





Ermittlung von Emissionsfaktoren diffuser Stäube

 Bereitstellung einer Arbeitshilfe für die Immissionsschutzbehörden in Baden-Württemberg



Baden-Württemberg

Ermittlung von Emissionsfaktoren diffuser Stäube

 Bereitstellung einer Arbeitshilfe für die Immissionsschutzbehörden in Baden-Württemberg

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.de
BEARBEITUNG	iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG Eisenbahnstr. 43 D-79098 Freiburg Dr. Thomas Damian Constanze Burckhardt Dr. Frank Braun Claus-Jürgen Richter unter Mitarbeit von: Rebecca Bertsch (LUBW) Dr. Bernd-Michael Kemper (LUBW) Thomas Hackbusch (LUBW) Dr. Sebastian Helgert (LUBW) Dr. Eric Wendel (LUBW)
REDAKTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Referat 33 – Luftqualität, Immissionsschutz
BEZUG	PDF-Download unter https://pd.lubw.de/10150
STAND	Juni 2021
SATZ UND BARRIEREFREIHEIT	Satzweiss.com Print Web Software GmbH Mainzer Straße 116 66121 Saarbrücken
TITELBILD	Radlader und mobiler Kiessortierer auf Raupe vor dem Hintergrund der Kiesberge, esalienko/stock.adobe.com
ABBILDUNGSNACHWEIS	siehe Abbildungsverzeichnis
ZITIERVORSCHLAG	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg., 2021): Ermittlung von Emissionsfaktoren diffuser Stäube, Karlsruhe

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

ZUSAMMENFASSUNG		7
1	HINTERGRUND	8
2	VORGEHENSWEISE	9
2.1	Allgemeines	9
2.2	Darstellung der Grundlagen zur Ermittlung der Staubemissionen	9
2.3	Sensitivitätsanalyse der Eingangsgrößen	9
2.4	Literaturrecherche und Umfrage zur Ermittlung gängiger Eingangsgrößen	9
2.5	Erstellung einer IT-Anwendung	10
2.6	Resumée	10
3	BERECHNUNG DER STAUBEMISSIONEN AUS DIFFUSEN QUELLEN	11
3.1	Umschlag und Lagerung	11
3.1.1	Aufnahme und Aufhaldung von Schüttgütern	11
3.1.2	Abwurf von Schüttgütern	12
3.2	Brechen und Sieben	12
3.3	Fahrbewegungen	13
3.3.1	Fahrbewegungen auf befestigten Fahrwegen	13
3.3.2	Fahrbewegungen auf unbefestigten Fahrwegen	13
3.4	Zusammenfassung der wichtigsten Parameter zur Berechnung der Staubemissionen	14
4	SENSITIVITÄTSANALYSE	15
4.1	Allgemeines	15
4.2	Analytische Formelbetrachtung	15
4.3	Auswertung der Einflussgrößen am Beispiel einer typischen Anlage	16
4.3.1	Sensitivität der Parameter für Umschlag- und Aufbereitungsvorgänge	16
4.3.2	Sensitivität der Parameter für Fahrbewegungen	18
4.4	Relevanz der Parameter im Hinblick auf die Ermittlung der Staubemissionen	18
5	ERMITTLUNG DER EINGANGSGRÖSSEN ZUR EMISSIONSBERECHNUNG	20
5.1	Allgemeines	20
5.2	Umschlag und Aufbereitung	20
5.2.1	Materialspezifische Parameter	20
5.2.2	Gerätespezifische Parameter	24
5.2.3	PM ₁₀ -Anteil am Gesamtstaub	30
5.2.4	Minderungsmaßnahmen	31
5.3	Fahrbewegungen	34
5.3.1	Allgemeine Parameter	34
5.3.2	unbefestigte Fahrwege	35
5.3.3	befestigte Fahrwege	37
5.3.4	PM ₁₀ -Anteil am Gesamtstaub	38
5.4	Windabwehungen	38

