Mai 2008 | |
| | 9. Veröffentlichungsdatum Mai 2008 | |
| 6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Öko-Institut für angewandte Ökologie e.V. Rheinstraße 95 64295 Darmstadt Deutschland | 10. UFOPLAN-Nr. 204 33 325 | |
| | 11. Seitenzahl 148 (+ Anhang) | |
| 7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau Deutschland | 12. Literaturangaben 97 | |
| | 13. Tabellen und Diagramme 80 (im Berichtsteil) | |
| | 14. Abbildungen 12 (im Berichtsteil) | |
| 16. Zusammenfassung Aufkommen, Verbleib und Qualität von mineralischen Abfällen, Recyclingbaustoffen, industriellen Nebenprodukten und sonstigen mineralischen Materialien werden erhoben und mit verschiedenen Materialwerten verglichen (LAGA-Merkblatt, Eckpunktepapier und Entwurf der Ersatzbaustoffverordnung). Für RC-Baustoffe, HMVA, Böden und Hüttensand wurde ein Analysenprogramm durchgeführt, in dem Feststoffgehalte und Eluate aus Säulentests und Schüttelproben vergleichend untersucht wurden. | | |
| 17. Schlagwörter Stoffstrommanagement; Recycling, mineralische Abfälle; Bodenschutz; Wasserschutz, Schutzgüter; | | |
| 18. Preis - | 19. | 20. |

Report Specifications

| | | |
|--|--|---|
| 1. Report Number UBA FB | 2. | 3. Special waste disposal |
| 4. Report Title | | |
| 5. Author(s), Surname(s), Given Name(s) Dehoust, Günter; Küppers, Peter; Gebhardt, Peter; Rheinberger, Ulrike; Hermann, Andreas | 8. Date of Completion November 2007 adjusted version May 2008 | |
| | 9. Date of Publication | |
| 6. Executing Institution (Name, Addresses) Öko-Institut für angewandte Ökologie e.V. Rheinstraße 95 64295 Darmstadt Germany | 10. UFOPLAN-No. 204 33 325 | |
| | 11. Number of Pages 148 (+Appendix) | |
| 7. Sponsoring Institution (Name, Address) Federal Environmental Agency Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau Germany | 12. Literature Information 97 | |
| | 13. Tables and Diagrams 80 | |
| | 14. Figures 12 | |
| 16. Summary The appearance, disposition and quality of mineral waste, recycling material, industrial by-products and other mineral materials will be investigated and compared with different material values (LAGA-bulletin, key data paper and draft of substitution material regulation). An analysis program was executed for RC-materials, ashes from waste-incineration, soils and granulated cinder, which determined the solid contents and eluates resulting from different methods comparatively. | | |
| 17. Keywords Material stream management; recycling, mineral waste; soil protection; water protection; subjects of protection; environmental impacts; comparative evaluation; | | |
| 18. Price - | 19. | 20. |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Inhaltsverzeichnis..... | I |
| Abbildungsverzeichnis | IV |
| Tabellenverzeichnis | V |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Datenerhebung | 4 |
| 2.1 Erhebung der Abfallmassen und Entsorgungswege..... | 4 |
| 2.2 Erhebung der Schadstoffgehalte | 4 |
| 3 Massenstromanalyse | 6 |
| 3.1 Auswertung der im Eckpunktepapier geregelten Materialien und mineralischen Abfälle | 8 |
| 3.1.1 Materialien und Abfälle aus der Herstellung von Eisen, Stahl und Nichteisenmetallen..... | 8 |
| 3.1.2 Gießereirestsand und Gießerei-Kupolofenschlacke | 16 |
| 3.1.3 Aschen und Schlacken aus der Stein- und Braunkohlefeuerung..... | 19 |
| 3.1.4 Abfälle aus der Verbrennung oder Pyrolyse von Abfällen..... | 24 |
| 3.1.5 Bau- und Abbruchabfälle | 26 |
| 3.1.6 Bodenmaterial..... | 32 |
| 3.2 Auswertung der Abfälle, die nicht im Eckpunktepapier geregelt sind..... | 36 |
| 3.2.1 Bergbauabfälle..... | 37 |
| 3.2.2 Abfälle aus der Herstellung von Keramikerzeugnissen und keramischen Baustoffen sowie von Zement, Branntkalk und Gips..... | 38 |
| 3.2.3 Abfälle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen sowie aus der Sanierung von Boden und Grundwasser | 39 |
| 3.3 Zusammenfassende Darstellung der Mengen und Trends..... | 40 |
| 4 Aufbereitungsverfahren | 45 |
| 4.1 Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen | 45 |
| 4.1.1 Aufbereitung von Bodenaushub (Boden und Steine)..... | 45 |
| 4.1.1.1 Biologische Bodenbehandlung..... | 45 |
| 4.1.1.2 Bodenwäsche | 48 |
| 4.1.1.3 Thermische Bodenbehandlung | 49 |
| 4.1.2 Aufbereitung von Straßenaufbruch | 50 |
| 4.1.3 Aufbereitung von Bauschutt..... | 51 |
| 4.1.4 Aufbereitung von Gleisschotter..... | 53 |
| 4.2 Aufbereitung von Hausmüllverbrennungsaschen | 53 |
| 4.2.1 Konventionelle Aufbereitung | 53 |
| 4.2.2 Weitergehende Aufbereitung | 54 |
| 5 Verwendung aufbereiteter Abfälle und Materialien | 56 |
| 5.1 Einsatz beim Straßen- und Wegebau..... | 56 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2 | Verwendung im Tief- und Landschaftsbau | 57 |
| 5.3 | Verwertung im Deponiebau sowie bei der Rekultivierung von Deponien | 58 |
| 5.4 | Einsatz im Tagebau | 59 |
| 6 | Qualität mineralischer Abfälle | 60 |
| 6.1 | Materialien und Abfälle aus der Herstellung von Eisen, Stahl und Nichteisenmetallen | 61 |
| 6.1.1 | Hochofenstückschlacke (HOS)..... | 62 |
| 6.1.2 | Hüttensand (HS)..... | 63 |
| 6.1.3 | Stahlwerksschlacken (SWS)..... | 64 |
| 6.1.3.1 | LD-Schlacken | 65 |
| 6.1.3.2 | Elektroofenschlacke (EOS) | 66 |
| 6.2 | Gießereiabfälle | 67 |
| 6.2.1 | Gießereirestsande (GRS)..... | 67 |
| 6.2.2 | Gießerei-Kupolofenschlacke (GKOS)..... | 68 |
| 6.3 | Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung | 69 |
| 6.3.1 | Steinkohle-Schmelzkammergranulat (SKG)..... | 69 |
| 6.3.2 | Steinkohlekesselaschen (SKA)..... | 69 |
| 6.3.3 | Steinkohleflugaschen (SFA) | 71 |
| 6.3.3.1 | SFA aus der Trockenfeuerung | 72 |
| 6.3.3.2 | SFA aus der Schmelzkammerfeuerung..... | 73 |
| 6.3.3.3 | SFA aus der Wirbelschichtfeuerung | 74 |
| 6.3.4 | Braunkohleflugaschen (BFA) und -kesselaschen (BKA) | 75 |
| 6.4 | Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA)..... | 75 |
| 6.5 | Bau- und Abbruchabfälle (RC)..... | 81 |
| 6.5.1 | Abgleich der RC Praxisdaten aus der Gütesicherung in NRW und Bayern und nicht qualitätsgesicherter Materialien aus Baden-Württemberg | 83 |
| 6.5.2 | Überprüfung des Einflusses der Körnungen auf die Qualitäten | 87 |
| 6.5.3 | Abgleich weiterer Datensätze | 87 |
| 6.5.4 | Abgleich der Daten aus dem UFOPLAN-Analysenprogramm | 89 |
| 6.6 | Bodenmaterial (BM)..... | 91 |
| 7 | Analysenprogramm | 97 |
| 7.1 | Untersuchungen an RC-Baustoffen, Hausmüllverbrennungsaschen und Hüttensanden | 98 |
| 7.1.1 | Probenbeschaffung und Siebung | 99 |
| 7.1.2 | Einzelproben..... | 99 |
| 7.1.3 | Feststoffanalyse..... | 100 |
| 7.1.4 | Eluatherstellung (Schütteluate)..... | 100 |
| 7.1.5 | Eluatanalyse | 100 |
| 7.1.6 | Untersuchungsergebnisse | 101 |
| 7.2 | Elutionsversuche zur Bestimmung des Schadstoffaustrags aus Böden und verschiedenen Recyclingmaterialien (Säuleneluate)..... | 102 |
| 7.2.1 | Versuchsaufbau..... | 103 |
| 7.2.2 | Versuchsdurchführung..... | 103 |
| 7.2.3 | Ergebniszusammenfassung | 104 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 8 | Stoffstromanalyse Chloride und Sulfate | 105 |
| 8.1 | Inputmengen mineralischer Abfälle und Materialien | 106 |
| 8.1.1 | Materialmengen | 106 |
| 8.1.2 | Sulfateintrag durch Verwertung mineralischer Abfälle und Materialien | 108 |
| 8.1.3 | Chlorideintrag durch Verwertung mineralischer Abfälle und Materialien | 109 |
| 8.2 | Deposition | 110 |
| 8.2.1 | Sulfateintrag mit der Deposition | 110 |
| 8.2.2 | Chlorideintrag mit der Deposition | 112 |
| 8.3 | Düngung | 113 |
| 8.3.1 | Sulfateintrag mit der Düngung | 113 |
| 8.3.2 | Chlorideintrag mit der Düngung | 119 |
| 8.4 | Chlorideintrag durch den Einsatz von Tausalz | 121 |
| 8.5 | Zusammenfassende Gegenüberstellung der Sulfat- und Chloridfrachten | 125 |
| 9 | Modellierung der Abminderung von Stoffkonzentrationen im Grundwasser bei Stoffeinträgen aus Verwertungsmaßnahmen | 126 |
| 10 | Fazit..... | 129 |
| | Literatur | 133 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------------|--|-----|
| Abbildung 3.1 | Aufkommen und Verbleib von Hochofenstückschlacken | 11 |
| Abbildung 3.2 | Aufkommen und Verbleib von Stahlwerksschlacken | 14 |
| Abbildung 3.3 | Aufkommen und Verbleib von Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung | 22 |
| Abbildung 3.4 | Aufkommen und Verbleib von Bauschutt, Straßenaufbruch und Baustellenabfällen | 30 |
| Abbildung 3.5 | Aufkommen und Verbleib von Boden und Steinen | 35 |
| Abbildung 3.6 | Aufkommen und Verbleib der mengenmäßig bedeutendsten mineralischen Abfälle und Materialien | 41 |
| Abbildung 6.1 | Darstellung der Werte für elektrische Leitfähigkeit und Sulfat für den Median (Quadrat, lila) und 80 %-Percentil (Raute, Blau) der erfassten Datensätze zu HOS | 63 |
| Abbildung 6.2 | Darstellung der Werte für elektrische Leitfähigkeit und Sulfat für den Median (Quadrat, lila) und 80 %-Percentil (Raute, Blau) des erfassten Datensatzes zu HS | 64 |
| Abbildung 7.1: | Zusammenstellung der Einzelproben | 98 |
| Abbildung 7.2: | Probenzusammensetzung | 100 |
| Abbildung 7.3: | Mittlere Sieblinie mit Bandbreite aller Sieblinien (RC-Baustoffe) | 101 |
| Abbildung 7.4: | Mittlere Sieblinie mit Bandbreite aller Sieblinien (HMVA) | 102 |
| Abbildung 7.5: | Schematischer Versuchsaufbau im Labor | 104 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------|---|----|
| Tabelle 3.1 | Zuordnung der Einsatz- und Entsorgungswege | 7 |
| Tabelle 3.2 | Aufkommen und Verbleib von Hochofenschlacken in den Jahren 2003 und 2004 | 10 |
| Tabelle 3.3 | Aufkommen und Verbleib von Stahlwerksschlacken in den Jahren 2003 und 2004 | 13 |
| Tabelle 3.4 | Zuordnung der Einsatzwege von Stahlwerksschlacken für die Jahre 2003 und 2004..... | 13 |
| Tabelle 3.5 | Aufkommen und Verbleib von Metallhüttenschlacken in den Jahren 2003 und 2004 | 15 |
| Tabelle 3.6 | Zuordnung der Einsatzwege von Metallhüttenschlacken für die Jahre 2003 und 2004..... | 15 |
| Tabelle 3.7 | Aufkommen und Verbleib von Schlacken aus der thermischen Aluminium- sowie der Silber- Gold- und Platin-Metallurgie im Jahren 2003 nach AVV | 15 |
| Tabelle 3.8 | Aufkommen und Verbleib von Abfällen aus der Eisen- und Stahlindustrie im Jahr 2003 nach AVV | 16 |
| Tabelle 3.9 | Aufkommen und Verbleib von Gießereirestsand und Gießerei-Kupolofenschlacke in den Jahren 2002 bis 2004..... | 18 |
| Tabelle 3.10 | Aufkommen und Verbleib von Abfällen vom Gießen von Eisen und Stahl im Jahr 2003 nach AVV | 18 |
| Tabelle 3.11 | Aufkommen und Verbleib von Abfällen vom Gießen von Nichteisenmetallen im Jahr 2003 nach AVV | 19 |
| Tabelle 3.12 | Aufkommen und Verbleib von Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung in den Jahren 2002 bis 2004..... | 21 |
| Tabelle 3.13 | Zuordnung der Einsatzwege von Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung für die Jahre 2003 und 2004 | 21 |
| Tabelle 3.14 | Aufkommen und Verbleib von Aschen aus der Braunkohlefeuerung in den Jahren 2002 bis 2004..... | 23 |
| Tabelle 3.15 | Zuordnung der Einsatzwege von Aschen aus der Braunkohlefeuerung für die Jahre 2003 und 2004 | 23 |
| Tabelle 3.16 | Aufkommen und Verbleib von Abfällen aus Kraftwerken und anderen Verbrennungsprozessen (außer 19) im Jahr 2003 nach AVV | 24 |
| Tabelle 3.17 | Aufkommen und Verbleib von Hausmüllverbrennungsaschen in den Jahren 2002 bis 2004 und Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten aus der Verbrennung oder Pyrolyse von Abfällen nach AVV..... | 26 |
| Tabelle 3.18 | Aufkommen und Verbleib von Bauschutt, Baustellenabfällen und Straßenaufbruch im Jahr 2002 bis 2004 | 29 |
| Tabelle 3.19 | Verwendung von Recyclingbaustoffen im Jahr 2002 | 30 |
| Tabelle 3.20 | Verwertungswege für Bauschutt und Straßenaufbruch der öffentlichen Hand in den Jahren 2001 und 2003..... | 31 |
| Tabelle 3.21 | Aufkommen und Verbleib von besonders überwachungsbedürftigen Bau- und Abbruchabfällen im Jahr 2003 | 32 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Tabelle 3.22 | Aufkommen und Verbleib von Boden und Steinen im Jahr 2002 und Verwertungswege der öffentlichen Hand im Jahr 2001 und 2003 | 34 |
| Tabelle 3.23 | Aufkommen und Verbleib von Abfällen aus der physikalischen und chemischen Verarbeitung von nichtmetallhaltigen Bodenschätzen nach AVV für das Jahr 2003..... | 35 |
| Tabelle 3.24 | Aufkommen und Verbleib von Boden Steinen und Baggergut im Jahr 2003 | 36 |
| Tabelle 3.25 | Aufkommen und Verbleib von Bergematerial aus dem Bergbau (nicht b.ü.) in den Jahren 2002 bis 2004 | 38 |
| Tabelle 3.26 | Aufkommen und Verbleib von bergbaulichen Abfällen im Jahr 2004 | 38 |
| Tabelle 3.27 | Aufkommen und Verbleib von Abfällen aus der Herstellung von Keramikerzeugnissen und keramischen Baustoffen und Erzeugnissen aus diesen im Jahr 2003 | 39 |
| Tabelle 3.28 | Aufkommen und Verbleib von Abfällen aus der mechanischen Behandlung von Abfällen (AVV-Nr. 19 12) sowie aus der Sanierung von Boden und Grundwasser (AVV-Nr. 19 13) im Jahr 2003..... | 40 |
| Tabelle 3.29 | Aufkommen mineralische Abfälle von 1996 bis 2004 | 42 |
| Tabelle 3.30 | Entsorgung mineralischer Abfälle in den Jahren 1997 bis 2004 | 44 |
| Tabelle 6.1 | Datensatz des FEhS-Instituts zu Hochofenstückschlacke im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs und des Eckpunktepapiers | 62 |
| Tabelle 6.2 | Datensatz des FEhS-Instituts zu Hüttensand im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers | 63 |
| Tabelle 6.3 | Datensatz des FEhS-Instituts zu Hüttensand im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs | 64 |
| Tabelle 6.4 | ABANDA - Datensatz zu SW-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers | 65 |
| Tabelle 6.5 | ABANDA - Datensatz zu SW-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs | 65 |
| Tabelle 6.6 | Datensatz des FEhS-Instituts zu LD-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers | 65 |
| Tabelle 6.7 | Datensatz des FEhS-Instituts zu LD-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs..... | 66 |
| Tabelle 6.8 | Datensatz des FEhS-Instituts zu EO-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers | 66 |
| Tabelle 6.9 | Datensatz des FEhS-Instituts zu EO-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfes..... | 66 |
| Tabelle 6.10 | ABANDA - Datensatz zu Gießereirestsanden im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers | 67 |
| Tabelle 6.11 | ABANDA - Datensatz zu Gießereirestsanden im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs für DOC | 67 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Tabelle 6.12 | ABANDA - Datensatz zu Gießerei-Kupolofenschlacke im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers | 68 |
| Tabelle 6.13 | ABANDA - Datensatz zu Gießerei-Kupolofenschlacke im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs | 68 |
| Tabelle 6.14 | ABANDA – und LAGA - Datensatz zu Steinkohle-Schmelzkammergranulat im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers und VO-Entwurfs | 69 |
| Tabelle 6.15 | Datensätze von VGB, LAGA und ABANDA zu Steinkohle-Kesselaschen im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers und der LAGA M 20 | 70 |
| Tabelle 6.16 | Datensätze von VGB, LAGA und ABANDA zu Steinkohle-Kesselaschen im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfes | 70 |
| Tabelle 6.17 | ABANDA – Datensatz zu SFA der keinem speziellen Feuerungssystem zugeordnet werden kann im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers und VO-Entwurfs | 72 |
| Tabelle 6.18 | Datensätze von VGB, LAGA und ABANDA zu Steinkohle-Flugaschen aus der Trockenkammerfeuerung im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers und VO-Entwurfs | 73 |
| Tabelle 6.19 | Datensätze von VGB, LAGA und ABANDA zu Steinkohle-Flugaschen aus der Schmelzkammerfeuerung im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers und VO-Entwurfs | 74 |
| Tabelle 6.20 | Datensätze von VGB und LAGA zu Steinkohle-Flugaschen aus der Wirbelschichtfeuerung im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers und VO-Entwurfs | 75 |
| Tabelle 6.21 | Gegenüberstellung der ZOW nach LAGA M 20 alt mit denen des Eckpunktepapiers | 76 |
| Tabelle 6.22 | Median, 80%-Perzentil (90%-Perzentil) und Werte“anzahl“ für vier Datensätze zu Hausmüllverbrennungsaschen im Vergleich zu den ZOW des Eckpunktepapiers..... | 76 |
| Tabelle 6.23 | Datensätze LfU BW, ABANDA und ITAD zu Hausmüllverbrennungsaschen im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfes | 77 |
| Tabelle 6.24 | Datensatz UFOPlan zu Hausmüllverbrennungsaschen im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers | 78 |
| Tabelle 6.25 | Datensatz UFOPLAN zu Hausmüllverbrennungsaschen im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfes | 78 |
| Tabelle 6.26 | Median, 80%-Perzentil (90%-Perzentil) und Werte“anzahl“ für drei Datensätze zu Hausmüllverbrennungsaschen im Vergleich zu den ZOW der LAGA M 20 | 79 |
| Tabelle 6.27 | Median, 80%-Perzentil und Werte“anzahl“ für je einen Datensatz zu Hausmüllverbrennungsaschen inkl. Kesselaschen und aus der Verbrennung von Klärschlamm beide Datensätze aus ABANDA im Vergleich zu den ZOW des Eckpunktepapiers | 79 |
| Tabelle 6.28 | Median, 80%-Perzentil und Werte“anzahl“ für je einen Datensatz zu Hausmüllverbrennungsaschen inkl. | |

| | | |
|--------------|--|----|
| | Kesselaschen und aus der Verbrennung von Klärschlamm im Vergleich zu den ZOW der LAGA M 20 | 80 |
| Tabelle 6.29 | Zuordnungswerte für Recyclingbaustoffe: LAGA M 20 im Vergleich zum Eckpunktepapier | 82 |
| Tabelle 6.30 | Datensätze BGRB und KM zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers..... | 83 |
| Tabelle 6.31 | Datensätze LfUBW und BR Bayern zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers | 84 |
| Tabelle 6.32 | Datensätze BGRB und KM zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs..... | 85 |
| Tabelle 6.33 | Datensätze LfUBW und BR Bayern (Weber) zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des VO- Entwurfs..... | 85 |
| Tabelle 6.34 | Datensätze BGRB und KM zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW der LAGA M 20 | 86 |
| Tabelle 6.35 | Datensätze LfUBW und BR Bayern (Weber) zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW der LAGA M 20 | 86 |
| Tabelle 6.36 | Die 905 Proben des alten Datensatzes der BGRB 1999 bis 2003 unterteilt nach den einzelnen Körnungen | 87 |
| Tabelle 6.37 | Median, 80%-Percentil, 90%-Percentil und Werte“anzahl“ für vier Datensätze zu Recyclingbaustoffen (zur Verfügung gestellt durch das LUA-NRW) im Vergleich zu den ZOW des Eckpunktepapiers | 88 |
| Tabelle 6.38 | Abhängigkeit des PAK-Gehalts von dem Anteil an Asphalt und Asphaltgranulat in den 940 Proben der BGRB | 89 |
| Tabelle 6.39 | Datensatz UFOPLAN zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers..... | 89 |
| Tabelle 6.40 | Datensatz UFOPLAN zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfes..... | 90 |
| Tabelle 6.41 | Zuordnungswerte (Feststoff) für Boden bzw. Bodenmaterial: LAGA M 20 im Vergleich zum Eckpunktepapier | 91 |
| Tabelle 6.42 | Zuordnungswerte (Eluat) für Boden bzw. Bodenmaterial: LAGA M 20 im Vergleich zum Eckpunktepapier | 92 |
| Tabelle 6.43 | Median, 80%-Percentil, 90%-Percentil und Werte“anzahl“ für vier Datensätze zu Bodenmaterialien im Vergleich zu den ZOW des Eckpunktepapiers | 93 |
| Tabelle 6.44 | Datensätze DB, BW und BGR zu Bodenmaterialien im Abgleich mit den ZOW BM-1 bis BM-3 des VO-Entwurfes | 94 |
| Tabelle 6.45 | Datensatz HH zu Bodenmaterialien im Abgleich mit den ZOW BM-1 bis BM-3 des VO-Entwurfes..... | 95 |
| Tabelle 6.46 | Datensatz BW zu Bodenmaterialien im Abgleich mit den ZOW BM-0 des VO-Entwurfes..... | 95 |
| Tabelle 6.47 | Median, 80%-Percentil, 90%-Percentil und Werte“anzahl“ für vier Datensätze zu Bodenmaterialien im Vergleich zu den ZOW der LAGA M 20..... | 96 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tabelle 7.1: | Zusammenstellung der Proben mit Angabe der Anzahl und Bundesländer | 99 |
| Tabelle 8.1 | Zusammenfassende Darstellung der Mengen der einzelnen mineralischen Abfälle und Materialien und der Unterscheidung in Abhängigkeit der Einbauart | 107 |
| Tabelle 8.2 | Ermittlung der „durchschnittlichen“ Sulfatkonzentrationen in Mineralischen Abfällen und Materialien als Input in die Stoffstrombilanz | 108 |
| Tabelle 8.3 | „Durchschnittliche“ Sulfatfrachten mineralischer Abfälle und Materialien | 109 |
| Tabelle 8.4 | Ermittlung der „durchschnittlichen“ Chloridkonzentrationen in Mineralischen Abfällen und Materialien | 109 |
| Tabelle 8.5 | „Durchschnittliche“ Chloridfrachten mineralischer Abfälle und Materialien | 110 |
| Tabelle 8.6 | Wichtige schwefelhaltige Stickstoffdünger | 114 |
| Tabelle 8.7 | Wichtige sulfathaltige Phosphatdünger | 114 |
| Tabelle 8.8 | Wichtige schwefelhaltige Kalidünger | 115 |
| Tabelle 8.9 | Ausgewählte NPK-Dünger | 115 |
| Tabelle 8.10 | Sickstoff- und Schwefelfrachten für die wichtigsten schwefelhaltigen Dünger für das Wirtschaftsjahr 2003/2004 | 116 |
| Tabelle 8.11 | Anteil der Schwefelzufuhr nach Düngergruppen | 117 |
| Tabelle 8.12 | Nährstoffgehalte einiger wichtiger Wirtschaftsdünger | 118 |
| Tabelle 8.13 | Sulateinträge durch Düngung und –austräge durch Pflanzenentzug | 119 |
| Tabelle 8.14 | Berechnung des Cl-Gehalts von Kalidüngern, bezogen auf den Nährstoffgehalt K ₂ O | 119 |
| Tabelle 8.15 | Berechnung der Cl-Gehalte einiger beispielhafter PK und NPK Dünger | 120 |
| Tabelle 8.16 | Ermittlung der Chloridfrachten durch die Düngung | 120 |
| Tabelle 8.17 | Verbrauch an Tausalzen (NaCl) auf deutschen Bundesautobahnen und –straßen | 122 |
| Tabelle 8.18 | Darstellung des Gesamtabsatzes an Tausalzen und der Verteilung, der Anwendung auf Fernstraßen und den restlichen Anwendungen | 124 |
| Tabelle 8.19 | Gegenüberstellung der wichtigsten Potenziale für den Eintrag von Sulfat und Chlorid in den Boden bzw. das Grundwasser | 125 |

1 Einleitung

In Deutschland sind die mineralischen Abfälle und Bodenaushub die größten Abfallmengenströme, die bezüglich ihrer Verwertung bislang keiner bundeseinheitlichen Regelung unterliegen. Derzeit existieren in den Bundesländern unterschiedliche Verwertungsvorgaben, die stark voneinander abweichen. In einigen Ländern sind einzelne Recyclingbaustoffe und industrielle Nebenprodukte als Produkte anerkannt, z.B. in NRW und Baden-Württemberg, z.T. liegen ganz eigene Regelungen zur Verwertung mineralischer Abfälle und Materialien vor, anderswo orientiert man sich nach den Vorgaben der LAGA.

Je nach Art (z.B. physikalische Eigenschaften), Schadstoffgehalt und Auslagverhalten stehen zahlreiche Verwertungsoptionen zu Verfügung. Hierzu gehören beispielsweise die Herstellung von Bauprodukten, der Einbau in technische Bauwerke (z.B. im Straßen- und Erdbau) und der Bergversatz. Neben der allgemeingültigen Gesetzgebung zum Schutz des Bodens und der Gewässer wurden verschiedene spezielle Rechtsvorschriften erlassen (z.B. „Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage“ und „Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage“), um die Umweltauswirkungen bestimmter Verwertungsmaßnahmen möglichst gering zu halten. Die Konkretisierung für die Anwendung mineralischer Abfälle in Bauwerken waren bisher neben den Regelungen in der TL Gestein-StB [FGSV 2004a] in den „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln“ der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA-Mitteilung 20) [LAGA 1997] sowie in dem Merkblatt des DIBt „Bewertung der Auswirkungen auf Boden und Grundwasser“ von November 2000 festgeschrieben.

Mit Inkrafttreten des Bodenschutzrechts [BBodSchG 2004] wurden neue fachliche Konzepte des Boden- und Grundwasserschutzes etabliert, die sich auch auf die Anforderungen an die Verwertung von mineralischen Materialien und Abfällen auswirken.

Spätestens nach dem „Tongrubenurteil“ [Notter 2006] ist klar, dass die Zuordnungswerte der LAGA-Mitteilung M 20 den Vorgaben des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes nicht mehr entsprechen. Dies war innerhalb der LAGA bereits frühzeitig erkannt worden. Der Versuch, diese neuen Anforderungen über die LAGA-Arbeitsgruppe bundeseinheitlich in einer überarbeiteten LAGA-Mitteilung verbindlich zu machen, wurde nicht umgesetzt [Bertram 2006]. Die Arbeitsgruppe der LAGA wurde zwischenzeitlich aufgelöst.

Abschließend wurde auf Wunsch des BMU innerhalb der LAGA ein Eckpunktepapier als Grundlage für eine Verwertungsverordnung für mineralische Abfälle erarbeitet [LAGA 2004a]. Demnach sollen beim Einsatz mineralischer Abfälle in technischen Bauwerken, bei bodenähnlichen Anwendungen sowie beim Einsatz in Bauprodukten künftig Begrenzungen gelten, die auf den Grundlagen des GAP-Papiers und

des Geringfügigkeitsschwellenkonzepts zum Schutz von Boden [Bannick 2006] und Grundwasser [Böhme 2006] gemäß der geltenden rechtlichen Vorgaben abgeleitet worden sind. Die gegenüber der alten LAGA M 20 z.T. strengeren Zuordnungswerte im Eckpunktepapier stehen in der Kritik, die Verwertung großer Teile dieser Abfälle zukünftig nicht mehr zu ermöglichen [Demmich 2006] [Bartke 2006] [Dihlmann 2006] [ARGE KWTB 2005].

In einem Workshop des BMU im Februar 2006 in Bonn wurden zudem alle beteiligten Kreise zu dem geplanten Vorgehen beim Erlass der Verwertungsverordnung für mineralische Abfälle gehört. Dabei hat das BMU die vorgesehene Verwertungsverordnung für den Einsatz mineralischer Abfälle und Materialien vorgestellt [Wagner 2006].

Parallel zu diesem Forschungsprojekt führte das LANUV NRW im Auftrag des Umweltbundesamtes ein weiteres Forschungsvorhaben „Ableitung von Materialwerten und Einbaumöglichkeiten mineralischer Ersatzbaustoffe“ durch, in dem einerseits der BMBF-Förderschwerpunkt „Sickerwasserprognose“ auf die neuen Fragestellungen ausgewertet wurden, andererseits die bestehenden Konzepte zur Bewertung von mineralischen Abfällen in Bezug auf Boden- und Grundwasserschutz und damit auch die LAGA-Eckpunkte weiterentwickelt wurden (LANUV 2007).

Des Weiteren wurde das UFO-Forschungsvorhaben „Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung schutzgutbezogener und anwendungsbezogener Anforderungen, des potenziellen, volkswirtschaftlichen Nutzens sowie branchenbezogener, ökonomischer Anreizinstrumente“ (FKZ 205 33 313) vergeben, in dem eine ARGE aus IFEU, Öko-Institut und IÖW im Auftrag des UBA in einer Akteurskooperation mit allen beteiligten Kreisen Möglichkeiten zur Förderung des Einsatzes mineralischer Abfälle, insbesondere auch in qualitativ hochwertigen Anwendungen, erarbeitet. Die Ergebnisse sollen im Frühjahr 2008 vorgelegt werden.

Mit dem Gesetz zur Vereinfachung der abfallrechtlichen Überwachung vom 15. Juli 2006 (BGBl. I, S. 1619) wurde in allen abfallrechtlichen Regelungen der Begriff „besonders überwachungsbedürftig“ durch den Begriff „gefährlich“ ersetzt. Da der vorliegende Bericht nur das Aufkommen und die Entsorgung von Abfällen vor diesem Zeitpunkt behandelt, wurde auf eine Anpassung verzichtet. Gefährliche Abfälle werden daher in diesem Bericht weiterhin als besonders überwachungsbedürftige Abfälle bezeichnet.

Das Projekt wurde durch einen Arbeitskreis aus Behörden und Verbandsvertretern aus der Bau- und Recyclingwirtschaft begleitet (Teilnehmerliste siehe Anhang 1), der die Arbeiten insbesondere durch die Beschaffung sowie Bereitstellung der erforderlichen Daten und Diskussion der Vorgehensweise unterstützte.

Das Projekt steht in engem Kontext zum Ordnungsverfahren für die bundeseinheitliche Ersatzbaustoffverordnung „Verordnung zur Regelung des

Einbaus von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken und zur Änderung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung“ die am 13.11.2007 zur Beteiligung betroffener Kreise versandt wurde. Dieses Projekt soll dabei unterstützen, die Folgen der Verordnungsgebung für die betroffene Wirtschaft abzuschätzen (BMU 2007).

Sowohl durch die Diskussionen mit dem Projektbeirat, als auch durch aktuelle Erfordernisse im Rahmen der Gespräche um die Ausgestaltung der Verordnung, ist das Projekt geändert und ergänzt worden, d.h. im Rahmen der Bearbeitung wurden immer wieder Themen neu aufgegriffen und das Projekt inhaltlich und bezüglich des Bearbeitungszeitraums erweitert. Zunächst wurde als Kontrolle der Vorgehensweise zur geplanten Umstellung des Analysenverfahrens für einzelne mineralischen Ersatzbaustoffe ein umfangreiches Analysenprogramm durchgeführt (siehe Kapitel 7). Eine Stoffstromanalyse über die gesamten Eintragspfade von Chloriden und Sulfaten in Boden und Grundwasser wurde erforderlich, um die Auswirkungen durch die geplante Setzung von Zuordnungswerten auch in Relation zu anderen Emissionsquellen einschätzen zu können (siehe Kapitel 8). Außerdem wurde das Verhalten dieser Stoffe im Grundwasser modelliert, um auch die Effekte der Abminderung von Stoffkonzentrationen im Grundwasser für eine Gesamtbewertung des Einflusses von Baumaßnahmen mit mineralischen Recyclingbaustoffen berücksichtigen zu können (siehe Kapitel 9).

2 Datenerhebung

2.1 Erhebung der Abfallmassen und Entsorgungswege

In einem ersten Schritt wurden zunächst Abfälle und Materialien ausgewählt, die prinzipiell zu den mineralischen Stoffen zählen. Daraus wurden zwei Listen erstellt. Liste 1 enthält Abfälle und Materialien mit den Bezeichnungen, die in Fachveröffentlichungen insbesondere aber im sogenannten Eckpunktepapier der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [LAGA 2004a] häufig verwendet werden. In Liste 2 sind die überwachungsbedürftigen und besonders überwachungsbedürftigen Abfälle nach den Abfallschlüsselnummern der Abfallverzeichnisverordnung [AVV 2002] aufgeführt. Auswahl und Listen wurden anschließend auf einer Veranstaltung mit dem Auftraggeber, Vertretern der für Abfälle und ihre Entsorgung zuständigen Ministerien/Bundesämtern, Verbandsvertretern der Entsorgungswirtschaft und mit weiteren Fachleuten in einem Projektbeirat (Teilnehmerliste siehe Anhang 1) diskutiert und entsprechend der Anregungen ergänzt. Die endgültigen Listen befinden sich in Anhang 2.

In Absprache mit dem Auftraggeber wurden Erhebungsbögen und ein Fragebogen entwickelt (siehe Anhang 3), um die angefallenen Abfallmassen und ihre Entsorgungswege zu erfragen und Analysedaten für Feststoff und Eluat zu erhalten. Diese wurden zusammen mit den beiden Listen an zahlreiche Institutionen (Behörden, Länderarbeitsgemeinschaften und Verbände, siehe Anhang 4) versandt, die die Erhebungs- und Fragebögen zum Teil direkt beantworteten bzw. zur Beantwortung an ihre Mitglieder weiterleiteten.

2.2 Erhebung der Schadstoffgehalte

Zunächst sind die Beteiligten zu Feststoffgehalten, dem Eluatverhalten nach DIN EN 12457 T.4 (früher: DEV S 4) und zu Daten aus weiteren Eluatverfahren (wie z.B. pH stat Verfahren) angefragt worden. Da zu sonstigen Eluatverfahren nur vereinzelte Daten vorlagen und sowohl der laufende Vollzug als auch das vorgelegte Eckpunktepapier ausschließlich auf Feststoffgehalte und das Eluatverhalten nach DIN EN 12457 T.4 basieren, wurde im Projektbeirat beschlossen, die Auswertung darauf zu beschränken.

Es zeigte sich im Verlauf der Datenrecherche, dass überwiegend zusammengestellte und zum Teil schon statistisch ausgewertete Daten zur Verfügung gestellt wurden. Einzelergebnisse, die von den Autoren auswertbar sind, bildeten dabei die Ausnahme. Um dennoch einigermaßen vergleichbare Daten zu erhalten, wurden deshalb von jedem Probensatz der Median, sowie das 80er Percentil abgefragt. Wenn möglich sollten außerdem noch Minima, Maxima und das arithmetische Mittel sowie das 90er Percentil angegeben werden.

Neben den Rückläufen aus der Fragebogenaktion wurde auch die Abfallanalysendatenbank ABANDA gezielt ausgewertet, die vom LUA NRW erstellt wurde, derzeit

noch immer aktualisiert wird und im Internet allen Interessenten zur Verfügung steht (ABANDA 2006).

Die wichtigsten Datensätze sind in Anhang 6 ausführlich dargestellt und den Zuordnungswerten des Eckpunktepapiers und der LAGA M 20 von 1997 gegenübergestellt.

3 Massenstromanalyse

Als Bezugsjahr für die Massenstromanalyse wurde das Jahr 2003 gewählt, da davon ausgegangen werden konnte, dass die Daten zum Anfall und zur Entsorgung für dieses Jahr im Laufe der Bearbeitung vollständig vorliegen würden. Um zumindest kurzfristige Entwicklungen erkennen zu können, wurden soweit möglich auch die Daten der Jahre 2002 und 2004 mit einbezogen.

Eine erste Auswertung erfolgte anhand der Rückläufe der versandten Erhebungsbögen. Darüber hinaus wurden die veröffentlichten Abfall- und Sonderabfallbilanzen der Bundesländer ausgewertet, für Nordrhein-Westfalen die Abfalldatenbanken ASYS und ABILA. Da der Detaillierungsgrad dieser Bilanzen in der Regel nicht ausreichend war, wurden anschließend die Landesumweltämter und/oder die statistischen Landesämter kontaktiert, um genauere Angaben insbesondere zu den Entsorgungswegen und zu den über diese Wege entsorgten Massen zu erhalten. Weiterhin wurden die entsprechenden Abfalldaten beim statistischen Bundesamt abgefragt.

Nicht in allen Fällen konnten die Daten auf diese Weise in ausreichendem Detaillierungsgrad ermittelt werden. Dies lag zum einen daran, dass sie in den Bundesländern nicht entsprechend erhoben wurden, und zum anderen am erforderlichen Zeit- und Kostenaufwand, den die kontaktierten Ämter für eine solche Auswertung hätten aufbringen müssen.

Hinsichtlich des Verbleibs der Abfälle und Materialien wird – soweit dies anhand der vorliegenden Daten und Angaben möglich ist – zusätzlich dargestellt, ob es sich bei den gewählten Einsatz- bzw. Entsorgungswegen um einen offenen Einbau oder um einen Einbau mit Sicherung handelt, um Schadstofffreisetzungspotenziale in Boden und Grundwasser zumindest qualitativ bewerten zu können. Abfälle und Materialien, die entweder in den Prozess zurückgeführt oder nach unter Tage verbracht werden, gehen in die Betrachtung nicht ein, da von ihnen keine Einträge in Boden und Grundwasser zu erwarten sind. Die einzelnen Zuordnungen können Tabelle 3.1 entnommen werden.

Tabelle 3.1 Zuordnung der Einsatz- und Entsorgungswege

| | Offener Einbau [%] | Einbau mit Sicherung [%] | Rückführung u. unter Tage [%] |
|------------------------------------|-----------------------------------|---|--|
| Asphaltmischwerk | | 100 | |
| Aufbereitung | 50 | 50 | |
| Aufhaldung | 100 | | |
| Bau und Rekultivierung v. Deponien | | 100 | |
| Bau und Rekultivierung (sonstige) | 50 | 50 | |
| Baustoff | 50 | 50 | |
| Behandlung | 50 | 50 | |
| Bergversatz | | | 100 |
| Beseitigung | | 100 | |
| Beton/Zement | | 100 | |
| Bodenbehandlung | 80 | 20 | |
| Bodenverbesserung | 100 | | |
| CPB | 50 | 50 | |
| CPB/Immobilisierung | 50 | 50 | |
| Deichbau | 100 | | |
| Deponie | | 100 | |
| Deponiebau | | 100 | |
| Deponiebaustoff | | 100 | |
| Düngemittel | 100 | | |
| Erd-, Tief-, Straßen- u. Wegebau | 50 | 50 | |
| Erdbau | 100 | | |
| Erdbau/Tiefbau | 80 | 20 | |
| Flächenrekultivierung | 100 | | |
| Freizeit- und Sportanlagen | 100 | | |
| Lager | 50 | 50 | |
| Landschaftsbau und -gestaltung | 100 | | |
| Lärmschutzwall | 100 | | |
| Mauersteine/Keramik | | 100 | |
| Recycling | 50 | 50 | |
| SAD | | 100 | |
| SAV | 50 | 50 | |
| Sonstiges | 50 | 50 | |
| Strahlmittel/Strahlsand | 100 | | |
| Straßenbau | 20 | 80 | |
| Straßen- und Tiefbau | 50 | 50 | |
| Straßen- und Wegebau | 50 | 50 | |
| Tagebau | 100 | | |
| UTD | | 100 | X |
| Verbrennung | 50 | 50 | |
| Verfüllbaustoff/Bergbaumörtel | | | 100 |
| Versatzbaustoff | | | 100 |
| Verwertung | 50 | 50 | |
| Wegebau | 80 | 20 | |
| Weiterverarbeitung | 50 | 50 | |
| Wiedereinsatz | | | 100 |
| Zement | | 100 | |
| Zerkleinerung | 50 | 50 | |
| Zwischenlager | 50 | 50 | |

3.1 Auswertung der im Eckpunktepapier geregelten Materialien und mineralischen Abfälle

Im Folgenden werden die im sogenannten Eckpunktepapier der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [LAGA 2004a] aufgeführten Abfälle sowie die Abfälle, die diesen Abfällen ihrer Herkunft nach zugeordnet werden können, näher betrachtet. Zu den im Eckpunktepapier genannten mineralischen Abfällen und Materialien gehören

- Hochofenstückschlacke (HOS),
- Hüttensand (HS),
- Stahlwerksschlacken aus der Erzeugung von Massen- und Qualitätsstählen (SWS),
 - LD-Schlacken (LDS),
 - Elektroofenschlacke (EOS),
- Gießerei-Kupolofenschlacke (GKOS),
- Gießereirestsand (GRS),
- Schmelzkammergranulat aus der Schmelzfeuerung von Steinkohle (SKG),
- Kesselasche aus der Steinkohlenfeuerung (SKA),
- Steinkohlenflugasche aus der Trocken- und Schmelzfeuerung (SFA),
- Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA),
- Recyclingbaustoffe (RC),
 - aufbereiteter Bauschutt,
 - aufbereiteter hydraulisch gebundener Straßenaufbruch,
- Bodenmaterial (BM).

Sie werden kurz beschrieben und ihr Aufkommen und ihr Verbleib werden dargestellt.

3.1.1 Materialien und Abfälle aus der Herstellung von Eisen, Stahl und Nichteisenmetallen

Von den bei der Herstellung von Eisen, Stahl und Nichteisenmetallen anfallenden Materialien und Abfällen werden im Eckpunktepapier der LAGA [LAGA 2004a] lediglich Hochofenstückschlacke und Hüttensand sowie Stahlwerksschlacken aus der Erzeugung von Massen- und Qualitätsstählen (LD-Schlacken, Elektroofenschlacke) aufgeführt. Für die weitere Betrachtung werden Edelstahlschlacken und sekundärmetallurgische Schlacken direkt den Stahlwerksschlacken zugeordnet. Abfälle aus der Verarbeitung von Schlacke (AVV-Nr. 10 02 01) und unbearbeitete Schlacke (AVV-Nr. 10 02 02) sowie Metallhüttenschlacken werden dieser Gruppe zugeordnet, erhalten aber eigene Unterkapitel.

Hochofenstückschlacke und Hüttensand

Hochofenstückschlacke und Hüttensand werden aus der beim Hochofenprozess entstehenden Hochofenschlacke gewonnen.

Zur Gewinnung von Hochofenstückschlacke wird die flüssige Schlacke in dünnen Lagen in Beete gegossen, wo sie langsam an der Luft kristallin erstarrt. Nach einem vorgegebenen Zeitplan wird die Schlacke durch Zusatz von Wasser weiter abgekühlt. Die abgekühlte Hochofenstückschlacke wird in mechanischen Anlagen weiterverarbeitet, wobei die mechanischen Eigenschaften der Schlacke in der Aufbereitung über eine Kombination verschiedener Stufen aus Zerkleinerungsaggregaten, Klassieranlagen und Sortierstufen eingestellt werden [MUNLV 2006].

Im Straßen- und Wegebau finden die Hochofenstückschlacken als Schotter, Splitte, Brechsande oder Mineralstoffgemische insbesondere zur Herstellung von Trag-schichten Anwendung. Auch im Gleisbau werden Hochofenstückschlacken eingesetzt. Bei der Betonherstellung dienen Hochofenstückschlacken als Zuschlagstoff. In gemahlener Form wird Hochofenstückschlacke unter der Bezeichnung Hüttenkalk als Düngemittel in der Landwirtschaft verwendet [MUNLV 2006].

Hüttensand entsteht durch Abschrecken flüssiger Hochofenschlacke. Er ist daher glasig erstarrt, enthält also keine Mineralphasen. Bei der Weiterverarbeitung können über die Steuerung der Schlackegranulationsanlagen die Parameter wie z.B. Kornform und Festigkeit eingestellt werden.

Die latent-hydraulischen Eigenschaften von Hüttensand machen ihn für die Herstellung von Bindemitteln, insbesondere Zementen, besonders geeignet. Hüttensand wird daher primär als Rohstoff in der Zementindustrie eingesetzt. Die Hüttensandgehalte von Portlandhüttenzement (CEM II) betragen bis zu 35 % und die von Hochofenzement (CEM III) 36 bis zu 95 %. Hochofenzemente zeichnen sich insbesondere aus durch geringe Kapillarporosität, gute Nachhärtung, geringere Hydratationswärme und damit verminderte Rissneigung durch Wärmespannungen, erhöhten Widerstand gegen Chloriddiffusion und erhöhte Chloridbindungs-fähigkeit und erhöhten chemischen Widerstand gegenüber z.B. Sulfaten oder Kalk lösender Kohlensäure [MUNLV 2006]. Außerdem besitzen sie höhere Druckfestigkeiten, die sie jedoch im Vergleich zu Portlandzementen erst nach 28 Tagen erreichen [Ehrenberg 2000]. In geringem Umfang findet Hüttensand als Mineralstoff im Straßenbau, als Gesteinskörnung für Beton und als Strahlmittel Verwendung.

Bei der Verwendung von Hochofenstückschlacke und Hüttensand im Straßenbau sind neben den von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen herausgegebenen Merkblätter und Richtlinien [FGSV 1999a] [FGSV 1995a] [FGSV 2001] die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien“ (ZTV) und „Technischen Lieferbedingungen“ (TL) zu beachten.

Aufkommen und Verbleib von Hochofenstückschlacke und Hüttensand in den Jahren 2003 und 2004 sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

Von der im Jahr 2003 angefallenen Hochofenstückschlacke wurden gemäß der Zuordnung nach Tabelle 3.1 1.155.000 Mg für die Berechnung der Sulfat- und Chloridfrachten dem offenen, 1.125.000 Mg dem Einbau mit Sicherung zugeordnet. Im Jahr 2004 erfolgte die Zuordnung zum offenen Einbau mit 898.500 Mg und 881.500 Mg wurden dem Einbau mit Sicherung zugewiesen. Die Mengen für das Lager wurden aus bilanztechnischen Gründen auf die anderen Verwendungsarten verteilt. Nach Angaben der FEhS wird Hochofenstückschlacke überwiegend in Tragschichten unter dichten Deckschichten eingebaut.

125.000 Mg des im Jahr 2003 angefallenen Hüttensands wurden dem offenen Einbau und 4.885.000 Mg dem mit Sicherung zugerechnet. Im Jahr 2004 erfolgte der offene Einbau mit 180.000 Mg und der Einbau mit Sicherung mit 5.480.000 Mg.

Tabelle 3.2 Aufkommen und Verbleib von Hochofenschlacken in den Jahren 2003 und 2004

| | Hochofenstückschlacke [10 ⁶ Mg] | | Hüttensand [10 ⁶ Mg] | |
|--------------------------------------|--|-------------|---|-------------|
| | 2003 | 2004 | 2003 | 2004 |
| Aufkommen | 2,28 | 1,78 | 5,01 | 5,66 |
| Zement | -- | -- | 4,76 | 5,30 |
| Baustoff | 2,04 | 2,12 | 0,11 | 0,20 |
| Düngemittel | 0,03 | 0,02 | -- | -- |
| Lager* | 0,21 | -0,36 | 0,14 | 0,16 |
| * + Lageraufbau, - Lagerabbau | | | | |

Quelle: FEhS – Institut für Baustoffforschung e.V.

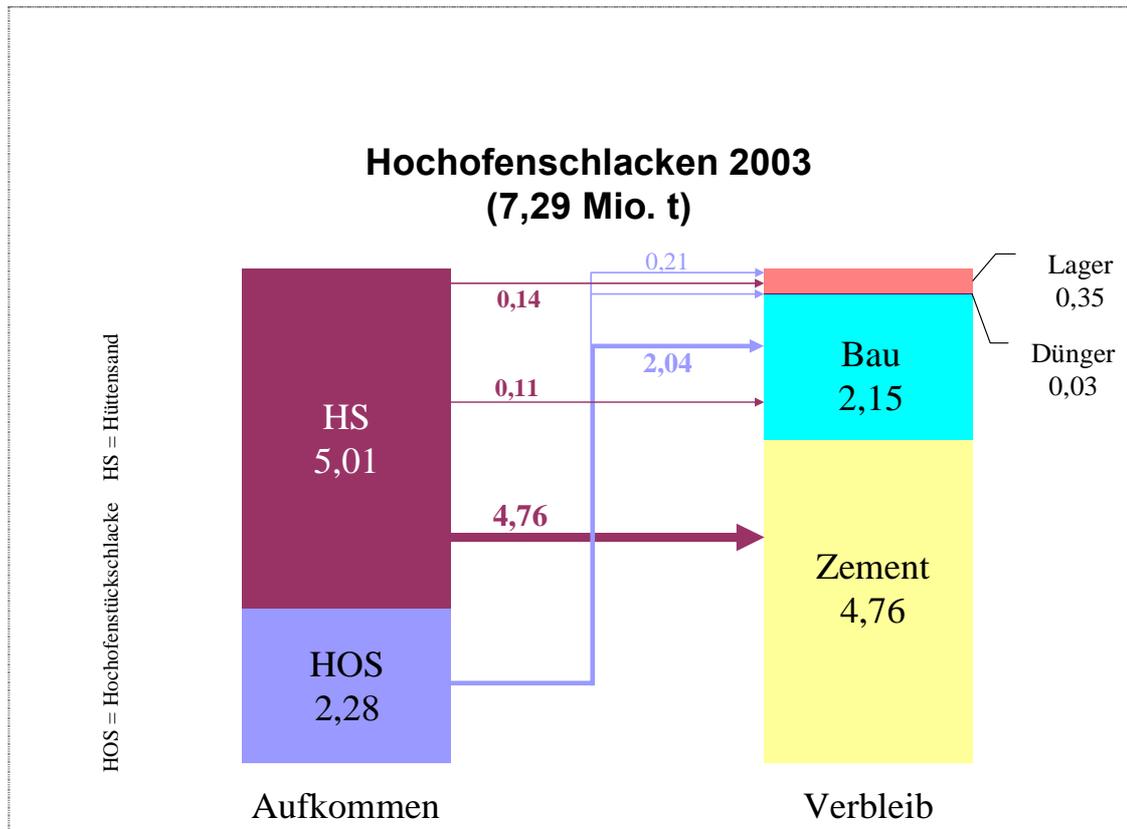


Abbildung 3.1 Aufkommen und Verbleib von Hochofenstückschlacken

Stahlwerksschlacken

Stahlwerksschlacke entsteht bei der Verarbeitung von Roheisen, Eisenschwamm und aufbereitetem Stahlschrott zu Stahl. Unterschieden werden LD-Schlacke und Elektroofenschlacke [FGSV 1999a].

LD-Schlacke entsteht beim LD- oder Sauerstoffaufblas-Verfahren (benannt nach den Entwicklungsorten Linz und Donawitz). Dieses ist das verbreitetste Verfahren. Dabei werden in den LD-Konverter flüssiges Roheisen eingefüllt sowie Stahlschrott und Schlackebildner zugegeben. Über eine Lanze wird Sauerstoff auf die Schmelze geblasen (Frischen). Dadurch verbrennen die Begleitelemente wie Kohlenstoff, Schwefel, Phosphor etc. und gehen in die Schlacke oder das Rauchgas über. Aufgrund der hohen Wärmeentwicklung wird der beigegebene Schrott dabei aufgeschmolzen. Die flüssige Schlacke wird in vorbereitete Beete gegossen.

Elektroofenschlacke fällt bei der Stahlerzeugung in Elektrostahlwerken an. Dabei wird der Schrott in der Regel über drei Elektroden erhitzt (Lichtbogen), bis der Stahl flüssig ist. Im Gleichstromofen, der seltener eingesetzt wird, wird mit einer Elektrode erhitzt.

Die Nutzung als Baustoff ist das mit Abstand wichtigste Einsatzgebiet von Stahlwerkschlacken. Daneben werden sie auch als Kalkdüngemittel verwendet [Merkel 2002].

Bei der Verwendung von LD- und Elektroofenschlacke im Straßenbau sind die von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen herausgegebenen Merkblätter und Richtlinien zu beachten [FGSV 1999a] [FGSV 2001].

Edelstahlschlacken

Edelstahlschlacken entstehen bei der Erzeugung von Edelstählen mit Chromgehalten über 10 % unter Verwendung von Schlackenbildnern (z.B. Kalk). Sie werden bei Temperaturen von ca. 1.600 °C in Tröge oder Beete abgegossen und erstarren dort zu einem kristallinen Mineralstoff. Durch die Umwandlungsprozesse liegen diese Schlacken sowohl in stückiger Form vor als auch in Sandkorngröße. Die Schlacken werden in entsprechenden Anlagen durch Sieben und Klassieren zu Sand, Splitt, Schotter oder Mineralgemischen aufbereitet. Neben Chrom können die Edelstahlschlacken auch noch weitere Legierungselemente, z.B. Nickel und Molybdän enthalten [FGSV 1998]. Aufgrund der relativ feinen Körnung werden die anfallenden Edelstahlschlacken vorwiegend im Erdbau eingesetzt.

Als sekundärmetallurgische Schlacken werden Schlacken aus der Nachbehandlung des Rohstahls bezeichnet, die bei der Herstellung von Qualitäts- und Massestählen entstehen [FGSV 1998]. Dabei werden in speziellen Aggregaten beispielsweise Legierungselemente eingebracht, die Schmelze homogenisiert und verbliebene Reste von Kohlenstoff und anderen Elementen entfernt.

Sekundärmetallurgische Schlacken sind kristalline Schlacken, die vorwiegend aus Kalk, Kieselsäure und Tonerde bestehen [FGSV 1998]. Sie liegen sowohl in stückiger als auch in Sandkorngröße vor. Sie können in Tragschichten ohne Bindemittel, Schottertragschichten, Frostschutzschichten, im Unter- und Erdbau und als Bettungsmaterial für Pflaster und Plattenbeläge eingesetzt werden und tragen zur Erhärtung mineralischer Schichten bei. Aufgrund der relativ feinen Körnung werden auch sie vorwiegend im Erdbau eingesetzt.

Bei der Verwendung von Edelstahlschlacken und sekundärmetallurgischen Schlacken im Verkehrswegebau sind die von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen herausgegebenen Merkblätter und Richtlinien zu beachten (z.B. [FGSV 1998]).

Aufkommen und Verbleib von LD-Schlacke, Elektroofenschlacke, sekundärmetallurgischer Schlacke und Edelstahlschlacke in den Jahren 2003 und 2004 sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Die Angaben darüber, ob diese Materialien offen oder mit Sicherung eingebaut wurden, finden sich in Tabelle 3.4.

Tabelle 3.3 Aufkommen und Verbleib von Stahlwerksschlacken in den Jahren 2003 und 2004

| | LD-Schlacke [10 ⁶ Mg] | | Elektroofen- schlacke [10 ⁶ Mg] | | sekundärmetallur- gische Schlacke [10 ⁶ Mg] | | Edelstahlschlacke [10 ⁶ Mg] | |
|-------------------------------|-------------------------------------|------|--|-------|--|-------|---|--------|
| | 2003 | 2004 | 2003 | 2004 | 2003 | 2004 | 2003 | 2004 |
| Aufkommen | 3,39 | 3,46 | 1,52 | 1,60 | 0,47 | 0,55 | 0,54 | 0,62 |
| Wiedereinsatz | 0,64 | 0,61 | 0,03 | 0,04 | 0,11 | 0,11 | 0,01 | < 0,01 |
| Düngemittel | 0,34 | 0,27 | -- | -- | 0,02 | 0,04 | -- | -- |
| Baustoff | 1,60 | 1,49 | 1,29 | 1,57 | 0,20 | 0,42 | 0,36 | 0,36 |
| Deponie | 0,56 | 0,73 | 0,03 | 0,04 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,19 |
| Lager | 0,25 | 0,35 | 0,17 | -0,05 | -0,03 | -0,13 | 0,04 | 0,06 |
| * + Lageraufbau, - Lagerabbau | | | | | | | | |

Quelle: FEhS – Institut für Baustoffforschung e.V.

Tabelle 3.4 Zuordnung der Einsatzwege von Stahlwerksschlacken für die Jahre 2003 und 2004

| Material | Einbau 2003 | | | Einbau 2004 | | |
|----------|-------------------------------|--|--|-------------------------------|--|--|
| | offen [10 ⁶ Mg] | mit Sicherung [10 ⁶ Mg] | Rückführung u. unter Tage [10 ⁶ Mg] | offen [10 ⁶ Mg] | mit Sicherung [10 ⁶ Mg] | Rückführung u. unter Tage [10 ⁶ Mg] |
| LDS | 1,265 | 1,485 | 0,64 | 1,19 | 1,65 | 0,61 |
| EOS | 0,73 | 0,76 | 0,03 | 0,761 | 0,8 | 0,039 |
| SEKS | 0,12 | 0,21 | 0,11 | 0,199 | 0,263 | 0,088 |
| EDS | 0,2 | 0,33 | 0,01 | 0,21 | 0,4 | 0,01 |

In Tabelle 3.4 werden die Verwertungswege gemäß Tabelle 3.1 dem offenen bzw. gesicherten Einbau zugeordnet. Dabei handelt es sich um eine grobe Einteilung, die eine konservative Abschätzung der Stoffströme für Chlorid und Sulfat ermöglichen soll. Gemäß Angaben der FEhS ist der Anteil der SWS, wie oben für Hochofenschlacken schon beschrieben, die gesichert eingebaut werden deutlich höher.

Stahlwerksschlacken (SWS) 2003

(5,92 Mio. t)

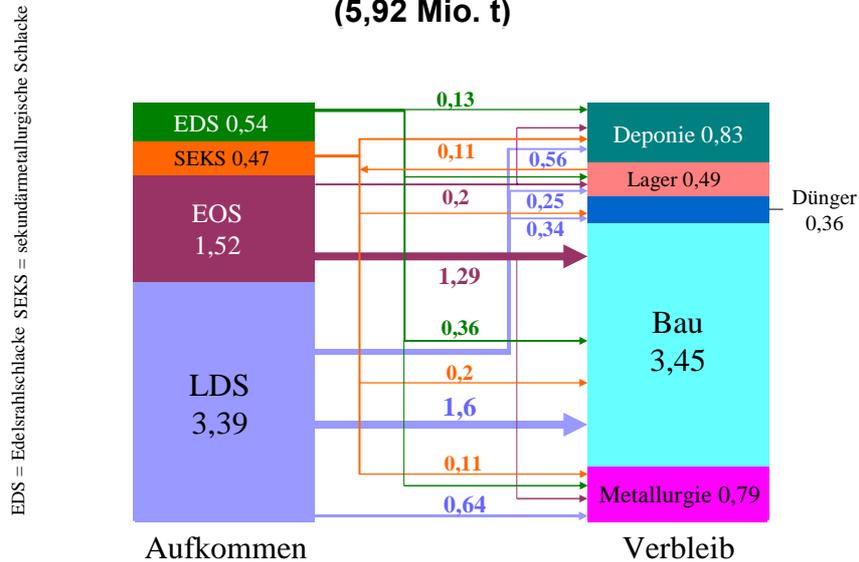


Abbildung 3.2 Aufkommen und Verbleib von Stahlwerksschlacken

Metallhüttenschlacken

Metallhüttenschlacken entstehen beim Schmelzen von Kupfer, Zink, Blei oder Chrom aus ihren Erzen [FGSV 1999b]. Hinzugezählt werden können auch Schlacken, die bei der Erzeugung von Ferrochrom und beim Erschmelzen der genannten Metalle aus Sekundärrohstoffen entstehen. Die flüssigen Metallhüttenschlacken werden entweder langsam abgekühlt, so dass sie zu kristalliner Stückschlacke erstarren, oder mit Wasser schnell abgekühlt, so dass ein glasiges feinkörniges Granulat entsteht [FGSV 1999b]. Darüber hinaus fällt bei der Entzinkung Wälzschlacke an.

Die kristallinen Stückschlacken und die glasigen feinkörnigen Granulate können in Asphalt- und Betondecken, in Deck- und Tragschichten, für Erdarbeiten sowie Bettungen und Fugenfüllungen verwendet werden [FGSV 1999b]. Granulierte Kupferhüttenschlacken werden vorwiegend als Strahlmittel eingesetzt, kristalline werden wegen der hohen Dichte vorwiegend im Wasserbau verwendet. Die anderen Schlacken (Blei, Zink, Chrom) kommen vorwiegend im Erdbau zum Einsatz.

Bei der Verwendung von Metallhüttenschlacken im Verkehrswegebau sind die von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen herausgegebenen Merkblätter und Richtlinien zu beachten (z.B. [FGSV 1999b] und [FGSV 2001]).

Aufkommen und Verbleib der Metallhüttenschlacken in den Jahren 2003 und 2004 sind in Tabelle 3.5 dargestellt. Die Angaben darüber, ob diese Materialien offen oder mit Sicherung eingebaut wurden, finden sich in Tabelle 3.6.

Tabelle 3.5 Aufkommen und Verbleib von Metallhüttenschlacken in den Jahren 2003 und 2004

| | Stückschlacke [10 ⁶ Mg] | | Wälzschlacke [10 ⁶ Mg] | | Granulat [10 ⁶ Mg] | |
|-------------------------------|---------------------------------------|--------|--------------------------------------|------|----------------------------------|------|
| | 2003 | 2004 | 2003 | 2004 | 2003 | 2004 |
| Aufkommen | 0,77 | 0,75 | 0,23 | 0,22 | 0,41 | 0,36 |
| Wiedereinsatz | -- | -- | -- | -- | 0,03 | 0,04 |
| Baustoff | 0,70 | 0,76 | 0,23 | 0,22 | 0,18 | 0,11 |
| Strahlmittel | -- | -- | -- | -- | 0,10 | 0,12 |
| Deponie | < 0,01 | < 0,01 | -- | -- | 0,09 | 0,08 |
| Zwischenlager | 0,06 | -0,01 | -- | -- | < 0,01 | 0,01 |
| * + Lageraufbau, - Lagerabbau | | | | | | |

Quelle: FEhS – Institut für Baustoffforschung e.V.

Tabelle 3.6 Zuordnung der Einsatzwege von Metallhüttenschlacken für die Jahre 2003 und 2004

| Material | Einbau 2003 | | | Einbau 2004 | | |
|---------------|-------------------------------|--|--|-------------------------------|--|--|
| | offen [10 ⁶ Mg] | mit Sicherung [10 ⁶ Mg] | Rückführung u. unter Tage [10 ⁶ Mg] | offen [10 ⁶ Mg] | mit Sicherung [10 ⁶ Mg] | Rückführung u. unter Tage [10 ⁶ Mg] |
| Stückschlacke | 0,38 | 0,39 | -, - | 0,37 | 0,38 | -, - |
| Wälzschlacke | 0,115 | 0,115 | -, - | 0,11 | 0,11 | -, - |
| Granulat | 0,195 | 0,185 | 0,03 | 0,18 | 0,14 | 0,04 |

Neben den oben genannten Metallhüttenschlacken fallen auch bei der thermischen Aluminium- sowie der Silber- Gold- und Platin-Metallurgie Schlacken an. Ihr Aufkommen ist allerdings gering (siehe Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7 Aufkommen und Verbleib von Schlacken aus der thermischen Aluminium- sowie der Silber- Gold- und Platin-Metallurgie im Jahre 2003 nach AVV [AVV 2002]

| | Schlacken aus der Erstsammelze von Aluminium (AVV-Nr. 10 03 04*) [Mg] | Schlacken aus der Erst- und Zweit- schmelze von Silber, Gold u. Platin (AVV-Nr. 10 07 01) [Mg] |
|--------------------|--|---|
| Aufkommen | 90 | 800 |
| Bergversatz | | 330 |
| Verwertung | 90 | |
| Deponie | | 160 |
| UTD | | 40 |

Quellen: Landesumweltämter, statistische Landesämter, statistisches Bundesamt und Abfallagenturen

Abfälle aus der Verarbeitung von Schlacke und unbearbeitete Schlacke

In der Eisen- und Stahlindustrie fallen neben den oben bereits beschriebenen Schlacken in sehr geringem Umfang auch Abfälle aus der Verarbeitung von Schlacke (AVV-Nr. 10 02 01) und unbearbeitete Schlacke (AVV-Nr. 10 02 02) an. Aufkommen und Verbleib dieser Abfälle im Jahr 2003 sind in Tabelle 3.5 enthalten und in Tabelle 3.8 nochmals gesondert dargestellt.

Abfälle aus der Verarbeitung von Schlacke wurden im Jahr 2003 überwiegend mit Sicherung eingebaut (569.000 Mg). Bei 66.700 Mg erfolgte der Einbau offen. Über die restlichen Massen liegen keine Angaben zum Entsorgungsweg vor.

Von dem Teil der im Jahr 2003 angefallenen unbearbeiteten Schlacke, für den Angaben zu den Entsorgungswegen vorliegen, wurden rund 2,17 Mio. Mg mit Sicherung eingebaut. Mit rund 493.000 Mg erfolgte der Einbau offen.

Tabelle 3.8 Aufkommen und Verbleib von Abfällen aus der Eisen- und Stahlindustrie im Jahr 2003 nach AVV [AVV 2002]

| | Abfälle aus der Verarbeitung von Schlacke (AVV-Nr. 10 02 01) [Mg] | Unbearbeitete Schlacke AVV-Nr. 10 02 02 [Mg] |
|-----------------------------|---|---|
| Aufkommen | 706.000 | 5.067.000 |
| Weiterverarbeitung | 133.400 | 246.400 |
| Bergversatz | | 44.000 |
| Deponiebau | 24.900 | 45.800 |
| Tagebau | | 11.700 |
| Sonstige Verwertung | | 332.800 |
| Aufbereitung | | 105.100 |
| Zerkleinerung | | 269.400 |
| sonstige Behandlung | | 9.100 |
| Deponie | 477.400 | 623.000 |
| sonstige Beseitigung | | 1.021.000 |

Quellen: Landesumweltämter, statistische Landesämter, statistisches Bundesamt und Abfallagenturen

3.1.2 Gießereirestsand und Gießerei-Kupolofenschlacke

Gießereirestsand ist rieselfähiger Sand, vorwiegend Quarzsand aber auch Chromit- oder Zirkonsand, der in Eisen-, Stahl-, Temper- und Nichteisenmetall-Gießereien anfällt. Als Bindemittel zur Herstellung der Gießformen wird Ton, Kunstharz und Wasserglas verwendet [FGSV 1999c]. Etwa 95 % des Sandes wird wiederaufbereitet und im Kreislauf geführt, etwa 5 % müssen ausgeschleust und ersetzt werden. Die Haupteinsatzgebiete des Restsand sind der Tagebau, der Deponiebau, der Bergversatz und der Straßenbau. Ein großer Anteil wird auch deponiert.

Kupolofenschlacke ist kristallin erstarrte Gesteinsschmelze, die in Eisengießereien anfällt. Beim Schmelzen von Gusseisen in Kupolöfen werden Schrott, innerbetriebliches metallisches Kreislaufmaterial und ggf. Roheisen bei einer Temperatur von 1.400 bis 1.500 °C verflüssigt. Die Schlacken entstehen bei der Trennung von Metalloxiden und metallischem Eisen, z.B. aus zusätzlich zugesetztem Schlackebildner wie Kalkstein oder Sandanhaftungen am Eisen und Abbrand des Ofenfutters [FGSV 1999c]. Nach dem Abkühlen wird die Schlacke zu Schotter, Splitt und Sand aufbereitet und kommt vorwiegend im Straßenbau aber auch im Tage- und Deponiebau zum Einsatz. Ein großer Anteil wird aber deponiert.

Für die Verwendung von Gießereirestsand und Kupolofenschlacke existieren verschiedene Regelungen, die je nach Einsatzgebiet zu beachten sind, z.B.

- Mitteilung 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [LAGA 1997],
- Merkblatt der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen über die Verwendung von Gießereireststoffen im Straßenbau [FGSV 1999c],
- Richtlinie der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im Straßenbau [FGSV 2001],
- Anforderungen des Länderausschusses Bergbau an die stoffliche Verwertung von Abfällen im Bergbau über Tage [LAB 1998],
- Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage [Dep-VerwV 2005].

Aufkommen und Verbleib von Gießereirestsand und Gießereikupolofenschlacke in den Jahren 2002 bis 2004 sind in Tabelle 3.9 bis Tabelle 3.11 dargestellt. Die Angaben des Instituts für Gießtechnik (IfG) zum Aufkommen und zum Verbleib von Gießereirestsand und Ofenschlacke in Tabelle 3.9 beruhen auf einer Abfrage von vier Entsorgungsfirmen, die die Abfälle von ca. 100 Gießereien entsorgen. Die Angaben betreffen nur die Verwertungswege. Daten zum Aufkommen insgesamt, zur Aufarbeitung und zum Wiedereinsatz sowie zur Beseitigung lagen nicht vor. Das IfG geht davon aus, dass insbesondere kleine und mittelgroße Gießereien (ca. 700) ihre Abfälle beseitigen. Aus diesem Grund sind in Tabelle 3.10 und Tabelle 3.11 zusätzlich die Daten aus den Ländern zum Aufkommen und zum Verbleib von Abfällen vom Gießen von Eisen und Stahl sowie von Nichteisenmetallen im Jahr 2003 aufgeführt. Dabei handelt es sich um folgende Abfälle:

- Ofenschlacke (AVV-Nr. 10 09 03 und 10 10 03),
- Gefährliche Stoffe enthaltende Gießformen und –sande vor dem Gießen (AVV-Nr. 10 09 05* und 10 10 05*),
- Gießformen und –sande vor dem Gießen mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 09 05* bzw. 10 10 05* fallen (AVV-Nr. 10 09 06 und 10 10 06)
- Gefährliche Stoffe enthaltende Gießformen und –sande nach dem Gießen (AVV-Nr. 10 09 07* und 10 10 07*) sowie

- Gießformen und -sande nach dem Gießen mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 09 07* bzw. 10 10 07* fallen (AVV-Nr. 10 09 08 und 10 10 08.)

Von den im Jahr 2003 angefallenen Gießereirestsanden wurden 835.000 Mg mit Sicherung und 506.000 Mg offen eingebaut. Die angefallene Gießerei-Kupolofenschlacke wurde mit 232.000 Mg zum überwiegenden Teil mit Sicherung eingebaut. Bei 44.000 Mg erfolgte der Einbau offen. Von den Gießereirestsanden mit gefährlichen Inhaltsstoffen wurden rund 6.400 Mg mit Sicherung und rund 2.100 Mg offen eingebaut.

Tabelle 3.9 Aufkommen und Verbleib von Gießereirestsand und Gießerei-Kupolofenschlacke in den Jahren 2002 bis 2004 (Auswertung von vier Entsorgungsfirmen mit ca. 100 Gießereien)

| | Gießereirestsand [Mg] | | | Kupolofenschlacke [Mg] | | |
|-------------------------|--------------------------|---------|---------|---------------------------|--------|--------|
| | 2002 | 2003 | 2004 | 2002 | 2003 | 2004 |
| Aufkommen | 460.000 | 445.000 | 127.000 | 28.000 | 42.000 | 37.000 |
| Straßenbau | 105.000 | 118.000 | 127.000 | 28.000 | 42.000 | 37.000 |
| Deponie-/Wegebau | 277.000 | 242.000 | | | | |
| Bergversatz | 78.000 | 85.000 | | | | |

Quelle: IfG – Institut für Gießtechnik gGmbH

Tabelle 3.10 Aufkommen und Verbleib von Abfällen vom Gießen von Eisen und Stahl im Jahr 2003 nach AVV [AVV 2002]

| | 10 09 03 [Mg] | 10 09 05* [Mg] | 10 09 06 [Mg] | 10 09 07* [Mg] | 10 09 08 [Mg] |
|-----------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Aufkommen | 276.000 | 3.000 | 129.500 | 3.500 | 1.250.000 |
| Bergversatz | 1.400 | | 3.000 | | 116.200 |
| Tagebau | 13.900 | | | | 305.800 |
| Deponiebau | 10.100 | | 13.000 | | 246.600 |
| Aufbereitung | 39.200 | 1.000 | 3.000 | 150 | 184.600 |
| sonstige Verwertung | 20.100 | 1.800 | 13.500 | | 100.100 |
| sonstige Behandlung | | | 1.000 | | 18.200 |
| Deponie | 97.700 | 100 | 7.000 | 3.200 | 211.700 |
| SAD | | | | 30 | |
| Verbrennung | | 100 | | 60 | 1.500 |
| sonstige Beseitigung | 93.500 | | 58 000 | | 64.700 |
| Zwischenlager | | | 100 | | |

Quellen: Landesumweltämter, statistische Landesämter, statistisches Bundesamt und Abfallagenturen

Tabelle 3.11 Aufkommen und Verbleib von Abfällen vom Gießen von Nichteisenmetallen im Jahr 2003 nach AVV [AVV 2002]

| | 10 10 03 [Mg] | 10 10 05* [Mg] | 10 10 06 [Mg] | 10 10 07* [Mg] | 10 10 08 [Mg] |
|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Aufkommen | 3.700 | 1.000 | 28.300 | 2.000 | 106.200 |
| Bergversatz | | 930 | 4.350 | | 18.400 |
| Deponiebau | | | | | 13.800 |
| Tagebau | | | | | 3.500 |
| Aufbereitung | 700 | | 400 | 100 | 22.100 |
| sonstige Verwertung | | | 18.900 | | 27.300 |
| CPB | | | | 300 | 400 |
| sonstige Behandlung | | 70 | 1.150 | 480 | 600 |
| Deponie | 100 | | 3.350 | 1.000 | 19.900 |
| UTD | | | | 30 | |
| SAV | | | | 90 | |
| sonstige Beseitigung | | | | | 200 |
| Zwischenlager | | | 100 | | |

Quellen: Landesumweltämter, statistische Landesämter, statistisches Bundesamt und Abfallagenturen

3.1.3 Aschen und Schlacken aus der Stein- und Braunkohlefeuerung

Bei den Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung werden Schmelzkammergranulat, Kesselasche, Flugasche und Wirbelschichtasche unterschieden. Aufgrund geringerer Verbrennungstemperaturen fällt bei der Braunkohlenfeuerung kein Schmelzkammergranulat an. Diesem Kapitel zugeordnet wurden die Abfälle, die in Kraftwerken und Feuerungsanlagen bei der Abfallmitverbrennung anfallen.

Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung

Schmelzkammergranulat (SKG) entsteht bei der Verbrennung von Steinkohle in Schmelzfeuerungen (Kohlenstaubfeuerungen mit flüssigem Ascheabzug) aus den mineralischen Beimischungen der Kohle, die im Wesentlichen aus Tonmineralien, Quarz und Karbonaten bestehen. Durch schockartige Abkühlung entsteht ein glasiges, amorphes Granulat [FGSV 1993a]. Die Hauptverwendung erfolgt im Erd-, Tief-, Straßen- und Wegebau. Dort kann es als Zuschlagstoff für Asphalt und Betondeckschichten, in Deckschichten ohne Bindemitteln, in Tragschichten und in Frostschutzschichten eingesetzt werden, ebenso als Bettung und Fugenfüllung von Pflasterdecken, zur Verbesserung des Untergrundes und des Unterbaus, sowie für Sickerschichten und Lärmschutzwälle [FGSV 1993a]. Schmelzkammergranulat kommt aber auch als Strahlsand zum Einsatz sowie als Zuschlag zu Beton/Zement oder als Verfüllbaustoff und Bergbaumörtel.

Kesselaschen (SKA) fallen bei der Trockenfeuerung von Steinkohle an und werden am Kesselboden über einen Wasserbehälter nass abgezogen [FGSV 1994a]. Kesselaschen werden vorwiegend im Erd-, Tief-, Straßen- und Wegebau eingesetzt und

finden dabei Verwendung zur Bodenverbesserung, zur Herstellung des Unterbaus, als Tragschicht aus unsortiertem Gestein, als Lärmschutzwand und als Bodenverfestiger. Darüber hinaus wird Kesselasche als Zuschlag zu Beton/Zement und für Mauersteine/Keramik sowie als Verfüllbaustoff und Bergbaumörtel verwendet.

Steinkohlenflugasche (SFA) entsteht bei der Verbrennung von Steinkohle in Trockenfeuerungen, Schmelzkammerfeuerungen und Rostfeuerungen [FGSV 1993b]. Die in der Steinkohle enthaltenen Mineralstoffpartikel werden im Rauchgasstrom mitgeführt und als Steinkohlenflugasche mit Elektrofiltern abgeschieden [BVK 2006]. Der überwiegende Anteil der anfallenden Steinkohlenflugasche wird als Zusatzstoff in Beton verwendet [vom Berg 2003]. Weitere Einsatzgebiete sind der Bergbau (Verfüllbaustoff, Bergbaumörtel), der Erd-, Tief-, Straßen- und Wegebau sowie die Verfestigung von Klärschlamm [BVK 2006].

Wirbelschichtaschen (SWA) entstehen bei der Verbrennung in Wirbelschichtfeuerungsanlagen als Filter- und Bettasche [BVK 2006]. Dabei finden die Verbrennungsvorgänge in einer fluidisierten Schicht aus Kohle-, Sand- und Kalksteinpartikeln im Temperaturbereich bis 900 °C statt. Die Fluidisierung wird durch einen von unten in den Feuerungsraum eingeblasenen Luftstrom erreicht. Zwei Bauarten von Wirbelschichtfeuerungen werden unterschieden:

- Bei der stationären Wirbelschicht wird die Strömungsgeschwindigkeit so eingestellt, dass die Partikel in Schwebelage gehalten, aber nicht ausgetragen werden.
- Bei der zirkulierenden Wirbelschicht wird die Strömungsgeschwindigkeit so hoch gewählt, dass die Partikel ausgetragen werden. Sie werden in einem nachgeschalteten Zyklon abgeschieden und in die Wirbelschicht zurückgeführt.

Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen werden Wirbelschichtaschen vielfältig verwendet, so z.B. als Roh- und Zusatzstoff bei der Zement- und Mörtelproduktion, bei der Herstellung von Mauersteinen, im Bergbau, im Straßen- und Landschaftsbau sowie als Düngemittel [BVK 2006].

Bei der Verwendung von Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung sind je nach Einsatzgebiet verschiedene Regelungen zu beachten. Z.B.

- Mitteilung 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [LAGA 1997],
- Merkblatt der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen über die Verwendung von Schmelzkammergranulat im Straßenbau [FGSV 1993a],
- Merkblatt der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen über die Verwendung von Steinkohlenflugasche im Straßenbau [FGSV 1993b],
- Merkblatt der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen über die Verwendung von Kesselasche im Straßenbau [FGSV 1994a],
- Richtlinie der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im Straßenbau [FGSV 2001],

- Anforderungen des Länderausschusses Bergbau an die stoffliche Verwertung von Abfällen im Bergbau über Tage [LAB 1998].

Aufkommen und Verbleib der Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung in den Jahren 2002 bis 2004 sind in Tabelle 3.12 dargestellt. Die Angaben darüber, ob diese Materialien offen oder mit Sicherung eingebaut wurden, finden sich für die Jahre 2003 und 2004 in Tabelle 3.13.

Tabelle 3.12 Aufkommen und Verbleib von Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung in den Jahren 2002 bis 2004

| | Schmelzkammer granulat [10 ⁶ Mg] | | | Kesselasche [10 ⁶ Mg] | | | Flugasche [10 ⁶ Mg] | | | Wirbelschicht- asche [10 ⁶ Mg] | | |
|---|---|-------|-------|-------------------------------------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|---|-------|-------|
| | 2002 | 2003 | 2004 | 2002 | 2003 | 2004 | 2002 | 2003 | 2004 | 2002 | 2003 | 2004 |
| Aufkommen | 2,065 | 2,112 | 1,954 | 0,517 | 0,582 | 0,563 | 4,067 | 4,469 | 4,446 | 0,421 | 0,430 | 0,436 |
| Beton/Zement | 0,139 | 0,161 | 0,177 | 0,150 | 0,164 | 0,155 | 3,046 | 3,302 | 3,106 | -- | -- | -- |
| Mauersteine/ Keramik | -- | -- | -- | 0,020 | 0,023 | 0,021 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| Verfüllbaustoff/ Bergbaumörtel | 0,157 | 0,126 | 0,109 | 0,026 | 0,029 | 0,027 | 0,542 | 0,644 | 0,846 | -- | -- | -- |
| Versatzbaustoff | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0,254 | 0,247 | 0,279 |
| Deponiebaustoff | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0,061 | 0,071 | 0,091 |
| Erd-, Tief-, Stra- Ben- u. Wegebau | 1,127 | 0,998 | 1,013 | 0,314 | 0,347 | 0,326 | 0,305 | 0,267 | 0,269 | 0,074 | 0,072 | 0,030 |
| Strahlsand | 0,531 | 0,662 | 0,356 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| sonstiges | 0,111 | 0,165 | 0,299 | -- | -- | -- | 0,174 | 0,256 | 0,255 | 0,031 | 0,040 | 0,036 |

Quelle: VGB PowerTech e.V.

Tabelle 3.13 Zuordnung der Einsatzwege von Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung für die Jahre 2003 und 2004

| Material | Einbau 2003 | | | Einbau 2004 | | |
|----------|-------------------------------|--|--|-------------------------------|--|--|
| | offen [10 ⁶ Mg] | mit Sicherung [10 ⁶ Mg] | Rückführung u. unter Tage [10 ⁶ Mg] | offen [10 ⁶ Mg] | mit Sicherung [10 ⁶ Mg] | Rückführung u. unter Tage [10 ⁶ Mg] |
| SKG | 1,2435 | 0,7425 | 0,126 | 1,012 | 0,833 | 0,109 |
| SKA | 0,1735 | 0,3605 | 0,029 | 0,163 | 0,339 | 0,027 |
| SFA | 0,2615 | 3,5635 | 0,644 | 0,262 | 3,368 | 0,846 |
| SWA | 0,43 | 0,056 | 0,247 | 0,033 | 0,124 | 0,279 |

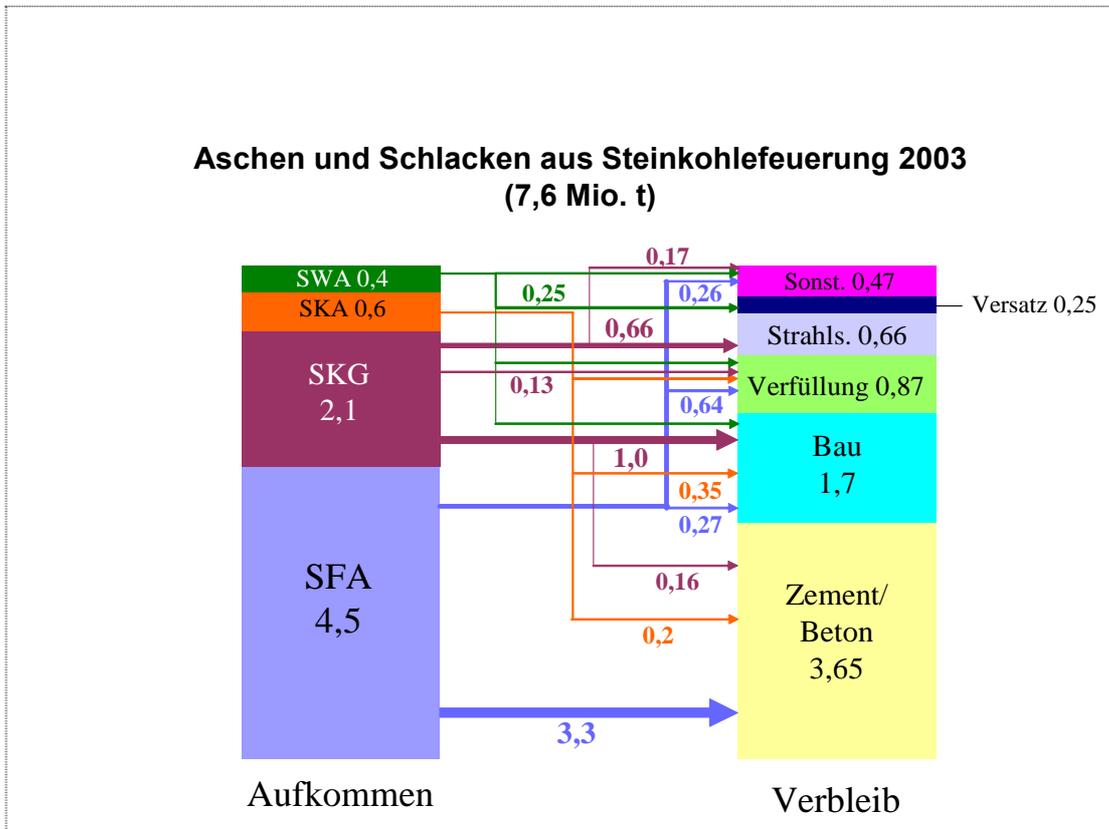


Abbildung 3.3 Aufkommen und Verbleib von Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung

Aschen aus der Braunkohlefeuerung

Braunkohleaschen fallen bei der Verbrennung von Braunkohle an.

Braunkohlenflugaschen besitzen höhere Salzgehalte als Steinkohleflugaschen. Die Verwendung im Straßenbau findet daher in der Regel nicht statt, obwohl die Schwermetallgehalte geringer sind. Haupteinsatzgebiet ist der Tagebau. Daneben kommen sie auch als Verfüllbaustoff zur Bodenverbesserung [FGSV 2003a] und in Zement/Beton zum Einsatz.

Kesselaschen aus der Braunkohlefeuerung werden überwiegend im Tagebau verwendet, aber auch als Zusatz zu Zement/Beton, als Verfüllbaustoff und im Straßen- und Wegebau.

Wirbelschichtaschen finden Verwendung als Versatz- und Deponiebaustoff, im Straßen- und Wegebau sowie im Tagebau.

Bei der Verwendung von Aschen aus der Braunkohlefeuerung sind je nach Einsatzgebiet verschiedene Regelungen zu beachten. Z.B.

- Hinweise der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen zur Verwendung von Braunkohlenflugasche aus Kraftwerken mit Kohlenstaubfeuerung im Erdbau [FGSV 2003],

- Anforderungen des Länderausschusses Bergbau an die stoffliche Verwertung von Abfällen im Bergbau über Tage [LAB 1998],
- Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage [Dep-VerwV 2005].

Aufkommen und Verbleib der Aschen aus der Braunkohlefeuerung in den Jahren 2002 bis 2004 sind in Tabelle 3.14 dargestellt. Die Angaben darüber, ob diese Materialien offen oder mit Sicherung eingebaut wurden, finden sich für die Jahre 2003 und 2004 in Tabelle 3.15.

Tabelle 3.14 Aufkommen und Verbleib von Aschen aus der Braunkohlefeuerung in den Jahren 2002 bis 2004

| | Kesselasche [10 ⁶ Mg] | | | Flugasche [10 ⁶ Mg] | | | Wirbelschichtasche [10 ⁶ Mg] | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|--|-------|-------|
| | 2002 | 2003 | 2004 | 2002 | 2003 | 2004 | 2002 | 2003 | 2004 |
| Aufkommen | 1,890 | 1,846 | 1,723 | 8,138 | 8,742 | 8,718 | 0,210 | 0,230 | 0,266 |
| Zement/Beton | 0,053 | 0,045 | 0,003 | 0,029 | 0,057 | 0,023 | -- | -- | -- |
| Verfüllbaustoff | 0,023 | 0,001 | 0,021 | 0,196 | 0,121 | 0,176 | -- | -- | -- |
| Versatzbaustoff | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0,041 | 0,040 | 0,009 |
| Deponiebaustoff | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0,010 | 0,008 | 0,006 |
| Straßen- und Wegebau | -- | -- | 0,199 | -- | -- | -- | 0,012 | -- | 0,016 |
| Tagebau | 1,814 | 1,791 | 1,500 | 7,623 | 8,390 | 8,317 | 0,141 | 0,179 | 0,230 |
| Bodenverbesserung | -- | -- | -- | 0,067 | 0,037 | 0,016 | -- | -- | -- |
| Sonstiges | -- | -- | -- | 0,223 | 0,137 | 0,132 | 0,006 | 0,003 | 0,004 |

Quelle: VGB PowerTech e.V.

Tabelle 3.15 Zuordnung der Einsatzwege von Aschen aus der Braunkohlefeuerung für die Jahre 2003 und 2004

| Material | Einbau 2003 | | | Einbau 2004 | | |
|----------|-------------------------------|--|--|-------------------------------|--|--|
| | offen [10 ⁶ Mg] | mit Sicherung [10 ⁶ Mg] | Rückführung u. unter Tage [10 ⁶ Mg] | offen [10 ⁶ Mg] | mit Sicherung [10 ⁶ Mg] | Rückführung u. unter Tage [10 ⁶ Mg] |
| BKA | 1,791 | 0,045 | 0,001 | 1,5995 | 0,1025 | 0,021 |
| BFA | 8,4955 | 0,1255 | 0,121 | 8,399 | 0,089 | 0,176 |
| BWA | 0,1805 | 0,0095 | 0,04 | 0,24 | 0,016 | 0,009 |

Aschen und Schlacken aus der Abfallmitverbrennung

In Kraftwerken und Feuerungsanlagen in denen nicht nur Stein- oder Braunkohle sondern auch Abfälle (Abfallmitverbrennung) verbrannt werden, fallen ebenfalls Aschen und Schlacken an. Dabei handelt es sich um folgende Abfälle:

- Rost- und Kesselasche, Schlacken und Kesselstaub aus der Abfallmitverbrennung, die gefährliche Stoffe enthalten (AVV-Nr. 10 01 14*),

- Rost- und Kesselasche, Schlacken und Kesselstaub aus der Abfallmitverbrennung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 01 14* fallen (AVV-Nr. 10 01 15),
- Filterstäube aus der Abfallmitverbrennung, die gefährliche Stoffe enthalten (AVV-Nr. 10 01 16*) und
- Filterstäube aus der Abfallmitverbrennung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 01 16* fallen (AVV-Nr. 10 01 17).

Diese Abfälle finden Verwendung im Bergversatz oder werden aufbereitet und anderweitig verwertet, zum Teil auch deponiert. Ihr Aufkommen und ihr Verbleib im Jahr 2003 sind in Tabelle 3.16 dargestellt.

Die im Jahr 2003 angefallenen Abfälle dieser Abfallgruppe, für die Angaben zu den Entsorgungswegen vorliegen, wurden wie folgt eingebaut:

- 10 01 14*: 100 Mg offen und 140 Mg mit Sicherung
- 10 01 15: 29.200 Mg offen und 13.000 Mg mit Sicherung
- 10 01 16*: 100 Mg mit Sicherung
- 10 01 17: 45.350 Mg offen und 46.370 Mg mit Sicherung

Tabelle 3.16 Aufkommen und Verbleib von Abfällen aus Kraftwerken und anderen Verbrennungsprozessen (außer 19) im Jahr 2003 nach AVV [AVV 2002]

| | 10 01 14* [Mg] | 10 01 15 [Mg] | 10 01 16* [Mg] | 10 01 17 [Mg] |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Aufkommen | 7.600 | 56.000 | 6.300 | 106.000 |
| Bergversatz | 7.350 | 13.000 | 3.000 | 8.800 |
| Deponiebau | | 1.000 | | |
| Aufbereitung | 190 | 24.000 | | 81.200 |
| sonstige Verwertung | | 3.200 | | 9.500 |
| Deponie | | 14.600 | | 1.000 |
| SAD | 40 | | 100 | 20 |
| Verbrennung | 10 | | | |

Quellen: Landesumweltämter, statistische Landesämter, statistisches Bundesamt und Abfallagenturen

3.1.4 Abfälle aus der Verbrennung oder Pyrolyse von Abfällen

Von den bei der Verbrennung oder Pyrolyse anfallenden Abfällen wird im Eckpunktepapier der LAGA [LAGA 2004a] lediglich Hausmüllverbrennungsasche behandelt. Hausmüllverbrennungsasche fällt bei der Verbrennung von Siedlungsabfällen und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen an und wird in der Abfallverzeichnis-Verordnung [AVV 2002] unter Nr. 19 01 12 geführt. Aber auch bei der Verbrennung von gefährlichen Abfällen beispielsweise in Sonderabfallverbrennungsanlagen fallen Aschen und Schlacken an, die in der Abfallverzeichnis-Verordnung als gefährliche (ehemals besonders überwachungsbedürftige) Abfälle unter der

Nr. 19 01 11* geführt werden. Da diese ebenfalls zu den mineralischen Abfällen gezählt werden können, werden sie in diesem Kapitel mitbehandelt.

Bei den Aschen aus der Hausmüllverbrennung wird zwischen HMV-Rohaschen und HMV-Aschen unterschieden. HMV-Rohaschen sind ein als Rostabwurf und Rostdurchfall anfallendes Gemenge aus gesinterten Verbrennungsprodukten, Eisenschrott und anderen Metallen, Glas und Keramikscherben, anderen mineralischen Bestandteilen sowie unverbrannten Resten, die aus den Feuerräumen von Abfallverbrennungsanlagen ausgetragen werden [LfU B.-W. 2004]. Die aufbereiteten und gealterten HMV-Rohaschen werden als HMV-Aschen bezeichnet. Die Verfahren zur Aufbereitung der HMV-Rohaschen sind in Kapitel 4.2 näher beschrieben.

In Sonderabfallverbrennungsanlagen erfolgt die Abfallverbrennung in einem Drehrohr, an dessen Ende die Schlackeschmelze überläuft, in ein Wasserbad tropft und dort glasartig erstarrt [Suchomel 1994]. Bei der Verbrennung von Sonderabfällen in anderen Anlagen können auch Aschen anfallen.

HMV-Aschen werden zum überwiegenden Teil im Deponiebau, im Bergversatz, im Erd-, Tief-, Straßen- und Wegebau (z.B. Lärmschutzwälle, Dammbau, hydraulisch gebundene Tragschichten, Frostschutz- und Schottertragschichten) sowie zur Bodenverbesserung verwendet [Krass 2004].

Die Aschen und Schlacken aus der Sonderabfallverbrennung werden vor allem im Bergversatz eingesetzt oder deponiert. Ein Teil wird auch behandelt bzw. immobilisiert. Die Verwendung von Schlacken aus Sonderabfallverbrennungsanlagen im Straßenbau ist zwar möglich, findet aber so gut wie nicht statt [Suchomel 1994] [Leidinger 2005].

Aufkommen und Verbleib der Hausmüllverbrennungsaschen sowie der Schlacken/Aschen aus der Sonderabfallverbrennung sind in Tabelle 3.17 dargestellt. Da die von der Interessengemeinschaft Thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD e.V.) zur Verfügung gestellten Daten zum Aufkommen und zum Verbleib von Hausmüllverbrennungsaschen für die Jahre 2002 bis 2004 bezüglich der Entsorgungswege nur die Angaben „Verwertung“ und „Beseitigung“ enthalten, wurden sie um die zusätzlichen Daten aus den Ländern für das Jahr 2003 ergänzt.

2,054 Mio. Mg der im Jahr 2003 angefallenen Hausmüllverbrennungsaschen (AVV-Nr. 19 01 12) wurden mit Sicherung und 0,922 Mio. Mg wurden offen eingebaut. Von den angefallenen Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit gefährlichen Inhaltsstoffen 17.650 Mg offen und 138.750 Mg mit Sicherung eingebaut.

Tabelle 3.17 Aufkommen und Verbleib von Hausmüllverbrennungsaschen in den Jahren 2002 bis 2004 und Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten aus der Verbrennung oder Pyrolyse von Abfällen nach AVV [AVV 2002]

| | Hausmüllverbrennungsasche AVV-Nr. 19 01 12 | | | Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten AVV-Nr. 19 01 11* |
|----------------------------|---|---------------|---------------|---|
| | 2002 [Mg] | 2003 [Mg] | 2004 [Mg] | 2003 [Mg] |
| Aufkommen | ca. 3.340.000 | ca. 3.300.000 | ca. 3.710.000 | 244.000 |
| Verwertung* | ca. 2.875.000 | ca. 2.833.000 | ca. 3.190.000 | |
| Beseitigung | ca. 468.000 | ca. 461.000 | ca. 519.000 | |
| Bergversatz | | 318.000 | | 85.000 |
| Deponiebau | | 737.000 | | |
| Tagebau | | 66.000 | | |
| Aufbereitung | | 2.000 | | 9.400 |
| Weiterverarbeitung | | 84.000 | | |
| CPB/Immobilisierung | | | | 19.900 |
| sonstige Behandlung | | 201.000 | | 4.700 |
| Deponie | | 137.500 | | 98.400 |
| SAD | | | | 22.700 |
| UTD | | | | 2.600 |
| Zwischenlager | | | | 1.300 |

* ca. 70 – 80 % Straßenbau, außerdem Deponiebau, Bergversatz, Baustoff

Quelle: Interessengemeinschaft Thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD e.V.). Für das Jahr 2003 zusätzlich Landesumweltämter, statistische Landesämter, statistisches Bundesamt und Abfallagenturen

3.1.5 Bau- und Abbruchabfälle

Im Eckpunktepapier der LAGA [LAGA 2004a] werden lediglich die aus Bau- und Abbruchabfällen gewonnenen Recycling-Baustoffe behandelt. Sie stehen daher an erster Stelle. Bei Bau- und Abbrucharbeiten fallen aber auch besonders überwachungsbedürftige mineralische Abfälle an. Sie werden daher ebenfalls in diesem Kapitel abgehandelt.

Recycling-Baustoffe

Recycling-Baustoffe sind Gemische aus Gesteinkörnungen, die zuvor bereits als natürliche oder künstliche mineralische Baustoffe in gebundener oder ungebundener Form eingesetzt waren [FGSV 2002a]. Sie werden durch Aufbereitung der bei Bautätigkeiten (Rückbau/Abriss, Umbau, Ausbau und Erhaltung von Hoch- und Tiefbauten, Straßen, Wegen, Flugplätzen und sonstigen Verkehrswegen) anfallenden Abfälle gewonnen und in marktgängigen Gesteinkörnungen (0/2 bis 32/63) eingesetzt [FGSV 2004a]. Die mit Abstand am häufigsten eingesetzte Gesteinkörnung ist 0/45.

Bei den Bau- und Abbruchabfällen handelt es sich um Bauschutt, Baustellenabfälle und Straßenaufbruch. Die „Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau“

(ARGE KWTB) erfasst unter diesen Begriffen bei ihrer Erhebung für das Jahr 2002 die folgenden Schlüsselnummern nach der Abfallverzeichnis-Verordnung [AVV 2002], wobei bei den Bauabfällen die mineralischen den Schwerpunkt bilden und daher Glas, Kunststoffe und Metalle nicht gesondert betrachtet werden [ARGE KWTB 2005]:

Bauschutt

- 17 01 01 Beton
- 17 01 02 Ziegel
- 17 01 03 Fliesen, Ziegel und Keramik
- 17 01 07 Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06¹ fallen

Baustellenabfälle

- 17 02 01 Holz
- 17 02 02 Glas
- 17 02 03 Kunststoff
- 17 04 01 Kupfer, Bronze, Messing
- 17 04 02 Aluminium
- 17 04 03 Blei
- 17 04 04 Zink
- 17 04 05 Eisen und Stahl
- 17 04 06 Zinn
- 17 04 07 gemischte Metalle
- 17 04 11 Kabel mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 04 10² fallen
- 17 06 04 Dämmmaterial mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 06 01³ und 17 06 03⁴ fällt
- 17 08 02 Baustoffe auf Gipsbasis mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 08 01⁵ fallen
- 17 09 04 Gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01⁶, 17 09 02⁷ und 17 09 03⁸ fallen

¹ Gemische aus oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten.

² Kabel, die Öl, Kohlenteer oder andere gefährliche Stoffe enthalten.

³ Dämmmaterial, das Asbest enthält.

⁴ Anderes Dämmmaterial, das aus gefährlichen Stoffen besteht oder solche Stoffe enthält.

⁵ Baustoffe auf Gipsbasis, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind.

⁶ Bau- und Abbruchabfälle, die Quecksilber enthalten.

⁷ Bau- und Abbruchabfälle, die PCB enthalten (z.B. PCB-haltige Dichtungsmassen, PCB-haltige Bodenbeläge auf Harzbasis, PCB-haltige Isolierverglasungen, PCB-haltige Kondensatoren).

⁸ Sonstige Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich gemischte Abfälle), die gefährliche Stoffe enthalten.

Straßenaufbruch

17 03 02 Bitumengemische mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 03 01⁹ fallen

Die aus den o.g. Abfällen gewonnenen Recycling-Baustoffe kommen in folgenden Bereichen zur Anwendung [ARGE KWTB 2001] [ARGE KWTB 2003]:

- Im Straßen-, Erd- und Tiefbau
 - als Damm- und Verfüllbaustoffe (z.B. Dämme, Lärmschutzwälle, Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben)
 - zur Bodenverbesserung und zur Bodenverfestigung,
 - in Frostschutzschichten,
 - in ungebundenen oder hydraulisch gebundenen Tragschichten,
 - in Asphalt-Tragschichten,
 - als Pflasterbettungsmaterial und Betonsteinpflaster,
 - als Zuschlag für Beton von Betonfahrbahndecken und
 - für Gasdrainagen im Deponiebau.
- Im Betonbau
 - als Gesteinskörnung für Beton und Mörtel (z.B. unbewehrter Beton, Betoninnen- und -außenbauteile, Stahlbeton)
 - für Sauberkeitsschichten unter Fundamenten,
 - für Beton im Wege-, Garten und Landschaftsbau,
 - als Unterbeton für Auffüllungen und
 - für Zementestrich.
- Im Vegetationsbau
 - als Substrat für Dach- und Bauwerksbegrünungen
 - als Rasensubstrat
 - als Parkdecksubstrat,
 - als Baums substrat insbesondere im Stadtstraßenbereich und
 - für Schotterrasen (z.B. für Notfahrbereiche).

Die Aufbereitung von Bauschutt zu Recycling-Baustoffen ist in Kapitel 4.1.3 beschrieben, die von Straßenaufbruch in Kapitel 4.1.2.

Recycling-Baustoffe und nicht aufbereiteter Bauschutt sollten vorrangig bei Baumaßnahmen im Hoch-, Erd-, Straßen- und Deponiebau verwendet werden. Im Rahmen der bergbaulichen oder sonstigen Rekultivierung sowie des Landschaftsbaus sollten diese Materialien nur in Ausnahmefällen eingesetzt werden [LAGA 1997].

⁹ Kohlenteerhaltige Bitumengemische.

Straßenaufbruch sollte soweit möglich im Rahmen von Straßenbaumaßnahmen wiederverwendet oder verwertet werden. Ist dies nicht möglich, ist er im allgemeinen einer Aufbereitungsanlage zuzuführen [LAGA 1997].

In Tabelle 3.18 werden zuerst Aufkommen und Verbleib von Bauschutt und Baustellenabfällen sowie von Straßenaufbruch bzw. unbelastetem Ausbausphalt dargestellt. In Tabelle 3.19 wird dann die Verwendung der Recycling-Baustoffe wiedergegeben, in Tabelle 3.20 die Verwertung durch die öffentliche Hand. Die Daten und Angaben der ARGE KWTB beziehen sich nur auf das Jahr 2002. Die Verwertungswege für Bauschutt und Straßenaufbruch der öffentlichen Hand werden vom Statistischen Bundesamt aber nur alle zwei Jahre erhoben, so dass sie für das Jahr 2002 zur Ergänzung nicht vorliegen. Hilfsweise sind in Tabelle 3.20 daher die Daten für die Jahre 2001 und 2003 wiedergegeben.

Tabelle 3.18 Aufkommen und Verbleib von Bauschutt, Baustellenabfällen und Straßenaufbruch im Jahr 2002 bis 2004

| | Bauschutt*¹ [10 ⁶ Mg] 2002 | Baustellen- abfälle*¹ [10 ⁶ Mg] 2002 | Straßen- aufbruch*¹ [10 ⁶ Mg] 2002 | unbelasteter Ausbausphalt*² [10 ⁶ Mg] 2002 bis 2004 |
|--|---|---|---|--|
| Aufkommen | 52,1 | 4,3 | 16,6 | je 14,0 |
| Recyclingbaustoff*³ | 35,7 | 1,2 | 14,2 | |
| Neuasphalt | | | | je 11,5 |
| Baustoff | | | | je 2,5 |
| Tagebau | 7,0 | | 0,3 | |
| Deponiebau | 1,6 | | 0,1 | |
| Verwertung übertägig | | 0,8 | | |
| öffentliche Hand*⁴ | 3,8 | | 1,7 | |
| Deponie | 4,0 | 2,3 | 0,3 | |
| * ¹ : Quelle: Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB) * ² : Quelle: Deutscher Asphaltverband e.V. (DAV) * ³ : Weitere Verwendung siehe Tabelle 3.19 * ⁴ : Verwertungswege siehe Tabelle 3.20 | | | | |

Die im Jahr 2002 angefallenen Abfälle dieser Abfallgruppe wurden wie folgt eingebaut:

- Bauschutt: 22,285 Mio. Mg offen und 29,855 Mio. Mg mit Sicherung
- Baustellenabfälle: 1 Mio. Mg offen und 3,3 Mio. Mg mit Sicherung
- Straßenaufbruch: 3,904 Mio. Mg offen und 12,68 Mio. Mg mit Sicherung
- Unbelasteter Ausbausphalt: 1,25 Mio. Mg offen und 1,25 Mio. Mg mit Sicherung

Bei der Zuordnung der über die öffentliche Hand entsorgten Abfälle wurden die Daten für das Jahr 2003 herangezogen, da für das Jahr 2002 keine Daten vorliegen.

Tabelle 3.19 Verwendung von Recyclingbaustoffen im Jahr 2002

| | [10 ⁶ Mg] |
|------------------------|----------------------|
| Straßenbau | 35,5 |
| Erdbau | 9,9 |
| Betonzuschlag | 0,8 |
| sonstige Zwecke | 4,9 |

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB)

Der Einbau von Recyclingbaustoffen erfolgte im Jahr 2002 mit 19,45 Mio. Mg offen. Mit Sicherung wurden 31,65 Mio. Mg eingebaut.

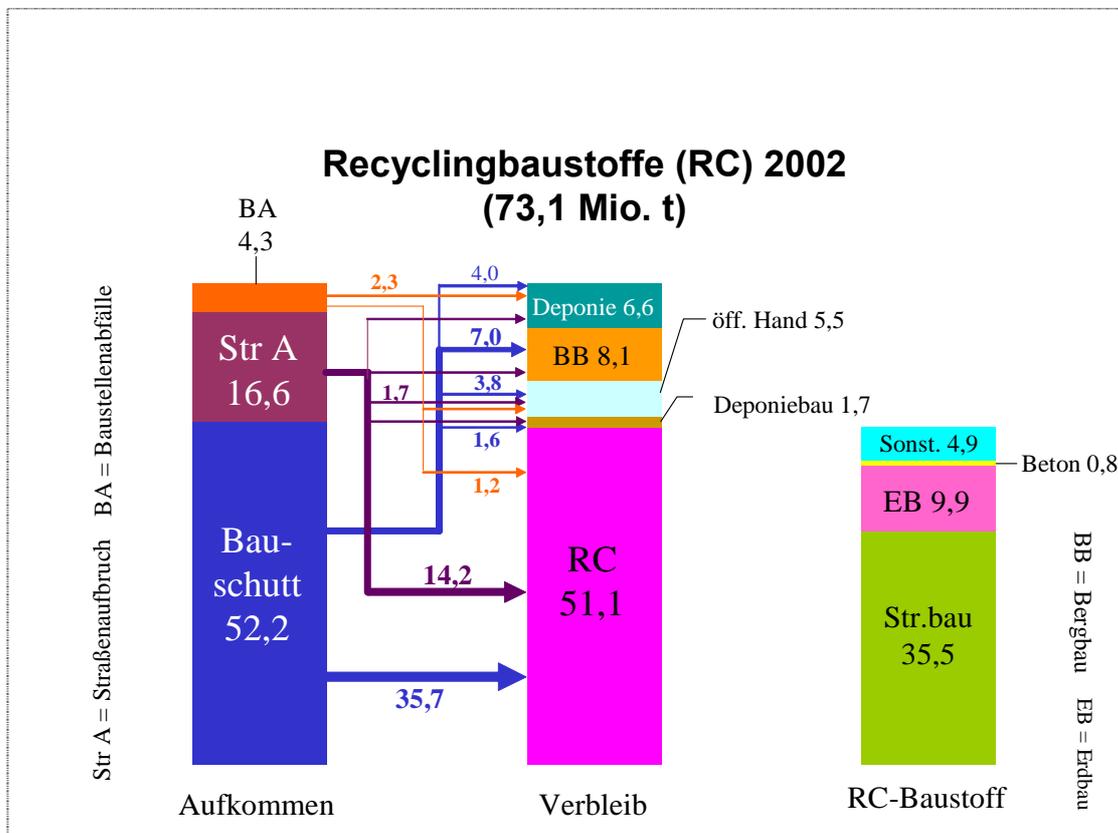


Abbildung 3.4 Aufkommen und Verbleib von Bauschutt, Straßenabruch und Baustellenabfällen

Tabelle 3.20 Verwertungswege für Bauschutt und Straßenaufbruch der öffentlichen Hand in den Jahren 2001 und 2003

| | Bauschutt [10 ⁶ Mg] | | Straßenaufbruch [10 ⁶ Mg] | |
|--|-----------------------------------|------|---|-------|
| | 2001 | 2003 | 2001 | 2003 |
| Insgesamt | 3,8 | 3,8 | 1,7 | 0,7 |
| Straßen- und Wegebau | 0,5 | 1,9 | 1,4 | 0,7 |
| Bau von Lärmschutzwällen | 0,3 | 0,05 | 0,03 | 0,009 |
| Landschaftsbau und -gestaltung | | 0,02 | | 0,004 |
| Freizeit- und Sportanlagen | 0,06 | | 0,006 | |
| Bau und Rekultivierung stillgelegter öffentlicher Deponien | 2,2 | 1,6 | 0,2 | 0,02 |
| Rekultivierung ehemals industriell, gewerblich und militärisch genutzter Flächen und Ablagerungen | 0,3 | 0,2 | 0,008 | 0,002 |
| Sonstige Bau- u. Rekultivierungsmaßnahmen | 0,4 | 0,07 | 0,04 | 0,01 |

Quellen: [StBA 2004; StBA 2005] gerundet

Besonders überwachungsbedürftige Bau- und Abbruchabfälle

Zu den besonders überwachungsbedürftigen Bau- und Abbruchabfällen gehören nach der Abfallverzeichnis-Verordnung [AVV 2002] folgende Abfälle:

- Gemische aus oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten (AVV-Nr. 17 01 06*),
- kohlenteeerhaltige Bitumengemische (AVV-Nr. 17 03 01*),
- Kohlenteeer und teeerhaltige Produkte (AVV-Nr. 17 03 03*) sowie
- Baustoffe auf Gipsbasis, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind (AVV-Nr. 17 08 01*).