5.5	Sonderfälle	40
5.5.1	Abkratzen von Kohle aus Lagerhalden	40
5.5.2	Zerkleinern von Schrotten mittels Schrottscheren	40
5.5.3	Zerkleinern von Schrotten mittels Brennschneiden	40
5.5.4	Sprengungen	41
5.5.5	Deponien	41
6	ERSTELLUNG EINER IT-ANWENDUNG	42
7	RESÜMEE	43
7.1	Allgemeines	43
7.2	Staubneigung SN	43
7.3	Umfeldfaktor k_U	45
7.4	Abwurfhöhe H	45
7.5	Schüttdichte ρ_S	46
7.6	Durchsatzleistungen M^*	47
7.7	Korrekturfaktor $k_{Gerät}$	47
7.8	Flächenbelastung sL	47
7.9	Feinkornanteil s	47
7.10	Mittlere Masse der Fahrzeugflotte W	47
7.11	Anzahl der Niederschlagstage p	47
7.12	Kennzahl für Maßnahmenwirksamkeit k_M	48
8	AUSBLICK UND WEITERER UNTERSUCHUNGSBEDARF	49
9	GLOSSAR	51
10	ANHANG	52
10.1	Umfrage	52
10.2	Umschlag und Aufbereitung	55
10.2.1	Schüttdichten	55
10.2.2	Staubinhaltsstoffe	58
10.2.3	PM ₁₀ -Anteil am Gesamtstaub	59
10.2.4	Zuladungen	60
10.2.5	Durchsatzleistungen	63
10.2.6	Dieselmotoremissionen	64
10.2.7	Flottenmittel	64
11	ABBILDUNGEN UND TABELLEN	65
11.1	Abbildungen	65
11.2	Tabellen	65
12	LITERATUR UND QUELLEN	68

Zusammenfassung

Beim Umschlag, der Lagerung und dem Transport von Schüttgütern können diffuse Staubemissionen entstehen. In der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 (2010) und der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 (2018) sind die Grundlagen dargestellt, um diese Emissionen abschätzen zu können. Zur Berechnung sind z. T. Eingangsparameter notwendig, die in den o. g. VDI-Richtlinien nicht aufgeführt sind. Ebenso gibt es Vorgänge, die in den VDI-Richtlinien nicht behandelt werden (z. B. Sprengungen in Steinbrüchen, Brennschneiden auf Schrottplätzen). Die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) hat daher die iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG beauftragt, plausible Eingangsgrößen zu recherchieren.

Dazu wurde zunächst die Sensitivität der Eingangsparameter bzgl. der Emissionsberechnung analysiert. Des Weiteren wurden aus Regelwerken, Fachzeitschriften, Forschungsarbeiten und Gutachten Literaturwerte recherchiert sowie über eine Umfrage bei Sachverständigen Eingangsparameter, die aufgrund mangelnder Erklärung in den VDI-Richtlinien größeren Interpretationsspielraum bieten, abgefragt. Sowohl die Literaturwerte als auch die Umfrageergebnisse weisen teilweise große Streuungen auf. Die zu empfehlenden Werte weichen daher in einigen Fällen von den statistischen Kenngrößen (Median, Mittelwert) ab, sofern sie als unplausibel anzusehen sind.

Für Umschlag- und Transportvorgänge konnte ein Katalog von Eingangsgrößen erstellt werden. Für Prozesse wie Sprengungen oder Brennschneiden wurden aus der Literatur Berechnungsansätze zusammengestellt und durch gängige Emissionsfaktoren unterstützt.

Um den Immissionsschutzbehörden ein einfach zu bedienendes Werkzeug zur Abschätzung diffuser Staubemissionen zu bieten, wurde eine Anwendung mit dem Programm Microsoft Excel 2019 erstellt. Diese kann für eine Plausibilitätsprüfung von Prognosegutachten verwendet werden. Die Bedienanleitung und Erläuterungen zur Anwendung werden in einem separaten Bericht von Damian et al. (2019) dargestellt.

1 Hintergrund

Beim Umschlag und der Aufbereitung von Schüttgütern und Abfällen können diffuse Staubemissionen entstehen, die aufgrund ihrer bodennahen Freisetzung zu erhöhten Staubimmissionen in der Umgebung führen können. In den VDI-Richtlinien 3790, Blatt 3 und Blatt 4 sind Berechnungsansätze beschrieben, um Staubemissionen für bestimmte Tätigkeiten abschätzen und beurteilen zu können.