Ihr Aufkommen und ihr Verbleib ist in Tabelle 3.21 dargestellt.

Die im Jahr 2003 angefallenen besonders überwachungsbedürftigen Bau- Und Abbruchabfälle wurden wie folgt eingebaut:

- 17 01 06* und 17 08 01: 287.240 Mg offen und 943.210 Mg mit Sicherung
- 17 03 01* und 17 03 03*: 509.450 Mg offen und 1.565.450 Mg mit Sicherung

Tabelle 3.21 Aufkommen und Verbleib von besonders überwachungsbedürftigen Bau- und Abbruchabfällen im Jahr 2003

| | 17 01 06* [Mg] | 17 03 01* [Mg] | 17 03 03* [Mg] | 17 08 01* [Mg] |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Aufkommen | 1.240.000 | 1.964.000 | 162.000 | 160 |
| Asphaltmischwerk | 5.700 | 401.000 | 5.900 | |
| Bergversatz | 8.800 | 22.000 | | |
| Deponiebau | 3.200 | 20.100 | | |
| Straßen-, Tiefbau | | 4.700 | | |
| sonstige Verwertung | 88.000 | 457.000 | 13.000 | |
| Weiterverarbeitung | 1.400 | | | |
| Aufbereitung | 91.000 | 192.200 | 9.400 | 80 |
| Bodenbehandlung | 86.000 | 8.800 | | |
| CPB/Immobilisierung | 63.000 | 17.600 | 5.800 | |
| sonstige Behandlung | 200.000 | 172.400 | 10.800 | |
| Deponie | 349.000 | 436.000 | 61.100 | 70 |
| SAD | 158.000 | 83.600 | 17.600 | |
| UTD | 400 | | | |
| Verbrennung | 1.000 | 9.700 | 23.800 | |
| sonstige Beseitigung | 140.000 | 30.700 | | |
| Zwischenlager | 44.000 | 84.200 | 9.500 | |

Quellen: Landesumweltämter, statistische Landesämter, statistisches Bundesamt und Abfallagenturen

3.1.6 Bodenmaterial

In diesem Kapitel wird zum einen Bodenmaterial nach der Definition der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [LAGA 2004b] behandelt. Zusätzlich werden auch die besonders überwachungsbedürftigen Abfälle aus diesem Bereich betrachtet.

Bodenmaterial

Unter Bodenmaterial wird Material aus Böden im Sinne von § 2 Abs. 1 Bundesbodenschutzgesetz [BBodSchG 2004] und dessen Ausgangssubstraten verstanden, jedoch ohne Mutterboden (AVV-Nr. 17 05 04) [LAGA 2004b]. Weiterhin als Bodenmaterial betrachtet werden

- Bodenaushub aus der Gewinnung und Aufbereitung nichtmetallhaltiger Bodenschätze, der als Abfall entsorgt wird (AVV-Nr. 01 04 08 und 01 04 09),
- Bodenmaterial mit mineralischen Fremdbestandteilen (z.B. Bauschutt, Schlacke, Ziegelbruch) bis zu 10 Vol.-%,
- Bodenmaterial, das in Bodenbehandlungsanlagen (z.B. Bodenwaschanlagen, Biobeeten) behandelt worden ist (AVV-Nr. 17 05 04) sowie
- Baggergut (AVV-Nr. 17 05 06), das aus Gewässern entnommen wird und das aus Sanden bzw. Kiesen mit einem maximalen Feinkornanteil (< 63 µm) von < 10 Gew.-% besteht [LAGA 2004b].

Die von der „Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau“ für das Jahr 2002 unter den Begriffen „Bodenaushub“ bzw. „Boden und Steine“ erhobenen Daten beinhalten zusätzlich die AVV-Nr. 17 05 08 (Gleisschotter mit Ausnahme desjenigen, der unter 17 05 07¹⁰ fällt) [ARGE KWTB 2005]. Die Abfälle mit den AVV-Nrn. 01 04 08¹¹ und 01 04 09¹² werden von der ARGE KWTB nicht erfasst.

Die Wiederverwendung von Bodenaushub ist soweit wie möglich anzustreben. Gegebenenfalls ist eine getrennte Gewinnung von Einzelbestandteilen, wie Sande und Kiese, vorzunehmen [LAGA 1997]. Auf besonders sensiblen Flächen (z.B. Spiel- und Sportplätze, Klein- und Hausgärten, Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete) sollte aus Vorsorgegründen auf den Einbau von Boden aus der Bodenbehandlung und der Altlastensanierung verzichtet werden [LAGA 1997].

Mehr als die Hälfte der von der ARGE KWTB im Jahr 2002 erfassten 140,9 Mio. Mg an Boden und Steinen wurde im Tagebau eingesetzt, knapp 23 % wurden durch die öffentliche Hand verwertet und rund 15 % des nach ARGE KWTB verwertbaren Materials wurde deponiert [ARGE KWTB 2005].

Die Daten und Angaben der ARGE KWTB zum Aufkommen und zum Verbleib in Tabelle 3.22 beziehen sich nur auf das Jahr 2002. Die Verwertungswege für Bodenaushub (Boden, Steine, Baggergut) der öffentlichen Hand werden vom Statistischen Bundesamt aber nur alle zwei Jahre erhoben, so dass sie für das Jahr 2002 zur Ergänzung nicht vorliegen. Hilfsweise sind daher die Daten für die Jahre 2001 und 2003 wiedergegeben.

Von dem im Jahr 2002 angefallenen Bodenmaterial wurden 96,65 Mio. Mg offen und 44,45 Mio. Mg mit Sicherung eingebaut. Bei der Zuordnung des über die öffentliche Hand entsorgten Bodenmaterials wurden die Daten für das Jahr 2001 herangezogen, da für das Jahr 2002 keine Daten vorliegen und die im Jahr 2002 über die öffentliche Hand entsorgte Masse identisch mit der des Jahres 2001 ist..

¹⁰ Gleisschotter, der gefährliche Stoffe enthält.

¹¹ Abfälle von Kies- und Gesteinsbruch mit Ausnahme derjenigen, die unter 01 04 07 fallen.

¹² Abfälle von Sand und Ton.

Tabelle 3.22 Aufkommen und Verbleib von Boden und Steinen im Jahr 2002 (ARGE KWTB) und Verwertungswege der öffentlichen Hand im Jahr 2001 und 2003 (Statistisches Bundesamt)

| | Boden, Steine, Baggergut | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | 2002 [10 ⁶ Mg] | 2001 [10 ⁶ Mg] | 2003 [10 ⁶ Mg] |
| Aufkommen | 140,9 | | |
| Tagebau | 74,4 | | |
| Deponiebau | 3,6 | | |
| öffentliche Hand | 35,8 | 35,8 | 28,3 |
| Straßen- und Wegebau | | 12,1 | 9,9 |
| Bau von Lärmschutzwällen | | 3,9 | 3,4 |
| Landschaftsbau und -gestaltung | | 2,3 | 1,5 |
| Deichbau | | 2,4 | 1,4 |
| Freizeit- und Sportanlagenbau | | 0,9 | 0,4 |
| Bau und Rekultivierung öffentlicher Deponien | | 8,9 | 6,4 |
| Rekultivierung ehemals industriell, gewerblich und militärisch genutzter Flächen und Altablagerungen | | 1,9 | 2,3 |
| Sonstige Bau- und Rekultivierungsmaßnahmen | | 3,5 | 3,0 |
| Recycling | 6,1 | | |
| Deponie | 21,0 | | |

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB) sowie [StBA 2004; StBA 2005]

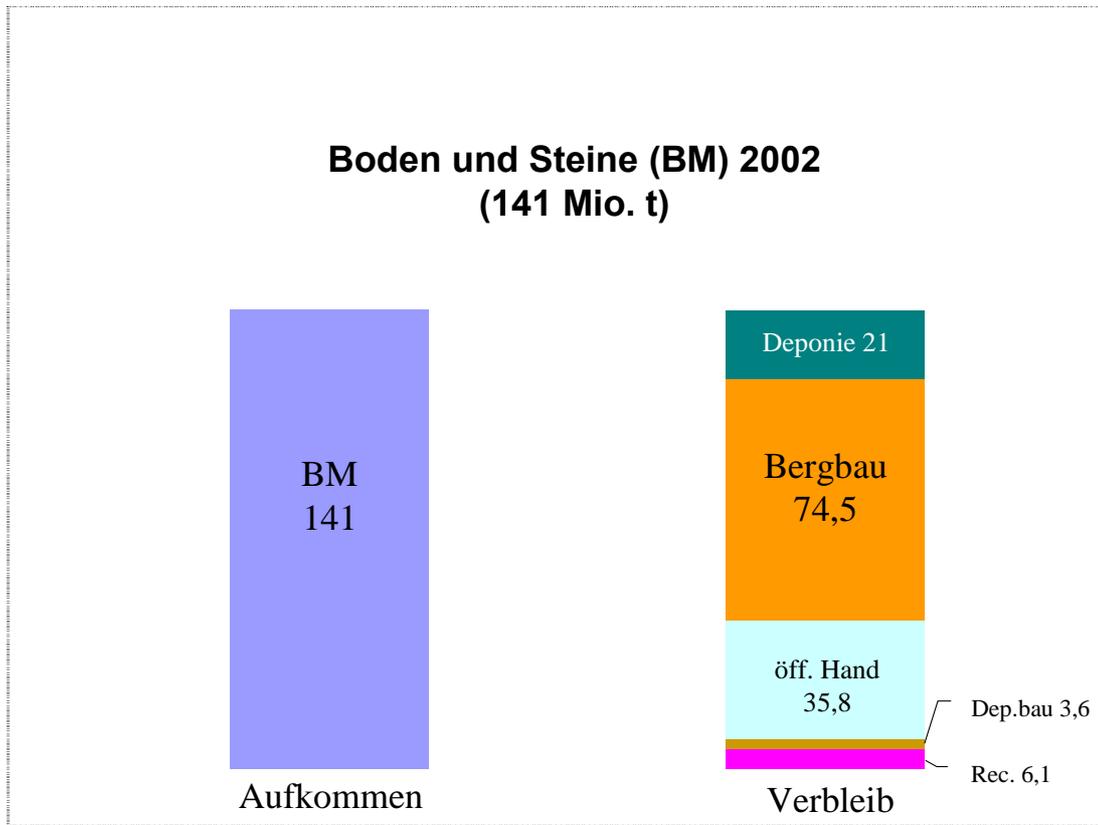


Abbildung 3.5 Aufkommen und Verbleib von Boden und Steinen

Aufkommen und Verbleib der Abfälle aus der physikalischen und chemischen Verarbeitung von nichtmetallhaltigen Bodenschätzen, die von der LAGA zum Bodenmaterial gerechnet werden, ist in Tabelle 3.23 dargestellt. 73.350 Mg dieser Abfallart wurden im Jahr 2003 offen und 9.700 Mg mit Sicherung eingebaut.

Tabelle 3.23 Aufkommen und Verbleib von Abfällen aus der physikalischen und chemischen Verarbeitung von nichtmetallhaltigen Bodenschätzen nach AVV [AVV 2002] für das Jahr 2003

| | Abfälle von Kies- und Gesteinsbruch 01 04 08 [Mg] | Abfälle von Sand und Ton 01 04 09 [Mg] |
|----------------------------|--|---|
| Aufkommen | 12.500 | 71.000 |
| Tagebau | | 70.800 |
| sonstige Verwertung | 5.100 | |
| Deponie | 7.100 | 50 |

Quellen: Landesumweltämter, statistische Landesämter, statistisches Bundesamt

Besonders überwachungsbedürftige Abfälle (Boden, Steine, Baggergut)

Zu den besonders überwachungsbedürftigen Abfällen aus diesem Bereich gehören nach der Abfallverzeichnis-Verordnung [AVV 2002] folgende Abfälle:

- Boden und Steine, die gefährliche Stoffe enthalten (AVV-Nr. 17 05 03*),
- Baggergut, das gefährliche Stoffe enthält (AVV-Nr. 17 05 05*) sowie
- Gleisschotter, der gefährliche Stoffe enthält (AVV-Nr. 17 05 07*).

Ihr Aufkommen und ihr Verbleib ist in Tabelle 3.24 dargestellt. Die verschiedenen in Deutschland angewendeten Aufbereitungsverfahren für kontaminierten Bodenaushub sind in Kapitel 4.1.1 näher beschrieben. Von diesen drei Abfallarten wurden im Jahr 2003 rund 1,962 Mio. Mg offen und rund 3,657 Mio. Mg mit Sicherung eingebaut.

Tabelle 3.24 Aufkommen und Verbleib von Boden (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten) Steinen und Baggergut im Jahr 2003

| | 17 05 03* [Mg] | 17 05 05* [Mg] | 17 05 07* [Mg] |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Aufkommen | 4.587.000 | 151.000 | 960.000 |
| Asphaltmischwerk | 4.600 | | 9.700 |
| Bergversatz | 78.000 | | |
| Deponiebau | 57.700 | | |
| sonstige Verwertung | 198.600 | 3.700 | |
| Weiterverarbeitung | 400 | | |
| Aufbereitung | 150.100 | 1.700 | 343.700 |
| Bodenbehandlung | 920.000 | 8.400 | 253.000 |
| CPB/Immobilisierung | 193.300 | 100 | 251.300 |
| sonstige Behandlung | 662.000 | 21.200 | 500 |
| Deponie | 1.635.200 | 60.800 | 101.300 |
| SAD | 459.100 | 17.200 | 800 |
| UTD | 400 | | |
| Verbrennung | 41.800 | | |
| Beseitigung | 20.600 | 37.400 | |
| Zwischenlager | 164.400 | 300 | |

Quellen: Landesumweltämter, statistische Landesämter, statistisches Bundesamt, Abfallagenturen

3.2 Auswertung der Abfälle, die nicht im Eckpunktepapier geregelt sind

In diesem Kapitel werden die Abfälle kurz behandelt, die weder im Eckpunktepapier der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [LAGA 2004a] aufgeführten sind, noch diesen Abfällen ihrer Herkunft nach zugeordnet werden können, bei denen es sich aber trotzdem um mineralische Abfälle handelt. Hierzu zählen

- Bergbauabfälle,

- Abfälle aus der Herstellung von Keramikerzeugnissen und keramischen Baustoffen wie Ziegeln, Fliesen, Steinzeug,
- Abfälle aus der Herstellung von Zement, Branntkalk, Gips und Erzeugnissen aus diesen,
- Abfälle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen sowie
- Abfälle aus der Sanierung von Boden und Grundwasser.

3.2.1 Bergbauabfälle

In diesem Kapitel behandelt werden nur Bergematerial und sonstige naturbelassene Stoffe, die im Bergbau anfallen.

Berge sind mineralische Stoffe aus Bergbautätigkeiten, die in Verbindung mit dem bergbaulichen Rohstoff abgebaut und separiert werden. Konnten sie nicht sofort für nutzbringende Zwecke verwendet werden und wurden daher aufgehaldet, spricht man von Haldenberge. Grubenberge fallen beim sogenannten Abteufen von Schächten sowie beim Auffahren von untertägigen Strecken im Gestein an [FGSV 2002b]. Bei Aufbereitungs- und Waschberge handelt es sich um Nebengesteine, die bei der Kohlegewinnung anfallen und in der Aufbereitung (Wäsche) von der Kohle getrennt werden. Flotationsabgänge bzw. Flotationsberge sind Waschberge mit einer Körnung von weniger als 0,5 mm [StBA 2005] [FGSV 2002b].

Berge können im Straßen- und Erdbau für Erdbauwerke, Tragschichten und zur Befestigung ländlicher Wege Verwendung finden [FGSV 2002b]. Bei ihrem Einsatz im Erd- und Straßenbau sind die in den Merkblättern und Technischen Lieferbedingungen der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen genannten Bedingungen zu beachten [FGSV 1994b] [FGSV 1995b] [FGSV 2001] [FGSV 2002b].

Die Daten zu den Bergbauabfällen der Tabelle 3.25 entstammen Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamts [StBA 2004; StBA 2005; StBA 2006a; StBA 2006b], die der Tabelle 3.26 beruhen auf Angaben der Wirtschaftsvereinigung Bergbau e.V. (WVB). Die Daten über die weiteren Abfälle aus dem Bergbau mit den AVV-Nrn. 01 01 01¹³, 01 01 02¹⁴, 01 03 08¹⁵, 01 04 07*¹⁶, 01 04 10¹⁷ und 01 04 12¹⁸ sind so unvollständig, dass sie hier nicht aufgeführt werden. Die vorliegenden Angaben können aber dem Anhang 4 entnommen werden.

¹³ Abfälle aus dem Abbau von metallhaltigen Bodenschätzen.

¹⁴ Abfälle aus dem Abbau von nichtmetallhaltigen Bodenschätzen.

¹⁵ Stäubende und pulvrige Abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 01 03 07 fallen.

¹⁶ Gefährliche Stoffe enthaltende Abfälle aus der physikalischen und chemischen Weiterverarbeitung von nichtmetallhaltigen Bodenschätzen.

¹⁷ Stäubende und pulvrige Abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 01 04 07 fallen.

¹⁸ Aufbereitungsrückstände und andere Abfälle aus der Wäsche und Reinigung von Bodenschätzen mit Ausnahme derjenigen, die unter 01 04 07 und 01 04 11 fallen.

Tabelle 3.25 Aufkommen und Verbleib von Bergematerial aus dem Bergbau (nicht b.ü.) in den Jahren 2002 bis 2004

| | Flotationsabgänge [10 ⁶ Mg] | Aufbereitungs- u. Waschberge [10 ⁶ Mg] | Grubenberge [10 ⁶ Mg] | Sonstige naturbelassene Stoffe [10 ⁶ Mg] |
|-----------------------|--|---|--|---|
| Aufkommen 2002 | 10,994 | 21,318 | 0,871 | 12,378 |
| Aufkommen 2003 | 11,249 | 21,386 | 0,748 | 13,306 |
| Aufkommen 2004 | 11,724 | 24,550 | 2,305 | 11,872 |
| Verbleib | Sämtliches Bergematerial wurde deponiert (Beseitigung) | | | |

Quelle: Statistisches Bundesamt

Nach Angaben des Statistischen Bundesamts wird das gesamte Bergematerial deponiert [StBA 2004] [StBA 2005] [StBA 2006a]. Es dürfte sich dabei aber wohl um eine Aufhaldung handeln, so dass der Einbau als offen anzusehen ist.

Tabelle 3.26 Aufkommen und Verbleib von bergbaulichen Abfällen im Jahr 2004

| | Bergematerial Steinkohlenbergbau (Ruhr, Saar, Ibbenbüren) [10 ⁶ Mg] | Flotationsabgänge Metallerzbergbau (Bergwerke Meggen, Wolfach, Dreislar) [Mg] | | |
|-------------------|--|---|--------------------|---------------------------------------|
| | | Aufbereitungs-/ Waschberge | Grubenberge | sonstige naturbelassene Stoffe |
| Aufkommen | 31,409 | 9.234 | 70.774 | 565 |
| Verwertung | 8,125 | | | |
| Aufhaldung | 23,284 | 9.234 | 70.774 | 565 |

Quelle: Wirtschaftsvereinigung Bergbau e.V. (WVB)

3.2.2 Abfälle aus der Herstellung von Keramikerzeugnissen und keramischen Baustoffen sowie von Zement, Branntkalk und Gips

Bei der Herstellung von Keramikerzeugnissen und keramischen Baustoffen wie Ziegeln, Fliesen und Steinzeug fallen nach dem Brennen Abfälle an, die mit Bau- und Abbruchabfällen vergleichbar sind. Sie werden nur zu einem geringen Teil aufbereitet, sondern vor allem deponiert.

Bei der Herstellung von Zement, Branntkalk und Gips sowie Erzeugnissen aus diesen fallen Betonabfälle und Betonschlämme an, die ebenfalls mit Bau- und Abbruchabfällen vergleichbar sind. Sie werden zum überwiegenden Teil einer Verwertung zugeführt. Aufkommen und Verbleib dieser Abfälle im Jahr 2003 sind in Tabelle 3.27 dargestellt.

Der Einbau von 16.850 Mg dieser beiden Abfallarten erfolgte im Jahr 2003 offen. 18.850 Mg wurden mit Sicherung eingebaut.

Tabelle 3.27 Aufkommen und Verbleib von Abfällen aus der Herstellung von Keramikerzeugnissen und keramischen Baustoffen wie Ziegeln, Fliesen, Steinzeug sowie aus der Herstellung von Zement, Branntkalk, Gips und Erzeugnissen aus diesen im Jahr 2003

| | Abfälle aus Keramikerzeugnissen, Ziegeln, Fliesen und Steinzeug nach dem Brennen 10 12 08 [Mg] | Betonabfälle und Betonschlämme 10 13 14 [Mg] |
|-----------------------------|---|---|
| Aufkommen | 40.000 | 20.000 |
| Aufbereitung | 100 | 100 |
| Verwertung | | 12.300 |
| Deponie | 21.000 | 200 |
| sonstige Beseitigung | | 2.000 |

Quellen: Landesumweltämter, statistische Landesämter

3.2.3 Abfälle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen sowie aus der Sanierung von Boden und Grundwasser

Bei der mechanischen Behandlung von Abfällen fallen Mineralien wie Sand und Steine an, die mit den Abfällen aus Bau- und Abbruchtätigkeiten vergleichbar sind. Sie werden vorwiegend im Deponie- und Tagebau eingesetzt. Ein Teil wird auch deponiert.

Bei der Sanierung von Böden und Grundwasser fallen ebenfalls feste mineralische Abfälle an, die zum Teil mit gefährlichen Stoffen verunreinigt sind. Diejenigen Abfälle, die nicht mit gefährlichen Stoffen verunreinigt sind, werden fast ausschließlich im Deponie- und Tagebau verwendet. Die mit gefährlichen Stoffen verunreinigten Abfälle werden vor allem im Bergversatz eingesetzt oder deponiert.

Aufkommen und Verbleib dieser Abfälle im Jahr 2003 sind in Tabelle 3.28 dargestellt. Ihr Einbau erfolgte im Jahr 2003 überwiegend mit Sicherung (rund 447.200 Mg). Rund 94.700 Mg wurden offen eingebaut.

Tabelle 3.28 Aufkommen und Verbleib von Abfällen aus der mechanischen Behandlung von Abfällen (AVV-Nr. 19 12) sowie aus der Sanierung von Boden und Grundwasser (AVV-Nr. 19 13) im Jahr 2003

| | Mineralien (z.B. Sand, Steine) 19 12 09 [Mg] | Feste Abfälle aus der Bodensanierung mit gefährlichen Stoffen 19 13 01* [Mg] | ohne gefährliche Stoffe 19 13 02 [Mg] |
|-----------------------------|---|---|--|
| Aufkommen | 360.000 | 122.500 | 95.300 |
| Bergversatz | | 35.800 | |
| Deponiebau | 213.900 | | 39.200 |
| Tagebau | 26.800 | | 55.700 |
| Aufbereitung | 1.800 | 19.300 | |
| CPB/Immobilisierung | | 3.300 | |
| Deponie | 88.200 | 64.100 | 300 |
| Verbrennung | | 10 | |
| sonstige Beseitigung | 29.300 | | |

Quellen: Landesumweltämter, statistische Landesämter, statistisches Bundesamt, Abfallagenturen

3.3 Zusammenfassende Darstellung der Mengen und Trends

Das Gesamtaufkommen der wichtigsten, durch das Eckpunktepapier geregelten, mineralischen Abfälle liegt bei ca. 250 Mio. t in den Jahren 2002 bzw. 2003.

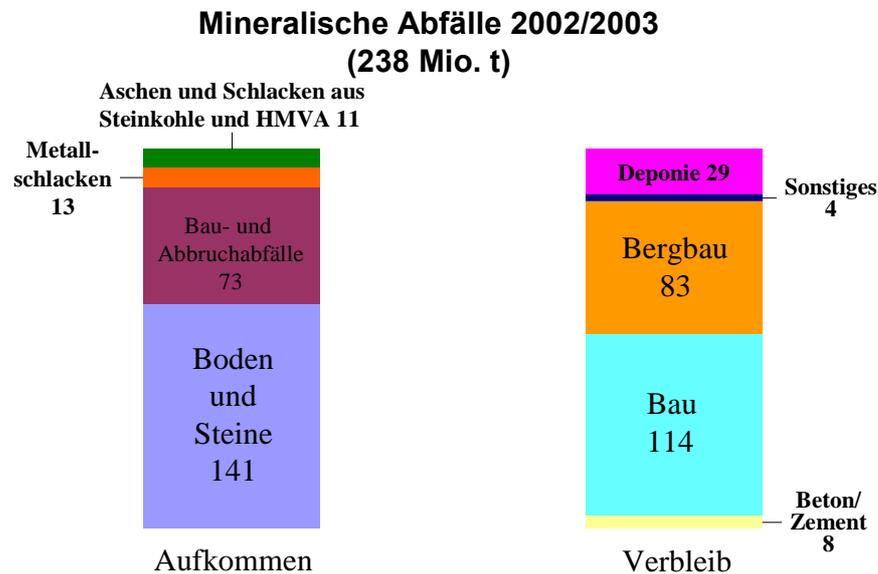


Abbildung 3.6 Aufkommen und Verbleib der mengenmäßig bedeutendsten mineralischen Abfälle und Materialien, ohne Rückstände aus Braunkohlefeuerungen ca. 10 Mio. t und Gießereien ca. 1,4 Mio. t

Entwicklung des Abfallaufkommens

Das Gesamtabfallaufkommen stieg von ca. 385 Mio. t im Jahr 1996 bis zum Jahr 2000 um rund 21 Mio. t an, wobei mit jeweils rund 9 Mio. t die Hauptsteigerungen von 1996 auf 1997 und von 1998 auf 1999 erfolgten. Seit dem ist es auf rund 341 Mio. t im Jahr 2004 gefallen. Erkennbar ist, dass diese Entwicklung eng mit der Entwicklung der Bau- und Abbruchabfälle als der größten Einzelfraktion verbunden ist.

Das Aufkommen an Bau- und Abbruchabfällen erhöhte sich von ca. 231 Mio. t im Jahr 1996 auf rund 261 Mio. t im Jahr 2000, mit einem geringen Einbruch im Jahr 1997. Danach ging es auf rund 223 Mio. t im Jahr 2003 zurück. Der Grund für den nochmaligen erheblichen Rückgang auf rund 189 Mio. t im Jahr 2004 dürfte vor allem darin zu suchen sein, dass im Jahr 2004 erstmals die bei Bau- und Rekultivierungsmaßnahmen der öffentlichen Hand eingesetzten Mengen an Bodenaushub, Bau-schutt und Straßenaufbruch in die Erhebung nicht mehr einbezogen wurden [StBA 2006b]. Im Jahr 2001 betrug dieser Anteil rund 41 Mio. t [StBA 2004] und im Jahr 2003 noch rund 32 Mio. t [StBA 2005].

Das Aufkommen an Bodenaushub war im Jahr 2000 mit rund 161 Mio. t am höchsten. Dies wird von der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau mit Großbaumaßnahmen wie dem Bau der ICE-Strecke Köln-Frankfurt begründet

[ARGE KWTB 2003]. Dies dürfte ebenfalls der Grund für das gleich hohe Aufkommen im Jahr 1999 sein.

Als Ursache für den Rückgang des Aufkommens von Bau- und Abbruchabfällen in den Folgejahren wird von der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau zusätzlich zum Wegfall zeitlich befristeter Großbaumaßnahmen (z.B. ICE-Strecke, Projekte im Rahmen der „Verkehrsprojekte Deutsche Einheit“) die weiter stark rückläufige gesamtwirtschaftliche Entwicklung in der Bau-, Baustoff- und Recycling-Branche genannt [ARGE KWTB 2005].

Tabelle 3.29 Aufkommen mineralische Abfälle von 1996 bis 2004 [StBA 2006b]

| Abfallaufkommen (1.000 t) | 1996 | 1997 | 1998 ¹⁾ | 1999 ²⁾ | 2000 ³⁾ | 2001 | 2002 ²⁾ | 2003 | 2004 ^{6),7)} |
|--|----------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|-----------------------|
| Insgesamt | 385 318 | 394 445 | 396 081 | 405 062 | 406 663 | 395 222 | 381 262 | 366 412 | 340 501 |
| davon | | | | | | | | | |
| Bergematerial aus dem Bergbau (nicht b.ü.) | 54 308 | 57 590 | 56 155 | 52 251 | 48 187 | 49 187 | 45 461 | 46 689 | 50 452 |
| Abfälle aus Produktion und Gewerbe ^{4) 5)} | 43 012 | 48 088 | 48 650 | 44 426 | 47 657 | 45 314 | 42 218 | 46 712 | 53 010 |
| darunter nicht b.ü. | . | . | . | 37 274 | 39 754 | 37 173 | 32 770 | 37 114 | 43 818 |
| Bau- und Abbruchabfälle (ein-schließlich Straßenaufbruch) ⁴⁾ | 231 480 | 229 338 | 232 085 | 258 690 | 260 687 | 251 322 | 240 812 | 223 389 | 188 607 |
| darunter nicht b.ü. | . | . | . | 252 377 | 253 700 | 243 660 | 230 863 | 213 746 | 179 637 |
| darunter Bodenaushub | . | . | . | 161 306 | 161 349 | 149 602 | 141 978 | 130 267 | 87 648 |
| Summe der aufgeführten mineralischen Abfälle | 328 800 | 335 016 | 336 890 | 355 367 | 356 531 | 345 823 | 328 491 | 316 790 | 292 069 |
| mineralische Abfälle ohne Bergematerial | 274 492 | 277 426 | 280 735 | 303 116 | 308 344 | 296 636 | 283 030 | 270 101 | 241 617 |

¹⁾ Hamburg mit Daten von 1997.

²⁾ Durch Umstieg vom LAGA-Abfallartenkatalog auf den Europäischen Abfallkatalog 1999 ergab sich eine Verschiebung der Abfallmengen in bestimmten Unterpositionen. Dies galt insbesondere für sonstige Siedlungsabfälle, Abfälle aus Produktion und Gewerbe sowie Bau- und Abbruchabfälle. Für 2002 erfolgten Verschiebungen durch die Einführung des Europäischen Abfallverzeichnisses insbesondere zwischen nicht besonders überwachungsbedürftigen und besonders überwachungsbedürftigen Abfällen sowie innerhalb der Siedlungsabfälle.

³⁾ Daten teilweise mit Hamburg 1999.

⁴⁾ Ab 1999 einschließlich der besonders überwachungsbedürftigen Abfälle.

⁵⁾ Inkl. sonstiger Abfälle, anderweitig nicht genannt, z.B. Aschen, Schlacken und Verbrennungsrückstände (AVV 10 und 19). Hier sind zu einem großen Teil auch nichtmineralische Abfälle enthalten (2002 bis 2004 lag der Anteil von Aschen und Schlacken mit jeweils ca. 22 Mio. t bei etwa 40 bis 50 %)

⁶⁾ Ab 2004 ohne eingesetzte Mengen an Bodenaushub, Bauschutt und Straßenaufbruch bei Bau- und Rekultivierungsmaßnahmen der öffentlichen Hand.

⁷⁾ vorläufige Zahlen

. Zahlenwert unbekannt oder geheim zu halten

b.ü.: besonders überwachungsbedürftig

Hinweis: Die Regelungen des Umweltstatistikgesetzes von 1994 sind nicht auf eine unmittelbare Erfassung des Abfallaufkommens ausgerichtet. Erfasst werden seit 1996 in erster Linie die jeweils eingesetzten Abfallmengen bei den Betreibern von Abfallentsorgungsanlagen

Entwicklung der Entsorgung

Obwohl das Gesamtabfallaufkommen von 1997 bis 2000 um rund 12 Mio. t anstieg, ist die beseitigte Abfallmenge in dieser Zeit um rund 15 Mio. t gefallen und die Verwertungsquote stieg von 62 % auf 67 %. Danach ist wieder eine rückläufige Verwertungsquote zu verzeichnen und sie betrug im Jahr 2004 nur noch 65 %.

Bei den Bau- und Abbruchabfällen (Bauschutt, Bodenaushub, Straßenaufbruch, Baustellenabfälle) blieb die beseitigte Abfallmenge, trotz einer Aufkommenssteigerung von mehr als 31 Mio. t, mit rund 31 Mio. t von 1997 bis 2000 nahezu konstant. Dem entsprechend erhöhte sich die Verwertungsquote von 86 % auf 88 %. Diese konnte im Jahr 2001 noch gehalten werden, viel dann 2002 auf 86 % und blieb bis 2004 auf diesem Wert.

Die Verwertungsquote der Abfälle aus Produktion und Gewerbe unterlag erheblichen Schwankungen. Die mit knapp 61 % höchste Quote wurde im Jahr 1999 erzielt. Sie fiel im Jahr 2000 abrupt auf 49 %, im Jahr 2002 sogar auf 39 % und stieg dann bis 2004 auf 57 %.

Tabelle 3.30 Entsorgung mineralischer Abfälle in den Jahren 1997 bis 2004 [StBA 2006b]

| | Beseitigung [1.000 Mg] | | | | Verwertung [1.000 Mg] | | | | Verwertungsquote [%] | | | |
|---|------------------------|--------------------|---------|---------|-----------------------|--------------------|---------|---------|----------------------|--------------------|------|------|
| | 1997 | 1998* ¹ | 1999 | 2000 | 1997 | 1998* ¹ | 1999 | 2000 | 1997 | 1998* ¹ | 1999 | 2000 |
| insgesamt | 150.905 | 145.432 | 134.630 | 136.061 | 243.540 | 248.142 | 270.433 | 270.602 | 62 | 63 | 66,8 | 67 |
| davon | | | | | | | | | | | | |
| Bergematerial aus dem Bergbau | 57.590 | 56.155 | 52.251 | 48.187 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Abfälle aus Produktion u. Gewerbe* ² | 23.994 | 22.569 | 14.582 | 20.100 | 24.114 | 25.394 | 22.692 | 19.654 | 50 | 53 | 60,9 | 49 |
| Bauschutt, Bodenaushub, Straßen- aufbruch, Baustellenabfälle | 31.379 | 29.782 | 31.924 | 31.316 | 197.958 | 201.215 | 220.453 | 222.383 | 86 | 87 | 87,4 | 88 |
| | Beseitigung [1.000 Mg] | | | | Verwertung [1.000 Mg] | | | | Verwertungsquote [%] | | | |
| | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
| insgesamt | 133.247 | 129.188 | 125.140 | 119.738 | 261.974 | 252.075 | 241.272 | 220.763 | 66 | 66 | 66 | 65 |
| davon | | | | | | | | | | | | |
| Bergematerial a.d. Bergbau (nicht b.ü.) | 49.187 | 45.461 | 46.689 | 50.452 | 0 | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Abfälle aus Produktion u. Gewerbe* ² | 19.115 | 25.958 | 26.919 | 22.950 | 18.058 | 16.260 | 19.793 | 30.060 | 49 | 39 | 42 | 57 |
| Bauschutt, Bodenaushub, Straßen- aufbruch, Baustellenabfälle | 28.389 | 34.736 | 30.763 | 25.714 | 215.271 | 206.076 | 192.626 | 162.893 | 88 | 86 | 86 | 86 |

*¹: ohne Hamburg

*²: Hier sind zu einem großen Teil auch nichtmineralische Abfälle enthalten.

b.ü.: besonders überwachungsbedürftige Abfälle

Hinweis: Die Regelungen des Umweltstatistikgesetzes von 1994 sind nicht auf eine unmittelbare Erfassung des Abfallaufkommens ausgerichtet. Erfasst werden seit 1996 in erster Linie die jeweils eingesetzten Abfallmengen bei den Betreibern von Abfallentsorgungsanlagen.

4 Aufbereitungsverfahren

Bau- und Abbruchabfälle und insbesondere kontaminierter Bodenaushub werden den verschiedensten Aufbereitungsverfahren unterzogen. Auch Hausmüllverbrennungsaschen können zumindest nach zwei Verfahren aufbereitet werden. Aus diesen Gründen werden diese Aufbereitungsverfahren in den folgenden Kapiteln gesondert beschrieben. Die Aufbereitung der übrigen Abfälle ist bereits in Kapitel 3.1 ausreichend dargestellt.

4.1 Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen

Zu den bei Bau- und Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen zählen Bodenaushub, Straßenaufbruch, Bauschutt und Gleisschotter. Die Aufbereitung dieser Abfälle wird im Folgenden beschrieben.

4.1.1 Aufbereitung von Bodenaushub (Boden und Steine)

Bei dem hier zu behandelnden Bodenaushub handelt es sich um Material aus Böden im Sinne von § 2 Abs. 1 Bundes-Bodenschutzgesetz [BBodSchG 2004] und dessen Ausgangssubstraten, jedoch ohne Mutterboden.

Unbelasteter Bodenaushub wird entweder direkt an anderer Stelle wieder eingesetzt oder auf Bodendeponien zwischengelagert. Teilweise wird er auch einer mechanischen Aufbereitung (Sortieren, Brechen, Klassieren) unterzogen, um eine für den jeweiligen Verwendungszweck geeignete Korngrößenverteilung zu erreichen.

Besteht der Verdacht, dass der anfallende Bodenaushub mit Schadstoffen belastet sein könnte, sind verschiedene Untersuchungen erforderlich. Der Untersuchungsumfang ist in der TR-Boden [LAGA 2004b] geregelt. Ist aufgrund des Untersuchungsergebnisses und der vorgesehenen Verwertung eine Behandlung und Aufbereitung erforderlich, stehen hierzu verschiedene Verfahren (biologische Behandlung, Wäsche, thermische Behandlung) zur Verfügung. Diese Verfahren sind im Folgenden näher beschrieben. Am häufigsten wird der Bodenaushub einer biologischen Behandlung unterworfen. Aber auch die thermische Behandlung und die Bodenwäsche finden Anwendung. Bei Bedarf wird der eigentlichen Behandlung eine Aufbereitung vorgeschaltet. Sie kann die Verfahrensschritte Zerkleinern, Klassieren, Sieben und Sortieren beinhalten.

4.1.1.1 Biologische Bodenbehandlung

Bei der biologischen Bodenbehandlung wird die Fähigkeit von Mikroorganismen zur Verstoffwechslung von z.B. Kohlenstoffverbindungen eingesetzt, um umweltgefährdende Stoffe wie Mineralölkohlenwasserstoffe, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und viele weitere organische Verbindungen soweit umzuwandeln, dass diese nicht mehr umweltgefährdend oder zumindest nicht mehr bioverfügbar sind [Hoffmann 2006]. Dabei werden In-situ-Verfahren (Sanierung erfolgt im natürlichen Lagerungsverband des Bodens) und Ex-situ-Verfahren (Behandlung erfolgt nach Aushub des kontaminierten Materials) unterschieden. In diesem Projekt spielen

aber nur die ex-situ-Verfahren eine Rolle. Bei ihnen wird differenziert zwischen on-site- (Behandlung vor Ort) und off-site-Techniken (Behandlung in Anlagen außerhalb des Sanierungsortes). Ex-situ-Verfahren kommen in der Praxis z.B. zum Einsatz, wenn

- im Rahmen von Baumaßnahmen belastetes Bodenmaterial anfällt, das aufgrund seiner Schadstoffgehalte nicht wiedereinbaufähig ist und somit einer geordneten Entsorgung zuzuführen ist,
- aufgrund der bestehenden bzw. geplanten Nutzung eine rasche Sanierung der Bodenkontamination erforderlich ist, welche mit einer i.d.R. zeitintensiven in-situ-Sanierung nicht realisierbar ist,
- der verunreinigte Boden einen hohen Kontaminationsgrad aufweist, so dass eine effektive Schadstoffreduzierung nur mittels einer Intensivbehandlung, wie sie z.B. in Mieten oder Bioreaktoren durchführbar ist, erfolgversprechend ist [LUA NRW 2005].

Beim vollständigen Abbau organischer Schadstoffe (= Mineralisierung) nutzen die Mikroorganismen die Schadstoffe als Energiequelle, wobei als Endprodukte Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) entstehen [LUA NRW 2005].

Werden die organischen Schadstoffmoleküle nicht vollständig bis zu ihren anorganischen Ausgangsstoffen abgebaut, sondern nur in kleinere organische Moleküle zerlegt, spricht man von einem Teilabbau [RP Gießen 2002]. Die entstehenden Abbauprodukte werden anschließend entweder von anderen Bodenorganismen weiter umgesetzt oder verbleiben im Boden, wo ein Einbau in die organische Bodenfraktion erfolgen kann (Humifizierung) [LUA NRW 2005]. Hier besteht die Gefahr, dass die entstandenen Umwandlungsprodukte (Metabolite) toxischer sind als die Ausgangsschadstoffe [RP Gießen 2002].

Schadstoffe können durch Mikroorganismen auch cometabolisch umgesetzt werden. Der Begriff Cometabolismus bezeichnet in diesem Zusammenhang die Abhängigkeit der Umsetzung eines Schadstoffes vom Vorhandensein eines anderen Stoffes (= Co-Substrat). Bei cometabolischen Umsetzungen gewinnen die Mikroorganismen aus dem Schadstoffabbau keine Energie und benötigen daher zur Aufrechterhaltung von Stoffwechsel- und Wachstumsprozessen zusätzliche organische Nährstoffe [LUA NRW 2005], z.B. Alkohol, Zucker etc. [Hoffmann 2006].

Umfang und Geschwindigkeit des biologischen Schadstoffabbaus werden maßgeblich durch die chemischphysikalischen Eigenschaften der Schadstoffe wie z.B. Wasserlöslichkeit und Molekülstruktur bestimmt. Kontaminanten, die toxische Wirkungen auf Mikroorganismen ausüben, limitieren den biologischen Schadstoffabbau. Darüber hinaus werden mikrobielle Degradationsprozesse auch durch bodenspezifische Eigenschaften beeinflusst. Bei tonigen schluffigen Böden mit hohen Adsorptionskräften ist der überwiegende Schadstoffanteil i.d.R. in der Feinkornfraktion

anzutreffen und daher weniger bioverfügbar. Aus diesen Gründen werden Wachstum und Abbauleistung der Mikroorganismen durch gezielte Maßnahmen gefördert, z.B. durch

- Verbesserung der Sauerstoffversorgung (z.B. durch Druckbelüftung, Einsatz von H_2O_2),
- Zufuhr von Nährstoffen,
- Erhöhung der Bioverfügbarkeit der Schadstoffe (z.B. durch Einsatz von Tensiden),
- Optimierung der äußeren Wachstumsbedingungen (pH-Wert, Temperatur, Redoxpotential) [LUA NRW 2005].

Die biologische Bodenbehandlung wird hauptsächlich in Mieten durchgeführt. Die Behandlung in Beeten spielt in Deutschland aufgrund des Platzbedarfs kaum eine Rolle. Der Einsatz von Reaktoren zur Bodenbehandlung hat derzeit ebenfalls nur geringe Bedeutung, da der Einsatz der Reaktorverfahren vielfach über den Pilotmaßstab nicht hinausgekommen ist bzw. sich auf einzelne Sanierungsprojekte beschränkt [Warrelmann 2002]. Daher wird unten nur das Mietenverfahren näher beschrieben.

Behandlung in Mieten

Bei diesem Verfahren zur biologischen Behandlung kontaminierter Böden wird das Bodenmaterial nach mechanischer Aufbereitung zu lockeren Haufwerken, den sog. Mieten, aufgeschichtet. Dabei werden statische Mietenverfahren (keine Umschichtung des Bodenmaterials während der Sanierung) und dynamische Mietenverfahren (mittels spezieller Wendeeinrichtungen kann während der Sanierungsphase eine Umschichtung des Bodenmaterials erfolgen) unterschieden [LUA NRW 2005].

Die Höhe der Mieten beträgt bis zu 3,0 m, in Ausnahmefällen werden Hochmieten mit über 3 m Höhe angelegt [Warrelmann 2002]. Die Behandlung des kontaminierten Bodenmaterials erfolgt auf Flächen, die mit einer Untergrundabdichtung versehen wurden. Die Mieten werden entweder den Witterungsbedingungen ausgesetzt (= offene Mieten) oder aber in geschlossenen Zelten oder Leichtbauhallen betrieben, wobei die Einhausung der Mieten das derzeit übliche Verfahren darstellt [LUA NRW 2005]. Zur Verbesserung der Abbaubedingungen werden die Mieten in Abhängigkeit von den jeweiligen Erfordernissen mit Strukturmaterial wie Rindenmulch, Rindenhumus, Borke, Stroh, Kompost sowie Nährstoffen (organische und anorganische Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorverbindungen) versetzt. Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, die Mieten mit mikrobiologischen Kulturen zu beimpfen. Außerdem werden sie befeuchtet und belüftet [Warrelmann 2002].

Bei der Belüftung (Sauerstoffversorgung) wird zwischen passiver und aktiver Belüftung unterschieden. Die passive Belüftung wird durch einen schichtenförmigen Aufbau (abwechselnd Boden- und Belüftungsschicht) erreicht. Die Zwangsbelüftung erfolgt mit Hilfe technischer Einbauten [Warrelmann 2002]. Bei der dynamischen Belüftung, die zur Zwangsbelüftung zählt, wird die Luftzufuhr durch regelmäßiges

Wenden bzw. Umsetzen der Mieten erzielt. Die dynamische Belüftung wird in der Praxis am häufigsten angewendet [Warrelmann 2002].

Bezüglich der Regulation des Wassergehaltes der Mieten wird prinzipiell unterschieden zwischen Trockenmieten und Nassmieten. Beim Trockenrotteverfahren wird zu Beginn der Behandlung ein der natürlichen Bodenfeuchte entsprechender Wassergehalt in der Miete eingestellt, so dass während des Betriebes kein Sickerwasser anfällt. Zur Vermeidung einer Austrocknung der Miete wird der Wassergehalt während der Behandlungsdauer regelmäßig kontrolliert und ggf. neu eingestellt. Bei Nassmieten wird das zu behandelnde Bodenmaterial durch Berieselungsanlagen befeuchtet. Das beim Betrieb von Nassmieten anfallende Sickerwasser wird über installierte Drainageeinrichtungen erfasst und kontrolliert abgeleitet. Nach entsprechender Aufbereitung in Abhängigkeit von der Schadstoffbelastung kann das gereinigte Wasser anschließend zur Befeuchtung der Mieten verwendet oder in die Kanalisation abgeleitet werden [LUA NRW 2005].

Die bei der Mietenbehandlung entstehende Abluft wird in der Regel über Bio- oder Aktivkohlefilter geleitet und gereinigt [LUA NRW 2005].

4.1.1.2 Bodenwäsche

Bodenwaschverfahren sind chemisch-physikalische Separationsverfahren. Prinzipielle schadstoffspezifische Beschränkungen und Ausschlusskriterien existieren für Bodenwaschverfahren nicht [LUA NRW 2005]. Mit der Bodenwäsche lassen sich alle herkömmlichen Schadstoffe und Schadstoffkombinationen in Bodenmaterial erfolgreich behandeln. Das Schadstoffspektrum reicht von organischen Stoffen wie Mineralölen und flüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen bis hin zu den Schwermetallen und ihren Verbindungen sowie Cyaniden, Dioxinen und Furanen etc. [Tittel 2002]. Unterschiede ergeben sich beim Aufwand, der im Vorfeld ggf. für eine Bodenvorbehandlung betrieben werden muss [LUA NRW 2005], denn zur erfolgreichen Abtrennung muss das Material zunächst aufgeschlossen werden, d.h. die Bindung zwischen Schadstoff und Bodenkorn muss je nach Schadstoffart durch Lösen (z.B. lösliche Schwermetallverbindungen), Emulgieren (z.B. Mineralölkohlenwasserstoffe), Strippen (z.B. flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe) oder Suspendieren (z.B. Schwermetalle) aufgehoben werden [Tittel 2002]. Die nach dem Aufschluss notwendige Abtrennung der abgelösten Schadstoffe aus der Boden-/Schadstoffsuspension ist beim Strippen unproblematisch. Auch gelöste und emulgierte Schadstoffe lassen sich einfach durch Entwässerung des Bodens zurückhalten. Für das Abtrennen suspendierter Schadstoffpartikel ist dagegen eine umfangreiche Trenntechnik erforderlich [Tittel 2002].

Klassierende Bodenwäsche

Die klassierende Bodenwäsche verfolgt in einem über mehrere Stufen verlaufenden Prozess das technische Ziel, die Schadstoffe direkt von der Bodenmatrix abzuwaschen und in die wässrige Lösung zu überführen, sowie die Bodenmatrix mittels

mehrerer in Reihe geschalteter Klassieraggregate zu fraktionieren. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Großteil der Kontaminanten an der Feinstkornfraktion adsorbiert ist. Diese geht in Form von koaguliertem Flotatschlamm oder Sedimentfilterkuchen in die Weiterbehandlung oder Reststoffentsorgung. [LUA NRW 2005.]

Hochdruckbodenwäsche

Das Verfahrensprinzip der Hochdruckbodenwäsche basiert auf der Einwirkung von mechanischer Energie auf die Bodenpartikel ohne den Einsatz von chemischen Hilfsmitteln und ohne die Bodenpartikel zu zerstören. Der Boden wird per Unterdruck durch ein Strahlrohr geschleust. Dabei tritt Wasser im Strahlrohr aus einem ringförmig angeordneten Düsenkranz aus und schießt kegelförmig in einem Brennpunkt zusammen. Dort werden die adsorbierten Schadstoffe durch große Scherkräfte von den Partikeloberflächen abgetrennt. Es sind Düsenvordrücke bis zu 350 bar anwendbar. Schadstoffe und Feinstkornanteil werden dem Prozesswasser entzogen und als Flotatschlamm/Filterkuchen entsorgt. [LUA NRW 2005.]

4.1.1.3 Thermische Bodenbehandlung

Die thermische Bodenreinigung basiert auf der Überführung der Schadstoffe in die Gasphase durch thermischen Energieeintrag. Die Schadstoffbeseitigung kann durch Verbrennung oder Ausdampfung der Schadstoffe sowie durch pyrolytische Umsetzung erfolgen [Lotter 1999]. Thermische Verfahren sind in erster Linie zur Reinigung von Böden geeignet, die mit organischen Kontaminationen wie KW, PAK, PCB, EOX, aber auch mit flüchtigen anorganischen Verbindungen wie z. B. Cyaniden und Schwermetallen mit niedrigem Siedepunkt (Quecksilber) belastet sind [LUA NRW 2005]. Vor der eigentlichen thermischen Behandlung wird das kontaminierte Bodenmaterial mechanisch aufbereitet [RP Gießen 2002]. Ab Wassergehalten von 10 % kann vor der Verbrennung auch eine Vortrocknungsstufe erforderlich werden [LUA NRW 2005]. Für die Behandlung von Böden, die mit organischen Schadstoffen belastet sind, hat sich das Niedertemperaturverfahren durchgesetzt [Lotter 1999]. Der gereinigte Boden weist nach der thermischen Behandlung keine biologische Aktivität mehr auf. Bei der Verwertung als Vegetationsschicht ist daher eine Anreicherung mit Humus erforderlich [LUA NRW 2005].

Verbrennung

Bei der Verbrennung werden die Schadstoffe durch direkte Beheizung im Drehrohr- oder Wirbelschichtofen bei Sauerstoffüberschuss bei Temperaturen von 450-800 °C verbrannt [LUA NRW 2005] oder das Bodenmaterial auf 1.200-1.400 °C erhitzt [RP Gießen 2002]. Die Verweilzeit des Bodens im Ofen liegt je nach Verfahren bei 30-60 Minuten. In der Nachverbrennung werden die in Gasform überführten Schadstoffe bei Temperaturen bis zu 1.300°C behandelt. Die dabei entstehende Abluft ist gemäß TA Luft zu reinigen [LUA NRW 2005].

Niedertemperaturverbrennung

Beim Niedertemperaturverfahren wird der Boden im Drehrohrofen indirekt durch den Trommelmantel wie auch direkt durch einen Gasbrenner auf Temperaturen von 400-550°C aufgeheizt [LUA NRW 2005]. Es werden auch Temperaturen bis 700 °C angewandt [RP Gießen 2002]. Dabei dampfen die organischen Schadstoffe vollständig aus. Die Verweilzeit im Drehrohrofen beträgt rund 15 Minuten. Das Prozessgas wird der thermischen Gasreinigung zugeführt, in der bei rund 950 °C die organischen Schadstoffe verbrannt werden. Bei chlororganischen Verbindungen sind Temperaturen von 1.200 °C erforderlich [LUA NRW 2005].

Pyrolyse

Als Pyrolyse wird die thermische Behandlung des Bodens unter weitgehendem Sauerstoffabschluss verstanden. Der Boden wird bei Temperaturen von 400-800 °C verschwelt. Die Nachverbrennung erfolgt bei Temperaturen von 1.000-1.300 °C. Es fallen geringere Mengen an zu behandelndem Rauchgas an als bei der direkten Verbrennung [LUA NRW 2005].

Vakuumdestillation

Kernstück dieser Anlage bilden zwei übereinander stehende Schaufeltrockner. Nach dem Befüllen des ersten Trockners wird mit Hilfe einer Vakuumpumpe ein Unterdruck von 100 mbar absolut angelegt und das Bodenmaterial auf 60 °C aufgeheizt. Dabei verdampft das enthaltene Wasser vollständig. Die Beheizung erfolgt mittels Thermalöl, das den die Trommel umgebenden Doppelmantel, die Stirnwände und die Welle der Mischwerkzeuge durchfließt. Nach der Trocknung wird das Bodenmaterial in die zweite baugleiche Trommel gefördert. Durch Anlegen eines Unterdrucks bis unter 5 mbar absolut und einer Maximaltemperatur von über 300 °C werden die Schadstoffe aus dem Bodenmaterial desorbiert. [Czetsch 2002]

Die in beiden Stufen anfallenden Dämpfe werden in Kondensatoren (Rohrbündelwärmetauscher) wieder verflüssigt. Das Kondensat der ersten Stufe wird gereinigt, das der zweiten Stufe gesammelt und gesondert entsorgt. [Czetsch 2002]

4.1.2 Aufbereitung von Straßenaufbruch

Beim Rückbau von Straßen kann durch selektives Aufbrechen der einzelnen Konstruktionsschichten relativ sortenreines Aufbruchmaterial gewonnen werden. Das Material kann entsprechend der Schichten in

- ungebundenes Tragschichtmaterial,
- hydraulisch gebundenes Aufbruchmaterial,
- bitumengebundenes Aufbruchmaterial,
- teerhaltiges Aufbruchmaterial und
- Mischmaterial

unterteilt werden [Klemt 1997]. Als Standardverfahren für die Gewinnung von Ausbauasphalt hat die Kaltfrästechnik weitgehend das Aufbrechen von Schichten mit dem Tiefenlöffel abgelöst, das im kommunalen Straßenbau aber noch anzutreffen ist [Pätzold 1997].

Bei der mechanischen Aufbereitung von Straßenaufbruch wird das Material von Störstoffen befreit, gebrochen, zerkleinert sowie je nach Verwendungszweck entsprechend gesiebt und klassiert.

Ungebundenes Tragschichtmaterial kann – soweit es unbelastet ist – beim Straßenbau direkt wieder eingesetzt werden. Es taucht dann in den Abfallstatistiken nicht auf. Hydraulisch gebundenes Material kann nach einer entsprechenden mechanischer Aufbereitung als Betonzuschlagstoff ebenfalls im Straßenbau verwendet werden.

Bitumengebundener Asphaltaufbruch wird nach einer mechanischen Aufbereitung meistens als Asphaltgranulat im Asphaltmischwerk neuem Asphalt zugemischt. Er kann aber in Ausnahmefällen auch als Verfüllmasse oder in Frostschutz- und Schottertragschichten Verwendung finden. Bei der Zugabe zu neuem Asphalt wird zwischen der Kaltzugabe und der Warmzugabe unterschieden [LfU Bayern 2001].