Die Ansätze in den VDI-Richtlinien decken hauptsächlich Standardfälle für den Umschlag und die Aufbereitung ab und bieten somit Interpretationsspielraum. Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, gängige Eingangsgrößen zur Berechnung der Staubemissionen zu recherchieren und Berechnungsansätze für Tätigkeiten, die in den VDI-Richtlinien nicht aufgeführt sind (z. B. Aufbereitungsvorgänge in Bauschuttrecyclinganlagen), zusammenzutragen. Zu den Eingangsgrößen zählen u. a. Materialeigenschaften wie Staubneigung oder Schüttdichte, aber auch gerätespezifische Parameter wie Abwurfhöhen oder Durchsatzleistungen von Bändern, Brechern oder Sieben. Weiterhin werden Minderungsmaßnahmen behandelt, da z. B. für den Effekt einer Fahrgeschwindigkeitsminderung auf unbefestigten Fahrwegen keine konkreten Hinweise in den VDI-Richtlinien gegeben werden.

Zur Ermittlung der Eingangsgrößen werden Literaturwerte aus Forschungsvorhaben und Berichten recherchiert und

eine Umfrage bei Umweltämtern, Behörden und Sachverständigen durchgeführt. Ferner wird die Sensitivität der Eingangsgrößen analysiert, um den Einfluss eines Parameters auf die Staubemission zu beurteilen.

Die Ergebnisse sollen die Immissionsschutzbehörden in der Beurteilung von Prognosegutachten unterstützen und Gutachtern Eingangsdaten für die Emissionsberechnungen liefern.

Zusätzlich wird eine Excel-Anwendung erstellt, die eine Abschätzung diffuser Staubemissionen von Umschlag- und Aufbereitungsprozessen sowie Fahrbewegungen ermöglicht. Die Anwendung berücksichtigt auch einige Spezialfälle, die nicht in den VDI-Richtlinien beschrieben sind. Ausführliche Informationen sind im Tutorial der Excel-Anwendung aufgeführt.

Am 01. Oktober 2019 hat auf Initiative der LUBW und der iMA Richter & Röckle GmbH ein Fachgespräch stattgefunden. Im Rahmen dieses Fachgesprächs wurden Behördenvertretern und Experten von Ingenieurbüros die Zwischenergebnisse des Forschungsprojekts vorgestellt. Die Anregungen aus den dort erfolgten Diskussionen wurden in diesem Bericht sowie in der Excel-Anwendung berücksichtigt.

2 Vorgehensweise

2.1 Allgemeines

Schwerpunkt der vorliegenden Studie ist die Recherche und das Zusammenstellen plausibler Eingangsgrößen zur Abschätzung diffuser Staubemissionen gemäß den VDI-Richtlinien 3790, Blatt 3 und Blatt 4.

Für folgende Parameter, die in Gutachten häufig unterschiedlich gehandhabt werden, werden Werte zusammengestellt:

- Staubneigungen
- Schüttdichten
- Abkipphöhen von Lkw und Bändern
- Durchsatzleistungen von Aufbereitungsaggregaten
- Leergewichte und Zuladungen von Lkw und Radladern
- Fahrbahnverschmutzungen
- Anzahl an Niederschlagstagen
- Minderungsmaßnahmen

Die Gliederung der Untersuchung ist in den folgenden Kapiteln beschrieben.

2.2 Darstellung der Grundlagen zur Ermittlung der Staubemissionen

Die grundlegenden Formeln zur Ermittlung der Staubemissionen aus diffusen Quellen werden in Kapitel 3 dargestellt. Dies ermöglicht Lesern, die sich vertieft in die Thematik einarbeiten wollen, die Berechnungen nachzuvollziehen.

2.3 Sensitivitätsanalyse der Eingangsgrößen

Einige Parameter wirken sich erheblich auf die Staubemissionen aus, während andere einen vergleichsweise geringen Einfluss haben. Daher wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, mit der eine Hierarchie der maßgeblichen Einflussfaktoren eines Emissionsfaktors abgeleitet wird (siehe Kapitel 4).

Hierzu werden zunächst die Formeln analytisch betrachtet (Kapitel 4.2). Anschließend wird eine typische Bauschuttrecyclinganlage herangezogen, für die alle Einflussparameter nacheinander variiert werden (Kapitel 4.3). Daraus können empirische Werte für die prozentuale Änderung der Staubemission für die jeweiligen Parameter abgeleitet werden.

2.4 Literaturrecherche und Umfrage zur Ermittlung gängiger Eingangsgrößen

Als grundlegendes Regelwerk zur Ermittlung der Eingangsgrößen dienen die VDI-Richtlinien 3790, Blatt 3 und Blatt 4. Darüber hinaus sind in Fachzeitschriften, Forschungsarbeiten und Gutachten Werte und Berechnungsansätze veröffentlicht.

Zusätzlich wurde an 29 Institute bzw. Sachverständige ein Fragebogen verschickt, der in Tabelle 10.1 in Anhang 10.1 dieses Berichts dargestellt ist. Insgesamt haben sich 14 Institute an der Umfrage beteiligt. Darin wurden Größen abgefragt, die in den VDI-Richtlinien nicht oder nur unspezifisch behandelt werden. Die statistische Analyse der Antworten soll die von Sachverständigen verwendeten Werte und deren Schwankungsbreiten ergeben.

Der erste Bereich des Fragebogens behandelt Eigenschaften von Schüttgütern (siehe Kapitel 5.2.1). Dazu zählen die Staubneigung, die Schüttdichte und der PM_{10} -Anteil des freigesetzten Staubes. Obwohl die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 im Anhang, S. 46 ff. eine ausführliche Liste für die Staubneigungen und Schüttdichten verschiedener Materialien angibt, umfasst diese nicht die häufigsten Materialien, z. B. aus dem Abfallbereich. Daher ist es sinnvoll, durch die Umfrage aus Expertenmeinungen gebräuchliche Standards zu ermitteln, insbesondere auch für den nicht explizit geregelten PM_{10} -Anteil.

Ebenso fehlen typische Werte zur Abwurfhöhe von Bändern oder Lkw, die in Teil B des Fragebogens abgefragt werden. Die Abfrage der Abwurfhöhen soll zudem das Spektrum deutlich machen und Begründungen für anzusetzende Höhen liefern (siehe Kapitel 5.2.2.3).

Für den Umfeldfaktor, der den Minderungseinfluss insbesondere von Windschutzmaßnahmen beschreibt, gibt es in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, S. 28 eine ausführliche Tabelle. Es werden jedoch keine Vorschläge gemacht, welcher Umfeldfaktor bei Hallen mit offenen Toren oder bei Lagerboxen angesetzt werden sollte. Dies wird in Teil C der Umfrage behandelt (siehe Kapitel 5.2.2.3).

In Teil D des Fragebogens (siehe Kapitel 5.3.2.1) wird für unbefestigte Fahrwege das Spektrum des Feinkornanteils der Straßenaufgabe abgefragt. Da in der Literatur unterschiedliche Werte veröffentlicht sind, wird durch die Einschätzung von Sachverständigen eine Vereinheitlichung angestrebt.

Zu den in Teil E abgefragten Minderungsmaßnahmen, die in den VDI-Richtlinien nicht explizit behandelt werden, zählen die Befeuchtung und die Reduktion der Fahrgeschwindigkeit (siehe Kapitel 5.2.3 und 5.3.3.1). Hierfür werden plausible Berechnungsverfahren und -faktoren ermittelt.

Emissionsfaktoren zur Berechnung von Dieselmotoremissionen werden in Teil F abgefragt. Teil G (vgl. Kapitel 5.3) enthält die Frage, ob von den Gutachtern eine Windabwehlung von Halden berücksichtigt wird.