Bei kalter Zumischung von Ausbauasphalt wird das Mineralgestein in der Trockentrommel über den üblichen Bereich von ca. 180 °C hinaus erhitzt, da die Zugabe des kalten Ausbauasphalts – entsprechend der Recyclingrate und seines Wassergehalts – dem Mischgut Wärme entzieht und die Temperatur des auszuliefernden Asphaltmischguts im Bereich von ca. 160 bis 180 °C liegen muss [LfU Bayern 2001]. Bei Recyclingraten von 25 bis 30 % kann daher eine Mineralguttemperatur – am Trockentrommelaustritt gemessen – von bis zu 300 °C erforderlich sein. Die Recyclingrate beim Kaltzugabeverfahren ist aus diesem Grund i.d.R. auf 30 % bei Freilagerung des Ausbauasphalts begrenzt [LfU Bayern 2001].

Zur Bewältigung größerer Ausbauasphalt-Recyclingraten als 30 % wird das Warmzugabeverfahren eingesetzt. Dabei wird der Ausbauasphalt in einer separaten Trockentrommel getrocknet und auf 130 °C erwärmt. Danach erfolgt die Zusammenführung mit dem heißen Mineralgut und die Verarbeitung mit Frischbitumen zu neuem Asphaltmischgut. Bei der Warmzugabe beträgt die Recyclingrate i.d.R. 50 %, in Einzelfällen auch 60 % [LfU Bayern 2001].

Kohlenteerhaltiges Ausbaumaterial wird einer Kaltaufbereitung unterzogen. Dabei wird es nach dem Brechen und Klassieren mit Zement hydraulisch gebunden (umhüllt). Anschließend kann es in hydraulisch gebundenen Tragschichten beim Straßenbau, Parkplatzbau und Deponiestraßenbau eingesetzt werden.

4.1.3 Aufbereitung von Bauschutt

Um eine hochwertige Verwertung von Bauschutt zu erreichen, ist es i.d.R. notwendig, die verschiedenen Materialfraktionen bereits an der Anfallstelle getrennt zu halten. Eine Vermischung erschwert die Verwertung meist erheblich oder macht sie

unmöglich, da eine nachträgliche Sortierung häufig nicht die gewünschte Sortenreinheit garantiert [MUF-RLP 2004]. Durch enthaltene Schadstoffe oder schadstoffhaltige Bauteile kann auch der gesamte Bauschutt kontaminiert werden. Bei schadstoffbelasteter Bausubstanz verstößt der konventionelle Abriss ohne Getrennthaltung außerdem gegen das Vermischungsverbot [LfU Bayern 2003a]. Daher sollten zunächst alle schadstoffhaltigen Materialien aus dem Bauwerk entfernt und die verschiedenen Baumaterialien möglichst sortenrein erfasst werden [MUF-RLP 2004].

In der Praxis besteht Bauschutt vor allem aus Kies und Sand, Betonbruch, Steinen, Ziegeln, Keramik, Gips und Mörtel. Außerdem können Metalle, Kunststoffe, Holz, Papier und Glas enthalten sein. Bei der Aufbereitung von Bauschutt wird das Material gebrochen (Backen- und Prallbrecher) und klassiert (durch Sieben), eventuell auch gemahlen oder gewaschen. Störstoffe (z.B. Metalle, Kunststoffe, Holz, Papier, Glas) werden abgetrennt oder aussortiert (Windsichten, Magnetabscheidung, Aquamator¹⁹, händisch). Im Ergebnis werden Sekundär- bzw. Recyclingbaustoffe verschiedener Körnungen hergestellt, die in den verschiedensten Baumaßnahmen direkt oder als Zuschlagsstoff für Beton Verwendung finden. Die Aufbereitung erfolgt in mobilen, semimobilen oder stationären Anlagen.

Mobile Anlagen sind auf einem Fahrgestell montiert, sehr kompakt gebaut, ohne großen Montageaufwand gut transportierbar und schnell aufbaubar [Silbe 1997]. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem Brecher zur Zerkleinerung und einer Siebanlage zur Trennung des Materials in zwei oder drei Fraktionen. Eine Sortierung der aufzubereitenden Stoffe kann hier i.d.R. nicht während des Aufbereitungsprozesses erfolgen, so dass die stoffliche Zusammensetzung des aufbereiteten Recyclingmaterials der des Ausgangsmaterials entspricht [Klemt 1997].

Stationäre Anlagen sind fest an einem Ort aufgebaut. Durch das Vorhalten von großen Lagerflächen und einer nach Baustoffen getrennten Lagerung der Eingangsmaterialien kann die Mischung des Aufgabeguts weitestgehend selbst bestimmt werden [Silbe 1997]. Sie verfügen je nach Ausstattung über mehrere Zerkleinerungsstufen und Sortiermodule. Bei inhomogener Zusammensetzung des aufzubereitenden Materials kann durch Separieren von unerwünschten Stoffen die Qualität hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung des Endmaterials entscheidend verbessert werden. Außerdem können die aussortierten Materialien einer weiteren Aufbereitung zugeführt werden (z.B. Bewehrungsseisen) [Klemt 1997].

Semimobile Anlagen bestehen aus kompakt aufgebauten Baugruppen zum Brechen und Sieben, die zerlegbar und auf Tiefladern transportierbar sind. Sie werden sowohl mobil als auch stationär eingesetzt. Sie kommen häufig als Bestandteile stationärer Anlagen zum Einsatz und werden dann mit weiteren Aggregaten wie Windsichter

¹⁹ Beim Aquamator wird der Materialstrom auf einem Förderband mit variabler Neigung transportiert, wobei Wasserdüsen leichtere Stoffe in einen separaten Ausgang abtreiben lassen. Dank der variablen Neigung können verschiedene Stufen der Dichtentrennung eingestellt werden.

und geschlossenen Lesestationen ausgerüstet. Je nach Einsatz sind die Produktqualitäten unterschiedlich [Silbe 1997].

Die Aufbereitung von Gipsplatten erfolgt – falls sie nicht bei Neubauten oder beim kontrollierten Rückbau sortenrein angefallen sind – nach der Aussortierung aus dem Bauschutt. Zur weiteren Aufbereitung werden die Platten zunächst zerkleinert bzw. aufgemahlen, wobei sich Gips und Karton mechanisch weitestgehend trennen. Nach der Trennung von Gips und Karton kann der Gips, falls keine Kontamination vorhanden ist, der Gipsindustrie zugeführt werden oder vor Ort in einem Kocher zu Stuckgips kalziniert werden [Hummel 1997]. Für beschichtete oder gestrichene Platten bietet sich das Müller-Kühne-Verfahren an. Dabei wird der Gips (Calciumsulfat) bei Temperaturen oberhalb von 700 °C reduzierend gespalten, wobei Calciumoxid entsteht. Dieses wird dann zur Zementklinkerherstellung verwendet. Das bei der Spaltung entstehende Schwefeldioxid wird zu Schwefelsäure verarbeitet [Hummel 1997].

4.1.4 Aufbereitung von Gleisschotter

Unbelasteter Gleisschotter kann nach einfacher Aufbereitung (Abtrennung von Störstoffen und Klassierung) als Gleisschotter wieder Verwendung finden. Für mit Schadstoffen belasteten Gleisschotter stehen verschiedene Behandlungsverfahren zur Verfügung. Er kann entweder gewaschen oder biologisch, chemisch oder thermisch behandelt werden. Um nicht die Gesamtmenge aufwendig behandeln zu müssen, kommt auch eine vorherige mechanische Aufbereitung (Klassierung) in Frage. Behandelt wird anschließend nur die höher belastete Feinkornfraktion [LfU Bayern 2003].

4.2 Aufbereitung von Hausmüllverbrennungsaschen

Aschen aus der Verbrennung von Hausmüll werden vor einer Verwertung entweder konventionell aufbereitet oder einer weitergehenden Aufbereitung unterzogen. Beide Aufbereitungsverfahren werden im Folgenden beschrieben.

4.2.1 Konventionelle Aufbereitung

Bei der konventionellen Aufbereitung handelt es sich um eine Kombination einfacher Verfahren.

Die Asche wird am Rostende der Müllverbrennungsanlage mit einem hydraulisch betätigten Stöbelentschlacker ausgelesen. Die Wasserversorgung im Stöbelentschlacker wird mit einem erheblichen Überschuss betrieben, um leicht lösliche Salze aus der Asche zu entfernen. Dabei wird beispielsweise eine Reduktion der Chloride um ca. 50 % erreicht. [VGB o.J.]

Nach einer der Entwässerung dienenden Ablagerungszeit von etwa zwei Wochen oder dem Abpressen der Asche [VGB o.J.], können die erforderlichen Aufbereitungsschritte durchgeführt werden [VGB o.J.] [Zwahr 2006]:

1. Die Asche wird gesiebt. Dabei erfolgt eine Trennung in zwei Fraktionen (1. Fraktion: 0-32 mm; 2. Fraktion: > 32 mm).
2. Brechen der 2. Fraktion in einer Prallmühle.
3. Abtrennung von Eisenschrott aus beiden Fraktionen mittels mehrerer Magnetabscheider und von NE-Metallen durch ein Wirbelstromverfahren. Die NE-Metalle werden dabei zu über 90 % ausgetragen.
4. Absiebung einer Fraktion > 32 mm aus der 2. Fraktion. Die Fraktion > 32 mm wird als sogenanntes Überkorn wieder in den Bunker verbracht.
5. Zusammenführung der beiden Fraktionen 0-32 mm und Absieben einer Fraktion > 10 mm.
6. Abtrennen von Leichtstoffen (unverbrannte Reste) aus der Fraktion > 10 mm mittels Windsichtung und Rückführung in die Verbrennung.
7. Zusammenführen der beiden Fraktionen (größer/kleiner 10 mm) über eine Bandwaage zur Einstellung der Siebkennlinie.

Anschließend wird die Asche, wie im Merkblatt M 19 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [LAGA 1994] gefordert, drei Monate gelagert. Während der Lagerung finden natürliche Alterungsreaktionen wie Oxidations-, Hydratations- und Carbonatisierungsvorgänge statt [Lück 2004]. Das Ergebnis ist die Abnahme der Löslichkeit von Salzen und Schwermetallen.

Da am abgetrennten Eisenschrott noch Aschereste haften, wird er in einer separaten Anlage in einer Stabtrommel und einer Prallmühle von den Resten befreit und zum Schluss in einer Presse zu Ballen gepresst [VGB o.J.].

4.2.2 Weitergehende Aufbereitung

Ziele der weitergehenden Aufbereitung von MVA-Aschen im Gegensatz zur konventionellen Ascheaufbereitung sind [Lück 2004]:

- klar definierte Kornverteilungen,
- hohe Kornfestigkeiten, scharfkantige Kornoberflächen, geringe Porosität, runde Schlackekörner,
- vollständige Auslese von Unverbranntem,
- maximale Schadstoffentfrachtung und Abscheidung von leicht löslichen Salzen,
- weitgehende Aussortierung von Eisen und NE-Metallen, auch in unteren Korngrößenbereichen und
- hohe Reinheiten der gewonnen Metallfraktionen.

Die weitergehende Ascheaufbereitung wird im Folgenden beispielhaft an Hand des Verfahrens der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl dargestellt, dass seit mehreren Jahren in Ludwigshafen großtechnisch betrieben wird [Lück 2004].

In der ersten Stufe erfolgt eine konventionelle Aufbereitung, wobei unverbrannte Bestandteile und NE-Metalle lediglich durch Handlese entfernt werden und das gesamte Aschematerial auf eine Korngröße von unter 22 mm zerkleinert wird.

Bevor das Aschematerial in die sich als zweite Stufe anschließende nasse Verfahrensstufe gelangt wird es nochmals einer Magnetabscheidung unterzogen.

In der nassen Verfahrensstufe²⁰ wird der Materialstrom zunächst auf einem Schwing-sieb unter starker Bebrausung mit Wasser bei 2 mm abgesiebt. Die hierbei erzeugten Kornklassen (< 2 mm und 2-22 mm) werden in einem Hydrobandbandscheider von schwimmfähigen Störstoffen befreit. Bei den Störstoffen handelt es sich im wesentlichen um Unverbranntes, dass der Verbrennung wieder zugeführt wird.

Die Asche < 2 mm wird in einem Sandabscheider in zwei Sandqualitäten getrennt und auf Spaltsieben entwässert. Die Asche der Korngröße 2-22 mm wird mittels Schwingsieben in vier Fraktionen klassiert (2-5, 5-8, 8-16 und > 16 mm). Die Fraktion > 16 mm wird zur Prallmühle der ersten Stufe (konventionelle Aufbereitung) zurückgeführt, da sich in ihr ein geringer Anteil an Überkorn > 22 mm befindet.

Nach der nassen Aufbereitung werden die einzelnen Fraktionen abschließend über einen Wirbelstromabscheider geführt, um die noch enthaltenen NE-Metalle abzutrennen.

²⁰ Dieses Nassverfahren dient in erster Linie der mechanischen Aufbereitung des Materials (Austrag des Feinstkorns mit der Flüssigphase). Wird die abgeschiedene Feinfraktion werden auch die darin angereicherten Schadstoffe ausgetragen. Sollen Salze ausgewaschen werden, muss der Waschvorgang speziell darauf abgezielt werden.

5 Verwendung aufbereiteter Abfälle und Materialien

Die nach den im vorangegangenen Kapitel dargestellten Verfahren aufbereiteten Abfälle und hergestellten Baustoffe können in verschiedensten Bereichen verwendet werden. Ihre Einsatzgebiete werden im Folgenden kurz dargestellt.

5.1 Einsatz beim Straßen- und Wegebau

Der Straßen- und Wegebau bietet ein großes Einsatzgebiet für die durch Aufbereitung aus Bau- und Abbruchabfällen gewonnenen Recycling-Baustoffe. Aufgrund der Anforderungen an die bautechnische Eignung spielt der direkte Einsatz der Bau- und Abbruchabfälle nur eine untergeordnete Rolle. Recycling-Baustoffe werden in Frostschutzschichten, in ungebundenen und hydraulisch gebundenen Tragschichten sowie in Asphalttragschichten eingesetzt. Weiterhin dienen sie als Zuschlagmaterial für Beton zur Herstellung von Betonfahrbahndecken und werden als Pflasterbettungsmaterial und Betonsteinpflaster verwendet. Für ihre Verwendung und Qualitätssicherung existiert ein Vorschriftenystem, das ergänzt wird durch zusätzliche Regelungen für industrielle Nebenprodukte und Recyclingbaustoffe beispielsweise der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, z.B. [FGSV 2001] [FGSV 2002a].

Bodenaushub wird im Straßen- und Wegebau bei der Erstellung des Unterbaus und von Tragschichten verwendet [MUF-RLP 2004]. Dabei sind die von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall aufgestellten Bedingungen und Zuordnungswerte zu erfüllen [LAGA 1997] [LAGA 2004b]. Außerdem muss er sinngemäß die für die Art der Schicht festgelegten Anforderungen für die Kornform sowie den Widerstand gegen Zertrümmerung und Frost nach Anhang E der TL Gestein-StB erfüllen [FGSV 2004b].

Bitumengebundener Ausbauasphalt/Straßenaufbruch wird i.d.R. nach einer Aufbereitung im Asphaltmischwerk neuem Asphalt zugemischt. Kohlenteerhaltiger Ausbauasphalt/Straßenaufbruch wird nach der Aufbereitung i.d.R. nur im Kaltverfahren mit Zement umhüllt und kommt in hydraulisch gebundenen Tragschichten beim Straßenbau, Parkplatzbau und Deponiestraßenbau zum Einsatz. Er darf nur unter wasserundurchlässigen Schichten eingebaut werden, und die Seitenflächen sind mit Bitumenemulsion zu versiegeln [LAGA 1997].

Gleisschotter, der keiner Wiederverwendung zugeführt wird, findet Verwendung im Straßen- und Wegebau sowie bei der Erstellung von Parkflächen. Dabei sind die entsprechenden Merkblätter der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, z.B. das Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe im Straßenbau [FGSV 2002a] zu beachten.

Hausmüllverbrennungsaschen werden in hydraulisch gebundenen Tragschichten, in Frostschutzschichten, in Schottertragschichten und ungebundenen Verkehrsflächen eingesetzt [VGB o.J.]. Die Kriterien für die Verwendung sind beispielsweise in

einem Merkblatt und einer Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [LAGA 1994] [LAGA 1997] sowie in einer Richtlinie der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [FGSV 2001] geregelt.

5.2 Verwendung im Tief- und Landschaftsbau

Auch der Tief- und Landschaftsbau bietet vielfältige Möglichkeiten für den Einsatz von Bauschutt bzw. daraus gewonnener Recycling-Baustoffe. Recycling-Baustoffe werden verwendet zum Bau von Dämmen, Deichen und Lärmschutzwällen, zur Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben sowie zur Bodenverbesserung und zur Bodenverfestigung. Sie werden eingesetzt als Rasen- und Parkdecksubstrat, für Schotterrassen sowie als Baumsustrat insbesondere im Stadtstraßenbereich. Weiterhin finden sie Anwendung als Gesteinskörnung für Beton und Mörtel (unbewehrter Beton, Betoninnenbauteile, Betonaußenbauteile, wasserundurchlässiger Beton, Beton mit hohem Frostwiderstand, Stahlbeton) sowie im Betonbau beispielsweise bei der Herstellung von Sauberkeitsschichten unter Fundamenten, bei der Hohlraumverfüllung, im Unterbeton für Auffüllungen und für Beton im Garten- und Landschaftsbau [ARGE KWTB 2001] [ARGE KWTB 2003].

Der von der öffentlichen Hand verwertete Bauschutt wird ebenfalls beim Bau von Straßen, Wegen und Lärmschutzwällen verwendet. Außerdem wird er im Landschaftsbau, zur Landschaftsgestaltung und zur Rekultivierung ehemals industriell, gewerblich oder militärisch genutzter Flächen und Altablagerungen eingesetzt [StBA 2004] [StBA 2005].

Bei allen oben genannten Anwendungen sind die von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall aufgestellten Bedingungen und Zuordnungswerte [LAGA 1997] zu beachten, sowie die für bestimmte Anwendungen in den Richtlinien und Merkblättern der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen genannten Vorgaben [FGSV 2001] [FGSV 2002a] einzuhalten.

Die Verwendung von Bodenaushub im Tief- und Landschaftsbau erfolgt vor allem durch die öffentliche Hand. Einsatzgebiete sind der Bau von Lärmschutzwällen und Deichen, die Landschaftsgestaltung sowie die Rekultivierung ehemals industriell, gewerblich oder militärisch genutzter Flächen und Altablagerungen [StBA 2004] [StBA 2005]. Beim Einbau sind die von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall aufgestellten Bedingungen und Zuordnungswerte zu beachten [LAGA 1997] [LAGA 2004b].

Straßenaufbruch, der nicht wieder beim Straßenbau Verwendung findet, wird zum überwiegenden Teil als Recycling-Baustoff verwertet (s.o.). Geringe Mengen, die durch die öffentliche Hand verwertet werden, kommen in Lärmschutzwällen, im Landschaftsbau, bei der Landschaftsgestaltung, bei der Errichtung von Freizeit- und Sportanlagen sowie bei der Rekultivierung ehemals industriell, gewerblich oder militärisch genutzter Flächen und Altablagerungen zum Einsatz [StBA 2004] [StBA 2005]. Bei der Verwendung von ungebundenem Straßenaufbruch außerhalb des

Straßen-, Wege- und Verkehrsflächenbaus gelten die Bedingungen und Zulassungswerte für Boden, wenn es sich um natürliche Mineralstoffe handelt, ansonsten sind diejenigen anzuwenden, die für den jeweiligen mineralischen Abfall gelten [LAGA 1997]. Für Natur- und Betonsteine, die zu Recycling-Baustoffen aufbereitet wurden, gelten die Regeln für Bauschutt [LAGA 1997]. Die Verwertung aufbereiteter sonstiger Werksteine richtet sich nach den Regeln für die jeweiligen mineralischen Abfälle oder nach dem Ergebnis der Einzelfallprüfung. Ihre Wiederverwendung ist nur außerhalb besonders sensibler Flächen (z.B. Spiel- und Sportplätze, Klein- und Hausgärten, Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete) zulässig [LAGA 1997].

Nicht wiederverwendeter Gleisschotter wird zum Teil zur Rekultivierung von Kies-, Sand- und Tongruben verwendet [DB 2006].

Hausmüllverbrennungsaschen können unter ganz bestimmten, in der Mitteilung 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [LAGA 1997] genannten Bedingungen auch in Lärmschutzwällen und Straßendämmen Anwendung finden. Die Verwendung bei Baumaßnahmen in beispielsweise Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebieten, in Wasservorranggebieten, in Gebieten mit häufigen Überschwemmungen, in Karstgebieten sowie auf Flächen mit sensibler Nutzung (z.B. Spiel- und Sportplätze) ist hingegen ausgeschlossen [LAGA 1997]. Auch in Dränageschichten dürfen Hausmüllverbrennungsaschen nicht eingesetzt werden.

5.3 Verwertung im Deponiebau sowie bei der Rekultivierung von Deponien

Im Jahr 2003 wurden im Deponiebau ca. 9,4 Mio. Mg Abfälle eingesetzt [StBA 2005]. Ihr Einsatz erfolgte beispielsweise

- bei der Errichtung des Basisabdichtungssystems [RP Gießen 2002],
- beim Bau von Trennwänden und Fahrstraßen [RP Gießen 2002],
- in der Gasdränageschicht [ARGE KWTB 2001] [ARGE KWTB 2003],
- bei der Errichtung des Oberflächenabdichtungssystems [RP Gießen 2002] sowie
- zur Profilierung des Deponiekörpers [BMU 2004].

Beim Deponiebau bzw. der Rekultivierung von Deponien wurden folgende Abfälle und Materialien verwendet:

- Recycling-Baustoffe [ARGE KWTB 2001] [ARGE KWTB 2003] [ARGE KWTB 2005],
- Bauschutt [ARGE KWTB 2003] [ARGE KWTB 2005],
- Straßenaufbruch [ARGE KWTB 2003] [ARGE KWTB 2005],
- Bodenaushub [ARGE KWTB 2003] [ARGE KWTB 2005],
- Gleisschotter [DB 2006] und

- Hausmüllverbrennungssasche [Krass 2004] [LfU Bayern 2002].

Bei den Fraktionen Bauschutt, Straßenaufbruch und Bodenaushub kamen auch belastete Materialien zum Einsatz.

Seit dem 1. September 2005 ist die Verwertung auf Deponien in der Deponieverwertungsverordnung geregelt [DepVerwV 2005].

5.4 Einsatz im Tagebau

Bei der Gewinnung von Bodenschätzen im Tagebau werden sowohl bei der Rekultivierung als auch aus bergtechnischen und bergsicherheitlichen Gründen Abfälle direkt oder nach einer Aufbereitung bzw. Behandlung eingesetzt. Der Einsatz erfolgt beispielsweise

- zur Sicherung von Böschungen,
- bei Anlage und Unterhalt von Förder- und Fahrwegen,
- um geochemische und hydrochemische Vorgänge (z.B. Pufferung) positiv zu beeinflussen,
- zur Verfüllung,
- um Oberflächen für die künftige Nutzung herzustellen und
- um Restlöcher und Halden zu gestalten [LAB 1998].

Im Jahr 2003 wurden rund 82,8 Mio. Mg Abfälle in Tagebauen abgelagert [StBA 2005]. Da nicht jeder Abfall im Tagebau verwendet werden kann, hat der Länderausschuss Bergbau Anforderungen für die stoffliche Verwertung von Abfällen im Tagebau erarbeitet [LAB 1998]. Darin werden insbesondere

- mineralische Abfälle aus dem Baubereich, Altlasten und Schadensfällen,
- Schlacken und Aschen aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen,
- Schlacken aus Eisen-, Stahl- und Tempergießereien,
- Abfälle aus kohlegefeuerten Kraftwerken und Feuerungsanlagen sowie
- organische Abfälle und Klärschlamm

als geeignet genannt, wenn sie die entsprechenden Anforderungen einhalten.

6 Qualität mineralischer Abfälle

In diesem Kapitel wird geprüft, für welche Schadstoffparameter Zuordnungswerte des Eckpunktepapiers durch die erhobenen Daten für den Median oder das 80%-Percentil überschritten werden. Soweit Daten hierfür vorhanden sind, wird zusätzlich das 90%-Percentil betrachtet. Neben dem Abgleich mit den Zuordnungswerten im Eckpunktepapier wird geprüft, wie die Einstufung zur Verwertung nach dem aktuellen Verordnungsentwurf „Verordnung zur Regelung des Einbaus von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken und zur Änderung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung“, Stand 13.11.2007, zu treffen ist. Abschließend werden die erhobenen Daten, im Falle von Überschreitungen beim 80 %-Percentil der ZOW aus dem Eckpunktepapier oder VO-Entwurf, den ZOW der alten LAGA Mitteilungen M 20 gegenübergestellt, um Veränderungen der neuen Festsetzungen gegenüber der früheren Praxis aufzuzeigen.

Der Abgleich mit den Minimal-, Maximalwerten und dem arithmetischen Mittel bringt hierbei keine aussagefähigen Ergebnisse, da diese zu stark durch einzelne „Extremwerte“ bestimmt werden. Sie können aber Hinweise zu der Aussagefähigkeit der Datensätze geben und werden deshalb bei Bedarf mit angegeben.

Aussagen zum pH-Wert werden dabei nur vereinzelt gemacht, da für den pH-Wert im Normalfall keine Über- oder Unterschreitungen beobachtet werden. Selbst wenn, der pH-Wert die Zuordnungswerte nicht einhält, wird dies in der Praxis kaum als Hinderungsgrund für ein Recycling herangezogen. Wenn Angaben zum pH-Wert gemacht werden, handelt es sich dabei immer um den oberen Grenzwert.

Die erhobenen Datensätze sind in Excel-Tabellen (Anhang 6) mit allen enthaltenen, relevanten Daten und Parametern dargestellt.

Je größer das Datenkollektiv, umso zuverlässiger sind die aus den Vergleichen zu ziehenden Rückschlüsse. Ein eindeutiger Bezug zwischen den Qualitäten und den Mengen ist nicht möglich, da zu den Analysen keine Informationen über die beprobten Mengen an Materialien und Abfälle vorhanden waren. Liegen jedoch ausreichend große Datenkollektive vor, ist bei den meisten Materialien dennoch davon auszugehen, dass die Probenanzahl auch Hinweise auf die Gesamtmengen zulässt.

Zunächst werden die Vergleiche anhand der Datensätze aus der Fragebogenaktion vorgenommen und dann mit weiteren Datensätzen aus der Literatur oder der ABANDA-Datenbank des LUA-NRW abgeglichen.

In allen Tabellen, in denen gemessene Werte den ZOW gegenübergestellt werden, sind Überschreitungen farblich gekennzeichnet. Rot Markierungen bedeuten dabei immer, dass der höchste vorhandene ZOW überschritten ist (z.B. RC 3, HOS 2 oder HS). Materialgruppen, bei denen nur ein ZOW existiert (z.B. HS), können deshalb nur rote Markierungen aufweisen. Orange markiert werden Überschreitungen des

nächst niedrigeren ZOW (z.B. RC 2 oder HOS 1). Materialgruppen, bei denen zwei ZOW existiert (HOS), können deshalb nur rote und orange Markierungen aufweisen. Gelbe Markierungen zeigen, dass bei den Gruppen, in denen drei ZOW existieren (SWS, RC, BM), der niedrigste ZOW über- und der mittlere ZOW unterschritten wird.

Edelstahlschlacken, wie Blei-Zink-Schlacken oder Kupferhüttenschlacken werden weder im aktuellen VO-Entwurf noch im Eckpunkt Papier geregelt. Sie werden deshalb hier nicht dargestellt. Die hierzu und zu sekundärmetallurgischen Schlacken erhobenen Datensätze sind in den Datensätzen in Anhang 6 aufgeführt.

Bezüglich dem Abgleich mit den Werten des aktuellen Verordnungsentwurfs „Verordnung zur Regelung des Einbaus von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken und zur Änderung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung“ (BMU 2007), ist zu berücksichtigen, dass die Materialwerte in diesem Entwurf auf ein Säulenverfahren (Säulenschnelltest nach DIN 19528) mit einem Wasser/Feststoffverhältnis von 2:1 (WF 2) beruhen, während die Praxiswerte ausschließlich nach dem Schütteltest DEV S4 (WF 10) ermittelt wurden (vgl. hierzu auch LANUV 2007 und Kapitel 7.1.4 und 7.2). Um die Praxiswerte dennoch mit den Materialwerten des Entwurfs zur Ersatzbaustoff-VO vergleichen zu können, wurden die auf ein Wasser-Feststoffverhältnis von 10:1 umgerechneten „Materialwerte“ für den Abgleich herangezogen. Die Genauigkeit dieser Umrechnung ist von Parameter zu Parameter verschieden und birgt damit eine Ungenauigkeit, die erst dann exakt abgeschätzt werden kann, wenn ausreichende Daten aus Parallelbeprobungen nach dem neuen Säulenverfahren und dem DEV S4-Verfahren vorliegen. Insofern kann diese Gegenüberstellung lediglich als erster orientierender Abgleich gewertet werden.

6.1 Materialien und Abfälle aus der Herstellung von Eisen, Stahl und Nichteisenmetallen

Im Bereich der Materialien und Abfälle aus der Herstellung von Eisen, Stahl und Nichteisenmetallen wurden aus der Fragebogenaktion belastbare Datensätze insbesondere von dem FEhS-Institut (Institut für Baustoff- Forschung e.V.) in Duisburg Rheinhausen zur Verfügung. Die Daten basieren auf einem Stamm von Daten der Mitte der 90er Jahre bereits zur Erarbeitung verschiedenster Regelwerke zur Verfügung gestellt worden war. Diese Daten wurden aktualisiert, so dass nun auch die Jahre 1996 bis 2004 berücksichtigt sind. Aus dem alten Datensatz wurden die Daten der Werke gestrichen, die inzwischen stillgelegt wurden.

Die Daten beziehen sich auf bearbeitete Schlacken, die als Baustoffe vermarktet wurden. Unaufbereitete Schlacken und Abfälle aus der Aufbereitung weisen z. T. Stoffzusammensetzungen, gelegentlich erheblich höhere Schadstoffgehalte im Feststoff oder Eluat auf.

Die Datensätze des FEhS-Instituts enthalten überproportional Daten von Schlacken, die durch das FEhS-Institut einer Fremdüberwachung im Rahmen der Gütesicherung unterzogen werden.

Die Eluatuntersuchungen wurden an 8/11 mm Prüfkörnungen nach DEV S4 durchgeführt. Eine Ausnahme bilden die granulierten Schlacken, die in der Originalkörnung ausgelaugt wurden.

Die Feststoffgehalte wurden als Vollanalysen, z.B. nach Mikrowellenaufschluss bestimmt. Sie sind deshalb nicht mit den Werten nach Königswasseraufschluss vergleichbar.

6.1.1 Hochofenstückschlacke (HOS)

Für Hochofenstückschlacke geben das Eckpunktepapier und der VO-Entwurf die gleichen Zuordnungswerte für die elektrische Leitfähigkeit (HOS 1 und 2 je 1500 µS/cm) und Sulfat (HOS 1: 300 mg/l und HOS 2: 800 mg/l) vor. Diese Zuordnungswerte entsprechen auch den Vorgaben der Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB 2004 – [FGSV 2004].

Die von dem FEhS-Institut zur Verfügung gestellten Daten mit 159 Messwerten für die elektrische Leitfähigkeit und 258 für Sulfat unterschreiten sowohl im Median, als auch im 80%-Percentil die ZOW für HOS 1 deutlich.

Tabelle 6.1 Datensatz des FEhS-Instituts zu Hochofenstückschlacke im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs und des Eckpunktepapiers

| 4 - HOS - FEhS | HOS-1 | HOS-2 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------|-------|---------|------------|------------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 12 | 12 | | 10,8 | 11,5 | 10,7 | 11,5 | 262 |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 1500 | µS/cm | 570 | 1400 | 540 | 930 | 159 |
| Sulfat | 300 | 800 | mg/l | 109 | 600 | 93 | 173 | 258 |

Bei einem Vergleichsdatensatz aus Hamburg für den je 10 Messwerte für elektrische Leitfähigkeit und Sulfat vorliegen, lag das 80%-Percentil für Sulfat mit 304 mg/l knapp über dem ZOW für HOS 1 von 300 mg/l. Gemäß Eckpunktepapier würden Werte bis 315 mg/l im Rahmen der Gütesicherung (Fremdüberwachung) als zulässige Überschreitung toleriert werden. Der Median lag mit etwa 245 mg/l unter HOS 1 aber deutlich oberhalb der repräsentativeren Daten der FEhS.

Der dritte Datensatz aus ABANDA mit 27 Messwerten für die elektrische Leitfähigkeit und 26 für Sulfat liegt für Sulfat im Bereich der Daten des FEhS-Instituts, weist aber höhere Werte bei der elektrischen Leitfähigkeit auf. Nach den ZOW des Eckpunktepapiers gibt es weder für den Median noch das 80%-Percentil eine Überschreitung.

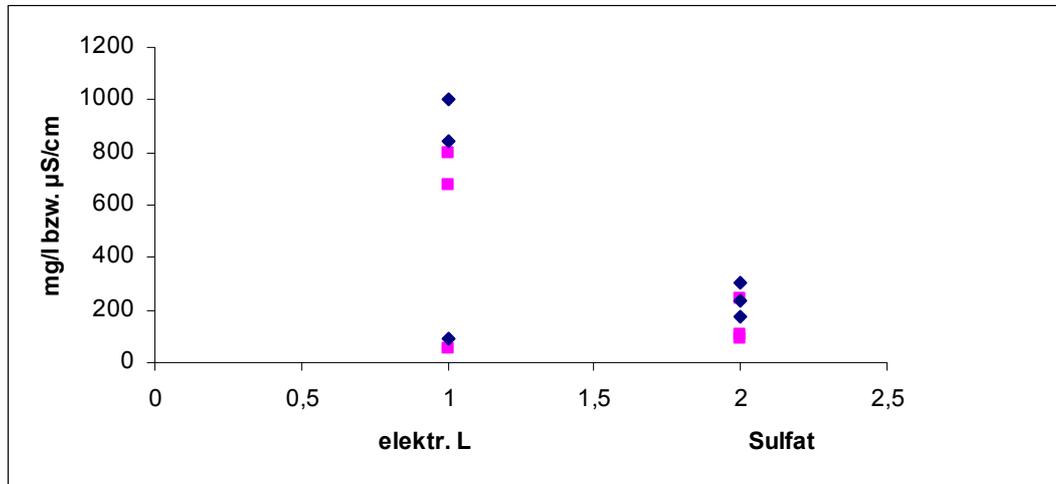


Abbildung 6.1 Darstellung der Werte für elektrische Leitfähigkeit und Sulfat für den Median (Quadrat, lila) und 80 %-Percentil (Raute, Blau) der erfassten Datensätze zu HOS

6.1.2 Hüttensand (HS)

Für Hüttensand liegt nur ein aussagefähiger Datensatz vor, der vom FEhS-Institut zur Verfügung gestellt wurde. Da Hüttensand ein sehr gleichmäßiger Ersatzbaustoff ist reicht die Datenlage dennoch für eine gute Einschätzung des Einflusses der neuen ZOW auf die Verwertungssituation.

Diese Daten zeigen, dass die ZOW des Eckpunktepapiers für elektrische Leitfähigkeit und Sulfat im 80 %-Percentil deutlich unterschritten werden.

Tabelle 6.2 Datensatz des FEhS-Instituts zu Hüttensand im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers

| 1 - HS - FEhS | HS | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------|---------|------------|-------------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 12 | | 10,7 | 11,5 | 10,7 | 11,3 | 50 |
| elektrische Leitfähigkeit | 1000 | µS/cm | 320 | 1100 | 310 | 640 | 25 |
| Sulfat | 150 | mg/l | 21 | 65 | 18 | 42 | 50 |

Im aktuellen VO-Entwurf ergeben die Zuordnungswert für die elektrische Leitfähigkeit und Sulfat rechnerisch eine Reduzierung und Vanadium wurde zusätzlich aufgenommen. Im 80 %-Percentil werden alle ZOW eingehalten.

Tabelle 6.3 Datensatz des FEhS-Instituts zu Hüttensand im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs²¹

| 1 - HS - FEhS | HS | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-----|---------|------------|-------------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 12 | | 10,7 | 11,5 | 10,7 | 11,3 | 50 |
| elektrische Leitfähigkeit | 750 | µS/cm | 320 | 1100 | 310 | 640 | 25 |
| Sulfat | 50 | mg/l | 21 | 65 | 18 | 42 | 50 |
| Vanadium | 30 | µg/l | 5 | 10 | 5 | 7 | 30 |

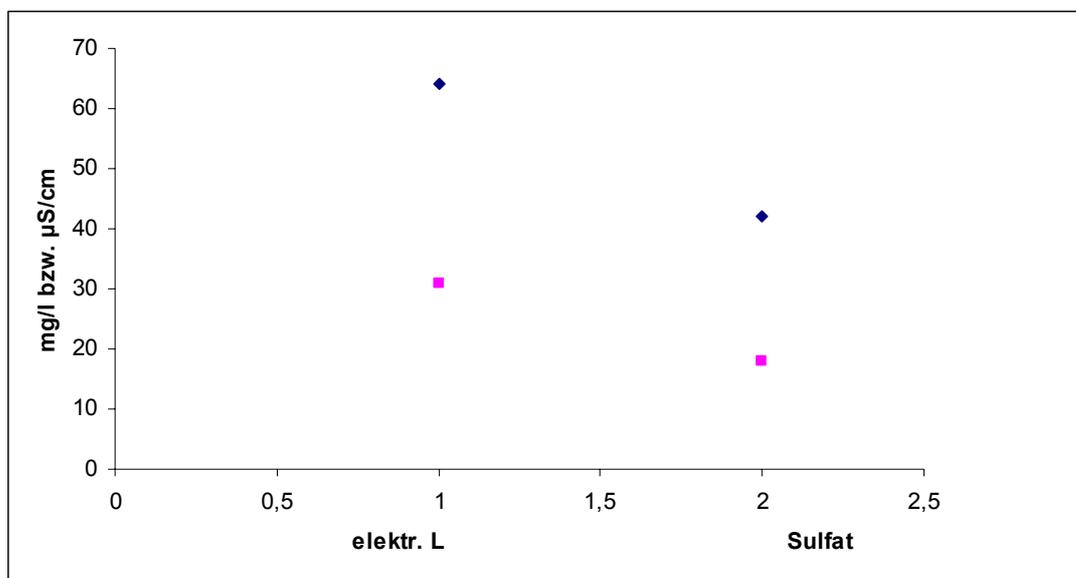


Abbildung 6.2 Darstellung der Werte für elektrische Leitfähigkeit und Sulfat für den Median (Quadrat, lila) und 80 %-Percentil (Raute, Blau) des erfassten Datensatzes zu HS

6.1.3 Stahlwerksschlacken (SWS)

Die Stahlwerksschlacken werden soweit möglich nach den Verfahren der Stahlproduktion in LD-Schlacken und Elektroofenschlacken zugeordnet.

Es liegt ein Vergleichsdatsatz aus ABANDA zu SWS vor, für den eine Zuordnung zu LDS oder EOS nicht möglich ist. Mit Ausnahme von der elektrischen Leitfähigkeit sind die verfügbaren Messwerte allerdings deutlich begrenzt. Er weist Überschreitungen bei der elektrischen Leitfähigkeit auf, die im Median knapp und im 80 %-Percentil deutlich oberhalb von SWS 3 liegen.

Für Fluorid liegt das 80 %-Percentil oberhalb von SWS 1.

²¹ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Tabelle 6.4 ABANDA - Datensatz zu SW-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers²²

| 1 - SWS - ABAND | SWS-1 | SWS-2 | SWS-3 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------|-------|-------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 13 | 13 | 13 | | | | | | | |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 1500 | 1500 | µS/cm | 2036,9 | 95 | 6410 | 1540 | 3080 | 27 |
| Fluorid | 0,75 | 2 | 2 | mg/l | 0,9 | 0,1 | 1,5 | 1 | 1,5 | 6 |
| Chrom (gesamt) | 30 | 75 | 100 | µg/l | 181,4 | 3 | 1500 | 10 | 30 | 9 |
| Vanadium | 50 | 100 | 100 | µg/l | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 2 |

Im VO-Entwurf wurde der ZOW für Chrom gestrichen und dafür Molybdän neu aufgenommen. Für Molybdän liegen allerdings keine Werte vor, da dies bei der Gütesicherung bisher nicht im Parameterumfang enthalten war. Bei Fluorid entspricht der ZOW für SWS 2, bei Vanadium für SWS 1 eine Absenkung, während bei beiden der neue ZOW für SWS 3 einer z.T. deutlichen Erhöhung gleichkommt.

Tabelle 6.5 ABANDA - Datensatz zu SW-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs²³

| 1 - SWS - ABAND | SWS-1 | SWS-2 | SWS-3 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------|-------|-------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 13 | 13 | 13 | | | | | | | |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 1500 | 1500 | µS/cm | 2036,9 | 95 | 6410 | 1540 | 3080 | 27 |
| Fluorid | 0,75 | 0,75 | 4 | mg/l | 0,9 | 0,1 | 1,5 | 1 | 1,5 | 6 |
| Vanadium | 25 | 100 | 800 | µg/l | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 2 |

6.1.3.1 LD-Schlacken

Für LD-Schlacken wurde ein aussagekräftiger Datensatz vorgelegt, der deutliche Überschreitungen bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit und Vanadium sowie geringe bei Fluorid:

- Der Median und 80 %-Percentil liegen bei der elektrischen Leitfähigkeit oberhalb von SWS-3.
- Bei Vanadium überschreitet das 80%-Percentil SWS 3, der Median SWS 1.
- Das 80 %-Percentil liegt bei Fluorid zwischen SWS 1 und SWS 2.

Da die elektrische Leitfähigkeit bei LDS ganz überwiegend durch Kalk bestimmt wird, ist deren Überschreitung kein alleiniges Ausschlusskriterium, wenn der pH-Wert über 11 liegt.

Tabelle 6.6 Datensatz des FEhS-Instituts zu LD-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers

| 3 - SWS - FEhS | SWS-1 | SWS-2 | SWS-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------|-------|-------|---------|------------|---------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 13 | 13 | 13 | | 11,9 | 12,7 | 12,1 | 12,7 | 318 |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 1500 | 1500 | µS/cm | 2400 | 8500 | 2280 | 4800 | 171 |
| Fluorid | 0,75 | 2 | 2 | mg/l | 0,5 | 4 | 0,4 | 1,8 | 202 |
| Chrom (gesamt) | 30 | 75 | 100 | µg/l | 10 | 60 | 10 | 20 | 293 |
| Vanadium | 50 | 100 | 100 | µg/l | 100 | 800 | 100 | 200 | 286 |

²² Nach Einschätzung des FEhS-Instituts ist der Maximalwert für die Chromauslaugung nicht plausibel. Die Überprüfung hat jedoch keinen Hinweis auf einen Übertragungsfehler ergeben. Da die Maximalwerte ohnehin nicht in die Bewertung eingehen, wirkt sich dieser Wert nicht weiter aus!

²³ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Im Abgleich mit dem VO-Entwurf liegt das 80 %-Percentil bei beiden Parametern zwischen SWS-2 und SWS-3.

Tabelle 6.7 Datensatz des FEhS-Instituts zu LD-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs²⁴

| 3 - SWS - FEhS | SWS-1 | SWS-2 | SWS-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------|-------|-------|---------|------------|---------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 13 | 13 | 13 | | 11,9 | 12,7 | 12,1 | 12,7 | 318 |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 1500 | 1500 | µS/cm | 2400 | 8500 | 2280 | 4800 | 171 |
| Fluorid | 0,75 | 0,75 | 4 | mg/l | 0,5 | 4 | 0,4 | 1,8 | 202 |
| Vanadium | 25 | 100 | 800 | µg/l | 100 | 800 | 100 | 200 | 286 |

Der Einsatz der LD-Schlacken wird nach dem Abgleich mit den errechneten Werten des VO-Entwurfs im Bereich SWS 3 sicher möglich sein. Dies wäre im Abgleich mit den Werten des Eckpunktepapiers aufgrund der Überschreitungen bei Vanadium nicht möglich gewesen.

6.1.3.2 Elektroofenschlacke (EOS)

Die ZOW für SWS 3 sind bei EOS gegenüber anderen Stahlwerksschlacken erhöht.

Für EOS liegt ein aussagefähiger Datensatz des FEhS-Instituts vor. Bei Chrom und Fluorid halten die erhobenen Werte für das 80 % Percentil SWS 2, bei Vanadium nur SWS 3 ein.

Tabelle 6.8 Datensatz des FEhS-Instituts zu EO-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers

| 5 - SWS - FEhS | SWS-1 | SWS-2 | SWS-3 | Einheit | Mittelwe | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------|-------|-------|---------|----------|---------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 13 | 13 | 13 | | 11,3 | 12 | 11,4 | 11,7 | 340 |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 1500 | 1500 | µS/cm | 770 | 1500 | 520 | 1250 | 217 |
| Fluorid | 0,75 | 2 | 5 | mg/l | 0,5 | 2 | 0,5 | 0,9 | 255 |
| Chrom (gesamt) | 30 | 75 | 100 | µg/l | 25 | 100 | 20 | 40 | 329 |
| Vanadium | 50 | 100 | 250 | µg/l | 100 | 350 | 100 | 200 | 296 |

Beim Abgleich der Daten mit dem VO-Entwurf erfolgt aufgrund von Fluorid und Vanadium eine Einstufung nach SWS 3.

Tabelle 6.9 Datensatz des FEhS-Instituts zu EO-Schlacken im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfes²⁵

| 5 - SWS - FEhS | SWS-1 | SWS-2 | SWS-3 | Einheit | Mittelwe | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------|-------|-------|---------|----------|---------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 13 | 13 | 13 | | 11,3 | 12 | 11,4 | 11,7 | 340 |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 1500 | 1500 | µS/cm | 770 | 1500 | 520 | 1250 | 217 |
| Fluorid | 0,75 | 0,75 | 4 | mg/l | 0,5 | 2 | 0,5 | 0,9 | 255 |
| Vanadium | 25 | 100 | 800 | µg/l | 100 | 350 | 100 | 200 | 296 |

Insgesamt zeigen die Daten, dass für aufbereitete Stahlwerksschlacken durch die Änderungen der ZOW eine Verwertung nach SWS 3 unproblematisch möglich sein wird.

²⁴ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

²⁵ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

6.2 Gießereiabfälle

6.2.1 Gießereirestsande (GRS)

Für Gießereirestsande liegt ein Datensatz aus ABANDA vor. Demnach gibt es Überschreitungen bei Ammonium-Stickstoff (80%-Perzentil), DOC und Fluorid (jeweils sowohl Median als auch 80%-Perzentil). Die gleichen Überschreitungen sind auch bei den in diesen Parametern gleichen ZOW der LAGA M 20 zu verzeichnen.

Tabelle 6.10 ABANDA - Datensatz zu Gießereirestsanden im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers

| 1 - GRS - ABAND | GRS | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 12 | | | | | | | |
| elektrische Leitfähigkeit | 1000 | µS/cm | 386,9 | 4,8 | 14000 | 276 | 466,4 | 302 |
| Ammonium-Stickstoff | 1 | mg/l | 2,3 | 0,01 | 53,3 | 0,7 | 2,3 | 168 |
| DOC | 20 | mg/l | 185,7 | 5,1 | 765 | 111,5 | 310 | 10 |
| Fluorid | 1 | mg/l | 1,8 | 0,01 | 29,5 | 1,1 | 2,4 | 225 |
| Phenolindex | 100 | µg/l | 194,5 | 0,03 | 20000 | 20 | 50 | 333 |
| Arsen | 20 | µg/l | 14,9 | 0,1 | 1000 | 6,9 | 10 | 181 |
| Blei | 100 | µg/l | 67,5 | 1 | 5330 | 10 | 50 | 190 |
| Cadmium | 10 | µg/l | 5,8 | 0,1 | 500 | 1 | 5 | 210 |
| Chrom (gesamt) | 50 | µg/l | 71,9 | 1 | 10000 | 10 | 20 | 195 |
| Kupfer | 50 | µg/l | 82,1 | 0,5 | 10000 | 20 | 50 | 207 |
| Nickel | 50 | µg/l | 77,4 | 1 | 10000 | 10 | 40 | 192 |
| Zink | 150 | µg/l | 173,8 | 0,1 | 10000 | 50 | 100 | 205 |

Beim Einsatz in Asphalttragschichten unter wasserundurchlässiger Deckschicht:

Fluorid 3 mg/l, DOC 250 mg/l, Ammonium-Stickstoff 8 mg/l, Phenolindex 1.000 µg/l, Arsen und Schwermetalle ohne Begrenzung.

Im VO-Entwurf ist eine Verwertung von Harz gebundenen Gießereirestsanden nicht mehr vorgesehen. Für die verbleibenden, tongebundenen Gießereirestsande wird für den Parameter DOC ein eigener Materialwert vorgesehen, dessen umgerechneter Wert für WF 10:1 gegenüber dem Eckpunktepapier und LAGA M 20 einer Absenkung von 20 mg/l auf 7 mg/l gleich kommt. Der vorliegende Datensatz überschreitet beide ZOW deutlich.

Für die Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, PAK, Chrom ges., Molybdän, Nickel und Vanadium werden die Materialwerte für Bodenmaterial (BM0 bis BM3) angesetzt.

Tabelle 6.11 ABANDA - Datensatz zu Gießereirestsanden im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs für DOC²⁶

| 1 - GRS - ABAND | GRS-SE | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|-----------------|--------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|-----------|
| DOC | 7 | mg/l | 185,7 | 5,1 | 765 | 111,5 | 310 | 10 |

²⁶ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Der vorliegende Datensatz gibt keinen Hinweis auf die Frage, ob bzw. in welchem Umfang Ton gebundene GRS die ZOW des VO-Entwurfs einhalten können. Nach den vorliegenden Daten wäre nach dem VO-Entwurf für die untersuchten GRS faktisch keine Verwertung möglich. Ein Abgleich mit den restlichen Materialwerten nach BM 0 bis BM 3 erübrigt sich deshalb.

Auch nach der LAGA M 20 und dem Eckpunktepapier läge bei einem Median für DOC von 111,5 mg/l der größte Teil der 10 Proben deutlich über dem ZOW für den offenen Einbau. Mit Ausnahme von DOC liegen für alle weiteren Parameter auch der 80 %-Percentil noch unterhalb der Werte für den Einsatz in Asphalttragschichten unter wasserundurchlässigen Deckschichten.

6.2.2 Gießerei-Kupolofenschlacke (GKOS)

Der Datensatz aus ABANDA weist im Gegensatz zu dem oben beschriebenen für GRS eine deutlich geringere Wertemenge auf. Speziell für Vanadium liegt nur ein einziger, für Molybdän kein Messwert vor.

Für Chrom und Nickel werden im 80 %-Percentil die ZOW überschritten. Da sich die ZOW gegenüber der LAGA M 20 nicht verändert haben, sind gegenüber deren ZOW selbstverständlich die gleichen Überschreitungen zu beobachten.

Tabelle 6.12 ABANDA - Datensatz zu Gießerei-Kupolofenschlacke im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers

| 1 - GKOS - ABAND | GKOS | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 12,5 | | | | | | | |
| elektrische Leitfähigkeit | 1000 | µS/cm | 176 | 1,5 | 890 | 87 | 228,2 | 25 |
| Chrom (gesamt) | 20 | µg/l | 25,45 | 1 | 100 | 10 | 50 | 11 |
| Nickel | 20 | µg/l | 52,9 | 1 | 380 | 10 | 40 | 11 |

In dem aktuellen VO-Entwurf gelten für die Gießerei-Kupolofenschlacke die ZOW für SWS. Chrom und Nickel sind dort nicht mehr geregelt, der ZOW für Fluorid wird selbst im Maximalwert der 11 Proben deutlich unterschritten. Der eine Wert für Vanadium lässt keine Einschätzung zu.

Tabelle 6.13 ABANDA - Datensatz zu Gießerei-Kupolofenschlacke im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs²⁷

| 16 - SWS - ABAND | SWS-1 | SWS-2 | SWS-3 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------|-------|-------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|-----------|
| pH-Wert (E) | 13 | 13 | 13 | | | | | | | |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 1500 | 1500 | µS/cm | 176 | 1,5 | 890 | 87 | 228,2 | 25 |
| Fluorid | 0,75 | 0,75 | 4 | mg/l | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 11 |
| Vanadium | 25 | 100 | 800 | µg/l | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 1 |

Bezüglich elektrischer Leitfähigkeit und Fluorid sind keine Probleme beim Einsatz von GKOS zu erwarten. Wie sich die ZOW für Vanadium und Molybdän auswirken werden, ist derzeit nicht absehbar. Für Molybdän steht gar kein und für Vanadium nur ein einziger Wert zur Verfügung.

²⁷ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

6.3 Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung

Zu den Schadstoffgehalten in Aschen und Schlacken aus der Steinkohlefeuerung wurden insbesondere vom VGB Datensätze zur Verfügung gestellt. Die Feststoffgehalte stammen bei diesen Daten immer aus Königswasseraufschlüssen und die Eluate wurden nach DEV S4 erstellt. Werte unterhalb der Nachweisgrenze wurden immer mit der NWG gleichgesetzt. Werte die offensichtlich aus der Bandbreite heraus fielen, wurden gestrichen.

Außerdem liegen einige Datensätze vor, die aus einer Datensammlung stammen, die im Rahmen der Erarbeitung der Technischen Regeln der LAGA "Aschen und Schlacken aus steinkohlebefeuelten Kraftwerken, Heizkraftwerken und Heizwerken" (LAGA Mitteilung Nr. 20) vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung aus verschiedenen Quellen zusammengestellt wurde. Die Daten wurden durch das LUA NRW zur Verfügung gestellt. Sie werden als Datensätze des LAGA gekennzeichnet.

6.3.1 Steinkohle-Schmelzkammergranulat (SKG)

Für das Schmelzkammergranulat liegen zwei auswertbare Datensätze vor, die nur über einen sehr begrenzten Umfang an Messwerten verfügen. Da Schmelzkammergranulat in der Praxis keine großen Schwankungen in der Zusammensetzung aufweist, kann man davon ausgehen, dass die Aussagefähigkeit ausreicht.

Sie zeigen auf, dass bei der elektrischen Leitfähigkeit, dem einzigen Parameter, der in den Eckpunkten neben dem pH-Wert geregelt ist, selbst die Maximalwerte den ZOW deutlich unterschreiten. Die ZOW wurden im VO-Entwurf und Eckpunktepapier nicht gegenüber den LAGA M 20 geändert.

Tabelle 6.14 ABANDA – und LAGA - Datensatz zu Steinkohle-Schmelzkammergranulat im Abgleich mit den ZOW des Eckpunkteapiers und VO-Entwurfs²⁸

| elektrische Leitfähigkeit | SKG | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-----|---------|------------|---------|---------|--------|----------|-----------|
| 2 - SKG - ABANDA | 200 | µS/cm | 28 | 10 | 93 | 23 | 29 | 11 |
| 3 - SKG - LAGA | 200 | µS/cm | 40,1 | 13 | 93 | 19 | 93 | 11 |

6.3.2 Steinkohlekesselaschen (SKA)

Die Datensätze von VGB und NLFb zu Kesselaschen stimmen relativ gut überein. Überschreitungen der ZOW des Eckpunkteapiers gibt es nicht. Ganz anders ist die Belastung bei dem Datensatz aus ABANDA. Dieser weist bei Sulfat und Chlorid etwa die zehnfachen Werte beim 80%-Percentil auf. Beim Parameter elektrische Leitfähigkeit sind die Unterschiede noch höher und auch schon beim Median zu

²⁸ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

beobachten. Diese Werte legen Nahe, dass es sich bei diesem Datensatz nicht nur um Aschen aus staubgefeuerten Steinkohlekraftwerken handelt.

Die ZOW des Eckpunktepapiers wurden unverändert aus LAGA M 20 übernommen.

Tabelle 6.15 Datensätze von VGB, LAGA und ABANDA zu Steinkohle-Kesselaschen im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers und der LAGA M 20

| 2 - SKA - VGB | SKA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|------------------|
| elektrische Leitfähigkeit | 1000 | µS/cm | | | | | | |
| Chlorid | 50 | mg/l | | 2 | 76 | 15 | 23 | 97 |
| Sulfat | 200 | mg/l | | 5 | 483 | 44 | 120 | 94 |
| Arsen | 100 | µg/l | | 1 | 100 | 14 | 26 | 98 |
| Quecksilber | 2 | µg/l | | 0 | 2 | 0,2 | 0,2 | 98 |
| 1 - SKA - LAGA | SKA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 1000 | µS/cm | 594 | 92 | 2060 | 320 | 762 | 13 |
| Chlorid | 50 | mg/l | 11,9 | 2 | 50 | 6,5 | 10,6 | 13 |
| Sulfat | 200 | mg/l | 106,3 | 9,8 | 419 | 45 | 185,8 | 13 |
| Arsen | 100 | µg/l | 14,7 | 0,6 | 55 | 8,5 | 23,2 | 12 |
| Quecksilber | 2 | µg/l | 0,5 | 0,03 | 2 | 0,4 | 0,5 | 12 |
| 3 - SKA - ABANDA | SKA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 1000 | µS/cm | 14512,5 | 23,4 | 166000 | 1800 | 21632 | 23 |
| Chlorid | 50 | mg/l | 456,5 | 0,5 | 4100 | 14 | 205,6 | 17 |
| Sulfat | 200 | mg/l | 781,7 | 2,6 | 6230 | 36 | 1410 | 21 |
| Arsen | 100 | µg/l | 157,6 | 0,3 | 2890 | 9 | 12 | 20 |
| Quecksilber | 2 | µg/l | 0,4 | 0,03 | 1 | 0,2 | 0,7 | 19 |

Es ist davon auszugehen, dass die Daten des VGB und der NLFB die für das Recycling bestimmten Kesselaschen besser repräsentieren als die Daten aus ABANDA, die überwiegend Steinkohleaschen beschreiben, die in die Beseitigung gelangen. Deshalb werden die Daten aus ABANDA nicht für die Bewertung herangezogen.

Tabelle 6.16 Datensätze von VGB, LAGA und ABANDA zu Steinkohle-Kesselaschen im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfes²⁹

| 2 - SKA - VGB | SKA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|------------------|
| elektrische Leitfähigkeit | 1000 | µS/cm | | | | | | |
| Sulfat | 120 | mg/l | | 5 | 483 | 44 | 120 | 94 |
| Arsen | 25 | µg/l | | 1 | 100 | 14 | 26 | 98 |
| Vanadium | 65 | µg/l | | 1 | 343 | 50 | 67 | 83 |
| 1 - SKA - LAGA | SKA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 1000 | µS/cm | 594 | 92 | 2060 | 320 | 762 | 13 |
| Sulfat | 120 | mg/l | 106,3 | 9,8 | 419 | 45 | 185,8 | 13 |
| Arsen | 25 | µg/l | 14,7 | 0,6 | 55 | 8,5 | 23,2 | 12 |
| Vanadium | 65 | µg/l | 47,1 | 10 | 95 | 50 | 63,6 | 8 |
| 3 - SKA - ABANDA | SKA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 1000 | µS/cm | 14512,5 | 23,4 | 166000 | 1800 | 21632 | 23 |
| Sulfat | 120 | mg/l | 781,7 | 2,6 | 6230 | 36 | 1410 | 21 |
| Arsen | 25 | µg/l | 157,6 | 0,3 | 2890 | 9 | 12 | 20 |
| Vanadium | 65 | µg/l | 30 | 10 | 70 | 10 | 46 | 3 |

²⁹ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Im VO-Entwurf werden Chlorid und Quecksilber nicht mehr geregelt, dafür Vanadium und Molybdän aufgenommen. Der ZOW für Sulfat wurde auf 120 mg/l, Arsen auf 25 µg/l reduziert.

Für Molybdän liegen keine Vergleichsdaten vor. Im Datensatz LAGA wird im 80%-Percentil der ZOW überschritten

6.3.3 Steinkohleflugaschen (SFA)

Die Steinkohleflugaschen werden unterschieden in Aschen aus der Schmelz(kammer)feuerung, Trockenfeuerung oder Wirbelschicht. Bei der Steinkohlenflugasche(SFA) aus der Schmelzkammerfeuerung hängt der Gehalt an leichtflüchtigen Schwermetallen davon ab, ob die Flugasche mit dem Ziel sie in der Schlacke einzuschmelzen rückgeführt wird, oder mit dem Ziel der Verwertung abgezogen wird. Im letzteren Fall ist der Gehalt an leicht flüchtigen Metallen geringer, da keine Anreicherung im Prozess stattfand. Da die vorgelegte Daten auch Anlagen mit Flugaschenrückführung enthalten, ist davon auszugehen, dass die tatsächlich im Recycling ankommenden Flugaschen (etwas) geringer belastet sind. Soweit möglich erfolgt die Gegenüberstellung für die einzelnen Feuerungsverfahren getrennt.

Die ZOW für Steinkohleflugaschen wurden im Eckpunktepapier gegenüber den Werten in LAGA M 20 nicht geändert. Deshalb ist eine gesonderte Darstellung nicht erforderlich. Der aktuelle VO-Entwurf sieht für SFA gegenüber dem Eckpunktepapier folgende Änderungen vor:

- Die ZOW für Chlorid und Quecksilber entfallen.
- Die ZOW für Vanadium und Molybdän werden neu aufgenommen.
- Für die restlichen Parameter ergeben die Umrechnungen des vorgegebenen Säuleneluats mit W/F 2: in Kenngrößen für W/F 10:1 die ZOW aus dem Eckpunktepapier.

In den folgenden Tabellen werden die erhobenen Daten sowohl dem Eckpunktepapier als auch dem VO-Entwurf gegenübergestellt. Gelten Parameter für beide sind sie in schwarz, gelten sie nur im Eckpunktepapier in blau, nur im VO-Entwurf rot dargestellt. Für Molybdän liegen keine Daten vor.

Für den folgenden Datensatz aus ABANDA (Tabelle 6.17) liegen keine Informationen über die Feuerungsart vor. Die Werte legen auch hier nahe, dass es sich nicht um Flugaschen aus staubgefeuerten Steinkohlekraftwerken handelt. Für die Bewertung kann er daher nicht herangezogen werden.

Tabelle 6.17 ABANDA – Datensatz zu Steinkohle-Flugasche der keinem speziellen Feuerungssystem zugeordnet werden kann im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers (ohne Vanadium) und VO-Entwurfs (ohne Chlorid und Quecksilber)³⁰

| 1 - SFA - ABANDA | SFA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 5000 | µS/cm | 5465 | 980 | 12400 | 3216 | 10560 | 24 |
| Chlorid | 50 | mg/l | 121,4 | 2 | 1634 | 14 | 61 | 101 |
| Sulfat | 1000 | mg/l | 1191 | 13,2 | 34921 | 470,5 | 1350 | 106 |
| Arsen | 100 | µg/l | 114,5 | 0,9 | 4650 | 20 | 180 | 112 |
| Cadmium | 10 | µg/l | 65 | 0,1 | 2760 | 10 | 74 | 117 |
| Chrom (gesamt) | 350 | µg/l | 4526 | 2,5 | 396000 | 160 | 342 | 95 |
| Quecksilber | 2 | µg/l | 31 | 0,08 | 2500 | 0,3 | 1 | 93 |
| Vanadium | 1000 | µg/l | 1228 | 9 | 50100 | 60 | 240 | 47 |

Im 80 %-Percentil werden alle ZOW bis auf Chrom, Quecksilber und Vanadium überschritten. Die Mediane halten den Grenzwert alle sicher ein, lediglich für Cadmium liegt der Median im Bereich des ZOW.

6.3.3.1 SFA aus der Trockenfeuerung

In Tabelle 6.18 werden die Datensätze des VGB und der LAGA, die als Flugaschen aus der Trockenkammerfeuerung ausgewiesen sind, den ZOW gegenübergestellt. Der Datensatz der VGB überschreitet im 80 %-Percentil bei Chrom gesamt den ZOW. Der Wert für Quecksilber beim 80 %-Percentil war nicht plausibel und wurde deshalb auf 0 gesetzt.

Alle anderen Parameter liegen unterhalb der ZOW. Im Datensatz der LAGA wird der ZOW für Sulfat gerade noch eingehalten.

³⁰ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Tabelle 6.18 Datensätze von VGB, LAGA und ABANDA zu Steinkohle-Flugaschen aus der Trockenkammerfeuerung im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers (ohne Vanadium) und VO-Entwurfs (ohne Chlorid und Quecksilber)³¹

| 4 - SFA - VGB | SFA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------------|---------|------------|---------|-------------|--------|------------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 5000 | µS/cm | | | | | | |
| Chlorid | 50 | mg/l | | 0,6 | 97,6 | 10 | 17 | 329 |
| Sulfat | 1000 | mg/l | | 14 | 1490 | 498 | 875 | 326 |
| Arsen | 100 | µg/l | | 1 | 270 | 15 | 60 | 362 |
| Cadmium | 10 | µg/l | | 0,02 | 5 | 1 | 5 | 372 |
| Chrom (gesamt) | 350 | µg/l | | 1 | 1250 | 280 | 461 | 374 |
| Quecksilber | 2 | µg/l | | 0,02 | 7 | 0,2 | 1,0 | 372 |
| Vanadium | 1000 | µg/l | | 0,1 | 1110 | 10 | 270 | 336 |
| 10 - SFA - LAGA | SFA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 5000 | µS/cm | 2400 | 980 | 4500 | 2005 | 3985 | 16 |
| Chlorid | 50 | mg/l | 12,3 | 5 | 50 | 10 | 10 | 16 |
| Sulfat | 1000 | mg/l | 569,2 | 75 | 1056 | 468 | 1000 | 16 |
| Arsen | 100 | µg/l | 52,3 | 1 | 200 | 33 | 91,6 | 32 |
| Cadmium | 10 | µg/l | 6,2 | 0,5 | 20 | 5 | 5 | 32 |
| Chrom (gesamt) | 350 | µg/l | 188,4 | 10 | 800 | 155 | 268 | 32 |
| Quecksilber | 2 | µg/l | 0,3 | 0,02 | 2 | 0,2 | 0,2 | 32 |
| Vanadium | 1000 | µg/l | 313,2 | 50 | 870 | 265 | 438 | 28 |

6.3.3.2 SFA aus der Schmelzkammerfeuerung

Für die SFA aus der Schmelzkammerfeuerung sind in Tabelle 6.19 Datensätze von VGB, ABANDA und LAGA den ZOW gegenübergestellt. Der Datensatz der VGB überschreitet ausschließlich bei Arsen die ZOW. Hier aber selbst im Median noch deutlich. Der ZOW für Arsen wurde gegenüber der LAGA M 20 nicht verändert.

Deutlich höhere Schadstoffgehalte weist bei nahezu allen Parametern der Datensatz aus ABANDA auf. Außer bei Arsen, Cadmium, Quecksilber und Vanadium werden die ZOW durch alle 80 %-Percentile überschritten. Beim Datensatz der LAGA wird wie bei dem des VGB der ZOW für Arsen schon vom Median übertroffen. Zusätzlich liegt das 80 %-Percentil von Cadmium über dem ZOW.

Da auch dieser ABANDA-Datensatz nicht plausibel erscheint, wird er nicht in die Bewertung mit einbezogen.

³¹ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Tabelle 6.19 Datensätze von VGB, LAGA und ABANDA zu Steinkohle-Flugaschen aus der Schmelzkammerfeuerung im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers (ohne Vanadium) und VO-Entwurfs (ohne Chlorid und Quecksilber)³²

| 3 - SFA - VGB | SFA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|------------------|
| elektrische Leitfähigkeit | 5000 | µS/cm | | | | | | |
| Chlorid | 50 | mg/l | | 2,8 | 16 | 10 | 10 | 56 |
| Sulfat | 1000 | mg/l | | 24 | 1080 | 345 | 495 | 57 |
| Arsen | 100 | µg/l | | 3 | 3700 | 340 | 1160 | 68 |
| Cadmium | 10 | µg/l | | 0,3 | 22 | 5 | 5 | 67 |
| Chrom (gesamt) | 350 | µg/l | | 5 | 980 | 175 | 310 | 68 |
| Quecksilber | 2 | µg/l | | 0,2 | 5,4 | 0,2 | 0,9 | 69 |
| Vanadium | 1000 | µg/l | | 1 | 2430 | 410 | 790 | 69 |
| 5 - SFA - ABANDA | SFA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 5000 | µS/cm | 9635 | 74,3 | 63600 | 2685 | 14540 | 60 |
| Chlorid | 50 | mg/l | 717,9 | 1,6 | 12000 | 14 | 415,6 | 55 |
| Sulfat | 1000 | mg/l | 2021 | 5,4 | 25000 | 539,5 | 1542 | 58 |
| Arsen | 100 | µg/l | 132 | 0,9 | 4650 | 10 | 60 | 56 |
| Cadmium | 10 | µg/l | 131,9 | 0,1 | 4110 | 5 | 10 | 64 |
| Chrom (gesamt) | 350 | µg/l | 679,6 | 3 | 7820 | 160 | 650 | 64 |
| Quecksilber | 2 | µg/l | 45,1 | 0,1 | 2500 | 0,2 | 1 | 56 |
| Vanadium | 1000 | µg/l | 145,9 | 9 | 670 | 60 | 250 | 27 |
| 8 - SFA - LAGA | SFA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 5000 | µS/cm | 976 | 630 | 2030 | 860 | 909 | 7 |
| Chlorid | 50 | mg/l | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 |
| Sulfat | 1000 | mg/l | 268 | 182 | 326 | 326 | 326 | 5 |
| Arsen | 100 | µg/l | 723 | 19 | 3200 | 288 | 1064 | 19 |
| Cadmium | 10 | µg/l | 23 | 5 | 100 | 5 | 21,4 | 19 |
| Chrom (gesamt) | 350 | µg/l | 321,1 | 10 | 2250 | 250 | 328 | 19 |
| Quecksilber | 2 | µg/l | 0,9 | 0,1 | 5 | 0,2 | 1,3 | 19 |
| Vanadium | 1000 | µg/l | 470,6 | 54 | 1050 | 430 | 654 | 15 |

6.3.3.3 SFA aus der Wirbelschichtfeuerung

Die Datensätze für Steinkohleflugaschen aus der Wirbelschicht weisen hohe Werte für Sulfat und elektrische Leitfähigkeit auf.

³² Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Tabelle 6.20 Datensätze von VGB und LAGA zu Steinkohle-Flugaschen aus der Wirbelschichtfeuerung im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers (ohne Vanadium) und VO-Entwurfs (ohne Chlorid und Quecksilber)³³

| 2 - SFA - VGB | SFA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|-------------|---------|--------------|---------|--------------|-------------|---------------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 5000 | µS/cm | | | | | | |
| Chlorid | 50 | mg/l | | 0,6 | 123 | 5,6 | 32 | 25 |
| Sulfat | 1000 | mg/l | | 95 | 2150 | 1515 | 1862 | 26 |
| Arsen | 100 | µg/l | | 1 | 6 | 1 | 1 | 26 |
| Cadmium | 10 | µg/l | | 0 | 5 | 0 | 5 | 26 |
| Chrom (gesamt) | 350 | µg/l | | 10 | 250 | 30 | 90 | 26 |
| Quecksilber | 2 | µg/l | | 0 | 0,5 | 0 | 0,5 | 26 |
| Vanadium | 1000 | µg/l | | 50 | 80 | 50 | 50 | 24 |
| 11 - SFA - LAGA | SFA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 5000 | µS/cm | 8035 | 995 | 11900 | 9570 | 10780 | 23 |
| Chlorid | 50 | mg/l | 43,1 | 5 | 180 | 32 | 63 | 23 |
| Sulfat | 1000 | mg/l | 1456 | 430 | 2100 | 1469 | 1642,8 | 23 |
| Arsen | 100 | µg/l | 7,2 | 1 | 40 | 1 | 8 | 23 |
| Cadmium | 10 | µg/l | 19,75 | 0,5 | 100 | 5 | 17 | 27 |
| Chrom (gesamt) | 350 | µg/l | 128,9 | 10 | 400 | 90 | 192 | 23 |
| Quecksilber | 2 | µg/l | 0,35 | 0,2 | 1 | 0,2 | 0,5 | 19 |
| Vanadium | 1000 | µg/l | 59,04 | 30 | 100 | 50 | 60 | 21 |

Bei diesen beiden Parametern überschreiten bereits die Mediane den ZOW, während für Chlorid und Cadmium Überschreitungen ausschließlich bei den 80%-Percentilen des Datensatzes der LAGA ausgewiesen werden. Die Mediane für Cadmium und Quecksilber in dem Datensatz von VGB waren nach Aussage des VGB wegen unplausiblen Werten auf Null gesetzt worden.

Der ZOW für Vanadium, der in dem VO-Entwurf neu aufgenommen wurde, wird bei beiden Datensätzen deutlich unterschritten.

6.3.4 Braunkohleflugaschen (BFA) und -kesselaschen (BKA)

Braunkohleflugaschen und -kesselaschen werden im Eckpunktepapier und im Entwurf der Ersatzbaustoff-VO nicht geregelt. Zu Braunkohleflugaschen liegen keine verwertbaren Daten vor.

Der Datensatz zu Braunkohlekesselaschen aus ABANDA ist in Anhang 6 enthalten.

6.4 Hausmüllverbrennungsgaschen (HMVA)

Für HMVA wurden im Eckpunktepapier gegenüber der LAGA M 20 vor allem eine Reduzierung der Parameter vorgenommen. Cyanid, Blei, Cadmium, Nickel, Quecksilber und Thallium im Eluat und EOX im Feststoff wurden nicht mehr begrenzt. Der Wert für TOC wurde von 1 Masse-% auf 3 Masse-% angehoben.

³³ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Tabelle 6.21 Gegenüberstellung der ZOW nach LAGA M 20 alt mit denen des Eckpunktepapiers

| Parameter | Einheit | LAGA alt | HMVA Eckp. |
|-------------------|---------|-------------|---------------|
| pH-Wert | | 7-13 | 7-13 |
| el. Leitfähigkeit | µS/cm | 6.000 | 6.000 |
| Chlorid | mg/l | 250 | 250 |
| Sulfat | mg/l | 600 | 600 |
| Cyanid (ges.) | µg/l | 20 | |
| Blei | µg/l | 50 | |
| Cadmium | µg/l | 5 | |
| Chrom (ges.) | µg/l | 200 | 50 |
| Kupfer | µg/l | 300 | 300 |
| Nickel | µg/l | 40 | |
| Quecksilber | µg/l | 1 | |
| Thallium | µg/l | 3 | |
| Zink | µg/l | 300 | 200 |
| TOC | M-% | 1 | 3 |
| EOX | mg/kg | 3 | |

Fettdruck: neu < alt

Kursivdruck: neu > alt

Die Werte für Chrom und Zink wurden verschärft. Chrom wurde von 200 µg/l auf 50 µg/l abgesenkt, Zink von 300 µg/l auf 200 µg/l. Alle anderen ZOW blieben unverändert (vgl. Tabelle 6.21).

Die Datensätze zu Hausmüllverbrennungsaschen in Tabelle 6.22 zeigen keine Überschreitungen, die nicht auch nach den alten Regeln zu verzeichnen gewesen wären. Von den vier Datensätzen weist ausschließlich der aus Baden-Württemberg Überschreitungen bei der elektrischen Leitfähigkeit und bei Zink auf, wobei die Werte für die elektrische Leitfähigkeit schon im Median über dem unveränderten ZOW lag.

Tabelle 6.22 Median, 80%-Percentil (90%-Percentil) und Werte“anzahl“ für vier Datensätze zu Hausmüllverbrennungsaschen (LfU-BW, ABANDA, HH, ITAD) im Vergleich zu den ZOW des Eckpunktepapiers

| | HMVA | 3-HMVA-LfU | | | | 2-HMVA-AB | | | 4-HMVA-HH | | | 6-HMVA-ITAD | |
|---------------------------|------------|-------------|--------------|--------------|-------|-----------|---------|-------|-----------|----------|-------|-------------|-------|
| | | Median | 80-Perc. | 90-Perd | Werte | Median | 80-Perd | Werte | Median | 80-Perc. | Werte | Median | Werte |
| elektrische Leitfähigkeit | 6000 µS/cm | 6795 | 10900 | 12500 | 26 | 1310 | 3650 | 131 | 1152 | 1500 | 41 | | |
| Chlorid | 250 mg/l | 66 | 122,4 | 144,6 | 30 | 93 | 149,6 | 128 | 88,4 | 180 | 41 | 166 | kA |
| Sulfat | 600 mg/l | 35,6 | 210 | 337,9 | 28 | 199,8 | 361,3 | 122 | 274 | 347 | 41 | 292 | kA |
| Antimon | 100 µg/l | 0 | 9,2 | 12,8 | 13 | 10 | 10 | 1 | | | | | |
| Chrom (gesamt) | 50 µg/l | 5 | 10,6 | 31,4 | 30 | 15 | 34 | 14 | | | | 15 | kA |
| Kupfer | 300 µg/l | 40 | 95,4 | 160 | 36 | 100 | 230 | 129 | | | | 66 | kA |
| Zink | 200 µg/l | 18 | 334 | 680 | 31 | 50 | 60 | 79 | | | | 10 | kA |
| TOC | 3 M-% | 0,4 | 0,8 | 1,14 | 34 | 1,2 | 2,6 | 55 | | | | | |

Im aktuellen VO-Entwurf wurden für HMVA die ZOW in zwei Einstufungsklassen unterteilt. Die ZOW unter HMVA 1 konnten erwartungsgemäß von keinem Datensatz erfüllt werden. Im Datensatz aus Baden-Württemberg wurden auch die Werte von HMVA 2 für die elektrische Leitfähigkeit selbst beim Median überschritten. Im Datensatz ABANDA liegen für das 80 %-Percentil Überschreitungen für HMVA 2 für Chlorid, Sulfat und Chrom gesamt vor.

Tabelle 6.23 Datensätze LfU BW, ABANDA und ITAD zu Hausmüllverbrennungsaschen im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfes³⁴

| 3 - HMVA - LfU | HMVA-1 | HMVA-2 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|--------|--------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 1300 | 6000 | µS/cm | 7518,8 | 680 | 41000 | 6795 | 10900 | 12500 | 26 |
| Chlorid | 130 | 600 | mg/l | 61,8 | 0,22 | 165 | 66 | 122,4 | 144,6 | 30 |
| Sulfat | 120 | 900 | mg/l | 114,9 | 0,08 | 512 | 35,6 | 210 | 337,9 | 28 |
| Antimon | 5 | 200 | µg/l | 4,1 | 1 | 40 | 0 | 9,2 | 12,8 | 13 |
| Arsen | 5 | 30 | µg/l | 2,5 | 0,3 | 20 | 0,3 | 5 | 5 | 28 |
| Chrom (gesamt) | 50 | 140 | µg/l | 9,6 | 0,5 | 60 | 5 | 10,6 | 31,4 | 30 |
| Kupfer | 30 | 850 | µg/l | 63,4 | 3 | 460 | 40 | 95,4 | 160 | 36 |
| Vanadium | 25 | 120 | µg/l | | | | | | | |
| 7 - HMVA - AB | HMVA-1 | HMVA-2 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
| pH-Wert (E) | 13 | 13 | | | | | | | | |
| elektrische Leitfähigkeit | 1300 | 6000 | µS/cm | 2743 | 10 | 44 | 1260 | 1648 | | 132 |
| Chlorid | 130 | 600 | mg/l | 591 | 0,5 | 12 | 21,7 | 621 | | 142 |
| Sulfat | 120 | 900 | mg/l | 1494 | 0,5 | 32360 | 220 | 1426 | | 137 |
| Antimon | 5 | 200 | µg/l | 455 | 1 | 8900 | 4 | 10 | | 22 |
| Arsen | 5 | 30 | µg/l | 98,8 | 0,1 | 5200 | 4,6 | 20 | | 132 |
| Chrom (gesamt) | 50 | 140 | µg/l | 1838 | 0,1 | 640000 | 30 | 560 | | 181 |
| Kupfer | 30 | 850 | µg/l | 367 | 0,9 | 23000 | 10 | 50 | | 177 |
| Vanadium | 25 | 120 | µg/l | 141,4 | 5 | 3000 | 10 | 60 | | 46 |
| 6 - HMVA - ITAD | HMVA-1 | HMVA-2 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
| Chlorid | 130 | 600 | mg/l | 159 | 1,3 | 470 | 166 | | | kA |
| Sulfat | 120 | 900 | mg/l | 307 | 2,5 | 725 | 292 | | | kA |
| Antimon | 5 | 200 | µg/l | | | | | | | |
| Arsen | 5 | 30 | µg/l | 12 | 0,5 | 100 | 5 | | | kA |
| Chrom (gesamt) | 50 | 140 | µg/l | 18 | 0,5 | 60 | 15 | | | kA |
| Kupfer | 30 | 850 | µg/l | 247 | 2 | 8000 | 66 | | | kA |
| Vanadium | 25 | 120 | µg/l | | | | | | | |

Im Rahmen des Analysenprogramms zu diesem UFOPLAN-Projekt (siehe Kapitel 7) wurden für 16 HMVA Proben neben Säulentests und Feststoffuntersuchungen auch Schütteltests nach DEV S 4 durchgeführt. Die Ergebnisse nach DEV S 4 sind im Datensatz UFO in Tabelle 6.24 den ZOW des Eckpunktepapiers und in Tabelle 6.25 denen des VO-Entwurfes gegenübergestellt. Die Auswertung der Daten aus den Säulentests erfolgt in dem parallel durchgeführten Projekt (LANUV 2007).

³⁴ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Tabelle 6.24 Datensatz UFOPlan zu Hausmüllverbrennungsaschen im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers

| 1 - HMVA - UFO | HMVA | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwert |
|---------------------------|------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|----------|----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 6000 | µS/cm | 1199,4 | 322 | 1768 | 1237 | 1452 | 1477 | 16 |
| Chlorid | 250 | mg/l | 205,3 | 87 | 389 | 202 | 235 | 335 | 16 |
| Sulfat | 600 | mg/l | 322,9 | 118 | 529 | 377,5 | 455 | 465 | 16 |
| Antimon | 100 | µg/l | 28,8 | 13 | 66 | 23 | 37 | 51 | 16 |
| Chrom (gesamt) | 50 | µg/l | 28,7 | 10 | 73 | 20,5 | 43 | 67 | 16 |
| Kupfer | 300 | µg/l | 96,8 | 10 | 672 | 56 | 93,1 | 108,5 | 16 |
| Zink | 200 | µg/l | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 16 |
| TOC | 3 | Masse-% | 2 | 0,9 | 4,1 | 1,8 | 3,1 | 3,7 | 16 |

Die ZOW des Eckpunktepapiers wurden im Median nicht und im 80 %-Percentil nur bei TOC knapp überschritten. Im 90 %-Percentil lagen zudem Überschreitungen bei Chrom gesamt und Chlorid vor.

Tabelle 6.25 Datensatz UFOPLAN zu Hausmüllverbrennungsaschen im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfes³⁵

| 1 - HMVA - UFO | HMVA -1 | HMVA-2 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|---------|--------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 1300 | 6000 | µS/cm | 1199,4 | 322 | 1768 | 1237 | 1452 | 1477 | 16 |
| Chlorid | 130 | 600 | mg/l | 205,3 | 87 | 389 | 202 | 235 | 335 | 16 |
| Sulfat | 120 | 900 | mg/l | 322,9 | 118 | 529 | 377,5 | 455 | 465 | 16 |
| Antimon | 5 | 200 | µg/l | 28,8 | 13 | 66 | 23 | 37 | 51 | 16 |
| Arsen | 5 | 30 | µg/l | 10,6 | 10 | 18,1 | 10 | 10 | 11,1 | 16 |
| Chrom (gesamt) | 50 | 140 | µg/l | 28,7 | 10 | 73 | 20,5 | 43 | 67 | 16 |
| Kupfer | 30 | 850 | µg/l | 96,8 | 10 | 672 | 56 | 93,1 | 108,5 | 16 |
| Vanadium | 25 | 120 | µg/l | 18,1 | 8,8 | 36 | 18 | 23 | 25 | 16 |

Im Abgleich mit den alten Daten der LAGA M 20 gibt es zusätzliche Überschreitungen bei TOC, Quecksilber, Blei und Zink. Zusätzlich lag das 90%-Percentil von Nickel im Datensatz aus Baden-Württemberg über dem ZOW der LAGA M 20.

³⁵ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Tabelle 6.26 Median, 80%-Percentil (90%-Percentil) und Werte“anzahl“ für drei Datensätze zu Hausmüllverbrennungsaschen (LfU-BW, ABANDA, ITAD) im Vergleich zu den ZOW der LAGA M 20

| | HMVA | Z2 | 3-HMVA-LfU | | | 2-HMVA-AB | | | 6-HMVA-ITAD | |
|---------------------------|------|---------|------------|----------|----------|-----------|--------|----------|-------------|--------|
| | | | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | Werte | Median |
| pH-Wert (E) | | 13 | | | | | | | | |
| elektrische Leitfähigkeit | 6000 | µS/cm | 6795 | 10900 | 12500 | 26 | 1310 | 3650 | 131 | |
| Chlorid | 250 | mg/l | 66 | 122,4 | 144,6 | 30 | 93 | 149,6 | 128 | 166 |
| Sulfat | 600 | mg/l | 35,6 | 210 | 337,9 | 28 | 199,8 | 361,3 | 122 | 292 |
| Cyanide (gesamt) | 20 | µg/l | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 30 | | | | 10 |
| Blei | 50 | µg/l | 20 | 554 | 2400 | 36 | 30 | 1260 | 128 | 10 |
| Cadmium | 5 | µg/l | 1 | 2 | 2,8 | 33 | 1 | 1,3 | 77 | 0,8 |
| Chrom (gesamt) | 200 | µg/l | 5 | 10,6 | 31,4 | 30 | 15 | 34 | 14 | 15 |
| Kupfer | 300 | µg/l | 40 | 95,4 | 160 | 36 | 100 | 230 | 129 | 66 |
| Nickel | 40 | µg/l | 5 | 12,4 | 41,6 | 34 | 10 | 10 | 30 | 5 |
| Quecksilber | 1 | µg/l | 0,2 | 2 | 2 | 33 | 0,2 | 0,2 | 15 | 0,3 |
| Zink | 300 | µg/l | 18 | 334 | 680 | 31 | 50 | 60 | 79 | 10 |
| TOC | 1 | Masse-% | 0,4 | 0,8 | 1,14 | 34 | 1,2 | 2,6 | 55 | |
| EOX | 3 | mg/kg | 0,5 | 1 | 1 | 15 | | | | 0,5 |

Es liegen zwei weitere Datensätze vor, von denen 1-HMVA-AB ausdrücklich auch Kesselasche beinhaltet und 5-HMVA-AB aus der Verbrennung von Klärschlamm stammt.

Tabelle 6.27 zeigt, dass beide Datensätze sehr hohe Sulfatgehalte aufweisen und der Datensatz, der auch Kesselasche enthält, darüber hinaus die ZOW für Chlorid, Chrom und insbesondere TOC erheblich überschreitet. Die Asche aus der Klärschlammverbrennung weist dagegen noch sehr hohe Werte bei elektrischer Leitfähigkeit auf.

Tabelle 6.27 Median, 80%-Percentil und Werte“anzahl“ für je einen Datensatz zu Hausmüllverbrennungsaschen inkl. Kesselaschen (1-HMVA-AB) und aus der Verbrennung von Klärschlamm (5-HMVA-AB) beide Datensätze aus ABANDA im Vergleich zu den ZOW des Eckpunktepapiers

| | HMVA | | 1-HMVA-AB | | | 5-HMVA-AB | | |
|---------------------------|------|-------|-----------|----------|-------|-----------|----------|-------|
| | | | Median | 80-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | Werte |
| elektrische Leitfähigkeit | 6000 | µS/cm | 1260 | 1648 | 132 | 7600 | 13028 | 15 |
| Chlorid | 250 | mg/l | 21,7 | 621 | 142 | 14 | 40 | 11 |
| Sulfat | 600 | mg/l | 220 | 1426 | 137 | 1200 | 1460 | 5 |
| Antimon | 100 | µg/l | 4 | 10 | 22 | 20 | 30 | 6 |
| Chrom (gesamt) | 50 | µg/l | 30 | 560 | 181 | 20 | 64 | 10 |
| Kupfer | 300 | µg/l | 10 | 50 | 177 | 10 | 46 | 12 |
| Zink | 200 | µg/l | 50 | 120 | 183 | 10 | 10 | 12 |
| TOC | 3 | M-% | 5,2 | 17,6 | 22 | 0,5 | 1 | 7 |

Im Abgleich mit der LAGA M 20 kommen zusätzlich noch Überschreitungen bei Blei, Nickel und Cadmium dazu (vgl. Tabelle 6.28).

Die Daten zeigen, dass durch die Änderungen der ZOW die Voraussetzungen für das Recycling von HMVA nicht wesentlich verschärft wurden.

Tabelle 6.28 Median, 80%-Perzentil und Werte“anzahl“ für je einen Datensatz zu Hausmüllverbrennungsgaschen inkl. Kesselaschen (1-HMVA-AB) und aus der Verbrennung von Klärschlamm (5-HMVA-AB) beide Datensätze aus ABANDA im Vergleich zu den ZOW der LAGA M 20

| | HMVA | | 1-HMVA-AB | | | 5-HMVA-AB | | |
|---------------------------|------|---------|------------|-------------|-------|-------------|--------------|-------|
| | Z2 | | Median | 80-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | Werte |
| pH-Wert (E) | 13 | | | | | | | |
| elektrische Leitfähigkeit | 6000 | µS/cm | 1260 | 1648 | 132 | 7600 | 13028 | 15 |
| Chlorid | 250 | mg/l | 21,7 | 621 | 142 | 14 | 40 | 11 |
| Sulfat | 600 | mg/l | 220 | 1426 | 137 | 1200 | 1460 | 5 |
| Cyanide (gesamt) | 20 | µg/l | 0,004 | 0,01 | 113 | 10 | 36 | 9 |
| Blei | 50 | µg/l | 30 | 100 | 191 | 50 | 56 | 15 |
| Cadmium | 5 | µg/l | 2,6 | 10 | 253 | 2,5 | 5 | 15 |
| Chrom (gesamt) | 200 | µg/l | 30 | 560 | 181 | 20 | 64 | 10 |
| Kupfer | 300 | µg/l | 10 | 50 | 177 | 10 | 46 | 12 |
| Nickel | 40 | µg/l | 20 | 58 | 172 | 50 | 50 | 11 |
| Quecksilber | 1 | µg/l | 0,3 | 1 | 129 | 0,5 | 0,5 | 14 |
| Zink | 300 | µg/l | 50 | 120 | 183 | 10 | 10 | 12 |
| TOC | 1 | Masse-% | 5,2 | 17,6 | 22 | 0,5 | 1 | 7 |
| EOX | 3 | mg/kg | 1 | 1,6 | 128 | | | |

6.5 Bau- und Abbruchabfälle (RC)

Der Abgleich der ZOW des Eckpunktepapiers und der LAGA M 20 von 1997 für Recyclingbaustoffe zeigt, dass vor allem folgende Änderungen für die Frage relevant sind, welche Mengen an RC-Baustoff zukünftig noch recycelt werden können:

- Die ZOW für Arsen, Blei und Cadmium entfallen.
- Die ZOW für PAK im Feststoff sowie Chrom, Kupfer und Nickel im Eluat wurden durchgehend reduziert.
- Der ZOW für Zink wurde für RC 2 und RC 3 reduziert.
- Der ZOW für Sulfat wurde für RC 1 bei Einbringung in Schichten größer 50 cm von 150 auf 100 mg/l reduziert und bei Einbringung in Schichten bis 50 cm von 150 auf 300 mg/l angehoben.

Tabelle 6.29 Zuordnungswerte für Recyclingbaustoffe: LAGA M 20 (1997) im Vergleich zum Eckpunktepapier

| Parameter | Einheit | Z 1.1 | RC-1 | Z 1.2 | RC-2 | Z 2 | RC-3 |
|--------------------|---------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|----------------|
| pH-Wert | | 7-12,5 | 7-12,5 | 7-12,5 | 7-12,5 | 7-12,5 | 7-12,5 |
| el. Leitfähigkeit | µS/cm | 1500 | 1500 | 2.500 | 2.500 | 3.000 | 3.000 |
| Chlorid | mg/l | 20 | 30 | 40 | 40 | 150 | 100 |
| Sulfat | mg/l | 150 | 100 (300) | 300 | 300 | 600 | 600 |
| Phenolindex | µg/l | 10 | 10 | 50 | 50 | 100 | 100 |
| Arsen | µg/l | 10 | | 40 | | 50 | |
| Blei | µg/l | 40 | | 100 | | 100 | |
| Cadmium | µg/l | 2 | | 5 | | 5 | |
| Chrom (ges.) | µg/l | 30 | 12,5 | 75 | 25 | 100 | 60 |
| Kupfer | µg/l | 50 | 20 | 150 | 60 | 200 | 100 |
| Nickel | µg/l | 50 | 15 | 100 | 20 | 100 | 70 |
| Quecksilber | µg/l | 0,2 | < 0,5 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Zink | µg/l | 100 | 100 | 300 | 150 | 400 | 200 |
| EOX | mg/kg | 3 | | 5 | | 10 | |
| Kohlenwasserstoffe | mg/kg | 300 | 300 (600) | 500 | 300 (600) | 1.000 | 1000 (2000) |
| BTX | mg/kg | | 1 | | 1 | | 1 |
| LHKW | mg/kg | | 1 | | 1 | | 1 |
| PCB | mg/kg | 0,1 | 0,15 | 0,5 | 0,15 | 1 | 0,5 |
| PAK | mg/kg | 5 | 3 | 15 | 9 | 75 | 30 |

Fettdruck: neu > alt

Kursiv: neu < alt

Im aktuellen VO-Entwurf werden noch folgende ZOW im Säuleneluat W/F 2:1 aufgeführt:

- Elektrische Leitfähigkeit
- Sulfat

- PAK₁₅
- Chrom gesamt
- Kupfer
- Vanadium

Für PAK gelten übergangsweise bis 2020 auch noch Feststoffgehalte (RC-1 5 mg/kg, RC-2 15 mg/kg und RC-3 30 mg/kg). Für Sulfat gelten bis 2020 angehobene Übergangswerte. Bei Abgleichen in diesem Kapitel werden für PAK und Sulfat die Übergangswerte herangezogen.

6.5.1 Abgleich der RC Praxisdaten aus der Gütesicherung in NRW und Bayern und nicht qualitätsgesicherter Materialien aus Baden-Württemberg

Für Recyclingmaterialien liegen zahlreiche aussagefähige Datensätze zur Verfügung. Dazu gehören insbesondere die Daten aus der Gütesicherung, die im Rahmen der Fragebogenaktion von den Verbänden zur Verfügung gestellt wurde. Dazu gehören die Datensätze der Bundesgütegemeinschaft Recyclingbaustoffe (BGRB) der Jahre 1999 bis 2007 aus der Fremdüberwachung und von der KM GmbH aus der Fremd- und Eigenüberwachung der Jahre 2003 bis 2005 ausschließlich die Körnung 0/45. Beide Datensätze stammen von Anlagen aus NRW (siehe Tabelle 6.30).

Tabelle 6.30 Datensätze BGRB und KM zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers

| 15 - RC - BGRB | RC-1 | RC-2 | RC-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------|------|------|---------|------------|---------|--------|----------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 2500 | 3000 | µS/cm | 941,2 | 3340 | 890 | 1400 | 1701 | 940 |
| Chlorid | 30 | 40 | 100 | mg/l | 8 | 110 | 6 | 9 | 13 | 940 |
| Sulfat | 100 | 300 | 600 | mg/l | 109 | 5690 | 53 | 114,2 | 162 | 940 |
| Phenolindex | 10 | 50 | 100 | µg/l | 11 | 50 | 10 | 10 | 17,6 | 940 |
| Chrom (gesamt) | 12,5 | 25 | 60 | µg/l | 18,4 | 60 | 15 | 30 | 30 | 940 |
| Kupfer | 20 | 60 | 100 | µg/l | 28,7 | 105 | 19 | 50 | 50 | 940 |
| Nickel | 15 | 20 | 70 | µg/l | 9,4 | 25 | 10 | 10 | 10 | 940 |
| Zink | 100 | 150 | 200 | µg/l | 54,1 | 154 | 40 | 100 | 100 | 940 |
| Σ PAK 16 nach EPA | 3 | 9 | 30 | mg/kg | 5,5 | 78 | 2,9 | 9 | 13 | 940 |
| 35 - RC - KM 0/45 | RC-1 | RC-2 | RC-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 2500 | 3000 | µS/cm | 881 | 2480 | 820 | 1230 | 1500 | 330 |
| Chlorid | 30 | 40 | 100 | mg/l | 7 | 150 | 6 | 9 | 11 | 330 |
| Sulfat | 100 | 300 | 600 | mg/l | 120 | 584 | 101 | 181 | 233 | 330 |
| Phenolindex | 10 | 50 | 100 | µg/l | 12 | 60 | 10 | 11 | 20 | 330 |
| Chrom (gesamt) | 12,5 | 25 | 60 | µg/l | 16 | 30 | 15 | 15 | 25 | 330 |
| Kupfer | 20 | 60 | 100 | µg/l | 37 | 72 | 50 | 50 | 50 | 330 |
| Nickel | 15 | 20 | 70 | µg/l | 10 | 25 | 10 | 10 | 10 | 330 |
| Zink | 100 | 150 | 200 | µg/l | 63 | 190 | 100 | 100 | 100 | 330 |
| Σ PAK 16 nach EPA | 3 | 9 | 30 | mg/kg | 7,4 | 89 | 4,6 | 11 | 16 | 330 |

Für das 80 %-Percentil lag im Datensatz von der BGRB der Wert für Chrom gesamt bei KM 0/45 für PAK über dem ZOW für RC-2.

Für den Median wurden keine Überschreitungen des ZOW für RC-2 festgestellt. Die von der BRGB zur Verfügung gestellten Daten wiesen nur bei Chrom eine Einstufung nach RC-2 ein. Die von KM bereitgestellten Daten darüber hinaus noch für Sulfat, Kupfer und PAK. Bis auf Kupfer lagen alle Medianwerte nahe bei dem

ZOW für RC-1. Bis auf die elektrische Leitfähigkeit, Phenolindex und PAK (BGRB) wiesen die 90 %-Perzentile die gleiche Einstufung auf wie die 80 %-Perzentile.

Darüber hinaus hat das Baustoffrecycling Bayern (BR) aus der Fremdüberwachung der Jahre 2000 bis 2004, die alle gängigen Körnungen von 0/5 bis 0/56 enthalten zur Verfügung gestellt.

Der Datensatz des LfUBW erfasste in einer Erhebung 2006 82 Proben von einsatzfertigen Recyclingbaustoffen für den offenen Einbau aus 50 Bauschuttrecyclinganlagen, die nicht Mitglied im Qualitätssicherungssystem Recyclingbaustoffe Baden Württemberg e.V. (QRB) sind.

Tabelle 6.31 Datensätze LfUBW und BR Bayern (Weber) zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des Eckpunkteapiers

| 12 - RC - LfUBW | RC-1 | RC-2 | RC-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------|------|------|---------|------------|---------|--------|----------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 2500 | 3000 | µS/cm | 774 | 3270 | 718 | 1157,6 | 1401,9 | 82 |
| Chlorid | 30 | 40 | 100 | mg/l | 7,93 | 30,7 | 6,23 | 12,86 | 15,86 | 82 |
| Sulfat | 100 | 300 | 600 | mg/l | 182 | 980 | 66,4 | 291 | 557 | 82 |
| Chrom (gesamt) | 12,5 | 25 | 60 | µg/l | 14,05 | 41,5 | 12,6 | 20,6 | 24,36 | 82 |
| Kupfer | 20 | 60 | 100 | µg/l | 7,66 | 35,9 | 5,1 | 11,26 | 15,68 | 82 |
| Nickel | 15 | 20 | 70 | µg/l | 5 | 5,6 | 5 | 5 | 5 | 82 |
| Quecksilber | 0,5 | 1 | 2 | µg/l | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 82 |
| Zink | 100 | 150 | 200 | µg/l | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 82 |
| Σ PAK 16 nach EPA | 3 | 9 | 30 | mg/kg | 11,22 | 131,1 | 5,08 | 12,25 | 23,9 | 82 |
| 8 - RC - Weber | RC-1 | RC-2 | RC-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 2500 | 3000 | µS/cm | 109,4 | 228 | 100 | 159 | 179 | 181 |
| Chlorid | 30 | 40 | 100 | mg/l | 10,2 | 58,7 | 9 | 14 | 18 | 181 |
| Sulfat | 100 | 300 | 600 | mg/l | 116,3 | 1180 | 88 | 171 | 212 | 181 |
| Chrom (gesamt) | 12,5 | 25 | 60 | µg/l | 15,6 | 50 | 15 | 22 | 27 | 181 |
| Kupfer | 20 | 60 | 100 | µg/l | 21,1 | 50 | 14 | 40 | 50 | 181 |
| Nickel | 15 | 20 | 70 | µg/l | 15,2 | 40 | 10 | 40 | 40 | 181 |
| Quecksilber | 0,5 | 1 | 2 | µg/l | 0,3 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,5 | 181 |
| Zink | 100 | 150 | 200 | µg/l | 29,6 | 70 | 30 | 50 | 50 | 181 |

Überschreitungen des RC-2-Wertes im 80 %-Perzentil sind bei PAK (LfUBW) sowie Nickel (BR-Bayern) zu beobachten. Der RC-1-Wert war außerdem auch jeweils bei Sulfat und Chrom sowie in Bayern bei Kupfer überschritten. Bei den Daten aus Baden-Württemberg lag im 90 %-Perzentil zusätzlich Sulfat, bei den bayrischen Daten zusätzlich Chrom gesamt über RC-2.

Bei den Median-Werten lagen alle Werte unter dem ZOW für RC-2. Zwischen RC-1 und RC-2 lagen die Werte der Parameter Chrom und für LfUBW der Parameter PAK.

Überschreitungen bei Nickel wurden ausschließlich bei dem Datensatz aus Bayern beobachtet.

Insgesamt werden bis zum 90%-Perzentil keine Überschreitungen von RC 3 festgestellt.

Der Vergleich mit den - für W/F 10:1 errechneten - Vergleichswerten zeigt eine etwas andere Situation.

Tabelle 6.32 Datensätze BGRB und KM zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs³⁶

| 15 - RC - BGRB | RC-1 | RC-2 | RC-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Percc. | 90-Percc. | Messwerte |
|---------------------------|------|------|------|---------|------------|---------|--------|-----------|-----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 750 | 1000 | 3500 | µS/cm | 941,2 | 3340 | 890 | 1400 | 1701 | 940 |
| Sulfat | 90 | 185 | 400 | mg/l | 109 | 5690 | 53 | 114,2 | 162 | 940 |
| Chrom (gesamt) | 20 | 25 | 40 | µg/l | 18,4 | 60 | 15 | 30 | 30 | 940 |
| Kupfer | 15 | 25 | 35 | µg/l | 28,7 | 105 | 19 | 50 | 50 | 940 |
| Σ PAK 16 nach EPA | 5 | 15 | 30 | mg/kg | 5,5 | 78 | 2,9 | 9 | 13 | 940 |
| 35 - RC - KM 04/45 | RC-1 | RC-2 | RC-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Percc. | 90-Percc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 750 | 1000 | 3500 | µS/cm | 881 | 2480 | 820 | 1230 | 1500 | 330 |
| Sulfat | 90 | 185 | 400 | mg/l | 120 | 584 | 101 | 181 | 233 | 330 |
| Chrom (gesamt) | 20 | 25 | 40 | µg/l | 16 | 30 | 15 | 15 | 25 | 330 |
| Kupfer | 15 | 25 | 35 | µg/l | 37 | 72 | 50 | 50 | 50 | 330 |
| Σ PAK 16 nach EPA | 5 | 15 | 30 | mg/kg | 7,4 | 89 | 4,6 | 11 | 16 | 330 |

Tabelle 6.33 Datensätze LfUBW und BR Bayern (Weber) zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfs³⁷

| 12 - RC - LfUBW | RC-1 | RC-2 | RC-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Percc. | 90-Percc. | Messwerte |
|---------------------------|------|------|------|---------|------------|---------|--------|-----------|-----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 750 | 1000 | 3500 | µS/cm | 774 | 3270 | 718 | 1157,6 | 1401,9 | 82 |
| Sulfat | 90 | 185 | 400 | mg/l | 182 | 980 | 66,4 | 291 | 557 | 82 |
| Chrom (gesamt) | 20 | 25 | 40 | µg/l | 14,05 | 41,5 | 12,6 | 20,6 | 24,36 | 82 |
| Kupfer | 15 | 25 | 35 | µg/l | 7,66 | 35,9 | 5,1 | 11,26 | 15,68 | 82 |
| Vanadium | 30 | 50 | 100 | µg/l | | | | | | |
| Σ PAK 16 nach EPA | 5 | 15 | 30 | mg/kg | 11,22 | 131,1 | 5,08 | 12,25 | 23,9 | 82 |
| 8 - RC - Weber | RC-1 | RC-2 | RC-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Percc. | 90-Percc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 750 | 1000 | 3500 | µS/cm | 109,4 | 228 | 100 | 159 | 179 | 181 |
| Sulfat | 90 | 185 | 400 | mg/l | 116,3 | 1180 | 88 | 171 | 212 | 181 |
| Chrom (gesamt) | 20 | 25 | 40 | µg/l | 15,6 | 50 | 15 | 22 | 27 | 181 |
| Kupfer | 15 | 25 | 35 | µg/l | 21,1 | 50 | 14 | 40 | 50 | 181 |

Außer für den Datensatz der LfUBW lag das 80 %-Percentil für Kupfer bei allen Werten über RC-3. Beim Datensatz KM auch im Median. Mit Ausnahme der bayrischen Daten liegen alle Werte für die elektrische Leitfähigkeit im 80 %-Percentil jetzt über RC-2, bei den Daten des LfUBW auch noch der Wert für Sulfat, der für das 90 %-Percentil auch über RC-3 ansteigt.

Der Abgleich dieser Datensätze mit den ZOW der LAGA M 20 zeigt folgendes Bild (siehe Tabelle 6.34 und Tabelle 6.35). Die Überschreitungen bei Sulfat und PAK sind nach wie vor fast durchgängig zu beobachten, insbesondere bei den Proben aus Baden-Württemberg führen sie zu nahezu der gleichen Einstufung. Überschreitungen bei Chrom treten nicht auf. Die ZOW für Z 1.2 werden nur noch bei PAK und Sulfat im 90%-Percentil überschritten. Beim Median tauchen Überschreitungen nur noch bei PAK im Datensatz aus Baden-Württemberg auf.

³⁶ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

³⁷ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Tabelle 6.34 Datensätze BGRB und KM zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW der LAGA M 20

| 15 - RC - BGRB | RC Z1-1 | RC Z1-2 | RC Z2 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|---------|---------|-------|---------|------------|---------|--------|----------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 2500 | 3000 | µS/cm | 941,2 | 3340 | 890 | 1400 | 1701 | 940 |
| Chlorid | 20 | 40 | 150 | mg/l | 8 | 110 | 6 | 9 | 13 | 940 |
| Sulfat | 150 | 300 | 600 | mg/l | 109 | 5690 | 53 | 114,2 | 162 | 940 |
| Phenolindex | 10 | 50 | 100 | µg/l | 11 | 50 | 10 | 10 | 17,6 | 940 |
| Arsen | 10 | 40 | 50 | µg/l | 4,8 | 50 | 0 | 10 | 10 | 940 |
| Blei | 40 | 100 | 100 | µg/l | 14,3 | 40 | 20 | 20 | 20 | 940 |
| Cadmium | 2 | 5 | 5 | µg/l | 1,8 | 10 | 2 | 2 | 2 | 940 |
| Chrom (gesamt) | 30 | 75 | 100 | µg/l | 18,4 | 60 | 15 | 30 | 30 | 940 |
| Kupfer | 50 | 150 | 200 | µg/l | 28,7 | 105 | 19 | 50 | 50 | 940 |
| Nickel | 50 | 100 | 100 | µg/l | 9,4 | 25 | 10 | 10 | 10 | 940 |
| Zink | 100 | 300 | 400 | µg/l | 54,1 | 154 | 40 | 100 | 100 | 940 |
| EOX | 3 | 5 | 10 | mg/kg | 0,7 | 11,3 | 0,8 | 1 | 1 | 940 |
| Σ PAK 16 nach EPA | 5 | 15 | 75 | mg/kg | 5,5 | 78 | 2,9 | 9 | 13 | 940 |
| 35 - RC - KM 0/45 | RC Z1-1 | RC Z1-2 | RC Z2 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 2500 | 3000 | µS/cm | 881 | 2480 | 820 | 1230 | 1500 | 330 |
| Chlorid | 20 | 40 | 150 | mg/l | 7 | 150 | 6 | 9 | 11 | 330 |
| Sulfat | 150 | 300 | 600 | mg/l | 120 | 584 | 101 | 181 | 233 | 330 |
| Phenolindex | 10 | 50 | 100 | µg/l | 12 | 60 | 10 | 11 | 20 | 330 |
| Arsen | 10 | 40 | 50 | µg/l | 7 | 50 | 6 | 10 | 20 | 330 |
| Blei | 40 | 100 | 100 | µg/l | 15 | 30 | 20 | 20 | 20 | 330 |
| Cadmium | 2 | 5 | 5 | µg/l | 2,2 | 10 | 2 | 2 | 5 | 330 |
| Chrom (gesamt) | 30 | 75 | 100 | µg/l | 16 | 30 | 15 | 15 | 25 | 330 |
| Kupfer | 50 | 150 | 200 | µg/l | 37 | 72 | 50 | 50 | 50 | 330 |
| Nickel | 50 | 100 | 100 | µg/l | 10 | 25 | 10 | 10 | 10 | 330 |
| Zink | 100 | 300 | 400 | µg/l | 63 | 190 | 100 | 100 | 100 | 330 |
| EOX | 3 | 5 | 10 | mg/kg | 0,7 | 8,4 | 0,2 | 2 | 1 | 330 |
| Σ PAK 16 nach EPA | 5 | 15 | 75 | mg/kg | 7,4 | 89 | 4,6 | 11 | 16 | 330 |

Tabelle 6.35 Datensätze LfUBW und BR Bayern (Weber) zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW der LAGA M 20

| 12 - RC - LFUBW | RC Z1-1 | RC Z1-2 | RC Z2 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|---------|---------|-------|---------|------------|---------|--------|----------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 2500 | 3000 | µS/cm | 774 | 3270 | 718 | 1157,6 | 1401,9 | 82 |
| Chlorid | 20 | 40 | 150 | mg/l | 7,93 | 30,7 | 6,23 | 12,86 | 15,86 | 82 |
| Sulfat | 150 | 300 | 600 | mg/l | 182 | 980 | 66,4 | 291 | 557 | 82 |
| Arsen | 10 | 40 | 50 | µg/l | 5 | 15,2 | 5 | 5 | 5 | 82 |
| Blei | 40 | 100 | 100 | µg/l | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 82 |
| Cadmium | 2 | 5 | 5 | µg/l | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 82 |
| Chrom (gesamt) | 30 | 75 | 100 | µg/l | 14,05 | 41,5 | 12,6 | 20,6 | 24,36 | 82 |
| Kupfer | 50 | 150 | 200 | µg/l | 7,66 | 35,9 | 5,1 | 11,26 | 15,68 | 82 |
| Nickel | 50 | 100 | 100 | µg/l | 5 | 5,6 | 5 | 5 | 5 | 82 |
| Quecksilber | 0,2 | 1 | 2 | µg/l | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 82 |
| Zink | 100 | 300 | 400 | µg/l | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 82 |
| Σ PAK 16 nach EPA | 5 | 15 | 75 | mg/kg | 11,22 | 131,1 | 5,08 | 12,25 | 23,9 | 82 |
| 8 - RC - Weber | RC Z1-1 | RC Z1-2 | RC Z2 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 2500 | 3000 | µS/cm | 109,4 | 228 | 100 | 159 | 179 | 181 |
| Chlorid | 20 | 40 | 150 | mg/l | 10,2 | 58,7 | 9 | 14 | 18 | 181 |
| Sulfat | 150 | 300 | 600 | mg/l | 116,3 | 1180 | 88 | 171 | 212 | 181 |
| Arsen | 10 | 40 | 50 | µg/l | 4,4 | 12 | 5 | 5 | 10 | 181 |
| Blei | 40 | 100 | 100 | µg/l | 9,6 | 24 | 5 | 20 | 20 | 181 |
| Cadmium | 2 | 5 | 5 | µg/l | 0,9 | 5 | 0,5 | 1 | 2 | 181 |
| Chrom (gesamt) | 30 | 75 | 100 | µg/l | 15,6 | 50 | 15 | 22 | 27 | 181 |
| Kupfer | 50 | 150 | 200 | µg/l | 21,1 | 50 | 14 | 40 | 50 | 181 |
| Nickel | 50 | 100 | 100 | µg/l | 15,2 | 40 | 10 | 40 | 40 | 181 |
| Quecksilber | 0,2 | 1 | 2 | µg/l | 0,3 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,5 | 181 |
| Zink | 100 | 300 | 400 | µg/l | 29,6 | 70 | 30 | 50 | 50 | 181 |

6.5.2 Überprüfung des Einflusses der Körnungen auf die Qualitäten

Um zu prüfen, ob die Körnung einen erheblichen Einfluss auf die Schadstoffgehalte in Recyclingbaustoffen hat, wurden die Werte aus den 905 Proben auch getrennt, in Abhängigkeit ihrer Körnung ausgewertet.