Diffuse Staubemissionen aus Brech- und Siebanlagen (zusätzlich zur Emission der Materialaufgabe und des Abwurfs vom

Austragsband) werden in Teil H behandelt. Auch hier liegt der Fokus auf der Beschreibung der Berechnungsansätze.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche und der Umfrage sind in Kapitel 5 beschrieben.

2.5 Erstellung einer IT-Anwendung

Die Berechnungsansätze werden in einer IT-Anwendung mit dem Programm Microsoft Excel 2019 MSO verarbeitet, mit der die Staubemissionen für Umschlag und Transport sowie Sonderfälle abgeschätzt werden können. Damit soll insbesondere den Immissionsschutzbehörden eine einfache Möglichkeit der Überprüfung von Prognosegutachten gegeben werden (Kapitel 6).

2.6 Resumée

Basierend auf der Literaturrecherche und der Umfrage bei den Experten werden typische Werte für die Parameter, die zur Berechnung der Staubemissionen erforderlich sind, empfohlen (Kapitel 7).

3 Berechnung der Staubemissionen aus diffusen Quellen

In diesem Kapitel werden die Berechnungsgrundlagen dargestellt, mit denen die Staubemissionen aus diffusen Quellen ermittelt werden. Die grundlegenden Formeln sind in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 (2010) und der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 (2018) aufgeführt.

Dieses Kapitel beschreibt die grundlegenden Gleichungen der nachfolgenden Kapitel und ist als inhaltliche Vertiefung zu verstehen.

3.1 Umschlag und Lagerung

Pieper (1995a) stellt die Grundlagen für die Formeln zur Berechnung der Umschlagemissionen in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 dar. Die Evaluierung dieser empirisch hergeleiteten Formeln erfolgt in Pieper (1995c). Für homogene Schüttgüter zeigte sich eine gute Übereinstimmung von Messwerten und berechneten Werten, sodass die Berechnungsverfahren in die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 übernommen wurden.

Die normierten Emissionsfaktoren für kontinuierliche und diskontinuierliche Aufnahme- und Abwurfverfahren werden gemäß VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, Nr. 7.2.2.1 wie folgt berechnet:

kontinuierlich: $q_{norm} = a \cdot 83,3 \cdot M'^{-0,5}$ (1)

diskontinuierlich: $q_{norm} = a \cdot 2,7 \cdot M^{-0,5}$ (2)

a Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung eines Stoffs hinsichtlich seiner Neigung zum Stauben.

M' Durchsatz in t/h.

M Abwurf-/Aufnahmemenge in t/(Abwurf bzw. Aufnahme).

Der Gewichtungsfaktor *a* errechnet sich aus:

$$a = \sqrt{10^{SN}} \quad (3)$$

wobei *SN* als „Staubneigung“ bezeichnet wird. Die Staubneigung wird nach Nr. 7.2.3 VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 in folgende fünf Klassen eingeteilt (Tabelle 3.1):

Tabelle 3.1: Staubneigung.

Staubneigung <i>SN</i>	Klasse
außergewöhnlich feuchtes/staubarmes Gut	0
Staub nicht wahrnehmbar	2
schwach staubend	3
mittel staubend	4
stark staubend	5



Zu den in Tabelle 3.1 definierten Werten dürfen auch Zwischenwerte (z. B. *SN* = 1, *SN* = 2,5) verwendet werden.

Für die Aufnahmemasse *M* sind entsprechend Bild 7 der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 folgende Werte anzusetzen:

- Aufnahme mit Zutrimmung: 2 t/Aufnahme
- Aufnahme mit Schaufellader (oder Löffelbagger): 100 t/Aufnahme
- Sonstige Aufnahme ohne Zutrimmung (z. B. Baggergreifer): 700 t/Aufnahme

Die normierten Emissionsfaktoren *q_{norm}* werden zur Berechnung von individuellen Emissionsfaktoren in g_{Staub}/t_{Gut} verwendet.

3.1.1 Aufnahme und Aufhaltung von Schüttgütern

Die Emissionen für die Aufnahme und Aufhaltung staubender Güter werden gemäß VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, Nr. 7.2.2.3 wie folgt anhand des Emissionsfaktors *q_{Auf}* ermittelt.

$$q_{Auf} = q_{norm} \cdot \rho_s \cdot k_U \quad (4)$$

q_{norm} auf $\rho_s = 1 \text{ t}_{Gut}/\text{m}^3$ normierter Emissionsfaktor in $g/t_{Gut} \cdot \text{m}^3/t_{Gut}$.