Tabelle 6.36 Die 905 Proben des alten Datensatzes der BGRB 1999 bis 2003 unterteilt nach den einzelnen Körnungen

| | | Körnung 0/5 Werte 44 | | | Körnung 0/8 Werte 20 | | | Körnung 0/32 Werte 36 | | | Körnung 0/45 Werte 768 | | | Körnung 0/56 Wert 37 | | |
|---------------------------|-------|----------------------|----------|----------|----------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|------------------------|----------|----------|----------------------|----------|----------|
| | | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Median | 80-Perc. | 90-Perc. |
| elektrische Leitfähigkeit | µS/cm | 925 | 1744 | 1903 | 1250 | 1602 | 1686 | 1020 | 1800 | 2100 | 880 | 1270 | 1603 | 608 | 1011 | 1211 |
| Chlorid | mg/l | 5 | 7,8 | 11,7 | 4,3 | 7,6 | 8,3 | 5 | 5,7 | 7,6 | 6 | 9 | 13 | 3,4 | 4,8 | 6 |
| Sulfat | mg/l | 66,7 | 122,4 | 132 | 67 | 96,6 | 127,4 | 37,4 | 54 | 70 | 61,8 | 130 | 190 | 34 | 81,4 | 111 |
| Phenolindex | µg/l | 10 | 10 | 50 | 10 | 22,6 | 31,6 | 10 | 12 | 15,5 | 10 | 10 | 16 | 10 | 10 | 0 |
| Chrom (gesamt) | µg/l | 26 | 30 | 30 | 15 | 30 | 30 | 20 | 30 | 30 | 15 | 15 | 20 | 17 | 30 | 30 |
| Kupfer | µg/l | 50 | 50 | 50 | 10,5 | 25,2 | 32 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 12 | 47,4 | 50 | 50 |
| Nickel | µg/l | 10 | 10 | 10 | 7,5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 |
| Zink | µg/l | 20 | 50 | 50 | 10 | 22 | 32 | 20 | 50 | 50 | 100 | 100 | 100 | 10 | 23,2 | 50 |
| S PAK 16 nach EPA | mg/kg | 4,6 | 11,0 | 14,2 | 6,9 | 9,2 | 14,0 | 2,9 | 7,4 | 13,5 | 1,6 | 4,9 | 9,2 | 2,5 | 7,4 | 7,4 |

Zunächst fällt auf, dass die Körnung 0/45 mit 768 Werten (85 %) die mit Abstand häufigste Gesteinskörnung darstellt. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Körnungen fallen geringer aus, als man erwarten könnte. Wegen des höheren Anteils an Feinstmaterial, das aufgrund der größeren Oberfläche Schadstoffe besser anlagert als grobes Material, wären bei den kleineren Körnungen (0/5 und 0/8) höhere Schadstoffgehalte zu erwarten. Bei den Eluatwerten ist allerdings zu beachten, dass bei allen Körnungen die Feinfraktion enthalten ist und, auch wenn ihr Anteil an der Gesamtprobe bei größeren Körnungen geringer ist, unter den gegebenen Auslaugbedingungen zu ähnlichen Auslaugraten beiträgt.

Am ehesten ist eine Mehrbelastung der kleinen Körnungen bei PAK zu beobachten, da hier der Gesamtgehalt analysiert wird und dieser wie oben beschrieben im Normalfall in der Grobfraktion etwas geringer ist.

6.5.3 Abgleich weiterer Datensätze

Weitere Datensätze, die alle vom LUA-NRW zur Verfügung gestellt wurden, sind in Tabelle 6.37 zusammengestellt. Auffällig sind die geringen PAK Gehalte in den bayrischen Proben.

Die Recyclingbaustoffe aus Hessen und Rheinland-Pfalz (14-RC-Hes) weisen insgesamt die höchsten Belastungen auf, aber die geringsten Gehalte an Sulfat.

Die beiden Datensätze aus einer Erhebung in Köln unterscheiden sich durch die Einstufung in Produktgruppe RC I bzw. RC II. RC I wird im Straßenoberbau, RC II im sonstigen Verkehrswege-, Sportplatz- und Deponiebau eingesetzt. Trotz der unterschiedlichen Einstufung unterscheiden sich diese beiden Materialgruppen kaum. Eine Ausnahme bildet die elektrische Leitfähigkeit, die anders als zu erwarten bei RC I mehr als 5fach höher ist als bei RC 2. Die Sulfatgehalte überschreiten den

ZOW für RC-1 bei Einbau in Schichten größer 50 cm nur geringfügig und lägen noch sicher im Bereich der zulässigen Überschreitung von 10 %.

Tabelle 6.37 Median, 80%-Perzentil, 90%-Perzentil und Werte“anzahl“ für vier Datensätze zu Recyclingbaustoffen (zur Verfügung gestellt durch das LUA-NRW) im Vergleich zu den ZOW des Eckpunktepapiers

| | | 9-RC-Bay | | | 14-RC-Hes | | | 24-RC1-Kö | | | 13-RC2-Kö | | |
|--------------------|-------|-----------|------------|-------|------------|--------------|-------|-----------|--------------|-------|-----------|--------------|-------|
| | | Median | 80-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | Werte |
| elektrische | | | | | | | | | | | | | |
| Leitfähigkeit | µS/cm | 88,5 | 150 | 156 | 769 | 1760 | 185 | 470 | 1010 | 303 | 96 | 164 | 683 |
| Chlorid | mg/l | 6 | 11 | 156 | 5 | 8,7 | 153 | 6 | 8,3 | 250 | 5 | 8 | 600 |
| Sulfat | mg/l | 81,5 | 176 | 156 | 28 | 86 | 153 | 52,7 | 103,8 | 284 | 44,5 | 104,9 | 650 |
| Phenolindex | µg/l | 10 | 20 | 156 | 10 | 20 | 178 | 12 | 21,2 | 90 | 14 | 20 | 176 |
| Chrom (gesamt) | µg/l | 15 | 17 | 156 | 13 | 30 | 179 | | | | | | |
| Kupfer | µg/l | 20 | 29 | 156 | 10 | 100 | 178 | 14 | 22 | 66 | 12 | 22 | 130 |
| Nickel | µg/l | 10 | 30 | 156 | 10 | 10 | 179 | 1,5 | 3 | 20 | 4 | 8,4 | 41 |
| Quecksilber | µg/l | 0,2 | 0,5 | 156 | 0,35 | 1 | 144 | | | | | | |
| Zink | µg/l | 20 | 50 | 156 | 50 | 50 | 179 | 16 | 27,4 | 53 | 30 | 96 | 118 |
| Kohlenwasserstoffe | mg/kg | 83,5 | 100 | 144 | 165 | 445,4 | 65 | | | | | | |
| S PAK 16 nach EPA | mg/kg | 1,1 | 1,8 | 156 | 4,4 | 12,5 | 149 | | | | | | |
| S PCB 6 | mg/kg | | | | 0,1 | 0,13 | 60 | | | | | | |

In zwei Datensätzen aus ABANDA werden die PAK-Gehalte von teerhaltigen und teerfreien Bitumengemische aufgezeigt, wenn auch nur in sehr geringer, nicht repräsentativer Probenzahl. Demnach liegen die PAK-Gehalte bei teerhaltigen Bitumengemischen zwischen 42 und 1.580 mg/kg, bei teerfreien zwischen 0,5 und 12,3 mg/kg. Die teerhaltigen Bitumengemische weisen außerdem hohe Gehalte an Quecksilber, Nickel und Kupfer auf.

Bei der Untersuchung aus Baden-Württemberg wurde die Abhängigkeit der PAK-Gehalte von dem Asphaltanteil untersucht. Eine Korrelation wurde nicht festgestellt. In der gleichen Arbeit wurde auch versucht, eine Abhängigkeit zwischen dem Sulfatgehalt und den Ausgangsmaterialien zu finden. Hier war deutlich zu erkennen, dass Beton und Asphalt geringere Sulfatgehalte aufweisen als Gebäudeabbruch (LUBW 2006a).

In Tabelle 6.38 sind die Ergebnisse einer Auswertung der PAK-Gehalte bei verschiedenen Anteilen an Asphalt und Asphaltgranulat dargestellt. Es zeigt sich, dass die PAK-Gehalte in der Fraktion mit 10 % bis 30 % Asphalt etwas höher lagen als in den Vergleichsfraktionen mit 0 % bis 2 % und 2 bis 10 % Asphaltanteil. Es zeigt sich aber, dass die Proben mit einem Anteil unter 2% höhere PAK-Gehalte aufweisen als die zwischen 2 % und 10 %. Die Auswertung aus Baden-Württemberg wird hierdurch bestätigt. Eine Reduktion der PAK-Gehalte durch das Abtrennen von Asphaltanteilen ist nur in sehr begrenztem Umfang möglich.

Tabelle 6.38 Abhängigkeit des PAK-Gehalts von dem Anteil an Asphalt und Asphaltgranulat in den 940 Proben der BGRB

| Anteil | Asphalt, Asphaltgranulat | | |
|------------|--------------------------|--------------|-------------|
| | 10 % bis 30 % | 2 % bis 10 % | 0 % bis 2 % |
| Anzahl | 397 | 314 | 229 |
| Mittelwert | 6,3 | 4,8 | 5,2 |
| Min | 0,05 | 0,00 | 0,23 |
| Max | 78,0 | 29,2 | 58,9 |
| Median | 4,2 | 2,6 | 2,3 |
| 80 % P. | 9,9 | 7,8 | 8,0 |
| 90 % P. | 13,4 | 11,5 | 12,9 |
| 95 % P. | 17,0 | 15,1 | 15,5 |

6.5.4 Abgleich der Daten aus dem UFOPLAN-Analysenprogramm

Im Rahmen des Analysenprogramms zu diesem UFOPLAN-Projekt (siehe Kapitel 7) wurden 50 Proben für Recyclingbaustoffe aus Bauschutttaufbereitungsanlagen neben Säulentests und Feststoffuntersuchungen auch Schütteltests nach DEV S 4 durchgeführt. Die Ergebnisse der Schütteltests sind im Datensatz UFO in Tabelle 6.39 den ZOW des Eckpunktepapiers und in Tabelle 6.40 denen des VO-Entwurfes gegenübergestellt. Die Auswertung der Säulentests erfolgte in dem parallel durchgeführten Projekt (LANUV 2008).

Tabelle 6.39 Datensatz UFOPLAN zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des Eckpunktepapiers

| 13 - RC - UFO | RC-1 | RC-2 | RC-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------|------|------|---------|------------|---------|--------|----------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 1500 | 2500 | 3000 | µS/cm | 545,1 | 1776 | 399 | 847,4 | 1140,8 | 50 |
| Chlorid | 30 | 40 | 100 | mg/l | 4,8 | 30 | 3 | 5,2 | 7,1 | 50 |
| Sulfat | 100 | 300 | 600 | mg/l | 69,2 | 329 | 34,5 | 136 | 159,2 | 50 |
| Chrom (gesamt) | 12,5 | 25 | 60 | µg/l | 14 | 99 | 10 | 12,2 | 15,5 | 50 |
| Kupfer | 20 | 60 | 100 | µg/l | 13,4 | 92 | 10 | 10 | 12,3 | 50 |
| Nickel | 15 | 20 | 70 | µg/l | 10,6 | 40,4 | 10 | 10 | 10 | 50 |
| Zink | 100 | 150 | 200 | µg/l | 40 | 41 | 40 | 40 | 40 | 50 |
| Σ PAK 16 nach EPA | 3 | 9 | 30 | mg/kg | 16,5 | 64,8 | 9,6 | 22,7 | 50,1 | 50 |

Auffällig waren, wie nicht anders zu erwarten, die Werte für Sulfat und PAK. Die Einstufung nach dem Sulfatwert würde im Median noch sicher nach RC-1, im 80 und 90 %-Perzentil in RC-2 erfolgen. Nach den PAK-Werten wäre bereits für den Median eine Einstufung nach RC-3 notwendig, im 90 %-Perzentil wird auch RC-3 überschritten.

Tabelle 6.40 Datensatz UFOPLAN zu Recyclingbaustoffen (RC) im Abgleich mit den ZOW des VO-Entwurfes³⁸

| 13 - RC - UFO | RC-1 | RC-2 | RC-3 | Einheit | Mittelwert | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------|------|------|---------|------------|---------|--------|----------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 750 | 1000 | 3500 | µS/cm | 545,1 | 1776 | 399 | 847,4 | 1140,8 | 50 |
| Sulfat | 90 | 185 | 400 | mg/l | 69,2 | 329 | 34,5 | 136 | 159,2 | 50 |
| Chrom (gesamt) | 20 | 25 | 40 | µg/l | 14 | 99 | 10 | 12,2 | 15,5 | 50 |
| Kupfer | 15 | 25 | 35 | µg/l | 13,4 | 92 | 10 | 10 | 12,3 | 50 |
| Vanadium | 30 | 50 | 100 | µg/l | 13,6 | 28 | 13 | 21 | 24 | 50 |
| Σ PAK 16 nach EPA | 3 | 4,5 | 15 | µg/l | 3,5 | 36,7 | 2,3 | 3,6 | 6,2 | 50 |
| Σ PAK 16 nach EPA | 5 | 15 | 30 | mg/kg | 16,5 | 64,8 | 9,6 | 22,7 | 50,1 | 50 |

Beim Abgleich nach dem VO-Entwurf kommt noch die elektrische Leitfähigkeit als auffälliger Parameter hinzu. Bei PAK entschärft sich dagegen die Situation erheblich. Zum einen sind die Übergangswerte für den PAK im Feststoff gegenüber dem Eckpunktepapier angehoben worden, zum anderen erweist sich die Begrenzung im Eluat im Vergleich zu den Feststoffwerten als deutlich moderater. Jetzt ist im 90 %-Percentil noch eine Verwertung nach RC-3, im 80 %-Percentil nach RC-2 und im Median nach RC-1 möglich. Berücksichtigt man zudem, dass in der Übergangszeit zwischen beiden ZOW gewählt werden kann und dass häufig die Gehalte im Feststoff und im Eluat stark voneinander abweichen (vgl. Kapitel 7.2.3), entschärft sich die Situation nochmals.

³⁸ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

6.6 Bodenmaterial (BM)

Die folgenden zwei Tabellen zeigen die ZOW für Bodenmaterial nach dem Eckpunktepapier im Vergleich zur LAGA M 20.

Tabelle 6.41 Zuordnungswerte (Feststoff) für Boden bzw. Bodenmaterial: LAGA M 20 im Vergleich zum Eckpunktepapier

| Parameter | Einheit | Z 1.1 | BM-1 | Z 1.2 | BM-2 | Z 2 | BM-3 |
|--------------------|---------|-------|---------------------|-------|----------------------------|------|-----------------------|
| Arsen | mg/kg | 30 | <i>45</i> | 50 | 45 | 150 | 150 |
| Blei | mg/kg | 200 | <i>210</i> | 300 | 210 | 1000 | 700 |
| Cadmium | mg/kg | 1 | 3 | 3 | 3 | 10 | 10 |
| Chrom (ges.) | mg/kg | 100 | <i>180</i> | 200 | 180 | 600 | 600 |
| Kupfer | mg/kg | 100 | <i>120</i> | 200 | 120 | 600 | 400 |
| Nickel | mg/kg | 100 | <i>150</i> | 200 | 150 | 600 | 500 |
| Quecksilber | mg/kg | 1 | <i>2,1</i> | 3 | 2,1 | 10 | 7 |
| Thallium | mg/kg | 1 | 3 | 3 | 3 | 10 | 10 |
| Zink | mg/kg | 300 | <i>450</i> | 500 | 450 | 1500 | 1500 |
| Cyanide | mg/kg | 10 | 1,5 | 30 | 1,5 | 100 | 5 |
| TOC | M-% | | 1,5 | | 1,5 | | 5 |
| EOX | mg/kg | 3 | 3 | 10 | 3 | 15 | 10 |
| Kohlenwasserstoffe | mg/kg | 300 | 300 <i>(600)</i> | 500 | 300 <i>(600)</i> | 1000 | 1000 <i>(2000)</i> |
| BTX | mg/kg | 1 | 1 | 3 | 1 | 5 | <i>1</i> |
| LHKW | mg/kg | 1 | 1 | 3 | 1 | 5 | <i>1</i> |
| PCB6 | mg/kg | 0,1 | <i>0,15</i> | 0,5 | 0,15 | 1 | 1 |
| PAK16 | mg/kg | 5 | 3 | 15 | 9 | 20 | <i>30</i> |

Fettdruck: neu < alt

Kursivdruck: neu > alt

Tabelle 6.42 Zuordnungswerte (Eluat) für Boden bzw. Bodenmaterial: LAGA M 20 im Vergleich zum Eckpunktepapier

| Parameter | Einheit | Z 1.1 | BM-1 | Z 1.2 | BM-2 | Z 2 | BM-3 |
|-------------------|---------|---------|-----------------|--------|--------------|----------|------------|
| pH-Wert | | 6,5 - 9 | 6,5 - 9,5 | 6 - 12 | 6-12 | 5,5 - 12 | 5,5-12 |
| el. Leitfähigkeit | µS/cm | 500 | 250 | 1.000 | <i>1.500</i> | 1.500 | 2.000 |
| Chlorid | mg/l | 10 | <i>30</i> | 20 | <i>50</i> | 30 | 100 |
| Sulfat | mg/l | 50 | 20 | 100 | 50 | 150 | 200 |
| Cyanid (ges.) | µg/l | 10 | 5 | 50 | 10 | 100 | 20 |
| Phenolindex | µg/l | 10 | <i>20</i> | 50 | 40 | 100 | 100 |
| Arsen | µg/l | 10 | <i>14</i> | 40 | 20 | 60 | 60 |
| Blei | µg/l | 40 | <i>40</i> | 100 | 80 | 200 | 200 |
| Cadmium | µg/l | 2 | 1,5 | 5 | 3 | 10 | 6 |
| Chrom (ges.) | µg/l | 30 | 12,5 | 75 | 25 | 150 | 60 |
| Kupfer | µg/l | 50 | 20 | 150 | 60 | 300 | 100 |
| Nickel | µg/l | 50 | 15 | 150 | 20 | 200 | 70 |
| Quecksilber | µg/l | 0,2 | <i>< 0,5</i> | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Thallium | µg/l | 1 | | 3 | | 5 | |
| Zink | µg/l | 100 | <i>150</i> | 300 | 200 | 600 | 600 |

Fettdruck: neu < alt

Kursivdruck: neu > alt

Tabelle 6.43 zeigt die Werte von Bodenmaterialien aus vier Datensätzen im Vergleich zu den OW des Eckpunktepapiers.

Mit Abstand die größte Probenzahl weist der Datensatz auf, der von der Bahn AG zur Verfügung gestellt wurde. Hier wurden aus dem gesamten Bundesgebiet Bodenwerte zusammengestellt, die neben dem Unterbau aus dem Gleisbereich auch Böden aus Altlasten und nicht näher beschriebene Böden beinhalten. Das 90%-Percentil für PCB ist deutlich erhöht und liegt über BM-3, während das 80%-Percentil noch unterhalb der Nachweisgrenze lag. Die Werte für PAK überschreiten im 90%-Percentil BM-2 und im 80%-Percentil noch BM-1. Bei diesen Werten ist zu berücksichtigen, dass die Bodenmaterialien im Gleisbereich und aus Altlasten besondere Belastungen erfahren haben (z.B. Auslaugung aus Bahnschwellen), die unter Umständen eine Behandlung erforderlich machen. Sulfat und Cyanide

überschreiten den ZOW für BM-1. Die angegebenen Werte für Cadmium und Nickel stellen die NWG dar.

Der Datensatz aus Baden-Württemberg soll die Hintergrundbelastung im anthropogen beeinflussten Bereich widerspiegeln. Untersucht wurden hierzu Proben auf Bodenaushubdeponien in Baden-Württemberg. Alle Werte bis auf Sulfat und TOC halten noch im 90%-Percentil BM-1 ein.

Wesentlicher Inhalt des Projektes der BGR war die exemplarische Untersuchung geeigneter Probenkollektive von Böden mit naturbedingt oder großflächig siedlungsbedingt erhöhten Gehalten anorganischer Spurenelemente im Hinblick auf die Elementfreisetzung und ihre Wirkungspfad- und nutzungsbezogenen Bewertung gemäß BBodSchV. Im Feststoff weist nur das 90%-Percentil für Chrom eine Überschreitung von ZOW (BM-2) auf. Im Eluat sind neben Chrom auch die Werte für Arsen, Blei, Kupfer und Nickel erhöht. Bei Nickel liegt bereits der Median über BM-2, bei Kupfer über BM-1.

Bei den Daten aus Hamburg handelt sich um insgesamt 288 Bodenproben aus Bauvorhaben in Hamburg, die gemäß LAGA Mitteilung 20 den Zuordnungswerten Z 0 bis > Z 2 zugeordnet wurden. Von den gesamten Proben waren ca. 134 als > Z 2 und 62 als Z 2 Material eingestuft worden. Der Vergleich zeigt, dass es sich hierbei um die am stärksten belasteten Böden handelt. Die ZOW für BM-3 wurden bei Sulfat, Phenolindex und PAK überschritten. Bis auf den EOX lagen alle organischen Parameter zumindest im 90%-Percentil über BM-2. Von den Schwermetallen überschreiten Blei, Kupfer und Zink den BM-2. Im Eluat liegen Blei, Kupfer und Quecksilber zwischen BM-1 und BM-2, Zink überschreitet auch BM-2.

Tabelle 6.43 Median, 80%-Percentil, 90%-Percentil und Werte“anzahl“ für vier Datensätze zu Bodenmaterialien (DB, LfU-BW, HH, BGR) im Vergleich zu den ZOW des Eckpunktepapiers

| | | 46-BM-DB | | | | 48-BM-BW | | | | 62-BM-HH | | | 47-BM-BGR | | | | |
|---------------------------|---------|------------|-------------|-------------|-------|----------|-------------|-------------|-------|-------------|--------------|--------------|-----------|-------------|-------------|--------------|-------|
| | | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Werte |
| elektrische Leitfähigkeit | µS/cm | 81 | 127 | 174,4 | 1207 | 114 | 159 | 191,6 | 59 | 168 | 366,6 | 561,5 | 288 | | | | |
| Chlorid | mg/l | 1,2 | 2,6 | 5,3 | 108 | 0,5 | 1 | 2,6 | 59 | 4,5 | 8 | 13,9 | 288 | | | | |
| Sulfat | mg/l | 7,3 | 20,2 | 39 | 122 | 5,4 | 13,9 | 34,9 | 59 | 42,5 | 120,6 | 215,9 | 288 | | | | |
| Cyanide (gesamt) | µg/l | 1,2 | 2,6 | 5,3 | 108 | | | | | 10 | 25 | 25 | 288 | | | | |
| Phenolindex | µg/l | | | | | | | | | 100 | 100 | 100 | 288 | | | | |
| Arsen | µg/l | 10 | 10 | 10 | 1165 | 0,8 | 2,2 | 3,4 | 59 | 5 | 7,1 | 11 | 287 | 6,4 | 12 | 19 | 84 |
| Blei | µg/l | 20 | 20 | 20 | 1165 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 59 | 5 | 10 | 24,3 | 288 | 8,8 | 25,6 | 42,9 | 152 |
| Cadmium | µg/l | 2 | 2 | 2 | 1166 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 59 | 1 | 3 | 288 | 0,2 | 0,6 | 0,9 | 152 | |
| Chrom (gesamt) | µg/l | 10 | 10 | 10 | 1187 | 0,9 | 1,5 | 1,6 | 59 | 2 | 9 | 10 | 288 | 3,4 | 8,8 | 13,3 | 152 |
| Kupfer | µg/l | 10 | 10 | 20 | 1165 | 2,1 | 4,1 | 4,9 | 59 | 11 | 21,6 | 30 | 288 | 25,7 | 51,1 | 64,8 | 152 |
| Nickel | µg/l | 20 | 20 | 20 | 1165 | 0,7 | 1,4 | 2 | 59 | 10 | 10 | 12 | 288 | 20,9 | 20,9 | 28,5 | 152 |
| Quecksilber | µg/l | 0 | 0 | 0 | 1173 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 59 | 0,2 | 1 | 1 | 288 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 152 |
| Zink | µg/l | 5 | 5 | 9 | 1134 | 15 | 23 | 28,2 | 59 | 50 | 136 | 270 | 288 | 30,6 | 75,2 | 111,7 | 152 |
| Cyanide (gesamt) | mg/kg | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 107 | | | | | 0,3 | 0,8 | 1 | 288 | | | | |
| Arsen | mg/kg | 6,7 | 13,6 | 18,6 | 1277 | 11 | 18 | 29,5 | 59 | 7,4 | 20 | 29,4 | 288 | 7,6 | 13,8 | 18,7 | 152 |
| Blei | mg/kg | 17,3 | 59,7 | 111,3 | 1280 | 20,6 | 34 | 42,7 | 59 | 73,5 | 272,6 | 640,2 | 288 | 57,6 | 131,5 | 207,3 | 152 |
| Cadmium | mg/kg | 0,8 | 1,6 | 2,5 | 1282 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 59 | 0,5 | 1,2 | 2,1 | 288 | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 152 |
| Chrom (gesamt) | mg/kg | 16,9 | 31,4 | 42,2 | 1309 | 38,9 | 51,1 | 59,9 | 59 | 14 | 27 | 36 | 287 | 38,9 | 84,4 | 186,5 | 152 |
| Kupfer | mg/kg | 19,4 | 61 | 107 | 1275 | 20,1 | 29,1 | 36,5 | 59 | 41 | 148 | 308,6 | 288 | 31,4 | 53,6 | 70,2 | 152 |
| Nickel | mg/kg | 16,4 | 33,5 | 47,9 | 1265 | 35,3 | 48 | 61 | 59 | 11,6 | 23 | 35,8 | 288 | 34,3 | 63,3 | 132,9 | 152 |
| Quecksilber | mg/kg | 0,2 | 0,4 | 1 | 1283 | 0,03 | 0,09 | 0,18 | 59 | 0,3 | 0,7 | 1,2 | 288 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 152 |
| Thallium | mg/kg | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 106 | 0,3 | 0,4 | 0,42 | 59 | 0,5 | 1 | 1 | 288 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 152 |
| Zink | mg/kg | 54,3 | 139 | 255 | 1272 | 62,1 | 89,8 | 119,6 | 59 | 179 | 448 | 851 | 288 | 139,6 | 255,9 | 392,4 | 152 |
| TOC | Masse-% | 1,5 | 2,1 | 2,4 | 2 | 1,04 | 2,24 | 3,48 | 59 | | | | | | | | |
| Kohlenwasserstoffe | mg/kg | | | | | 50 | 50 | 50 | 59 | 50 | 171,6 | 419,8 | 287 | | | | |
| EOX | mg/kg | | | | | | | | | 1 | 2 | 2 | 288 | | | | |
| S BTEX | mg/kg | | | | | | | | | 0,04 | 0,2 | 1 | 288 | | | | |
| S LHKW | mg/kg | | | | | | | | | 0,1 | 1 | 1 | 288 | | | | |
| S PAK 16 nach EPA | mg/kg | 0,8 | 4,9 | 11,6 | 1481 | 0,16 | 0,63 | 1,1 | 59 | 4,6 | 19 | 51,6 | 288 | | | | |
| S PCB 6 | mg/kg | 0 | 0 | 2,7 | 112 | 0,002 | 0,01 | 0,015 | 59 | 0,03 | 0,2 | 0,3 | 288 | | | | |

Im neuen VO-Entwurf wurden für Böden neben BM-1 bis BM-3 auch BM-0 eingeführt. Um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wird der Abgleich getrennt durchgeführt.

Zunächst werden die Werte der Bahn, aus Baden-Württemberg und aus dem Forschungsprojekt der BGR den Rechenwerten für das 10:1 Eluat BM-1 bis BM-3 gegenübergestellt.

Tabelle 6.44 Datensätze DB, BW und BGR zu Bodenmaterialien im Abgleich mit den ZOW BM-1 bis BM-3 des VO-Entwurfes³⁹

| 46-BM-DB | BM-1 | BM-2 | BM-3 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------|------|------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 200 | 200 | 1000 | µS/cm | 121,1 | 8 | 8240 | 81 | 127 | 174,4 | 1207 |
| Blei | 175 | 250 | 300 | µg/l | 20 | 160 | 20 | 20 | 20 | 20 | 1165 |
| Chrom (gesamt) | 30 | 65 | 100 | µg/l | 15 | 10 | 2200 | 10 | 10 | 10 | 1187 |
| Kupfer | 25 | 45 | 100 | µg/l | 13 | 10 | 100 | 10 | 10 | 20 | 1165 |
| Nickel | 7 | 40 | 100 | µg/l | 21 | 20 | 389 | 20 | 20 | 20 | 1165 |
| Zink | 30 | 130 | 300 | µg/l | 9 | 5 | 886 | 5 | 5 | 9 | 1134 |
| TOC | 2 | 2 | | Masse-% | 1,5 | 0,3 | 2,6 | 1,5 | 2,1 | 2,4 | 2 |
| 48 - BM - BW | BM-1 | BM-2 | BM-3 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
| elektrische Leitfähigkeit | 200 | 200 | 1000 | µS/cm | 120,7 | 8 | 285 | 114 | 159 | 191,6 | 59 |
| Blei | 175 | 250 | 300 | µg/l | 0,2 | 0,2 | 0,7 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 59 |
| Chrom (gesamt) | 30 | 65 | 100 | µg/l | 1,1 | 0,2 | 4,6 | 0,9 | 1,5 | 1,6 | 59 |
| Kupfer | 25 | 45 | 100 | µg/l | 2,7 | 0,2 | 11,8 | 2,1 | 4,1 | 4,9 | 59 |
| Nickel | 7 | 40 | 100 | µg/l | 1 | 0,5 | 5,4 | 0,7 | 1,4 | 2 | 59 |
| Zink | 30 | 130 | 300 | µg/l | 18,2 | 4 | 135 | 15 | 23 | 28,2 | 59 |
| TOC | 2 | 2 | | Masse-% | 1,6 | 0,05 | 18,4 | 1,04 | 2,2 | 3,5 | 59 |
| 47 - BM - BGR | BM-1 | BM-2 | BM-3 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
| Blei | 175 | 250 | 300 | µg/l | 19,7 | 2,3 | 280,3 | 8,8 | 25,6 | 42,9 | 152 |
| Chrom (gesamt) | 30 | 65 | 100 | µg/l | 6,9 | 1,1 | 125 | 3,4 | 8,8 | 13,3 | 152 |
| Kupfer | 25 | 45 | 100 | µg/l | 36,3 | 0,8 | 333 | 25,7 | 53,1 | 64,8 | 152 |
| Nickel | 7 | 40 | 100 | µg/l | 24,9 | 20,9 | 170 | 20,9 | 20,9 | 28,5 | 152 |
| Zink | 30 | 130 | 300 | µg/l | 79,3 | 18 | 2862 | 30,6 | 75,2 | 111,7 | 152 |

Die Gegenüberstellung zeigt, dass für Böden, die eine normale Hintergrundbelastung dokumentieren (DB und BW) mit Ausnahme von TOC selbst beim 90 %-Percentil keine Überschreitungen zu verzeichnen sind. Bei Nickel stellen die 20 µg/l die Nachweisgrenze dar, stehen also nicht für eine Überschreitung.

Werden gezielt belastete Böden untersucht (BGR), sind Überschreitungen von BM-1 für Kupfer, Nickel und Zink schon beim Median zu verzeichnen. Für Kupfer liegt beim 80 %-Percentil auch eine Überschreitung für BM-2 vor. Eine deutliche Entlastung gegenüber den ZOW des Eckpunktepapiers wird durch den Verzicht auf die Begrenzungen bei Sulfat und Cyaniden und bei PAK durch die Übergangslösung bzw. die Umstellung auf Eluatwerte bewirkt. Überschreitungen von BM-3 sind hierdurch auch bei den belasteten Böden aus Hamburg nicht mehr zu verzeichnen (siehe Tabelle 6.45).

³⁹ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Tabelle 6.45 Datensatz HH zu Bodenmaterialien im Abgleich mit den ZOW BM-1 bis BM-3 des VO-Entwurfes⁴⁰

| 62 - BM - HH | BM-1 | BM-2 | BM-3 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------|------|------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 200 | 200 | 1000 | µS/cm | 288,2 | 3,2 | 3800 | 168 | 366,6 | 561,5 | 288 |
| Blei | 175 | 250 | 300 | µg/l | 9,9 | 1 | 93 | 5 | 10 | 24,3 | 288 |
| Chrom (gesamt) | 30 | 65 | 100 | µg/l | 5,9 | 0 | 310 | 2 | 9 | 10 | 288 |
| Kupfer | 25 | 45 | 100 | µg/l | 17,6 | 0 | 302 | 11 | 21,6 | 30 | 288 |
| Nickel | 7 | 40 | 100 | µg/l | 10,4 | 0 | 330 | 10 | 10 | 12 | 288 |
| Zink | 30 | 130 | 300 | µg/l | 140,9 | 0 | 6500 | 50 | 136 | 270 | 288 |

Hierdurch ist z.T. auch für Böden, die nach der LAGA M 20 nicht verwertbar waren jetzt eine Verwertung nach BM-3 möglich.

Der Abgleich mit BM-0 erbringt bei den belasteten Böden aus dem BGR-Projekt durchweg Überschreitungen. Nur der Wert für Blei im Median liegt knapp unter BM-0. Die Nachweisgrenzen bei dem Datensatz der Bahn lagen so hoch, dass ein Abgleich mit BM-0 nicht möglich ist. Deshalb wird hier ausschließlich der Datensatz aus Baden-Württemberg den BM-0 Werten gegenübergestellt.

Der Abgleich zeigt, dass bis auf TOC, selbst für das 90 %-Percentil alle Parameter unterhalb von BM-0 liegen, wenn auch bei der elektrischen Leitfähigkeit sowie Kupfer und Zink der ZOW fast erreicht wurde.

Tabelle 6.46 Datensatz BW zu Bodenmaterialien im Abgleich mit den ZOW BM-0 des VO-Entwurfes⁴¹

| 48 - BM - BW | BM-0 | Einheit | Mittelwert | Minimum | Maximum | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Messwerte |
|---------------------------|------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|----------|-----------|
| elektrische Leitfähigkeit | 200 | µS/cm | 120,7 | 8 | 285 | 114 | 159 | 191,6 | 59 |
| Blei | 9 | µg/l | 0,2 | 0,2 | 0,7 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 59 |
| Chrom (gesamt) | 2,5 | µg/l | 1,1 | 0,2 | 4,6 | 0,9 | 1,5 | 1,6 | 59 |
| Kupfer | 5 | µg/l | 2,7 | 0,2 | 11,8 | 2,1 | 4,1 | 4,9 | 59 |
| Nickel | 7 | µg/l | 1 | 0,5 | 5,4 | 0,7 | 1,4 | 2 | 59 |
| Zink | 30 | µg/l | 18,2 | 4 | 135 | 15 | 23 | 28,2 | 59 |
| TOC | 2 | Masse-% | 1,6 | 0,05 | 18,4 | 1,0 | 2,2 | 3,5 | 59 |

Der Abgleich mit der LAGA M 20 zeigt im Wesentlichen ähnliche Einstufungen wie gegenüber dem Eckpunktepapier. Bei Sulfat und Cyaniden machen sich die Verschärfungen im Eckpunktepapier am deutlichsten bemerkbar.

⁴⁰ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

⁴¹ Dieser Abgleich steht unter dem Vorbehalt der Anmerkungen in Kapitel 6.0 (letzter Absatz)

Tabelle 6.47 Median, 80%-Perzentil, 90%-Perzentil und Werte“anzahl“ für vier Datensätze zu Bodenmaterialien (DB, LfU-BW, HH, BGR) im Vergleich zu den ZOW der LAGA M 20

| | | 46-BM-DB | | | | 48-BM-BW | | | | 62-BM-HH | | | | 47-BM-BGR | | | |
|---------------------------|-------|----------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|-------|-----------|----------|----------|-------|
| | | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Werte | Median | 80-Perc. | 90-Perc. | Werte |
| elektrische Leitfähigkeit | mg/l | 81 | 127 | 174,4 | 1207 | 114 | 159 | 191,6 | 59 | 168 | 366,6 | 561,5 | 288 | | | | |
| Chlorid | mg/l | 1,2 | 2,6 | 5,3 | 108 | 0,5 | 1 | 2,6 | 59 | 4,5 | 8 | 13,9 | 288 | | | | |
| Sulfat | µg/l | 7,3 | 20,2 | 39 | 122 | 5,4 | 13,9 | 34,9 | 59 | 42,5 | 120,6 | 215,9 | 288 | | | | |
| Cyanide (gesamt) | µg/l | 1,2 | 2,6 | 5,3 | 108 | | | | | 10 | 25 | 25 | 288 | | | | |
| Phenolindex | µg/l | | | | | | | | | 10 | 100 | 100 | 288 | | | | |
| Arsen | µg/l | 10 | 10 | 10 | 1165 | 0,8 | 2,2 | 3,4 | 59 | 5 | 7,1 | 11 | 287 | 6,4 | 12 | 19 | 84 |
| Blei | µg/l | 20 | 20 | 20 | 1165 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 59 | 5 | 10 | 24,3 | 288 | 8,8 | 25,6 | 42,9 | 152 |
| Cadmium | µg/l | 2 | 2 | 2 | 1166 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 59 | 1 | 1 | 3 | 288 | 0,2 | 0,6 | 0,9 | 152 |
| Chrom (gesamt) | µg/l | 10 | 10 | 10 | 1187 | 0,9 | 1,5 | 1,6 | 59 | 2 | 9 | 10 | 288 | 3,4 | 8,8 | 13,3 | 152 |
| Kupfer | µg/l | 10 | 10 | 20 | 1165 | 2,1 | 4,1 | 4,9 | 59 | 11 | 21,6 | 30 | 288 | 25,7 | 53,1 | 64,8 | 152 |
| Nickel | µg/l | 20 | 20 | 20 | 1165 | 0,7 | 1,4 | 2 | 59 | 10 | 10 | 12 | 288 | 20,9 | 20,9 | 28,5 | 152 |
| Quecksilber | µg/l | 0 | 0 | 0 | 1173 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 59 | 0,2 | 1 | 1 | 288 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 152 |
| Thallium | mg/kg | 1 | 1 | 1 | 106 | | | | | 2,3 | 5 | 7 | 288 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 152 |
| Zink | mg/kg | 5 | 5 | 9 | 1134 | 15 | 23 | 28,2 | 59 | 50 | 136 | 270 | 288 | 30,6 | 75,2 | 111,7 | 152 |
| Cyanide (gesamt) | mg/kg | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 107 | | | | | 0,3 | 0,8 | 1 | 288 | | | | |
| Arsen | mg/kg | 6,7 | 13,6 | 18,6 | 1277 | 11 | 18 | 29,5 | 59 | 7,4 | 20 | 29,4 | 288 | 7,6 | 13,8 | 18,7 | 152 |
| Blei | mg/kg | 17,3 | 59,7 | 111,3 | 1280 | 20,6 | 34 | 42,7 | 59 | 73,5 | 272,6 | 640,2 | 288 | 57,6 | 131,5 | 207,3 | 152 |
| Cadmium | mg/kg | 0,8 | 1,6 | 2,5 | 1282 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 59 | 0,5 | 1,2 | 2,1 | 288 | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 152 |
| Chrom (gesamt) | mg/kg | 16,9 | 31,4 | 42,2 | 1309 | 38,9 | 51,1 | 59,9 | 59 | 14 | 27 | 36 | 287 | 38,9 | 84,4 | 186,5 | 152 |
| Kupfer | mg/kg | 19,4 | 61 | 107 | 1275 | 20,1 | 29,1 | 36,5 | 59 | 41 | 148 | 308,6 | 288 | 31,4 | 53,6 | 70,2 | 152 |
| Nickel | mg/kg | 16,4 | 33,5 | 47,9 | 1265 | 35,3 | 48 | 61 | 59 | 11,6 | 23 | 35,8 | 288 | 34,3 | 63,3 | 132,9 | 152 |
| Quecksilber | mg/kg | 0,2 | 0,4 | 1 | 1283 | 0,03 | 0,09 | 0,18 | 59 | 0,3 | 0,7 | 1,2 | 288 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 152 |
| Thallium | mg/kg | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 106 | 0,3 | 0,4 | 0,42 | 59 | 0,5 | 1 | 1 | 288 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 152 |
| Zink | mg/kg | 54,3 | 139 | 255 | 1272 | 62,1 | 89,8 | 119,6 | 59 | 179 | 448 | 851 | 288 | 139,6 | 255,9 | 392,4 | 152 |
| Kohlenwasserstoffe | mg/kg | | | | | 50 | 50 | 50 | 59 | 50 | 171,6 | 419,8 | 287 | | | | |
| EOX | mg/kg | | | | | | | | | 1 | 2 | 2 | 288 | | | | |
| S BTEX | mg/kg | | | | | | | | | 0,04 | 0,2 | 1 | 288 | | | | |
| S LHKW | mg/kg | | | | | | | | | 0,1 | 1 | 1 | 288 | | | | |
| S PAK 16 nach EPA | mg/kg | 0,8 | 4,9 | 11,6 | 1481 | 0,16 | 0,63 | 1,1 | 59 | 4,6 | 19 | 51,6 | 288 | | | | |
| S PCB 6 | | 0 | 0 | 2,7 | 112 | 0,002 | 0,01 | 0,015 | 59 | 0,03 | 0,2 | 0,3 | 288 | | | | |

7 Analysenprogramm

Obwohl in dieser Studie aussagefähige Analysensätze zusammengetragen werden konnten, zeigte sich, dass wie bei der Konzeption des Vorhabens schon geplant, die Durchführung eines eigenen Analysenprogramms erforderlich wurde. Schwerpunkt des Programms war es, für verschiedene Proben aus Recyclingmaterial, Böden, MV-Aschen und Hüttesand Ergebnisse aus Feststoffanalysen sowie Analysen nach Elution und Säulentest vergleichend gegenüber zu stellen.

Zur Beurteilung der schadlosen Verwertung von Abfällen und dem schadlosen Einbau von Produkten und Materialien haben sich im BMBF-Vorhaben „Sickerwasserprognose“ Säulenversuche als besonders geeignet herausgestellt, da sie gut reproduzierbar sind, sich für mineralische Materialien und die relevanten Schadstoffgruppen eignen und die Schadstofffreisetzung über die Zeit ermittelt werden kann.

Insoweit sind diese Untersuchungen von besonderer Relevanz für die grundlegende Bewertung mineralischer Abfälle und die Überprüfung der bodenschutz- und grundwasserschutzbezogenen Auswirkungen der materialspezifischen Belastungen, wie sie im Rahmen der inhaltlichen Ausgestaltung der Bundes-Verwertungsverordnung vorgenommen werden müssen. Die im BMBF-Vorhaben sowie ansonsten vorliegenden Säulenversuchsergebnisse mussten mit diesem Analysenprogramm ergänzt werden, um die Bandbreite der vorkommenden Qualitäten einschätzen und eine ausreichend abgesicherte Bewertung durchführen zu können.

Deshalb wurden Materialien analysiert, die eine große Heterogenität in Deutschland aufweisen können. Dies betrifft insbesondere Recycling-Baustoff und Bodenmaterial sowie untergeordnet auch Hausmüllverbrennungsasche. Das jeweilige Erkenntnisdefizit war für die gewählte Anzahl der zu untersuchenden Proben wider. Neben den Säulenversuchen wurden parallel Schüttelversuche nach DIN EN 12457-4 und 12457-1 sowie Feststoffbestimmungen durchgeführt werden. Diese waren zur Charakterisierung der Materialien erforderlich und helfen die Erkenntnisse zur Übertragung der Laborversuche zu untermauern.

Zur Durchführung des Analysenprogramms wurden Unteraufträge an

- KM GmbH für Straßenbau- und Umwelttechnik (Probennahme, -aufbereitung, Feststoffanalysen, Schütteltests, Analyse der Schwermetalle)
- Universität Tübingen, Zentrum für angewandte Geowissenschaften (Säulentest für RC-Baustoffe, MVA-Aschen und Hüttesand, PAK-Analysen)

Außerdem wurden bei der Uni Tübingen Säulentests für Bodenproben durchgeführt, die überwiegend durch die Deutsche Bahn und das LANUV NRW zur Verfügung gestellt wurden. In den folgenden beiden Unterkapitel () werden Kurzfassungen der

Berichte von der KM GmbH für Straßenbau- und Umwelttechnik und der Uni Tübingen dargestellt. Die ausführlichen Berichte werden diesem Bericht beigelegt.

7.1 Untersuchungen an RC-Baustoffen, Hausmüllverbrennungsaschen und Hüttensanden

Das Analysenprogramm sollte für insgesamt 68 Proben durchgeführt werden, dabei handelte es sich um 50 Recycling-Baustoffe, 16 Hausmüllverbrennungsaschen und 2 Hüttensande. Das Analyseprogramm sah u.a., die Proben nach Sieblinie zusammenzusetzen. Hierfür wurde im Vorfeld die Sieblinie mittels Nasssiebung gemäß DIN EN 933-1 ermittelt. Von jeder Probe waren vier Einzelproben für die Säulenversuche der UNI Tübingen und je zwei Einzelproben für die Untersuchungen der KM GmbH einzuwiegen. In Abbildung 7.1 sind die Mengen und Anzahlen der Einzelproben dargestellt.

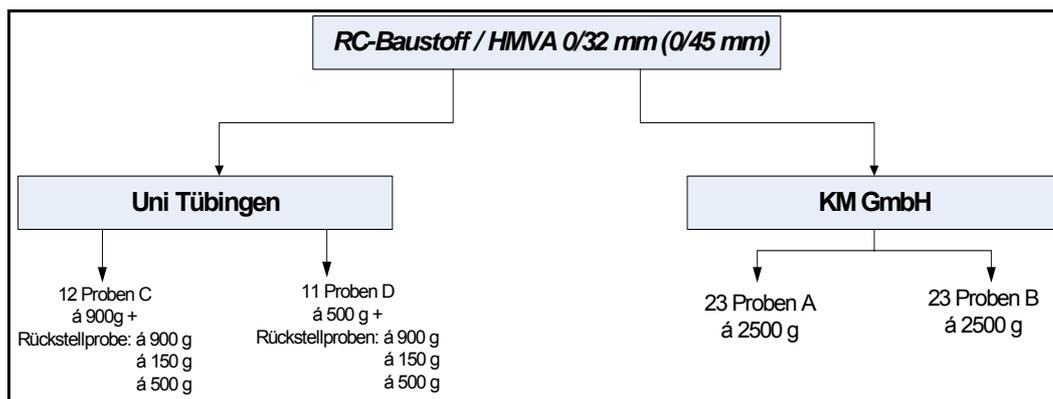


Abbildung 7.1: Zusammenstellung der Einzelproben

Um möglichst einen bundesweiten Querschnitt an Baustoffen zu erhalten, wurden die Proben aus Orten verschiedener Bundesländer entnommen. In der nachfolgenden Tabelle 3.1 sind die Bundesländer der Probennahme-Orte mit Angabe der Probenanzahl und des jeweiligen Baustoffes zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Zusammenstellung der Proben mit Angabe der Anzahl und Bundesländer

| Gesamtanzahl | Anzahl | Bundesland | Material |
|--------------|--------|-----------------------------|--|
| 50 | 37 | Nordrhein-Westfalen | Recycling-Baustoff |
| | 1 | Rheinland-Pfalz | |
| | 7 | Sachsen | |
| | 2 | Hamburg | |
| | 2 | Hessen | |
| | 1 | Thüringen | |
| 16 | 10 | Nordrhein-Westfalen | Hausmüll-ver- brennungsgasche |
| | 2 | Saarland | |
| | 1 | Bayern | |
| | 1 | Baden-Württemberg | |
| | 1 | Hamburg | |
| | 1 | Rheinland-Pfalz | |
| 2 | 2 | FEhS Duisburg ¹⁾ | Hüttensand |

1) Genaue Herkunft nicht bekannt. Die Proben wurden zugesandt und enthielten keine Angaben darüber, wo die Proben entnommen wurden.

7.1.1 Probenbeschaffung und Siebung

Die Probenahme erfolgte gemäß DIN EN 932-1. Die Probemenge betrug rund 80 kg. Die Proben wurden in luftdicht verschlossenen PP-Behältern bei Raumtemperatur gelagert.

Grundsätzlich war die zur Auslieferung kommende Körnung zu untersuchen. Bei Lieferkörnungen mit einem Größtkorn > 32 mm wurde der Anteil > 32 mm abgetrennt, schonend gebrochen und daraus die Körnung 16/32 mm dem Gemisch 0/32 mm in dem Mengenanteil zugefügt, in dem der Anteil > 32 mm in der Lieferkörnung vorlag.

Für jede Probe wurde die baustofftypische Sieblinie ermittelt.

7.1.2 Einzelproben

Nach Fertigstellung der Sieblinie (mittels Nasssiebung), wurden die Einzelproben nach den ermittelten Anteilen an Korn 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm (Anteil > 32 mm wurde zur Kornfraktion 16/32 mm zugefügt, wie dieser in der Lieferkörnung vorlag) wieder zusammengesetzt (siehe Abbildung 7.2) und einzeln nach dem Schema in Abbildung 7.1 abgepackt und zur TU Tübingen versandt.

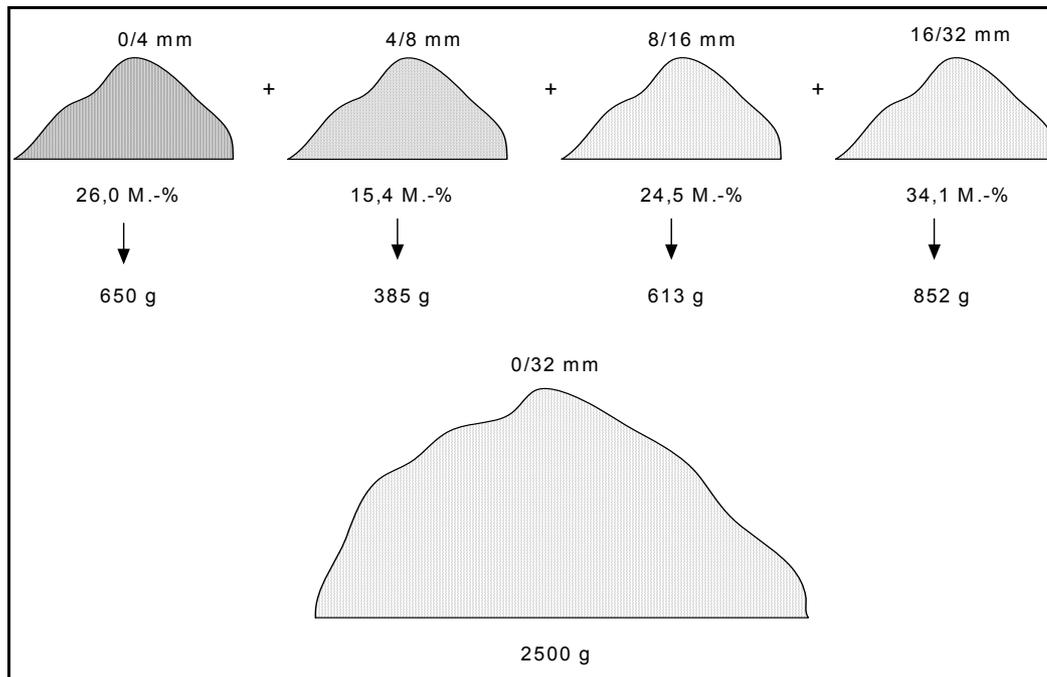


Abbildung 7.2: Probenzusammensetzung

7.1.3 Feststoffanalyse

An den 68 Proben erfolgte die Bestimmung der Parameter analog DIN 38414 S7 (Aufschluss im Königswasser) und DIN 38406 E22. Dabei wurden folgende Parameter bestimmt: Blei, Antimon, Cadmium, Kobalt, Chrom, Kupfer, Nickel, Molybdän, Vanadium, Zink und Arsen.

7.1.4 Eluatherstellung (Schütteleluate)

Die eingewogene Probe wurde bei dem W/F-Verhältnis 2:1 mit der 2-fachen Menge und beim W/F-Verhältnis 10:1 mit der 10-fachen Menge an entmineralisiertem Wasser (bezogen auf das Trockengewicht der Probe) 24 Stunden lang auf einem Schwingtisch bewegt. Nach Beenden der Elution wurde die feste und flüssige Phase getrennt. Nach einer 10-minütigen Absetzzeit (Absetzen der Grobanteile) wurde das trübe Eluat dekantiert und durch einen Membranfilter, Porenweite 0,45 µm, gefiltert. Das Filtrat wurde umgehend analysiert.

7.1.5 Eluatanalyse

Ausgewählte Parameter

An 136 Eluatproben wurden die Parameter quantitative Trübe, pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Sulfat, Chlorid und DOC bestimmt.

Schwermetalle

Die Untersuchungen auf Schwermetalle (ICP/OES-ASS) wurde an insgesamt 476 Eluaten durchgeführt. 340 Eluate stammten aus den Säulenversuchen der TU Tübingen und je 68 Eluate mit einem W/F-Verhältnis von 2:1 bzw. 10:1 von der KM GmbH. Es wurden folgende Schwermetalle untersucht: Blei, Antimon, Cadmium, Kobalt, Chrom, Kupfer, Nickel, Molybdän, Vanadium, Zink und Arsen.

7.1.6 Untersuchungsergebnisse

Sowohl bei den RC-Baustoffen als auch bei den Hausmüllverbrennungsaschen handelte es sich um güteüberwachtes Material. Aus der Sieblinie der 50 verschiedenen RC-Baustoffe wurde ein arithmetisches Mittel (mittlere Sieblinie) errechnet. Die mittlere Sieblinie und die Bandbreite aller RC-Baustoffe sind in Abbildung 7.3 grafisch dargestellt. Zusätzlich wurde – dient ausschließlich nur zur Orientierung - der typische Sieblinienbereich für Schottertragschichten des Straßenbaues dargestellt. Bei den RC-Baustoff-Proben waren auch RC-Baustoffe dabei, die für den Einsatz als Frostschuttschicht eingestuft waren.

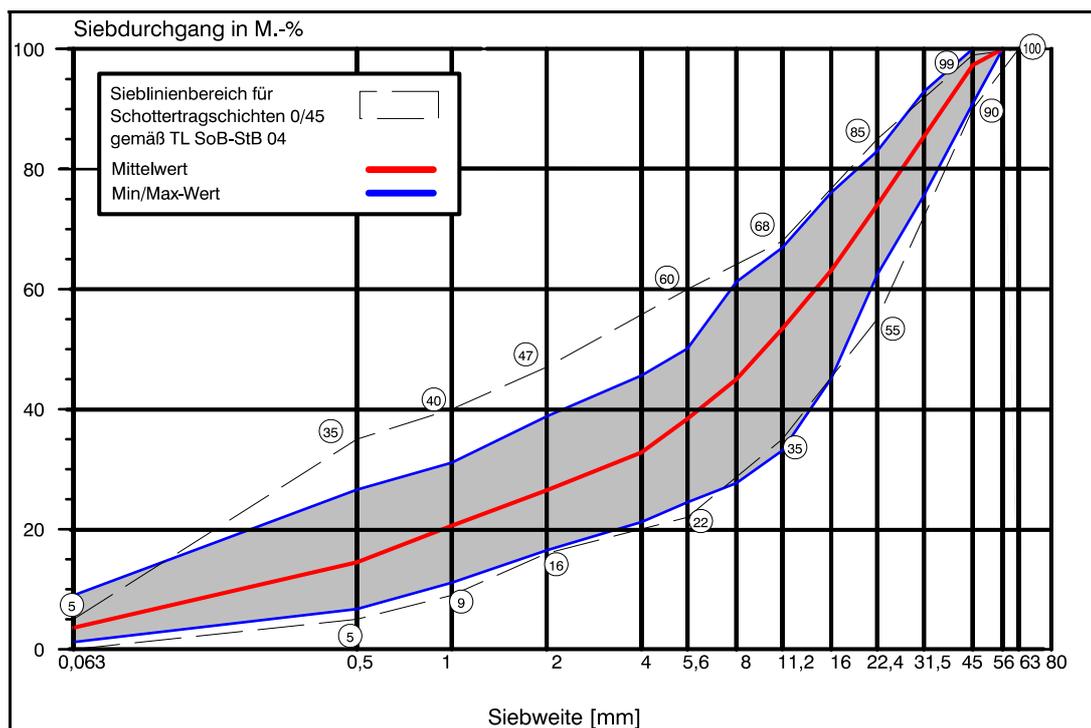


Abbildung 7.3: Mittlere Sieblinie mit Bandbreite aller Sieblinien (RC-Baustoffe)

Für die Hausmüllverbrennungsasche ist die mittlere Sieblinie auch mit der Bandbreite aller HMVA-Proben grafisch in Abbildung 7.4 dargestellt. Da das

Haupteinsatzgebiet für Hausmüllverbrennungsaschen in Frostschutz- und Schottertragschichten liegt, wurde diese mit angegeben.

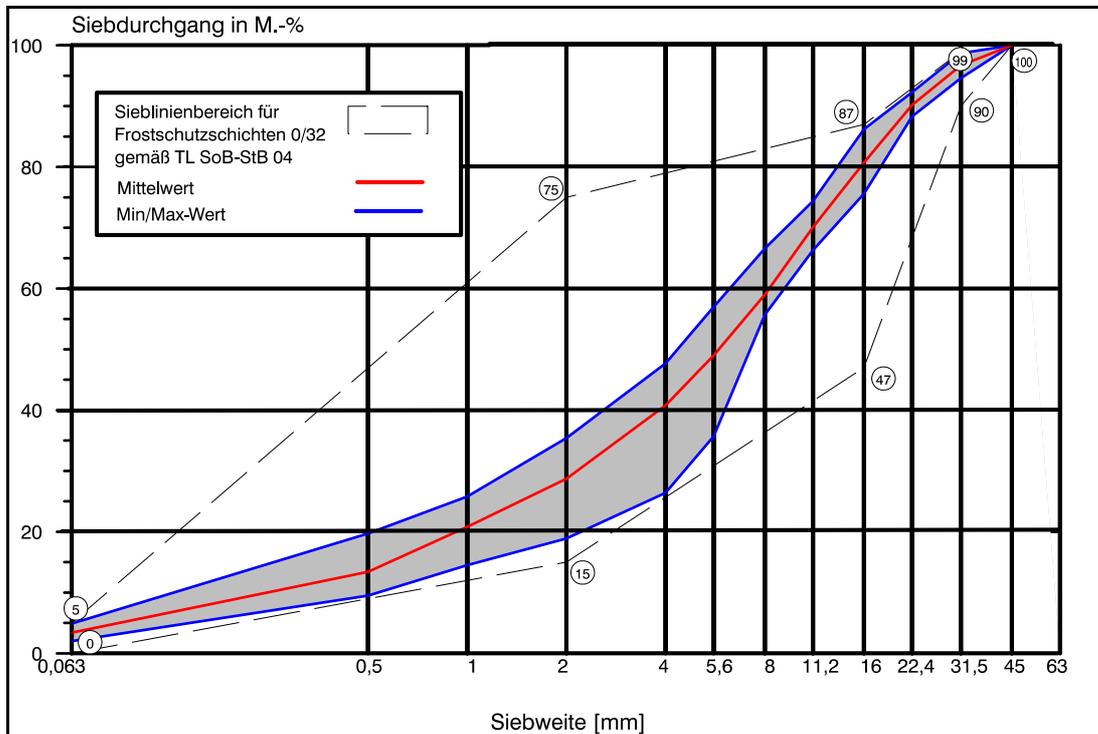


Abbildung 7.4: Mittlere Sieblinie mit Bandbreite aller Sieblinien (HMVA)

Die tabellarische Darstellung der Analysenergebnisse ist dem beiliegenden ausführlichen Bericht in Anhang 7 zu entnehmen.

7.2 Elutionsversuche zur Bestimmung des Schadstoffaustrags aus Böden und verschiedenen Recyclingmaterialien (Säuleneluate)

Zur Untersuchung des Schadstoffaustrags aus verschiedenen Recyclingmaterialien wurden im Rahmen dieses Projektes insgesamt 68 Säulenversuche im hydrogeochemischen Labor des Zentrums für Angewandte Geowissenschaften durchgeführt. 50 verschiedene Bauschutte (RC), 16 Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) und 2 Hüttensande (HS) wurden untersucht.

Die Säuleneluate sämtlicher Materialien wurden auf Chlorid, Sulfat und Schwermetalle, Gehalt an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC), Trübe, pH-

Wert sowie elektrische Leitfähigkeit untersucht. Von den Bauschuttproben und deren Eluaten wurde zudem der Gehalt an polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bestimmt, an allen Ausgangsmaterialien mit Ausnahme der Hüttensande der Anteil an organischem Kohlenstoff (C_{org}).

Alle Eluate wurden von Dr. Klaus Mesters, KM GmbH für Straßenbau- und Umwelttechnik auf Schwermetalle untersucht.

Des Weiteren wurden Böden und Eluate aus Säulenversuchen, durchgeführt von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), auf PAK untersucht.

7.2.1 Versuchsaufbau

Für den Laborversuch wurden Glassäulen mit einem Innendurchmesser von 6 cm und einer Länge von 15 bzw. 24 cm eingesetzt. Die erste Schicht bildete eine 1 cm dicke Lage aus Quarzsand mit einer Korngröße von 0,6 - 1,2 mm. Diese sollte ein gleichmäßiges Anströmen der Probe gewährleisten. Darüber wurde das zu untersuchende Probenmaterial lagenweise eingefüllt und verdichtet bis zu einer Höhe von 10 bzw. 20 cm. Über das Probenmaterial wurde eine zweite Filterschicht aus Quarzsand eingebaut, um einen Austrag des Probenmaterials zu verhindern. In Anhang 8 sind die Daten der mit den verschiedenen Untersuchungsmaterialien befüllten Säulen aufgeführt.

Nach dem Einbau des Untersuchungsmaterials wurden die Säulen innerhalb von 90 min mit deionisiertem Wasser aufgesättigt.

7.2.2 Versuchsdurchführung

Durch eine Peristaltikpumpe wurden die Säulen mit konstanter Fließgeschwindigkeit mit deionisiertem Wasser von unten nach oben durchströmt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt. Die Umgebungstemperatur betrug konstant 20°C.

Die gesammelten Eluate sollten nach den Wasser/Feststoffverhältnissen 0,25, 0,5, 1, 2 und 3 (PN1 - PN5 = Probenahmen) analysiert werden. Die genauen Wasser/Feststoffverhältnisse der Probenahmen der einzelnen Säulen, ergaben sich durch variierende Feststoffeinwaagen sowie durch variierende pumpenabhängigen Flussraten (vergleiche beiliegenden Bericht in Anhang 8).

Die gewonnenen Eluate wurden für die verschiedenen Parameterbestimmungen aufgeteilt.

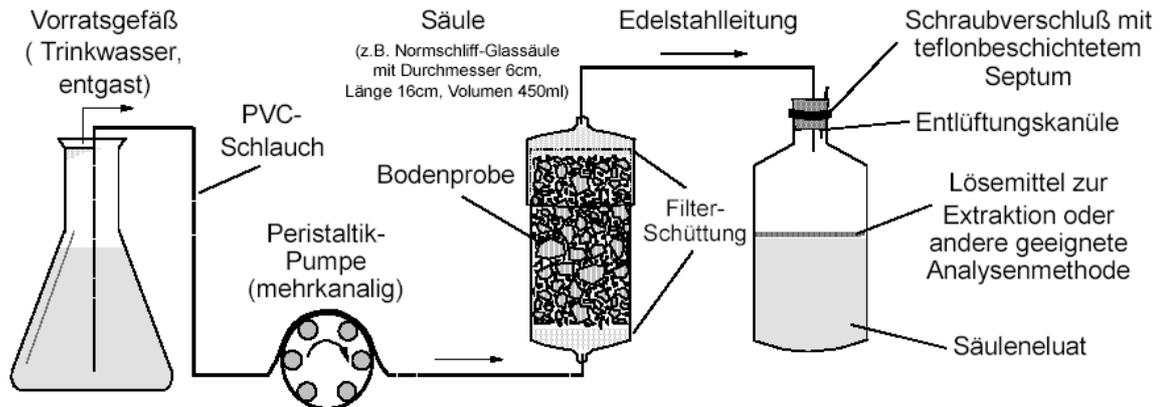


Abbildung 7.5: Schematischer Versuchsaufbau im Labor

7.2.3 Ergebniszusammenfassung

Die untersuchten Materialien weisen eine große Heterogenität sowohl bezüglich der Gehalte der Parameter wie z.B. Ionen und PAK auf als auch ihres Elutionsverhaltens. Die Ergebnisse der durchgeführten Säulenversuche legen nahe, dass die Elution von Stoffen aus den Materialien sehr stark von deren Beschaffenheit abhängt.

Die Sulfatkonzentrationen in den Eluaten der Bauschutte unterscheiden sich z.T. um mehr als das hundertfache, ihre prozentuale Abnahme über den Versuchszeitraum ist sehr unterschiedlich. Die Konzentrationen der aus dem Bauschutt eluierten Chloride waren oftmals um den Faktor 10 – 20mal kleiner als die der Sulfate. Säuleneluate aus den Hausmüllverbrennungsaschen zeigten sehr hohe Chlorid- und Sulfatkonzentrationen. Waren die Chloride zu Versuchsende fast völlig eluiert, fiel die Abreicherung der Sulfate deutlich geringer aus. Bei den beiden untersuchten Hüttensanden wurde in den Eluaten nur sehr geringe Chlorid- bzw. Sulfatgehalte analysiert. Die Werte lagen im Konzentrationsbereich eines Trinkwassers.

Die Ergebnisse der durchgeführten Säulenversuche zeigen ferner, dass die Analyse der verschiedenen Recyclingmaterialien allein nicht ausreicht, um die Auswaschung von PAK aus diesen Materialien abzuschätzen. Der PAK-Gehalt in den Feststoffen lässt sich nicht mit der PAK-Konzentration in den Eluaten korrelieren. Vergleichbare Resultate zeigen auch die von der BGR mit Bodenmaterial durchgeführten Säulenversuche. Auch hier kann aus dem PAK-Gehalt in Feststoffen nicht auf die PAK-Konzentration in den Eluaten geschlossen werden. Unserer Meinung nach muss die Durchführung von Säulenversuchen deshalb ein essentieller Bestandteil einer Beurteilung von Recyclingmaterial sein.

8 Stoffstromanalyse Chloride und Sulfate

Um die Bedeutung von Zusammenhängen des Eintrages von Salzen auch in Relation zu anderen Emittenten und Einträge von Chloriden und Sulfaten in Boden und Grundwasser bewerten zu können, wurde eine Zusammenstellung der verfügbaren Daten zu den weiteren Eintragsquellen angeregt.

Hierzu wird in diesem Kapitel in einer zusätzlichen Recherche von Literaturdaten, statistischen Daten und deren Zusammenstellung zu einer Stoffstromanalyse aller wichtigen Quellen und Emittenten für Belastungen des Bodens und Grundwassers durch Chloride und Sulfate durchgeführt.

Als wichtigste Quellen werden dabei neben der Verwertung von mineralischen Abfällen Daten insbesondere zu folgenden Quellen recherchiert:

- Einträge aus der Atmosphäre (trockene und nasse Depositionen),
- Einträge durch die Landwirtschaft (mineralische und organische Düngemittel),
- Einsatz von Auftausalzen,
- Einsatz von Primärrohstoffen im Baubereich (Sand, Kies und Steine),
- Aufhaldung von Abraum aus dem Salztagebau (Bedeutung als Punktquelle im Wesentlichen nur regional).

Die jährlichen Einträge werden, soweit die Datenlage dies zulässt, grob bilanziert. Durch Sensitivitätsanalysen werden die Spannweite der Einträge (unterer Bereich – Mittel – oberer Bereich) und die unterschiedliche Qualität der verfügbaren Daten aufgezeigt. Soweit aus der Recherche der Daten sich von selbst eine Spannweite für die Einträge ergibt, bilden diese den oberen und unteren Bereich. Der mittlere Bereich wird dann daraus durch Mittelung bestimmt. Soweit die recherchierten Daten keine Spannweite aufzeigen, werden diese als Mittel definiert und durch Auf- und Abschläge in Abhängigkeit von der Qualität der Daten die Spannweite ermittelt.

Der zeitliche Verlauf und die regionale Verteilung der Versickerung von Chloriden und Sulfaten aus den unterschiedlichen Quellen kann dabei nur qualitativ diskutiert werden. Beim zeitlichen Verlauf ist, aufgrund der leichten Löslichkeit der Salze, im Wesentlichen nur zwischen dem offenen Eintrag/Einbau (Düngung, Verfüllung ohne Abdichtung, Depositionen) und Quellen bei denen die Sickerwasserentstehung reduziert ist (z.B. Deponien oder unter gebundenen Decken), zu unterscheiden. Bezüglich der regionalen Verteilung sind flächige Depositionen und kleine bzw. große Punktquellen zu unterscheiden.

Hauptziel der Stoffstromanalyse bleibt die Darstellung der Gesamteinträge, mit dem Schwerpunkt der flächenhaften Einträge. Punktquellen wie Deponien und Salzabraumhalden werden für den Vergleich nicht herangezogen, da sie sich nur in unmittelbarer Nähe der Standorte auswirken.

8.1 Inputmengen mineralischer Abfälle und Materialien

8.1.1 Materialmengen

Zur Ermittlung der Sulfat- und Chloridfrachten werden zunächst die Mengen, die in Kapitel 3 ausführlich dargestellt sind, zusammengestellt (Tabelle 8.1). Den Daten für die Gesamtgehalte wurden, soweit möglich die Angaben aus der Fragebogenaktion zugrunde gelegt. Genaue Angaben zu der Unterscheidung, ob die Materialien offen oder mit Sicherung eingebaut wurden, liegen nicht vor. Teilweise lassen sich die genannten Verwertungswege eindeutig zuordnen, wie z.B. Deponierung und Deponiebau, Einsatz in Beton zum Einbau mit Sicherung oder Verfüllungen im Tagebau, Einsatz als Dünge- oder Strahlmittel als offene Anwendung. Andere Anwendungen, wie pauschale Angaben Recycling oder Verwendung als Baustoff lassen sich nicht eindeutig zuordnen, sondern vielmehr nur abschätzen. Entsprechende Zuordnungen sind nach den in Kapitel 3 beschriebenen Vorgaben durchgeführt worden (vergleiche auch Tabelle 3.1).

Eine weitergehende Abschätzung ist nicht möglich, da weder davon auszugehen ist, dass alle Anwendungen im offenen Einbau zu einer vollständigen Freisetzung führen, noch dass bei einem Einbau mit Sicherung auf lange Zeiträume gesehen große Anteile zurückgehalten werden. Aufgrund der völlig unterschiedlichen Rahmenbedingungen kann und soll die Stoffstromanalyse die Potenziale an Sulfat und Chlorid aufzeigen, die zu einem Eintrag in den Boden und/oder das Grundwasser führen können. Die Unterteilung in offenen Einbau und Einbau mit Sicherung soll die Möglichkeit geben, die Potenziale qualitativ unterschiedlich zu bewerten.

Werden Materialien in den Prozess zurückgeführt oder nach unter Tage verbracht, gehen sie nicht als Input in die Stoffstromanalyse ein, weil dann nicht von einem Eintrag in den Boden oder das Grundwasser auszugehen ist.

Tabelle 8.1 Zusammenfassende Darstellung der Mengen der einzelnen mineralischen Abfälle und Materialien und der Unterscheidung in Abhängigkeit der Einbauart

| mineralische Abfälle und Materialien | Gesamt | | Einbau | | Rückführung |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| | Menge | offen | mit Sicherung | u. unter Tage | |
| | Mio. t | Mio. t | Mio. t | Mio. t | |
| HOS | 1,90 | 0,4 | 1,5 | | |
| HS | 5,81 | 0,25 | 5,61 | | |
| EOS | 1,52 | 0,73 | 0,76 | 0,03 | |
| LD Schlacken | 3,39 | 1,265 | 1,485 | 0,64 | |
| sonst. SWS | 2,42 | 1,01 | 1,23 | 0,15 | |
| GRS | 1,514 | 0,506 | 0,835 | 0,142 | |
| GKOS | 0,278 | 0,044 | 0,232 | 0,002 | |
| HMVA | 3,30 | 0,922 | 2,054 | 0,318 | |
| SKG | 2,112 | 1,244 | 0,743 | 0,126 | |
| SKA | 0,582 | 0,174 | 0,361 | 0,029 | |
| SFA | 4,469 | 0,262 | 3,564 | 0,644 | |
| SWA | 0,43 | 0,056 | 0,127 | 0,247 | |
| BKA | 1,846 | 1,791 | 0,045 | 0,001 | |
| BFA | 8,742 | 8,496 | 0,126 | 0,121 | |
| BWA | 0,23 | 0,1805 | 0,0095 | 0,04 | |
| Boden | 140,9 | 96,65 | 44,35 | | |
| Bauschutt | 52,1 | 22,285 | 29,855 | | |
| Baustellenabfälle | 4,3 | 1,0 | 3,3 | | |
| Straßenaufbruch | 16,6 | 3,904 | 12,680 | | |
| Ausbauasphalt | 14,0 | 1,25 | 1,25 | 11,5 | |
| Summe | 266,44 | 142,42 | 110,11 | 13,99 | |

Zur weiteren Berechnung der Sulfat und Chloridfrachten werden die Daten für Bauschutt, Baustellenabfälle, Straßenaufbruch und Ausbauasphalt zu der Gruppe RC-Baustoffe zusammengefasst.

Da weder für Sulfat noch für Chlorid Daten zum Gehalt in der Originalsubstanz vorliegen, werden die Werte im Eluat hochgerechnet. Es wird dabei vereinfachend davon ausgegangen, dass in den vorliegenden Eluaten nach DEV S 4 beide Salze vollständig eluiert wurden. Zumindest für Chloride kommt diese Abschätzung dem tatsächlichen Verhalten sehr nahe, aber auch bei den Sulfaten kann der damit verbundene Fehler für die geplante Bilanzierung als sehr gering in Kauf genommen werden.

Da Eluate nach DEV S 4 mit einem Wasser/Feststoffverhältnis von 10:1 ausgelaugt wurden, müssen die in mg/l erhobenen Eluatwerte mit 10 multipliziert werden, um den Gehalt in der Ausgangssubstanz in mg/kg zu erhalten.

Für die Ermittlung werden die Mediane aus den als repräsentativ einzuschätzenden Datensätzen herangezogen.

8.1.2 Sulfateintrag durch Verwertung mineralischer Abfälle und Materialien

Für die Ermittlung der Sulfatkonzentrationen in mineralischen Abfällen und Materialien für die Stoffstromanalyse werden die aussagefähigen Daten aus der Erhebung zusammengestellt. Die für die weitere Bilanz herangezogenen Daten für den unteren und oberen Bereich der Spannweite und das Mittel werden aus den fett gedruckten Daten in Tabelle 8.2 berechnet. Soweit die Datenbasis ausreichend ist, werden die Daten direkt daraus ermittelt (niedrigster, höchster Wert und arithmetischer Mittelwert). Soweit nur ein Wert vorliegt, wird dieser als Mittelwert eingesetzt und der obere und untere Wert der Spannweite durch Auf- und Abschläge von je 30 % berechnet. Eine Ausnahme stellt das sehr einheitliche Material Hüttensand dar. Hier werden die Auf- und Abschläge mit je 25 % angesetzt.

Liegen nur zwei Werte vor, die keine sichere, angemessene Spannweite ergeben, wird deren arithmetischer Mittelwert als „Mittel“ eingesetzt und zur Ermittlung der Spannweite ebenfalls mit den gleichen Auf- und Abschlägen versehen. Für Flugaschen aus der Verbrennung von Braunkohle (BFA) und Braunkohlewirbelschichtaschen (BWA) wurden mangels aussagefähiger Daten die Werte für Braunkohlekesselaschen (BKA) herangezogen.

Tabelle 8.2 Ermittlung der „durchschnittlichen“ Sulfatkonzentrationen in Mineralischen Abfällen und Materialien als Input in die Stoffstrombilanz

| mineralische Abfälle und Materialien | DS 1 | DS 2 | DS 3 | DS 4 | DS 5 | DS 6 | von | bis | Mittel |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | mg/kg |
| HOS | 135 | 930 | 1305 | 2445 | | | 930 | 1305 | 1.118 |
| HS | 180 | | | | | | 135 | 225 | 180 |
| EOS | 100 | 220 | | | | | 100 | 220 | 160 |
| LD Schlacken | 50 | 200 | | | | | 50 | 200 | 125 |
| sonst. SWS | 183 | 225 | 565 | | | | 183 | 565 | 324 |
| GRS | 320 | | | | | | 224 | 416 | 320 |
| GKOS | 430 | | | | | | 301 | 559 | 430 |
| HMVA | 356 | 1998 | 2200 | 2740 | 2920 | 12000 | 1998 | 2920 | 2.465 |
| SKG | 50 | 50 | 370 | | | | 50 | 370 | 157 |
| SKA | 360 | 450 | | | | | 284 | 527 | 405 |
| SFA | 3450 | 4000 | 4680 | 4705 | 5395 | 8750 | 3450 | 8750 | 5.398 |
| SWA | 14690 | 15150 | | | | | 10444 | 19396 | 14.920 |
| BKA | 8900 | | | | | | 6230 | 11570 | 8.900 |
| BFA | BKA | | | | | | 6230 | 11570 | 8.900 |
| BWA | BKA | | | | | | 6230 | 11570 | 8.900 |
| Boden | 54 | 73 | 360 | 425 | 498 | | 73 | 498 | 339 |
| RC-Baustoff | 280 | 527 | 600 | 664 | 815 | 880 | 280 | 880 | 628 |

DS 1 bis DS 6: verschiedene Datensätze, berücksichtigt wurden nur die fett gedruckten Datensätze

Durch Multiplikation der Konzentrationen in Tabelle 8.2 mit den Mengen der mineralischen Abfälle und Materialien in Tabelle 8.1 erhält man die Sulfatfrachten (Tabelle 7.3), die durch Verwertung dieser Materialien in Böden und Grundwasser gelangen können (Potenziale).

Tabelle 8.3 „Durchschnittliche“ Sulfatfrachten mineralischer Abfälle und Materialien

| mineralische Abfälle und Materialien | Gesamt | | | offener Einbau | | | Einbau mit Sicherung | | |
|---|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|----------------------|---------|--------|
| | von | bis | Mittel | von | bis | Mittel | von | bis | Mittel |
| | t | t | t | t | t | t | t | t | t |
| HOS | 1.767 | 2.480 | 2.123 | 372 | 522 | 447 | 1.395 | 1.958 | 1.676 |
| HS | 784 | 1.307 | 1.046 | 34 | 56 | 45 | 757 | 1.262 | 1.010 |
| EOS | 152 | 334 | 243 | 73 | 161 | 117 | 76 | 167 | 122 |
| LD Schlacken | 170 | 678 | 424 | 63 | 253 | 158 | 74 | 297 | 186 |
| sonst. SWS | 443 | 1.367 | 785 | 185 | 571 | 328 | 225 | 695 | 399 |
| GRS | 339 | 630 | 484 | 113 | 210 | 162 | 187 | 347 | 267 |
| GKOS | 84 | 155 | 120 | 13 | 25 | 19 | 70 | 130 | 100 |
| HMVA | 6.593 | 9.636 | 8.133 | 1.842 | 2.692 | 2.272 | 4.104 | 5.998 | 5.062 |
| SKG | 106 | 781 | 331 | 62 | 460 | 195 | 37 | 275 | 116 |
| SKA | 165 | 307 | 236 | 49 | 91 | 70 | 102 | 190 | 146 |
| SFA | 15.418 | 39.104 | 24.121 | 902 | 2.288 | 1.411 | 12.294 | 31.181 | 19.234 |
| SWA | 4.491 | 8.340 | 6.416 | 585 | 1.086 | 836 | 1.326 | 2.463 | 1.895 |
| BA | 11.501 | 21.358 | 16.429 | 11.158 | 20.722 | 15.940 | 280 | 521 | 401 |
| BFA | 54.463 | 101.145 | 77.804 | 52.927 | 98.293 | 75.610 | 782 | 1.452 | 1.117 |
| BWA | 1.433 | 2.661 | 2.047 | 1.125 | 2.088 | 1.606 | 59 | 110 | 85 |
| Boden | 10.286 | 70.168 | 47.765 | 7.055 | 48.132 | 32.764 | 3.238 | 22.086 | 15.035 |
| RC-Baustoff | 24.360 | 76.560 | 54.607 | 7.963 | 25.026 | 17.850 | 13.184 | 41.435 | 29.554 |
| Summe | 132.554 | 337.012 | 243.114 | 84.522 | 202.677 | 149.831 | 38.191 | 110.566 | 76.403 |

8.1.3 Chlorideintrag durch Verwertung mineralischer Abfälle und Materialien

Die Chloridfrachten wurden analog zum Vorgehen für die Ermittlung der Sulfatfrachten berechnet (vgl. Beschreibung zu Tabelle 8.2). Soweit davon auszugehen war, dass die vorliegenden Daten der Nachweisgrenze entsprachen, wurden diese als oberer Wert eingesetzt und der Mittelwert und der untere Wert durch Abschläge von 20 % bzw. 40 % berechnet (z.B. SKG, BFA).

Tabelle 8.4 Ermittlung der „durchschnittlichen“ Chloridkonzentrationen in Mineralischen Abfällen und Materialien

| mineralische Abfälle und Materialien | DS 1 | DS 2 | DS 3 | DS 4 | DS 5 | DS 6 | von | bis | Mittel |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | mg/kg |
| HOS | 35 | 49 | 76 | 80 | | | 35 | 80 | 60 |
| HS | 50 | | | | | | 35 | 65 | 50 |
| EOS | 40 | 55 | | | | | 34 | 62 | 48 |
| LD Schlacken | 40 | 100 | | | | | 40 | 100 | 70 |
| sonst. SWS | 1 | 4,5 | 5 | | | | 1 | 5 | 3,5 |
| GRS | 86 | | | | | | 60 | 112 | 86 |
| GKOS | 90 | | | | | | 63 | 117 | 90 |
| HMVA | 140 | 217 | 660 | 884 | 930 | 1660 | 217 | 930 | 673 |
| SKG | 100 | 100 | 100 | | | | 60 | 100 | 80 |
| SKA | 65 | 140 | | | | | 65 | 140 | 103 |
| SFA | 19 | 100 | 100 | 100 | 140 | 140 | 60 | 100 | 80 |
| SWA | | | | | | | | | |
| BA | 100 | | | | | | 60 | 100 | 80 |
| BFA | BKA | | | | | | 60 | 100 | 80 |
| BWA | BKA | | | | | | 60 | 100 | 80 |
| Boden | 5 | 12 | 45 | 46 | 100 | | 5 | 100 | 42 |
| RC-Baustoff | 50 | 56 | 60 | 60 | 60 | 62,3 | 50 | 62,3 | 58 |

DS 1 bis DS 6: verschiedene Datensätze, berücksichtigt wurden nur die Fett gedruckten Datensätze

Die Chloridfrachten wurden gemäß dem oben beschriebenen Vorgehen zur Ermittlung der Sulfatfrachten berechnet.

Tabelle 8.5 „Durchschnittliche“ Chloridfrachten mineralischer Abfälle und Materialien

| mineralische Abfälle und Materialien | Gesamt | | | offener Einbau | | | Einbau mit Sicherung | | |
|--------------------------------------|--------------|---------------|---------------|----------------|---------------|--------------|----------------------|---------------|--------------|
| | von | bis | Mittel | von | bis | Mittel | von | bis | Mittel |
| | t | t | t | t | t | t | t | t | t |
| HOS | 67 | 152 | 114 | 14 | 32 | 24 | 53 | 120 | 90 |
| HS | 203 | 378 | 291 | 9 | 16 | 13 | 196 | 365 | 281 |
| EOS | 52 | 94 | 73 | 25 | 45 | 35 | 26 | 47 | 36 |
| LD Schlacken | 136 | 339 | 237 | 51 | 127 | 89 | 59 | 149 | 104 |
| sonst. SWS | 2 | 12 | 8 | 1 | 5 | 4 | 1 | 6 | 4 |
| GRS | 91 | 170 | 130 | 30 | 57 | 44 | 50 | 94 | 72 |
| GKOS | 18 | 33 | 25 | 3 | 5 | 4 | 15 | 27 | 21 |
| HMVA | 716 | 3.069 | 2.220 | 200 | 857 | 620 | 446 | 1.910 | 1.382 |
| SKG | 127 | 211 | 169 | 75 | 124 | 99 | 45 | 74 | 59 |
| SKA | 38 | 81 | 60 | 11 | 24 | 18 | 23 | 50 | 37 |
| SFA | 268 | 447 | 358 | 16 | 26 | 21 | 214 | 356 | 285 |
| SWA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| BKA | 111 | 185 | 148 | 107 | 179 | 143 | 3 | 5 | 4 |
| BFA | 525 | 874 | 699 | 510 | 850 | 680 | 8 | 13 | 10 |
| BWA | 14 | 23 | 18 | 11 | 18 | 14 | 1 | 1 | 1 |
| Boden | 705 | 14.090 | 5.861 | 483 | 9.665 | 4.021 | 222 | 4.435 | 1.845 |
| RC-Baustoff | 4.350 | 5.420 | 5.050 | 1.422 | 1.772 | 1.651 | 2.354 | 2.933 | 2.733 |
| Summe | 7.420 | 25.578 | 15.462 | 2.967 | 13.803 | 7.478 | 3.714 | 10.585 | 6.964 |

8.2 Deposition

Die Gesamtdosition setzt sich aus der trockenen und nassen Deposition zusammen. Für die hier betrachteten Salze Sulfat und Chlorid dominieren die Einträge mit nasser Deposition, weshalb in der Literatur überwiegend Daten zu Einträgen mit der nassen Deposition zu finden sind. Vereinzelt wird für Sulfat zusätzlich die Gesamtdosition erfasst, wodurch dann auch Rückschlüsse auf die Einträge aus trockener Deposition möglich werden (LUBW 2006b).

Die nasse Deposition setzt sich aus Einträgen über Regen, Nebel und Graupel zusammen, die ganz wesentlich für den Austrag von Schadstoffen aus der Atmosphäre verantwortlich sind.

Die Regenmenge bestimmt ganz wesentlich den Schadstoffeintrag durch nasse Deposition, so dass in Gebirgslagen erhöhte Depositionsraten festzustellen sind.

8.2.1 Sulfateintrag mit der Deposition

Die Schwefeldepositionen lagen Anfang der 80er Jahre zwischen 40 und 60 kg je ha und Jahr, in industrienahen Ballungsgebieten bei bis zu 150 kg je ha und Jahr (Nestler, Grischek 2003).

Die Einträge von Sulfat über den Luftpfad wurden durch erfolgreiche Maßnahmen zur Emissionsreduktion in den 80er und 90er Jahren erheblich reduziert und sind in den letzten Jahren etwa konstant (LUBW 2006b; UBA 1999).

Wesentlichen Einfluss auf den Eintrag aus der Atmosphäre haben die Niederschlagsmengen und die Sulfatkonzentrationen im Niederschlag. Die ausgewerteten Quellen zeigen durchschnittliche Sulfatkonzentrationen im Niederschlag zwischen 1,4 und 2,1 mg/l in Sachsen (LFUG 2004) und damit gut übereinstimmende Werte für die UBA-Messstationen Waldhof und Deuselbach von 1,2 bis 2,1 mg/l in den Jahren 2000 bis 2002 (UBA 2003). 1998 wurde im UBA

Messprogramm in den 6 Messstellen ohne die Messstellen Westerland und Zingst, die aufgrund des Einflusses durch Seesalz hier nicht berücksichtigt wurde, einen Schwankungsbereich von 1,4 bis 2,1 mg/l aufgezeigt (UBA 1999). Insgesamt zeigen sich relativ geringe Schwankungen der Sulfatgehalte im Niederschlag. Geht man gemäß den Daten des Deutschen Wetterdienstes von 1961 bis 1990 von mittleren Niederschlagsmengen um 800 mm (bzw. l/m^2) aus (DWD 2007), resultieren daraus Sulfatdepositionen von 10 bis 21 kg/ha.

Das UBA gibt für die Messstellen in Waldhof und Deuselbach für den Zeitraum von 2000 bis 2002 Frachten zwischen 9,1 und 12,8 kg Sulfat je ha an (UBA 2002). 1998 lagen die Werte bei den 6 Messstellen des UBA zwischen 11,5 und 24,6 kg Sulfat je ha (UBA 1999).

Im Depositionsmessnetz in Baden-Württemberg wurden in den Jahren 2000 bis 2002 Sulfat-Gesamtdepositionen von 11,0 bis 38,3 kg/ha, im Jahr 1999 von 11,7 bis 45,3 kg/ha und 2005 von 12,0 und 23,7 kg/ha gemessen. In Baden-Württemberg wurden im Bereich von Großstädten und insbesondere in den sehr Niederschlagsreichen Regionen des Schwarzwaldes erhöhte Depositionsfrachten ermittelt. Für Städte wurden für die letzten drei Jahre (2003 bis 2005) Jahresmittelwerte von 18,6 kg/ha und für den ländlichen Raum ohne Gebiete mit besonders hohen (Schwarzwald) oder geringen (Tauberland) Depositionsfrachten 15,0 kg/ha ausgewiesen (LUBW 2006b).

Kali und Salz gibt 18,5 kg/ha als durchschnittlich jährliche Sulfatdepositionen an, bei einer Schwankungsbreite von 9 bis vereinzelt 51 kg/ha (K&S 2007).

Die Depositionsmessungen zeigen ohne Berücksichtigung der Höchstwerte aus dem Schwarzwald insgesamt jährliche Sulfateinträge zwischen 9 und 25 kg/ha.

Für Sachsen wurden für 2004 Depositionen für Schwefel zwischen 3,1 und 6,8 kg/ha, das entspricht einem Sulfateintrag zwischen 9,3 und 20,4 kg/ha (LFUG 2005). In Schleswig-Holstein wurde für 2005 ein mittlerer Wert von 5,2 kg/ha Schwefel bzw. 15,6 kg/ha Sulfat (SUI 2006), in Bayern 1999 eine mittlere Schwefeldeposition von 3,2 kg/ha dokumentiert, was einem Sulfateintrag von 9,6 kg/ha entspricht (BLfU 2000).

Aufgrund der rauen Oberfläche von Wäldern werden dort Luftschadstoffe vermehrt aus der Atmosphäre „ausgefiltert“. Deshalb sind dort, wie oben für den Schwarzwald beschrieben, höhere Depositionseinträge, insbesondere durch trockene Depositionen und Nebel, zu erwarten, als auf Flächen mit niedrigem oder ohne Bewuchs. Für die Jahre 1985 bis 1989 werden, bei allerdings noch deutlich höheren SO_2 -Emissionsfrachten, für Wälder in Westdeutschland Schwefeldepositionen von 42 kg/ha, für Nordostdeutschland von 59 kg/ha und für das sächsische Erzgebirge von 128 kg/ha angegeben (Nestler, Grischek 2003). Nach Haupt sind die mittleren Sulfatfrachten in Wäldern 2 bis 4fach höher als im Freiland (Haupt 2000). Im Bericht über den Zustand des Waldes 2005 wird für 2000 bis 2003 als durchschnittlicher

Schwefeleintrag in Wälder 9 kg Schwefel je ha angegeben (BMELV 2006), woraus sich ein Sulfateintrag von 27 kg/ha errechnet.

Die ausgewerteten Depositionsmessungen zeigen insgesamt durchschnittliche jährliche Sulfateinträge zwischen 9 und 25 kg/ha. Unter Berücksichtigung der Gesamtfläche von Deutschland von 35,7 Mio. ha (BMVEL 2004) ergeben sich daraus durchschnittliche Gesamtfrachten von 320.000 bis 890.000 t Sulfat je Jahr. Der Mittelwert liegt bei 605.000 t/a.

8.2.2 Chlorideintrag mit der Deposition

Im Gegensatz zu Sulfat, konnte für Chlorid ein eindeutiger Rückgang der Depositionsfrachten festgestellt werden. Die Änderungen in den letzten Jahren waren gering und bei den verschiedenen Stationen nicht einheitlich. Die regionalen Schwankungen sind höher (UBA 1999).

In den sechs nicht durch maritimen Einfluss geprägten Messstationen des UBA wurden 1998 Chloridkonzentrationen im Regen von 0,29 bis 0,83 mg/l gemessen. Die Depositionsfrachten lagen an den gleichen Messstellen zwischen 3 und 7 kg Chlorid je ha. Die Frachten waren mehr durch die Niederschlagsmengen bestimmt, die zwischen 540 und 1730 mm lagen, als durch die Konzentrationen (UBA 1999).

In der UBA Messstation Walhof bei Berlin wurden 2001 und 2002 als Jahresdurchschnitt jeweils Konzentrationen von 0,7 mg Chlorid je Liter und Depositionen von 4,7 bzw. 5,9 kg/ha gemessen. In Deuselbach im Hunsrück lagen die Konzentrationen im gleichen Zeitraum bei 0,45 mg/l und die Depositionen bei 3,7 bzw. 3,8 kg/ha (UBA 2002).

Für das Jahr 2004 werden für Sachsen mittlere Konzentrationen von 0,37 bis 0,74 mg/l und Depositionen von 2,4 bis 6,9 kg/ha beschrieben (LFUG 2004).

In Schleswig-Holstein wurde 2005 ein Chlorideintrag durch nasse Depositionen von durchschnittlich 26,8 kg/ha gemessen (SUI 2006). Dieser gegenüber sonstigen Quellen deutlich erhöhte Wert wird voraussichtlich stark durch den maritimen Einfluss bestimmt.

In Baden-Württemberg lagen die Konzentrationswerte 2002 bei 0,2 bis 0,7 mg/l (LUBW 2003). Für 2005 wurden in den 7 Messstationen in Baden-Württemberg Depositionswerte zwischen 2,6 und 8,5 kg/ha gemessen. Der Mittelwert lag bei 4,3 kg Chlorid je ha (LUBW 2007).

Die zitierten mittleren Konzentrationen im Niederschlag von etwa 0,3 bis 0,8 mg/l ergeben bei der durchschnittlichen Niederschlagsmenge in Deutschland von 800 mm Depositionsfrachten von 2,4 bis 6,4 kg/ha. Die so ermittelten Werte stimmen relativ gut mit den Angaben zur Deposition aus den zitierten Quellen (außer Schleswig-Holstein) überein und werden für die weitere Bilanz herangezogen. Als Gesamtdepositionsfracht für Deutschland errechnet sich daraus eine Spanne von 90.000 bis 230.000 t/a, der Mittelwert liegt bei 160.000 t/a.

8.3 Düngung

In Deutschland beträgt die landwirtschaftlich genutzte Fläche 17 Mio. ha. Der Absatz an Handelsdünger an die Landwirtschaft betrug 2003/2004 aufgeschlüsselt nach Nährstoffen 1,83 Mio. t Stickstoff, 0,28 Mio. t Phosphat, 0,49 Mio. t Kali und 2,1 Mio. t Kalk (BMVEL 2004).

8.3.1 Sulfateintrag mit der Düngung

In der Vergangenheit stand Schwefel infolge der hohen Schwefeldepositionen (vergleiche Kapitel 8.2.1) und dem hohen Eintrag durch den Einsatz schwefelhaltiger Stickstoff- und Phosphordünger immer ausreichend zur Verfügung. Deshalb fand Schwefel in den wissenschaftlichen Untersuchungen zur Pflanzenproduktion deutlich weniger Beachtung als andere Makronährstoffe (Nestler, Grischek 2003).

Meist ist der Schwefelvorrat in den Böden für die Pflanzenversorgung ausreichend, insbesondere wenn man den Eintrag durch die Deposition aus der Atmosphäre und den Sulfatgehalt handelsüblicher Mineraldünger bedenkt. Eine gezielte Sulfatdüngung ist deshalb nur im Ausnahmefall, bei regionaler Unterversorgung und in Abhängigkeit von den angebauten Kulturpflanzen erforderlich. Durch die Steigerung der Ernteerträge, den verringerten Einsatz von schwefelhaltigem Dünger und dem Rückgang des atmosphärischen Eintrags infolge der reduzierten SO₂-Emissionen durch den Einsatz von Entschwefelungsanlagen in der Rauchgasreinigung ist zunehmend ein Schwefelmangel, speziell bei Getreide und Raps zu beobachten. Mit der mineralischen Düngung werden nach Haupt 15 bis 60 kg Schwefel je ha und Jahr auf landwirtschaftlich genutzten Flächen aufgebracht. Das entspricht etwa einem jährlichen Sulfateintrag aus der mineralischen Düngung von 45 bis 180 kg/ha und Jahr oder einer Gesamtfracht von 760.000 t/a bis etwa 3 Mio. t je Jahr.

Bei gezielter Schwefeldüngung (siehe oben) werden Werte von 45 bis 100 kg je ha und Jahr genannt. Durch den Einsatz von Wirtschaftsdünger werden zusätzlich 4 bis 18 kg Schwefel je ha und Jahr eingebracht (Haupt 2000).

Als Entzug durch die Pflanzen gibt Disse für eine Fruchtfolge aus Getreide und Hackfrucht 20 bis 30 kg Schwefel je ha und Jahr an (Disse o.J.). Dieser Wert deckt sich mit den Angaben nach Haupt, wonach ein mittlerer Pflanzenentzug von 25 kg je ha und Jahr anzusetzen ist. Demgegenüber wurden bei Lysimeter – und Freilandmessungen Sickerwassereinträge in das Grundwasser von 3 bis 144 kg Schwefel je ha und Jahr beobachtet (Haupt 2000).

Der Sulfatgehalt in landwirtschaftlich genutzten Böden kann auch indirekt, durch Nitrateinträge und durch die Mineralisation von organischem Stickstoff, bedingt durch autotrophe Denitrifikation in erheblichem Umfang erfolgen. Die hierdurch bedingte Sulfatbildung kann insbesondere nach dem Umbruch von Grünland zu erheblichen Einträgen von Sulfat in das Grundwasser führen (Haupt 2000).

Als Grundlage für eine überschlägige Ermittlung der Sulfateinträge über den Pfad der Handelsdünger in der Landwirtschaft werden in Tabelle 8.6 bis Tabelle 8.9 die Sulfatgehalte wichtiger Handelsdünger und deren Gehalt in Relation zum Hauptnährstoff aufgeführt.

Tabelle 8.6 Wichtige schwefelhaltige Stickstoffdünger (LPP 2000, IVA 2006)

| | N_{ges} | S | Faktor |
|--------------------------------|------------------------|--------------|---------------|
| N-Dünger | kg/dt | kg/dt | S/N |
| Ammoniumnitrat mit Schwefel | 24 | 6 | 0,25 |
| Stickstoff-Mangnesia | 20 | 4 | 0,20 |
| Ammonsulfatssalpeter (ASS) | 26 | 13 | 0,50 |
| Ammonsulfat | 21 | 24 | 1,14 |
| Ammonsulfatharnstoff | 35 | 10 | 0,29 |
| Ammonium-Harnstoff-Lösung m.S. | 24 | 3 | 0,13 |
| Harnstoff-Ammonsulfat-Lösung | 20 | 7 | 0,35 |

Tabelle 8.7 Wichtige sulfathaltige Phosphatdünger (LPP 2000, IVA 2006)

| | P₂O₅ | S | Faktor |
|---------------------------------|-----------------------------------|--------------|-------------------------------------|
| P-Dünger | kg/dt | kg/dt | S/P₂O₅ |
| Superphosphat | 18 | 12 | 0,67 |
| Rohphosphat, teilaufgeschlossen | 23 | 9 | 0,39 |

Tabelle 8.8 Wichtige schwefelhaltige Kalidünger (LPP 2000, IVA 2006, K&S 2007)

| | K ₂ O | MgO | Na | S | Faktor |
|----------------------|------------------|-------|-------|-------|--------------------|
| K-Dünger | kg/dt | kg/dt | kg/dt | kg/dt | S/K ₂ O |
| Kalirohsalz | 11 | 5 | 20 | 4 | 0,36 |
| Kaliumchlorid mit Mg | 40 | 6 | 3 | 4 | 0,10 |
| Kaliumsulfat | 50 | | 18 | 18 | 0,36 |
| Kaliumsulfat mit Mg | 30 | 10 | | 17 | 0,57 |

Für NPK- und PK-Dünger sind aufgrund der unterschiedlichsten Zusammensetzungen nur beispielhafte Daten aufgeführt.

Tabelle 8.9 Ausgewählte NPK-Dünger

| Beispiele für | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | S | Faktor | | |
|----------------------|-------|-------------------------------|------------------|-------|--------|---------------------------------|--------------------|
| NPK-Dünger | kg/dt | kg/dt | kg/dt | kg/dt | S/N | S/P ₂ O ₅ | S/K ₂ O |
| NPK | 20 | 8 | 8 | 4 | 0,20 | 0,50 | 0,50 |
| NPK stabilisiert | 14 | k.A. | k.A. | 11 | 0,79 | | |
| Nitrophoska | 15 | 15 | 15 | | | | |

Da im statistischen Jahrbuch der Absatz an die Landwirtschaft nicht für alle Einzeldünger aufgeführt wird (BVEL 2004, IVA 2006), müssen aus den Angaben in den Tabellen oben z. T. durchschnittliche Schwefelgehalte in Relation zu den Nährstoffen abgeschätzt werden, um Gesamtfrachten ermitteln zu können. Hierzu werden aus den Nährstofffrachten der einzelnen an die Landwirtschaft abgegebenen Handelsdünger über die oben ermittelten bzw. abgeschätzten Faktoren die Schwefelfrachten errechnet. In der Jahresstatistik werden auch Handelsdünger berücksichtigt, die außerhalb der Landwirtschaft eingesetzt werden (BVEL 2004).

Für die Stickstoffdünger sind nur nicht schwefelhaltigen Einzeldüngern wie Kalkammonsalpeter, Ammonnitrat-Harnstoff-Lösung und Harnstoff mit der abgesetzten N-Menge aufgeführt. Die in Tabelle 8.6 genannten schwefelhaltigen N-Dünger werden, zusammen mit weiteren nicht schwefelhaltigen N-Einzeldüngern in einer Gruppe zusammengeführt, für die ein Schwefelgehalt in Relation zum N-Gehalt abgeschätzt wurde. Für die NPK Dünger wird der Sulfateintrag mit dem Nährstoff Kali berechnet. Für Kaliumchlorid und Kaliumsulfat, wird jeweils ein Anteil von 30 % für die Variante mit Magnesium angesetzt (vergleiche Tabelle 8.10).

Tabelle 8.10 Stickstoff- und Schwefelfrachten für die wichtigsten schwefelhaltigen Dünger für das Wirtschaftsjahr 2003/2004 (BMVEL 2004)

| | N | Faktor | S |
|--------------------------------|---------|--------|--------|
| N-Dünger | t/a | S/N | t/a |
| N-Einzelnährstoffdünger | 265.200 | 0,25 | 66.300 |
| | P2O5 | Faktor | S/P2O5 |
| P-Dünger | t/a | S/P2O5 | t/a |
| Superphosphat | 31.700 | 0,67 | 21.239 |
| andere P-Einzelnährstoffdünger | 8.000 | 0,20 | 1.600 |
| | K2O | Faktor | S/K2O |
| K-Dünger | t/a | S/K2O | t/a |
| Kaliohsalz | 11.300 | 0,36 | 4.109 |
| Kaliumchlorid mit Mg | 74.040 | 0,10 | 7.404 |
| Kaliumsulfat | 17.700 | 0,36 | 6.372 |
| Kaliumsulfat mit Mg | 7.590 | 0,57 | 4.301 |
| PK-Dünger | 72.600 | 0,10 | 7.260 |
| NPK-Dünger | 130.300 | 0,15 | 19.545 |

Aus der Aufstellung in Tabelle 8.3 ergibt sich als Gesamtsumme für den Schwefeleintrag über Handelsdünger in der Landwirtschaft, von 138.000 t Schwefel je Jahr, das entspricht etwa 414.000 t Sulfat je Jahr. Je ha landwirtschaftlich genutzte Fläche sind das etwa 8 kg Schwefel und 24 kg Sulfat.

Im Vergleich zu den Angaben von Haupt ergibt sich durch diese Abschätzung ein deutlich geringerer Sulfateintrag durch die Landwirtschaft. Bereits der untere Wert der dort angegebenen Spannweite ist mit 15 kg je ha bzw. 760.000 t/a fast doppelt, der obere mit ca. 60 kg je ha bzw. 3 Mio. t/a etwa 7 mal so hoch. Ein Grund für diese Differenzen kann darin liegen, dass seit der Bilanzierung, die den Angaben in Haupt (2000) zugrunde liegen, der Einsatz von schwefelhaltigen Düngemitteln zurückgegangen ist (Haupt 2000, Nestler, Grischek 2003).

Bei dem Forschungsvorhaben von Nestler und Grischek wurden zur Ermittlung der Schwefelsalden in der Landwirtschaft Betriebs-, Stall- und Flächenbilanzen für Beispielbetriebe durchgeführt. Als Ergebnis wurde festgehalten, dass auch bei flächendeckendem Einsatz von schwefelhaltigen Düngern das Saldo an Schwefel 5

bis 15 kg je ha nicht übersteigt, im Normalfall übersteigt der Austrag durch Pflanzen. Nach Angaben von Haupt ergibt sich folgendes Schwefelsaldo:

- Eintrag mit Mineraldünger 15 – 60 kg/ha*a
- Eintrag mit Wirtschaftsdünger 4 – 18 kg/ha*a
- Austrag durch Pflanzenentzug 20 – 30 kg/ha*a
- Saldo: 0 – 48 kg/ha*a.

Bei dem Forschungsvorhaben wurde für die beiden Fallbeispiele Mockritz und Bramstedt folgende Verteilung der Schwefelzufuhr auf die einzelnen Düngemittelgruppen ermittelt (Tabelle 8.11).

Die Verteilung zeigt die hohe Bedeutung der Wirtschaftsdünger bei den untersuchten Fallbeispielen. Nimmt man die zugekauften organischen Düngemittel hinzu, liegt der Anteil noch etwas höher, zwischen 52 und 85 %. Im Vergleich dazu lag der Anteil organischer Dünger am gesamten Eintrag durch Düngemittel nach Haupt bei ca. 22 %.

Tabelle 8.11 Anteil der Schwefelzufuhr nach Düngergruppen (Nestler, Grischek 2003)

| Düngemittelgruppen | Anteil an der Schwefelzufuhr |
|---|------------------------------|
| | % |
| Wirtschaftsdünger | 50 - 80 |
| Stickstoffdünger | 1 - 15 |
| Kalidünger | 10 - 15 |
| Phosphatdünger | 0 - 15 |
| NPK-Dünger | 5 |
| Hühnertrockenkot, Klärschlamm (zugekauft) | 2 - 5 |

Die Nährstoffzusammensetzung der wichtigsten Wirtschaftsdünger zeigt Tabelle 8.11).

Tabelle 8.12 Nährstoffgehalte einiger wichtiger Wirtschaftsdünger (Nestler, Grischek 2003)

| Wirtschaftsdünger | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | MgO | S | Faktor |
|-----------------------|------|-------------------------------|------------------|------|------|--------|
| | % | % | % | % | % | S/N |
| Gülle, Rind 6 % TM | 0,29 | 0,14 | 0,45 | 0,40 | 0,03 | 0,10 |
| Gülle, Rind 8 % TM | 0,46 | 0,24 | 0,56 | 0,70 | 0,04 | 0,09 |
| Gülle, Schwein 4 % TM | 0,30 | 0,29 | 0,18 | 0,05 | 0,02 | 0,07 |
| Gülle, Schwein 8 % TM | 0,57 | 0,39 | 0,33 | 0,12 | 0,04 | 0,07 |
| Stallmist, Rind | 0,60 | 0,40 | 0,70 | 0,19 | 0,10 | 0,17 |
| Stallmist, Schaf | 1,88 | 0,69 | 1,93 | 0,23 | 0,10 | 0,05 |
| Stallmist, Schwein | 0,94 | 0,69 | 0,42 | 0,20 | 0,10 | 0,11 |
| Stallmist; Ziege | 1,88 | 0,69 | 1,93 | 0,77 | 0,10 | 0,05 |

Nestler und Grischek kommen zu dem Schluss, dass im Gegensatz zu Stickstoff die Landwirtschaft im Normalfall nicht als Verursacher von Sulfateinträgen in das Grundwasser anzusehen ist. Vielmehr können durch die im Allgemeinen negativen Salden in der Landwirtschaft noch Schwefeleinträge aus der Atmosphäre abgepuffert werden.

In Einzelfällen können durch die Landwirtschaft allerdings auch sehr hohe Schwefelüberschüsse verursacht werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn bei sehr hohem Viehbesatz mit dem Import von Futtermitteln hohe Sulfatfrachten eingeführt werden, die den Entzug durch die Pflanzen z. T. deutlich übersteigen können oder wenn bei der Düngung eine Bilanz des Ein- und Austrags von Schwefel ganz unterbleibt und vermehrt über organische Düngemittel wie Geflügelkot zusätzliche Schwefelfrachten eingetragen werden. Außerdem kann der Schwefeleintrag über die Beregnung mit sulfathaltigem Wasser und die Umwidmung von Grünland in Ackerland die Schwefelbilanz maßgeblich beeinflussen (Nestler, Grischek 2003; Haupt 2000).

Für die Stoffstrombilanz wird ein mittlerer Schwefelentzug von 25 kg je ha angesetzt (Disse o.J.), bei einer Spanne von 20 bis 30 kg/ha (Haupt 2000).

Für den Eintrag wird als unterer Wert der aus dem Absatz von Handelsdünger und dem Schwefelgehalt der einzelnen Dünger berechnete Wert von 8 kg/ha angesetzt. Bei der Herleitung des oberen Wertes der Spanne wird nach Nestler und Grischek von einem positiven Saldo von bis zu 15 kg Schwefel je ha, bei einem Austrag von bis zu 30 kg Schwefel je ha ausgegangen. Daraus ergibt sich ein Wert von 45 kg Schwefel je ha. Als mittlerer Wert werden 27 kg/ha angesetzt.

Unter diesen Annahmen lassen sich die gesamten Sulfat Ein- und Austräge für Deutschland berechnen (vergleiche Tabelle 8.13).

Tabelle 8.13 Sulfateinträge durch Düngung und –austräge durch Pflanzenentzug

| | Einheit | Mittel | von | bis |
|-------------------------------------|-----------|--------|-------|-------|
| Eintrag durch Düngung | | | | |
| Schwefeleintrag je ha | kg/ha | 27 | 8 | 45 |
| Sulfateintrag je ha | kg/ha | 81 | 24 | 135 |
| Sulfateintrag, gesamt | 1.000 t/a | 1.375 | 407 | 2.292 |
| Austrag durch Pflanzenentzug | | | | |
| Schwefelaustrag je ha | kg/ha | 25 | 20 | 30 |
| Sulfataustrag je ha | kg/ha | 75 | 60 | 90 |
| Sulfataustrag, gesamt | 1.000 t/a | 1.273 | 1.019 | 1.528 |

8.3.2 Chlorideintrag mit der Düngung

Da Chlorid kein Pflanzennährstoff ist, liegen weder Daten zu Chlorid- oder Salzbilanzen durch Düngung und Pflanzenentzug vor, noch werden Daten zum Chloridgehalt der einzelnen Düngemittel veröffentlicht. Man kann allerdings davon ausgehen, dass der ganz überwiegende Anteil der mit der Düngung eingetragenen Chloride den Kalidüngern, bzw. dem Kaligehalt in Mehrnährstoffdüngern zugeordnet werden können und dass demgegenüber der Eintrag mit den restlichen Mineraldüngern und den Wirtschaftsdüngern vernachlässigt werden kann.

Tabelle 8.14 Berechnung des Cl-Gehalts von Kalidüngern, bezogen auf den Nährstoffgehalt K_2O

| | K ₂ O | Gehalt | MgO | Gehalt | Na | Gehalt | S | Abzug | Gehalt | Anteil |
|-----------------|------------------|---------------------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------------------|---------------------|
| | | Cl/K ₂ O | | Cl/MgO | | Cl/Na | | Cl/S | Cl _{ges} | Cl/K ₂ O |
| K-Dünger | kg/dt | kg/dt | kg/dt | kg/dt | kg/dt | kg/dt | kg/dt | kg/dt | kg/dt | |
| Kalirohsalz | 11 | 8,3 | 5 | 8,8 | 20 | 30,8 | 4 | 8,8 | 39,1 | 3,6 |
| Kaliumchlorid | 60 | 45,2 | | | | | | | 45,2 | 0,8 |
| K.chl. mit Mg | 40 | 30,1 | 6 | 10,6 | 3 | 4,6 | 4 | 8,8 | 36,4 | 0,9 |
| Kaliumsulfat | 50 | 37,6 | | | 18 | 27,8 | 18 | 39,8 | 25,6 | 0,5 |
| K.sulf mit Mg | 30 | 22,6 | 10 | 17,6 | | | 17 | 37,6 | 2,6 | 0,1 |

Geht man weiterhin davon aus, dass die Nährstoffe Kali und Magnesium als Chloride oder Sulfate vorliegen und Natrium als Chlorid, lassen sich die Chloridgehalte der Kali- und PK- und NPK-dünger berechnen (vgl.: Tabelle 8.14 und Tabelle 8.15).

Tabelle 8.15 Berechnung der Cl-Gehalte einiger beispielhafter PK und NPK Dünger

| | K ₂ O | Gehalt | S | Abzug | Gehalt | Anteil |
|----------------------|------------------|---------------------|-------|-------|-------------------|---------------------|
| | | Cl/K ₂ O | | Cl/S | Cl _{ges} | |
| Beispiele für | kg/dt | kg/dt | kg/dt | kg/dt | kg/dt | Cl/K ₂ O |
| NPK-Dünger | | | | | | |
| Nitrophoska | 15 | 11,3 | | | 11,3 | 0,8 |
| PK-Dünger | | | | | | |
| Thomaskali 7+21 | 21 | 15,8 | 3 | 6,6 | 9,2 | 0,4 |
| Thomaskali 10+15 | 15 | 11,3 | 3 | 6,6 | 4,7 | 0,3 |
| Thomaskali 12+18 | 18 | 13,5 | 3 | 6,6 | 6,9 | 0,4 |

Aus den so ermittelten Chloridgehalten der wichtigsten Kali- und Mehrnährstoffdünger ergeben sich unter Berücksichtigung des Absatzes dieser Dünger an die Landwirtschaft (BMVEL 2004) die Chloridfrachten mit der Düngung (Tabelle 8.16).

Tabelle 8.16 Ermittlung der Chloridfrachten durch die Düngung

| K-Dünger | t/a | Cl/K ₂ O | t/a |
|----------------------|---------|---------------------|---------|
| Kalirohsalz | 11.300 | 3,6 | 40.139 |
| Kaliumchlorid | 172.760 | 0,8 | 130.044 |
| Kaliumchlorid mit Mg | 74.040 | 0,9 | 67.463 |
| Kaliumsulfat | 17.700 | 0,5 | 9.060 |
| Kaliumsulfat mit Mg | 7.590 | 0,1 | 654 |
| PK-Dünger | 72.600 | 0,40 | 29.040 |
| NPK-Dünger | 130.300 | 0,75 | 97.725 |
| Summe | | | 374.124 |

Als Gesamtfracht durch die Düngung errechnet sich ein Wert von etwa 374.000 t Chlorid je Jahr. Zur Berechnung der Spanne werden aufgrund der unsicheren Eingangsdaten ein Schwankungsbereich von +/- 30 % angesetzt. Das ergibt als unteren Wert der Spanne 262.000 t/a und als oberen 486.000 t/a.

Für den Austrag an Chloriden durch Pflanzenentzug liegen keine verlässlichen Zahlen vor. Nach Auskünften der Düngeberatung ist davon auszugehen, dass etwa 30 % des Eintrags über Düngemittel durch Ernteentzug wieder ausgetragen werden (K&S 2007).

Nach Henneberg und Neumann wurden bei einem Versuch mit etwa 840 t/ha Baggergut-Trockenmasse aus Brackgewässern 3.268 kg Chlorid je ha auf die Versuchsflächen eingetragen. Mit den geernteten Maispflanzen wurden in fünf Jahren bei durchschnittlichen Ernteerträgen von etwa 220 dt je ha und Jahr nur etwa 0,1 kg je ha und Jahr mit den Pflanzen entzogen. In der gleichen Zeit betrug der Austrag über das Sickerwasser 2.768 kg je ha (Henneberg, Neumann 2006).

Daraus lässt sich eine Spanne für den Austrag der Chloride durch den Pflanzenentzug zwischen 0 und 146.000 t/a und ein mittlerer Wert von 78.000 t/a ableiten.

8.4 Chlorideintrag durch den Einsatz von Tausalz

In Deutschland beträgt der Anteil der Straßen an der Gesamtfläche ca. 4 %. Dies entspricht einer Fläche von etwa 14.638,09 km². Das gesamte Straßennetz weist etwa eine Länge von 626.801 km auf, die sich wie folgt verteilen:

- Autobahnen 12.044 km,
- Bundesstraßen 41.139 km,
- Landes- und Kreisstraßen 178.218 km,
- Gemeindestraßen 395.400 km (Knoll 2005).

Daten zum Verbrauch an Tausalzen auf deutschen Bundesautobahnen und –straßen für den Zeitraum 1980 bis 1990 und einige ausgewählte Winter zeigt Tabelle 8.17.

Die 2005/2006 auf Autobahnen und Bundesstraßen eingesetzten Tausalzmengen verteilen sich auf folgende Salzarten

- NaCl 1.030.000 t
- CaCl₂ und MgCl₂ 56.000t (BAST 2006).

Diese Verteilung zeigt, dass ganz überwiegend NaCl zum Einsatz kommt. Tausalze werden zu über 95 % aus Steinsalz gewonnen. Als natürliche Begleitstoffe können einige Prozent unlösliche Bestandteile (i. W. Ton) und andere Salze (z.B.

Calciumsulfat, bzw. Gips, WGK 1) enthalten sein. Ferner können als künstliche Zusätze einige zehntel bis hundertstel Promille Antbackmittel (z. B. gelbes Blutlaugensalz) sowie Farbstoffe zur Vergällung und Kennzeichnung beigegeben sein (BALA 1999).

Tabelle 8.17 Verbrauch an Tausalzen (NaCl) auf deutschen Bundesautobahnen und –straßen

| Jahr | Autobahnen | Bundesstraßen | Quelle |
|-----------|---------------------|---------------|------------|
| | t | t | |
| 1980-1990 | 170.000 bis 800.000 | | BALA 1999 |
| 1993/1994 | 205.000 | 226.000 | Knoll 1999 |
| 1998/1999 | 437.600 | 378.500 | Knoll 1999 |
| 2005/2006 | 643.000 | 543.000 | BAST 2006 |

Der Verbrauch an Streusalz unterliegt starken Schwankungen, je nachdem wie die Winter ausfallen. Dies verdeutlichen nicht zuletzt auch die Daten in Tabelle 8.17.

Der Gesamtverbrauch an Auftausalzen, unter Berücksichtigung der Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen und dem Verbrauch im privaten Bereich, kann aus den statistischen Daten zum Verbrauch an Auftausalzen abgeleitet werden. Bei den folgenden Daten zum Inlandsabsatz von 2000 bis 2005, ist der Import nicht berücksichtigt (vgl. hierzu auch Daten bis 2000 in

- 2000: 1,1 Mio. t
- 2001: 1,8 Mio. t
- 2002: 1,8 Mio. t
- 2003: 2,0 Mio. t
- 2004: 2,2 Mio. t
- 2005: 3,4 Mio. t (Knoll 2005, Knoll 2006, VKS 2006).

Der Verbrauch für 2005 liegt mit 3,4 Mio. t stark über dem mehrjährigen Mittel. Berücksichtigt man die Jahre 1992 bis 2005 (ab 1992 liegen die Daten für die alten und neuen Bundesländer vor) ergibt sich ein mittlerer Verbrauch von 1,7 Mio. t je Jahr, bei einer Schwankungsbreite von 0,6 Mio. t in 1992 bis 3,4 Mio. t 2005. Seit 1995 ist eine leichte Zunahme im Verbrauch zu beobachten (VKS 2006). Bei den Daten zum Inlandsabsatz ist zu berücksichtigen, dass daraus der saisonale Verbrauch

nur indirekt abgeleitet werden kann, weil die Zu- oder Abnahme von Lagerbeständen aus den Daten nicht erkennbar ist. Beim langjährigen Mittel werden solche Einflüsse aber ausgeglichen, so dass im Durchschnitt von einem Gesamtverbrauch von 1,7 Mio. t Tausalz in Deutschland ausgegangen werden kann, das entspricht einem Eintrag von etwa 1 Mio. t Chloride durch den Verbrauch von Tausalz.

Neben dem Einsatz von Enteisungsmitteln auf Straßen- und Wegen, werden auch auf Flughäfen Enteisungsmittel, sowohl zum Enteisen der Flugzeuge als auch der Verkehrsflächen verwendet. Bei einer Befragung der größten deutschen Flughäfen werden dabei allerdings nur zu etwa 5 % Tausalze eingesetzt (UBA-Texte 2003). Diese Mengen sind im Rahmen der Absatzstatistik erfasst.

Für die Bewertung, welcher Anteil dieser Chloride von den Straßen in den Boden und in das Grundwasser gelangt, kann davon ausgegangen werden, dass der größte Teil des innerorts angewendeten Tausalzes mit der Kanalisation direkt in Oberflächengewässer geleitet wird. Statistiken, die den Verbrauch in innerörtlichen Anwendungen durch Kommunen und Private im Verhältnis zum Einsatz außerorts, auf Bundesautobahnen, Bundes-, Landes- und Kreisstraßen stellen, liegen nicht vor.

Als erste Näherung kann bei der Aufteilung davon ausgegangen werden, dass der Anteil, der auf den Bundesautobahnen und -straßen eingesetzt wird, direkt in den Boden eindringt und der Rest in die Kanalisation. Um die Gesamtabsatzzahlen für Tausalz mit den Angaben zum Einsatz auf Bundesautobahnen und -straßen abzugleichen, muss auch der unterschiedliche Erhebungszeitraum berücksichtigt werden. Für den Verbrauch werden die Angaben auf die Wintersaison, für den Absatz auf das Kalenderjahr bezogen. Der Abgleich zwischen Gesamtabsatz und Verbrauch auf Bundesautobahnen und -straßen, für den vereinfachend davon ausgegangen wird, dass der gesamte Salzbedarf für die Wintersaison auf Vorrat, also im Vorjahr beschafft wurde, stellt die Basis zur Abschätzung des Verbrauchs auf Landes- und Kreisstraßen bzw. in Kommunen dar. Hierzu werden die Verbrauchszahlen für Fernstraßen von dem Gesamtabsatz abgezogen um die durchschnittliche Verteilung zwischen dem Verbrauch auf Fernstraßen (Bundesautobahnen und -straßen) und den restlichen Anwendungen (Kommunen, Kreis- und Landstraßen, Privatgelände) zu ermitteln.

Tabelle 8.18 Darstellung des Gesamtabsatzes an Tausalzen und der Verteilung, der Anwendung auf Fernstraßen und den restlichen Anwendungen (UBA-Texte 2003)

| | Gesamt | Fern straßen | | Rest | |
|------------|--------|--------------|----|--------|----|
| | Mio. t | Mio. t | % | Mio. t | % |
| 1992 | 0,61 | 0,23 | 38 | 0,38 | 62 |
| 1993 | 1,08 | 0,24 | 22 | 0,84 | 78 |
| 1994 | 0,87 | 0,43 | 50 | 0,44 | 50 |
| 1995 | 1,64 | 0,48 | 29 | 1,16 | 71 |
| 1996 | 2,35 | 0,74 | 31 | 1,61 | 69 |
| 1997 | 1,37 | 0,50 | 37 | 0,87 | 63 |
| 1998 | 1,38 | 0,39 | 28 | 0,99 | 72 |
| 1999 | 2,36 | 0,82 | 35 | 1,54 | 65 |
| 2000 | 1,14 | 0,59 | 52 | 0,55 | 48 |
| Mittelwert | 1,42 | 0,49 | 35 | 0,93 | 65 |

Die Gegenüberstellung zeigt, dass von 1992 bis 2000 etwa 490.000 t/a bzw. 35 % des Gesamtabsatzes auf Fernstraßen und 930.000 t/a bzw. 65 Prozent in Kommunen, auf Landes- und Kreisstraßen sowie im Privatbereich eingesetzt wurden. Überträgt man diese Verteilung auf den Gesamtabsatz der Jahre 1992 bis 2005 ergibt sich für Fernstraßen ein Verbrauch von etwa 600.000 t/a und für den Rest von etwa 1.120.000 t/a.

Für ein Projekt des Umweltbundesamtes wurde 2001 eine Umfrage bei 54 Kommunen zur Erhebung des Einsatzes von Enteisungsmitteln innerhalb der letzten vier Jahre durchgeführt. Demnach wird der kommunale Einsatz, der auch nach dieser Untersuchung in Abhängigkeit der klimatischen Verhältnisse und der Größe der Städte stark schwankt, mit 358.000 t/a für Salze und 244.000 t/a für abstumpfende Streumittel angegeben (UBA-Texte 2003).

Für die Bilanz wird angesetzt, dass zusätzlich zu den 358.000 t/a nochmals die gleiche Menge im Bereich kanalisierter Straßen zur Anwendung kommen und damit nicht dem Pfad in den Boden und das Grundwasser gelangen, sondern Kläranlagen und Oberflächengewässern zugeleitet werden. Als Bodeneintrag verbleibt somit eine mittlere Salzfracht von 984.000 t/a was einem Chlorideintrag von etwa 600.000 t/a entspricht. Als Spannweite wird ein Bereich von +/- 30 % angesetzt. Somit errechnet sich ein unterer Eintrag von 420.000 t/a und ein oberer von 720.000 t/a.

8.5 Zusammenfassende Gegenüberstellung der Sulfat- und Chloridfrachten

In Tabelle 8.19 sind die einzelnen Frachten für den Eintrag von Sulfat und Chlorid in den Boden und das Grundwasser zusammenfassend dargestellt.

Es handelt sich dabei um Potenziale zum flächenhaften Eintrag in den Boden, die aufgrund der Datenlage nur in relativ groben Spannen ermittelt werden konnten. Genauere Berechnungen über das exakte Verhalten der Materialien und Emissionspfade ist nicht sinnvoll, da jeder Einzelfall verschiedene Rahmenbedingungen aufweist, die in einer landesweiten Betrachtung nicht generalisierbar sind. In diesem Sinne sind auch die Unterscheidungen in offenen Einbau bzw. Einbau mit Sicherung nur als Hilfe zur qualitativen Einschätzung des Gesamtpotenzials zu verstehen. Das gleiche gilt für die Unterscheidung der Emissionspfade bei den Auftausalzen in Abhängigkeit von der Lage der Straßen inner- oder außerorts.

Tabelle 8.19 Gegenüberstellung der wichtigsten Potenziale für den Eintrag von Sulfat und Chlorid in den Boden bzw. das Grundwasser

| | Chloride | | | Sulfate | | |
|----------------------------------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| | von | bis | Mittel | von | bis | Mittel |
| | t | t | t | t | t | t |
| min. Abf. und Materialien | | | | | | |
| <i>Gesamt</i> | 7.400 | 25.600 | 15.400 | 132.554 | 337.012 | 243.114 |
| offener Einbau | 3.000 | 13.900 | 7.500 | 84.522 | 202.677 | 149.831 |
| Einbau mit Sicherung | 3.700 | 10.500 | 6.900 | 38.191 | 110.566 | 76.403 |
| | | | | | | |
| Deposition | 90.000 | 230.000 | 160.000 | 320.000 | 890.000 | 605.000 |
| Auftausalze | | | | | | |
| <i>Gesamt</i> | 725.900 | 1.288.100 | 1.037.000 | | | |
| Anschluss Kanalisation | 305.900 | 568.100 | 437.000 | | | |
| Entwässerung in Boden | 420.000 | 720.000 | 600.000 | | | |
| Düngung | 262.000 | 486.000 | 374.000 | 407.000 | 2.292.000 | 1.375.000 |
| Pflanzenentzug | 0 | -146.000 | -78.000 | -1.019.000 | -1.528.000 | -1.273.000 |

Wie oben beschrieben, kann der Pflanzenentzug den Anteil an Düngung übersteigen, da die Pflanzen z. T. auch die Stoffe aus den anderen Quellen aufnehmen können.

9 Modellierung der Abminderung von Stoffkonzentrationen im Grundwasser bei Stoffeinträgen aus Verwertungsmaßnahmen

Hinsichtlich der weitergehenden Bewertung der Auswirkungen von Einträgen in das Grundwasser, war es notwendig, vor dem Hintergrund der aktuellen Vorhaben des Bundesgesetzgebers für die Fortschreibung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999) und der geplanten Bundesregelung für die Verwertung mineralischer Abfälle wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens als Unterauftrag die Studie „Modellierung der Verdünnung/Abminderung von Stoffkonzentrationen im Grundwasser bei Stoffeinträgen aus Verwertungsmaßnahmen an Professor Gratwohl, Uni Tübingen vergeben. Neben diesem Forschungsvorhaben wird hierdurch auch das UBA-Vorhaben „Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Vorhabens „Sickerwasserprognose“ in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden“ (UBA FE 205 74 251) unterstützt, die als ergänzende Grundlage zur Ausgestaltung der Bundesverwertungsverordnung, auf der Basis bisheriger Ergebnisse aus dem BMBF Forschungsvorhaben zur Sickerwasserprognose dient.

Sie untersucht und beschreibt das Potential von Prozessen, die zu einer Abminderung von aus Verwertungsmaterialien wie Recyclingbaustoff stammenden Schadstoffkonzentrationen an der Grundwasseroberfläche führen können. In diesem Kapitel wird die Zusammenfassung der Studie dargestellt. Die Studie ist als ausführliche Version beigelegt.

Die betrachteten Prozesse beinhalten verschiedene Stofffreisetzungsprozesse aus dem Schadenherd (Lösung/Abreicherung, Desorption), Sorption und Verdünnung durch Dispersion in der ungesättigten Zone, im Kapillarsaum und im Grundwasser. Zur Bewertung der konzentrationsmindernden Prozesse wurden hochauflösende numerische Transportsimulationen in zweidimensionalen vertikalen Profilschnitten eines hypothetischen sandigen Grundwasserleiters durchgeführt. Als Verwertungsmaßnahme, aus der die Schadstoffemissionen in den ungesättigten Boden erfolgen, wurde hier das Szenario eines Lärmschutzwalls betrachtet, in dem Recyclingbaustoff als Tragschicht verbaut ist. Die Migration der Modellsubstanzen *Chlorid* (als Beispiel eines Salzes) und eines *PAK-Summenparameters* wurde durch die ungesättigte Zone unter Berücksichtigung der Einmischung über den Kapillarsaum in die gesättigte Zone und zu verschiedenen Beobachtungspunkten (BOP) abstromig der Verwertungsmaßnahme modelliert. Für die einzelnen Modellsubstanzen wurde dabei jeweils das substanzspezifische zeitliche Verhalten der Schadstoffquelle berücksichtigt. Als Modellergebnisse wurden die zeitlichen Verläufe der Konzentrationsdurchbrüche an den BOP, über die Aquifermächtigkeit gemittelte Konzentrationen sowie Konzentrationsminderungsfaktoren berechnet.

Durch die starke Retardation der PAK werden diese nur sehr langsam aus dem Bauschutt ausgetragen. Da für die PAK eine zeitlich konstante Quellstärke angenommen wurde, erreicht die Schadstofffahne einen stationären Zustand. Direkt unterhalb der Schadstoffquelle beginnt nach ungefähr 30 a der erste Eintrag der PAK über die ungesättigte Zone (geringsorptiver Sand) und den Kapillarsaum ins Grundwasser, nach ca. 60 a ist die Fahne an der Grundwasseroberfläche unterhalb der Verwertungsmaßnahme stationär. Durch seitlich im Kapillarsaum anströmendes Wasser und Dispersion kommt es hier zu einer nur geringfügigen Verdünnung bzw. Verminderung der Schadstoffkonzentrationen, sodass hier im stationären Zustand Konzentrationen von $C/C_0 = 0.8$ erreicht werden. Aufgrund der Linearität des Retardationsmodells sind die Abminderungsfaktoren C/C_0 auch auf jede beliebige Quellkonzentration C_0 anwendbar. Der stationäre Zustand der Schadstofffahne für das gesamte Modellgebiet wird nach ca. 1220 a erreicht. Die maximal beobachtete PAK-Konzentration 200 m im Abstrom der Verwertungsmaßnahme liegt dann bei $C/C_0 = 0.03$. Aufgrund der insgesamt nur geringen Abminderungsfaktoren für PAK ist mit Einträgen ins Grundwasser und Überschreitungen der Prüfwerte zu rechnen, sofern die Gleichgewichtskonzentrationen im Sickerwasser der Schadstoffquelle entsprechende Konzentrationsniveaus erreichen. Bei lang anhaltender Quellstärke bestünde so gegebenenfalls eine langfristige Gefahr für das Grundwasser. Die Modellierung wurde ohne Berücksichtigung des anzunehmenden Abbaus der PAK in der ungesättigten und gesättigten Zone durchgeführt. Insoweit liegen die Ergebnisse auf der sicheren Seite.

Legt man typische Quellstärkekonzentration von RC-Baustoffen von $3 \mu\text{g/L}$ zugrunde (LANUV NRW, Auswertung von Zusatzuntersuchungsergebnisse des Öko-Instituts), würden die Geringfügigkeitsschwellen (GFS, LAWA, 2005) am Übergang ungesättigte Zone/gesättigte Zone nach ca. 100 Jahren erreicht. 200 m im Abstrom der Verwertungsmaßnahme würden bei den hier gefundenen Verdünnungsfaktoren Maximalkonzentrationen im Grundwasser von $0,1 \mu\text{g/l}$ resultieren, die Einhaltung der GFS-Werte wäre dort also gegeben (Unterschreitung um Faktor 2).

Bei hochkontaminierten Altlasten mit typischen Quellstärkekonzentration von $1000 \mu\text{g/L}$, würden die Geringfügigkeitsschwellen (GFS, LAWA, 2005) am Übergang ungesättigte Zone/gesättigte Zone nach wenigen Jahren erreicht. 200 m im Abstrom der Verwertungsmaßnahme würden bei den hier gefundenen Verdünnungsfaktoren Maximalkonzentrationen im Grundwasser von $30 \mu\text{g/l}$ resultieren, also vielfache Überschreitung der GFS-Werte.

Für das Salz Chlorid wird die zeitliche Abnahme der Schadstoffemission aus der Verwertungsmaßnahme auf Hintergrundwerte innerhalb von 20 a berücksichtigt. Chlorid wird im Boden nur sehr schwach retardiert und tritt unterhalb der Verwertungsmaßnahme bereits nach 0.5 a an der Grundwasseroberfläche auf. Die hier beobachtete Maximalkonzentration beträgt $C/C_0 = 0.76$ nach 3.8 a. Aufgrund der

zeitlichen Abnahme der Emission wird kein stationärer Zustand der Chloridfahne erreicht. Dispersion und Verdünnung durch Zustrom im Kapillarsaum und infiltrierendes Sickerwasser führen zu einer zunehmenden Reduktion der Chloridkonzentrationen in der Schadstoffahne während des Transports. Nach 15 a beträgt die Maximalkonzentration im Aquifer $C/C_0 = 0.09$. Nach rund 100 a liegen die Konzentrationen im gesamten Aquifer wieder im Bereich des Hintergrundes. Die über den Simulationszeitraum beobachtete Maximalkonzentration am abstromigen Modellrand beträgt $C/C_0 = 0.012$ nach ca. 20 Jahren. Für Salze wie Chlorid sind Überschreitungen des Grundwasser-Prüfwertes zu erwarten, solange hohe Konzentrationen im Schadensherd auftreten. Im Unterschied zu den PAK kann hingegen durch die Abreichung der Quelle und die Verdünnung im Aquifer die langfristige Gefahr für das Grundwasser als gering eingestuft werden.

Der Kapillarsaum des Sandbodens weist aufgrund seiner geringen Kapillarität eine nur sehr geringe Mächtigkeit auf. Um das Einmischungsverhalten in mächtiger ausgeprägten Kapillarsäumen vergleichen zu können, wurden weitere Simulationen für einen feinkörnigeren schluffig lehmigen Sand mit einem mächtigeren geschlossenen Kapillarsaum durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Abminderung der Schadstoffkonzentrationen im Kapillarsaum gegenüber dem größeren reinen Sand erheblich reduziert ist. Bei konstanter Quellstärke aus dem Verwertungsmaterial wird unabhängig von Retardationseffekten an der Grundwasseroberfläche fast die volle Ausgangskonzentration C_0 erreicht. Dies ist vor allem auf insgesamt deutlich langsamer ablaufende Fließvorgänge im feinkörnigen Medium zurückzuführen, da die Dispersions-Koeffizienten entsprechend reduziert sind. Dadurch wird nur sehr wenig unkontaminiertes Wasser innerhalb des Kapillarsaums hinzugemischt und die Abminderung wird nahezu vernachlässigbar.

Grundsätzlich lässt die Verdünnung von gelösten Schadstoffen aus der ungesättigten Zone im Kapillarsaum nur eine geringfügige Verringerung der im Grundwasser ankommenden Konzentrationen erwarten.

10 Fazit

Der Einfluss durch die im VO-Entwurf festgesetzten Materialwerte auf die Verwertung von mineralischen Abfällen und Materialien als Ersatzbaustoffe ist, für jede Materialgruppe getrennt zu bewerten. Deshalb wird jede Gruppe einzeln betrachtet und diskutiert. Bei dieser Diskussion werden Überschreitungen bei den Maximalwerten nicht berücksichtigt, da diese zum einen nicht ausreichend interpretierbar sind (Einzelwerte) und zum anderen durch die Regelungen im VO-Entwurf (4 aus 5 bzw. Einhaltung im 80 %-Percentil) Ausreißer nach oben zulässt.

Alle Aussagen stehen unter dem Vorbehalt, dass die Materialwerte im Entwurf der Ersatzbaustoff-VO auf ein Säulenverfahren (WF 2) beruhen, während die Praxiswerte ausschließlich nach dem Schütteltest DEV S4 (WF 10) ermittelt wurden (vgl. Kapitel 6). Die hierzu notwendigen Umrechnungen sind mit schwer abschätzbaren Ungenauigkeiten behaftet. Insofern muss der orientierende Charakter dieser Abgleiche bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Für SWS, SKA, SFA und HMVA stehen alle Aussagen zudem unter dem Vorbehalt, dass zu dem neu eingeführten Parameter Molybdän keine Aussagen getroffen werden können, da keine Vergleichswerte vorliegen.

Für **Hochofenstückschlacke (HOS)** und **Hüttensand (HS)** wird es auch nach der Einführung der ZOW aus dem VO-Entwurf keine Probleme bei der Verwertung geben. Auch die reduzierten Werte für Sulfat und elektrische Leitfähigkeit bei HS ändern daran nichts. Nach den vorliegenden Daten halten Hochofenstückschlagen sicher HOS-1 ein.

Unter **Stahlwerksschlacken (SWS)** werden **LDS** und **EOS** zusammengefasst. Bei den LD-Schlacken ist die Einstufung nach dem VO-Entwurf sicher in SWS-3 möglich, da die Überschreitungen bei der elektrischen Leitfähigkeit nur bei pH-Werten unter 11 als Begrenzung zählen würden. Im Median entsprechen die vorgelegten Daten abgesehen von Vanadium SWS-1. Der Vanadiumwert hält allerdings SWS-2 gerade so ein. Gegenüber den ZOW des Eckpunktepapiers macht sich hier insbesondere die Anhebung der SWS-3 Werte für Vanadium und Fluorid bemerkbar. Die Vanadiumbelastungen wären nach dem Eckpunktekriterium noch ein Ausschlusskriterium für LDS gewesen. Für EOS ist nach den Vorgaben des VO-Entwurfes und des Eckpunktepapiers eine Einstufung nach SWS-3 vorzunehmen. Der Abstand zu den ZOW für SWS-3 ist deutlich. Gegenüber der alten Einstufung nach der LAGA M 20 stellt dies eine Erleichterung dar. Dort lag der Wert für Chrom gesamt deutlich über Z 2.

Bei **Gießereirestsanden (GRS)** werden zukünftig nur noch tongebundene Restsande für eine Verwertung als Ersatzbaustoff zugelassen. Für diese Gruppe der GRS liegen keine Vergleichswerte vor.

Gießerei-Kupolofenschlacken (GKOS) werden im VO-Entwurf den ZOW für SWS zugeordnet. Für GKOS stellt die neue Einstufung eine deutliche Erleichterung dar. Sowohl nach dem Eckpunktepapier als auch nach der LAGA M 20 war eine Verwertung als Ersatzbaustoff wegen Überschreitungen bei Chrom und Nickel bei dem vorliegenden Datensatz aus ABANDA nicht möglich. Nach dem VO-Entwurf ist eine Einstufung nach SWS-1 aufgrund der Parameter elektrische Leitfähigkeit und Fluorid unkritisch. Fraglich bleibt die Situation bei Molybdän und Vanadium.

Für **Steinkohle-Schmelzkammergranulat (SKG)** verändert sich durch den VO-Entwurf nichts an der unproblematischen Verwertungssituation.

Für Steinkohlekesselaschen (SKA) stellen die reduzierten ZOW für Sulfat und Arsen ein Problem dar. Die 80 %-Percentile beider Parameter liegen im Bereich des ZOW. Durch die Regelungen im VO-Entwurf, dass die ZOW im 80 %-Percentil einzuhalten sind, bleibt die Verwertung als Ersatzbaustoffe für die Masse der SKA möglich.

Bei den **Steinkohleflugaschen (SFA)** sind die unterschiedlichen Feuerungssysteme zu unterscheiden. Allgemein lässt sich sagen, dass das Eckpunktepapier keine Veränderungen gegenüber der LAGA M 20 vorsah und dass von den beiden neu aufgenommenen Parametern zumindest Vanadium sich als unproblematisch für SFA herausstellt, während für Molybdän keine Daten vorliegen. Insgesamt hat sich an der Einstufung der SFA gegenüber dem bisherigen Zustand nichts geändert.

Für **SFA aus der Trockenfeuerung** zeigte sich lediglich bei Chrom gesamt eine Überschreitung des ZOW. Bei **SFA aus der Schmelzkammerfeuerung** waren in dem von der VGB zur Verfügung gestellten Datensatz deutlich Überschreitungen des ZOW für Arsen zu verzeichnen. Der Datensatz aus ABANDA wies erhöhte Werte bei elektrischer Leitfähigkeit, Sulfat, Chlorid und Chrom auf. Der dritte Datensatz (LAGA) zeigte zusätzlich noch für Cadmium Probleme auf. Die gleiche Einschätzung gilt bezüglich der **SFA aus der Wirbelschicht**.

Für **Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA)** sind im Entwurf der Ersatzbaustoff-VO zwei ZOW-Einstufungen vorgesehen. HMVA-1 ist dabei eher zukünftig von Bedeutung, wenn durch weitergehende Aufbereitungsverfahren gegenüber heute eine deutlich effektivere Schadstoffentlastung gelingt. Bezüglich HMVA-2 sind dennoch Verschärfungen gegenüber den heutigen ZOW festzustellen. Die beobachteten Überschreitungen für die elektrische Leitfähigkeit und Zink (LfU BW) sowie TOC bei dem Analysenprogramm zu diesem Projekt (UFOPLAN) haben nichts mit den neuen ZOW zu tun, da die Zuordnungswerte nicht verändert wurden. Darüber hinaus waren nach dem Eckpunktepapier im 80 %-Percentil keine Überschreitungen zu verzeichnen. Nach dem VO-Entwurf liegen für im 80 %-Percentil Werte für elektrische Leitfähigkeit Chlorid, Sulfat und Chrom oberhalb von HMVA-2 vor. Eine Beeinträchtigung der Verwertung der HMV-Aschen insgesamt wird hierdurch nicht zu befürchten sein, da bezüglich der Aufbereitung noch Möglichkeiten für eine effektivere Schadstoffabreicherung existieren, deren Mehrkosten bei der Kalkulation

der Verbrennungspreise für Hausmüll nicht zu einer unverträglichen Mehrbelastung führen wird. Der UFOPLAN-Datensatz weist selbst im 90 %-Perzentil keine Überschreitungen für HMVA-2 auf⁴².

Bei **Recyclingbaustoffen aus Bau- und Abbruchabfällen (RC)** werden auch in der momentanen Praxis, die Schadstoffe Sulfat und PAK kritisch eingestuft. Bezüglich Sulfat wird die Situation trotz der Übergangslösung bis 2020 noch etwas verschärft. Hier liegen die 80 %-Perzentile überwiegend bei RC-3. Bezüglich PAK hat sich die Situation dagegen eher entschärft, da die PAK im Eluat nach derzeitiger Datenlage sich weniger begrenzend auswirken werden als im Feststoff und durch die übergangsweise Möglichkeit zwischen PAK im Eluat und Feststoff zu wählen, noch weitere Spielräume ausgeschöpft werden können. Da auf die Sulfatgehalte durch eine gezielte Inputkontrolle oder technische Trennverfahren besser Einfluss genommen werden kann als auf die PAK-Gehalte, kann man diese Veränderungen insgesamt als eine Erleichterung für ein hochwertiges Bauschuttrecycling einstufen. Als besonders begrenzend stellt sich jetzt die Verschärfung des ZOW für Kupfer heraus, der bei den untersuchten Datensätzen im 80 %-Perzentil meist über RC-3 lag. Bei Kupfer wird allerdings eine abschließende Beurteilung erst möglich sein, wenn ausschließlich Analyseverfahren eingesetzt werden, deren Nachweisgrenze deutlich unterhalb der ZOW-Werte liegen.

Für **Bodenmaterialien (BM)** ist zu berücksichtigen, dass ein Teil der Datensätze auch belastete Böden aufweisen, die unter Umständen eher in einer Altlastenbeurteilung zu bewerten wären. Schränkt man die Betrachtung auf die Datensätze für unbelastete Böden (DB und BW) ein, zeigen sich bis auf meist geringen Überschreitungen beim TOC-Wert durchgehend Einstufungen nach BM-1. Soweit aufgrund der Nachweisgrenzen auch ein Abgleich mit BM-0 möglich war (BW), hielten die Daten auch BM-0 ein. Ein Abgleich mit stark belasteten Datensätzen zeigt, dass sich die Einstufung gegenüber den alten ZOW eher erleichtert. Zu den zukünftigen ZOW für PAK im Eluat liegen keine Vergleichsdaten vor.

Die **Stoffstromanalyse für Chloride und Sulfate**, mit der die Einträge aus dem Einsatz mineralischer Abfälle und Materialien als Ersatzbaustoffe mit den Einträgen aus sonstigen Quellen abgeglichen wurde zeigt⁴³, dass:

- Chloride ganz überwiegend durch Auftausalze eingetragen werden. Auch durch die Deposition und Düngung⁴⁴ gelangen deutlich mehr Chloride in

⁴² Hierzu wurde seitens der Interessensgemeinschaft der Aufbereiter und Verwerter von Müllverbrennungsschlacken (IGAM) angemerkt, gravierende Veränderungen in der Aufbereitung seien eher nicht zu erwarten, da die Wirtschaftlichkeit bei der Aufbereitung beachtet werden müsse und die Entsorgung der ausgeschleusten, schadstoffangereicherten Feinfraktion ungeklärt sei.

⁴³ Bei der Bewertung muss berücksichtigt werden, dass aufgrund der Datenlage zahlreiche Abschätzungen notwendig waren, die zwangsweise mit Ungenauigkeiten verbunden sind. Die Tendenz der Aussage ist aber dennoch als gesichert anzusehen.

Boden und Grundwasser als durch Ersatzbaustoffe. Der Anteil der Chloride liegt ungefähr im Bereich von 0,3 bis 1,4 %.

- Der Anteil des Recyclings mineralischer Abfälle und Mineralien am Gesamteintrag von Sulfat mit etwa 10 bis 25 % deutlich höher ist als bei Chlorid.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass ein massiver Einschnitt bezüglich des Einsatzes von Ersatzbaustoffen durch die Neuregelungen des VO-Entwurfs nicht zu erwarten sein wird. Die erhöhten Aufwendungen für die Aufbereitung, die in einigen Bereichen, insbesondere bei den RC-Materialien notwendig sein werden, müssen jedoch durch die Schaffung entsprechender Rahmenbedingungen unterstützt werden, damit die Wirtschaftlichkeit des Recyclings dieser erheblichen Mengen mineralischer Abfälle und Materialien nicht gefährdet wird. Eine besonders wichtige Maßnahme hierzu stellen bereits die Regelungen zur Gütesicherung im VO-Entwurf selbst dar. Hierdurch wird die Konkurrenz durch nicht ordnungsgemäß aufbereitetes Material verhindert. Weitere Maßnahmen sind insbesondere nötig, um auch die Konkurrenzsituation zu den Primärrohstoffen zu verbessern. In dem UFOPLAN-Projekt „Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung schutzgutbezogener und anwendungsbezogener Anforderungen, des potenziellen, volkswirtschaftlichen Nutzens sowie branchenbezogener, ökonomischer Anreizinstrumente“ werden entsprechende Maßnahmen mit allen betroffenen Kreisen diskutiert.

⁴⁴ Der gewollte und mehr oder minder gezielte Eintrag der Salze mit den Düngemitteln ist nur bedingt mit den Salzen vergleichbar, die ungewollt über mineralische Baustoffe oder Auftausalze eingebracht werden, auch wenn der Pflanzenentzug in der Bilanz berücksichtigt wurde.

Literatur

- ABANDA 2006 <http://www.lua.nrw.de/abfall/bewertung/abanda.htm>
- ARGE KWTB 2001 Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau: Monitoring-Bericht Bauabfälle (Folgebericht, Teil 2 – Erhebung: 1998), Berlin/Düsseldorf/Duisburg 2001
- ARGE KWTB 2003 Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau: 3. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung: 2000), Berlin/Düsseldorf/Duisburg 2003
- ARGE KWTB 2005 Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau: 4. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2002), Berlin 2005
- AVV 2002 Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV) v. 10.12.2001, BGBl. I S. 3379, zuletzt geändert am 15.07.2006, BGBl. I S. 1619
- BALA 1999 Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft: Salzstreuung-Auswirkung auf die Gewässer. Merkblatt Nr. 3.2/1, München, September 1999
- Bannick 2006 Bannick, Claus: Anmerkungen zum Eckpunktepapier der LAGA aus Sicht des Bodenschutzes; Bonn 2006; http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/abfw_workshop_bannick.pdf
- Bartke 2006 Bartke, Kurt: Verwendung mineralischer Abfälle bei Verfüllungsmaßnahmen; Bonn 2006; http://www.bmu.de/files/abfallwirtschaft/downloads/application/pdf/abfw_workshop_bartke.pdf
- BAST 2006 Bundesanstalt für Straßenwesen: Schriftliche Auskunft, Bergisch Gladbach November 2006
- BBodSchG 2004 Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG) v. 17.03.1998, BGBl. I S. 502, zuletzt geändert am 09.12.2004, BGBl. I S. 3214
- Bertram 2006 Bertram, Heinz-Ulrich: Die LAGA-Eckpunkte für eine Verordnung über die Verwertung von mineralischen Abfällen; Bonn 2006; http://www.bmu.de/files/abfallwirtschaft/downloads/application/pdf/abfw_workshop_bertram_a.pdf
- BLfU 2000 Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Immissionsökologischer Bericht 2000 - 2001, Augsburg 2003. http://www.bayern.de/lfu/umwelt_qual/
- BLfU 2002 Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Stickstoff- und Säureeintrag in naturnahe Biotope in Bayern seit 1985, Stand 2002. http://www.bayern.de/lfu/tat_bericht/tb_200x/tb_2001/pdf/stickstoff_saeureintrag.pdf
- BMELV 2006 Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Bericht über den Zustand des Waldes 2005. Stand Januar 2006. http://www.bmelv.de/nn_753668/SharedDocs/downloads/01-Broschueren/Waldzustand2005.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/Waldzustand2005.pdf
- BMU 2004 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Hintergrundinformationen zu der neuen Deponieverwertungsverordnung, Stand Dezember 2004; <http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/doc/print/6854.php>

- BMU 2007 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Verordnung zur Regelung des Einbaus von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken und zur Änderung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung; Arbeitsentwurf, - Stand: 13.11.2007 – Bonn/Berlin 2007
- BMVEL 2004 Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft: Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2004, Abteilung 4 „Agrarmärkte, Planungsgrundlagen“, Münster-Hiltrup 2004
- Böhme 2006 Böhme, Martin: Anmerkungen zum Eckpunktepapier aus Sicht des Grundwasserschutzes; Bonn 2006; http://www.bmu.de/files/abfallwirtschaft/downloads/application/pdf/abfw_workshop_boehme.pdf
- BVK 2006 Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte e.V.: http://www.bvk-online.com/bvk_smartm/html/f/4/bundesverband_kraftwerksnebenprodukte_glossar.html
- Czetsch 2002 Czetsch, A.: Thermische Bodenbehandlung – Probleme und Grenzen am Beispiel der Vakuumdestillation, in: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Bodenbehandlung – Stand der Technik und neue Entwicklungen, Fachtagung am 11.06.2002, Augsburg 2002
- DB 2006 DB Netz AG: Rücklauf vom 02.06.2006
- Demmich 2006 Demmich, Jörg: Anmerkungen zum Eckpunktepapier aus der Sicht der betroffenen Wirtschaft; Bonn 2006; http://www.bmu.de/files/abfallwirtschaft/downloads/application/pdf/abfw_workshop_demmich.pdf
- DepVerwV 2005 Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage (Deponieverwertungsverordnung – DepVerwV) v. 25.07.2005, BGBl. I Nr. 46, S. 2252, zuletzt geändert am 15.07.2006, BGBl. I S. 1619
- DIBt 2000 „Bewertung der Auswirkungen auf Boden und Grundwasser“ DIBt Merkblatt von November 2000
- Dihlmann 2006 Dihlmann, Peter: Vollzug in den Ländern: Baden-Württemberg; Bonn 2006; http://www.bmu.de/files/abfallwirtschaft/downloads/application/pdf/abfw_workshop_dihlmann.pdf
- Disse o.J. Markus Disse: Bodenschutz – Erosionsschutz, Teil 2: Bodenschutz Überblick, Vorlesungsskript, Universität der Bundeswehr München
- DWD 2007 Deutscher Wetterdienst – Klimadaten-Online: http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/index_mittelwerte.htm
- Ehrenberg 2000 Ehrenberg, A.; Lang, E.: Optimierung hüttensandhaltiger Zemente zur Steigerung ihrer Anfangsfestigkeit; in: Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken: Eisenhüttenschlacken - Eigenschaften und Nutzung, 119-139, Duisburg 2000
- EU 2001 European Commission: Environmental pressure indicators for the EU, Data 1985-98, Eurostat Theme 8, Environment and energy, Luxemburg 2001
- FGSV 1993a Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von Schmelzkammergranulat im Straßenbau, FGSV 624, Ausgabe 1993

- FGSV 1993b Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von Steinkohlenflugasche im Straßenbau, FGSV 625, Ausgabe 1993
- FGSV 1994a Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von Kesselasche im Straßenbau, FGSV 626, Ausgabe 1994
- FGSV 1994b Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verfestigung von Waschbergen aus der Steinkohlengewinnung mit hydraulischen Bindemitteln, FGSV 631, Ausgabe 1994
- FGSV 1995a Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von Hüttensand in Frostschutz- und Schottertragschichten, FGSV 628, Ausgabe 1995
- FGSV 1995b Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Lieferbedingungen für Waschberge aus der Steinkohlengewinnung als Baustoffe im Straßen- und Erdbau, TL WB-StB 95, FGSV 623, Ausgabe 1995
- FGSV 1998 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von Hüttenmineralstoffgemischen, sekundärmetallurgischen Schlacken sowie Edelstahlschlacken im Straßenbau, FGSV 635, Ausgabe 1998
- FGSV 1999a Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von Eisenhüttenschlacken im Straßenbau, FGSV 634, Ausgabe 1999
- FGSV 1999b Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von Metallhüttenschlacken im Straßenbau, FGSV 639, Ausgabe 1999
- FGSV 1999c Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von Gießereireststoffen im Straßenbau, FGSV 641, Ausgabe 1999
- FGSV 2001 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im Straßenbau – RuA-StB 01, Ausgabe 2001
- FGSV 2002a Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe im Straßenbau, FGSV 616/3, Ausgabe 2002
- FGSV 2002b Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung mineralischer Baustoffe aus Bergbautätigkeiten im Straßen- und Erdbau, FGSV 629, Ausgabe 2002
- FGSV 2003a Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Hinweise zur Verwendung von Braunkohlenflugasche aus Kraftwerken mit Kohlenstaubfeuerung im Erdbau, FGSV 627, Ausgabe 2003
- FGSV 2004a Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB 2004, Stand 27.09.2004
- FGSV 2004b Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau – TL SoB-StB, Stand 27.07.2004, rev. 02.09.2004

- Haupt 2000 Haupt, A.: Sulfat im Grundwasser - Herkunft und Modellierung des reaktiven Transports. Fortschrittberichte VDI, Reihe 15, Nr. 227. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 2000
- Henneberg, Neumann 2006 Henneberg, M; Neumann, R: Stoffpfad Boden – Grundwasser, insbesondere Salzaustrag, beim Einsatz von Baggergut aus Brackgewässern in Land- und Landschaftsbau, Universität Rostock, 4. Rostocker Baggergutseminar, 2006
- Hoffmann 2006 Hoffmann, J.: Entwicklung der biologischen Altlastensanierung in Deutschland, Umwelt meets Biotech – Biologische Verfahren – Chancen für die Umwelttechnologie, Tagung der HA Hessen Agentur GmbH, Frankfurt 23.05.2006
- Hummel 1997 Hummel, H.-U.: Recycling von Gipsplatten, Beitrag zum Darmstädter Massivbau-Seminar 1997, Band 18, Darmstadt 1997
- IVA 2006 Industrieverband Agrar: Wichtige Zahlen – Düngemittel, Produktion, Markt, Landwirtschaft 2005 – 2006; Frankfurt 2006
- K&S 2007 Kali GmbH: <http://www.kali-gmbh.com/duengemittel/fachinfo/beratung> und telefonische Auskünfte
- Klemt 1997 Klemt, K.: Die Verwendung der heute am Markt befindlichen aufbereiteten Abbruchmaterialien, Beitrag zum Darmstädter Massivbau-Seminar 1997, Band 18, Darmstadt 1997
- Knoll 1999 Knoll, E.: Der Elsner 2000. Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen. Otto Elsner Verlagsgestellschaft, 1999
- Knoll 2005 Knoll, E.: Der Elsner 2006. Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen. Otto Elsner Verlagsgestellschaft, 2005
- Knoll 2006 Knoll, E.: Der Elsner 2007. Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen. Otto Elsner Verlagsgestellschaft, 2006
- Krass 2004 Krass, K.; Brüggemann, M.; Görener, E.: Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 2001 - Teil 2: Industrielle Nebenprodukte, Straße + Autobahn 2004 (5), 275-281.
- LAB 1998 Länderausschuss Bergbau: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von Abfällen im Bergbau über Tage – Technische Regeln für den Einsatz von bergbaufremden Abfällen im Bergbau über Tage, Stand Okt. 1998
- LAGA 1994 Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Merkblatt „Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle, Stand 01.03.1994
- LAGA 1997 Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln – Stand 06.11.1997; Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall 20, 4. Aufl., Erich Schmidt Verlag, Berlin 1998
- LAGA 2004a Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: Eckpunkte (EP) der LAGA für eine „Verordnung über die Verwertung von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken“, Stand: 31.08.2004
- LAGA 2004b Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung – 1.2 Bodenmaterial (TR Boden), Stand: 05.11.2004

- LANUV 2007 Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: „Ableitung von Materialwerten und Einbaumöglichkeiten mineralischer Ersatzbaustoffe“; Düsseldorf 2007
- Leidinger 2005 Leidinger, W.; Beyer, J.: Möglichkeiten und Grenzen verschiedener Methoden der Sonderabfallverbrennung, in: UWSF – Z Umweltchem Ökotox 17 (2) 59-63 (2005)
- LfU B.-W. 2004 Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Schlacken aus Hausmüllverbrennungsanlagen in Baden-Württemberg, Karlsruhe 2004
- LfU Bayern 2001 Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Verwertung von mineralischen Abfällen in Asphaltmischanlagen – Arbeitspapier, Stand Sept. 2001
- LfU Bayern 2002 Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Verwertung von MV-Rostschlacke in Bauvorhaben – Abschlussbericht, Augsburg 2002
- LfU Bayern 2003a Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Kontaminierte Bausubstanz – Erkundung, Bewertung, Entsorgung – Arbeitshilfe kontrollierter Rückbau, Augsburg 2003
- LfU Bayern 2003b Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Anforderungen an die Entsorgung von Gleisschotter, Merkblatt, Stand August 2003
- LFUG 2004 Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Jahresbericht zur Immissionssituation 2004
- Lotter 1999 Lotter, S.; Stegmann, R.: Stand der Technik und Wissenschaft bei der Dekontamination von Altlasten; in: Altlastensanierung in Hamburg, Fachtagung 27./28.09.1999
- LPP 2000 Landesanstalt für Pflanzenbau und Pflanzenschutz Rheinland-Pfalz: Sachgerechte Düngung für Acker- und Grünland – Leitfaden, Ausgabe 2000
- LUA NRW 2005 Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: Leistungsbuch Altlasten und Flächenentwicklung 2004/2005, Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Bd. 20, Essen 2005
- LUBW 2006a Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Analytische Untersuchung von Bauschuttrecyclingmaterial in Baden-Württemberg – Untersuchungskampagne 2006, Karlsruhe 2006
- LUBW 2006b Die Luft in Baden-Württemberg, LfU Depositionsmessnetz; 10.2006 (<http://www2.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/luft/depositionsmessnetz/index.php?>)
- LUBW 2007 Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/19583/>
- Lück 2004 Lück, T.: Die weitergehende Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke nach dem Verfahren der Scherer + Kohl GmbH; in: Thomé-Kozmiensky, K. J.: Optimierung der Abfallverbrennung 1, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2004
- Merkel 2002 Merkel, Th.: Erzeugung und Nutzung von Hochofen- und Stahlwerksschlacken, Report des Forschungsinstituts 2002 (1), 5-6.
- MUF-RLP 2004 Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz: Leitfaden Bauabfälle, Mainz 2004

- MUNLV 2006 Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Abfallwirtschaft – Vereinbarung über die rechtliche Behandlung von Hüttensand und Hochofenstückschlacke der Firma ThyssenKrupp Stahl GmbH, Erlass v. 21.01.2006
- Nestler, Grischek 2003 Nestler, W., Grischek, T.: Handbuch Wasserversorgung und Sulfatbelastung des Grundwassers unter land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen. In Zusammenarbeit der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, DVGW-Forschungsstelle TU Hamburg-Harburg, TU Dresden, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V., DVGW Technologiezentrum Wasser Karlsruhe e.V., Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. BMBF-Verbundvorhaben, Mai 2003
- Notter 2006 Notter, Harald: Konsequenzen aus dem „Tongrubenurteil“; Bonn 2006
- Pätzold 1997 Pätzold, H.: Wiederverwendung von Asphalt, Nienburg 1997 (<http://www.ab.fh-hannover.de/bauing/projekte/asphalt/index.htm>)
- RP Gießen 2002 Regierungspräsidium Gießen: Bodenaushub, Vollzugshandbuch der Abfallwirtschaft – Arbeitshilfe Verwertung Nr. 3, Stand 01.01.2002
- Silbe 1997 Silbe, K.: Kosten-Nutzen-Betrachtung im Hinblick auf die Wiederverwertung von Abbruchmaterialien zur Herstellung von Beton, Vortrag im Rahmen des Darmstädter Massivbau-Seminars „Kreislaufgerechtes Bauen im Massivbau“, Darmstadt 1997
- StBA 2004 Statistisches Bundesamt: Umwelt – Abfallentsorgung 2002, Fachserie 19 / Reihe 1, Wiesbaden 2004
- StBA 2005 Statistisches Bundesamt: Umwelt – Abfallentsorgung 2003, Fachserie 19 / Reihe 1, Wiesbaden 2005
- StBA 2006a Statistisches Bundesamt: Umwelt – Abfallentsorgung 2004, Fachserie 19 / Reihe 1, Wiesbaden 2006
- StBA 2006b Statistisches Bundesamt: Abfallaufkommen und Abfallentsorgung in Deutschland 1996 bis 2004, Wiesbaden, Stand Juli 2006
- Suchomel 1994 Suchomel, H.: Schlackemengen und –merkmale aus der Sonderabfallverbrennung mit Drehrohrofen bei flüssigem Schlackeabzug, in: Beihefte zu Müll und Abfall, 31, 1994
- SUI 2006 Staatliches Umweltamt Itzehoe: Atmosphärische Stoffeinträge in Schleswig-Holstein. Stand Juli 2006. http://www.umwelt.schleswig-holstein.de/servlet/is/1447/deposition_in_sh_2005.pdf
- Tittel 2002 Tittel, R.: Bodenwäsche – Probleme und Grenzen, in: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Bodenbehandlung – Stand der Technik und neue Entwicklungen, Fachtagung am 11.06.2002, Augsburg 2002
- UBA 1999 Jahresbericht 1998 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes. UBA-Texte 66/99, Berlin 1999
- UBA 2003 Jahresbericht 2002 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes. UBA-Texte 89/03, Berlin 2003

- UBA-Texte 2003 Gartiser, S.; Reuther, R.; Gensch, C.-O.: Machbarkeitsstudie zur Formulierung von Anforderungen für ein Enteisungsmittel für Straßen und Wege, in Anlehnung an DIN EN ISO 14024; Hydrotex Labor für Ökotoxikologie und Gewässerschutz GmbH und Öko-Institut e.V.; Hrsg. Umweltbundesamt; Berlin 2003
- VGB o.J. VGB PowerTech: Bericht zur Kreislaufwirtschaft von Produkten aus der thermischen Abfallverwertung
- VKS 2006 Verband der Kali- und Salzindustrie e.V.: Absatzstatistik (1989 bis 2005); Juli 2006
- vom Berg 2003 vom Berg: VGB, Persönliche Mitteilung, 16/12/2003
- Wagner 2006 Wagner, Rüdiger: Schlusswort zum BMU-Workshop; Bonn 2006; http://www.bmu.de/files/abfallwirtschaft/downloads/application/pdf/abfw_workshop_wagner_schlusswort.pdf
- Warrelmann 2002 Warrelmann, J.: Biologische Sanierungsverfahren; in: Umweltbundesamt: Leitfaden „Biologische Verfahren zur Bodensanierung, FKZ 1491064, Berlin 2002
- Zwahr 2006 Zwahr, H.: Eigenschaften mineralischer Abfälle – Stand der Aufbereitungstechnik und Untersuchungsverfahren von MVA-Schlacken; BMU-Workshop zu den Anforderungen an die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung mineralischer Abfälle, Bonn 13./14.02.2006