Der Emissionsfaktor kann aus Bild 7 der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 (2010) entnommen werden.

ρ_s Schüttdichte in t_{Gut}/m^3 des Stoffes.

k_U dimensionsloser Umfeldfaktor.

Der Umfeldfaktor berücksichtigt staubmindernde Maßnahmen, z. B. Absaugung, Kapselung usw. *k_U* = 1 bedeutet, dass keine staubmindernden Einflüsse angenommen werden.

3.1.2 Abwurf von Schüttgütern

Zur Abschätzung der Emissionen für den Abwurf stauender Güter wird gemäß VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, Nr. 7.2.2.5 folgender Ansatz mit dem Emissionsfaktor q_{Ab} gewählt:

$$q_{Ab} = q_{norm} \cdot k_H \cdot k_{Gerät} \cdot 0,5 \cdot \rho_s \cdot k_U \quad (5)$$

q_{norm} normierter Emissionsfaktor auf $\rho_s = 1 \text{ t}_{Gut}/\text{m}^3$ in $\text{g}/\text{t}_{Gut} \cdot \text{m}^3/\text{t}_{Gut}$.

Der Emissionsfaktor ergibt sich in Abhängigkeit von der Staubqualität des Einsatzstoffes und von der Abwurfmenge bei diskontinuierlichen Vorgängen bzw. dem Durchsatz bei kontinuierlichen Vorgängen.

$k_H = \left(\frac{H + H_{Rohr} \cdot k_{Reib}}{2}\right)^{1,25}$ Auswirkungsfaktor zur Berücksichtigung der Abwurfhöhe, wobei H_{Rohr} nur für Schüttrohre ohne Beladepfopf und für Rutschen > 0 ist, sodass üblicherweise $k_H = \left(\frac{H}{2}\right)^{1,25}$.

H freie Fallhöhe des Materials in m.

$k_{Gerät}$ empirischer Korrekturfaktor, der das Abwurfverfahren berücksichtigt.

Greifer: $k_{Gerät} = 2$.

Sonstige diskontinuierliche Abwurfverfahren

(Lkw, Radlader): $k_{Gerät} = 1,5$.

Kontinuierliche Beladegeräte (Schüttrohr, Transportband): $k_{Gerät} = 1$.

ρ_s Schüttdichte des Einsatzstoffes in $\text{t}_{Gut}/\text{m}^3$.

k_U dimensionsloser Umfeldfaktor.

Der Umfeldfaktor berücksichtigt staubreduzierende Maßnahmen, die sich z. B. durch Einrichtungen zur Verminderung der Windangriffsfläche ergeben. $k_U = 1$ ist nur in völlig hindernisfreier Umgebung anzusetzen.

3.2 Brechen und Sieben

Ein geeigneter Ansatz zur Berücksichtigung der Staubemissionen aus Brech- und Siebmaschinen ist in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 1 (2015) und der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 nicht vorgegeben. Es liegt daher im Ermessensbereich des Gutachters, einen geeigneten Ansatz zu wählen.

Eine Möglichkeit ist die Berücksichtigung eines zusätzlichen kontinuierlichen Abwurfs des Materials mit einer Abwurfhöhe von z. B. 0,5 m. Andere Ansätze sind möglich.

Darüber hinaus werden in der BUBE-Online Fachhilfe¹, die im Jahr 2016 als Hilfsmittel zur Berechnung von Staubemissionen bereitgestellt wurde, für das Brechen und Sieben Emissionsfaktoren angegeben. Diese sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.2: Emissionsfaktoren beim Brechen und Sieben in kg/t nach BUBE-Online.

Verfahren -Art		Emission	Aggregatzustand	E-Faktor
Brechen/Vorbrechen von festen nassen Stoffen	00099900	Staub, nicht weiter aufgeteilter Rest	staubförmig	0,005
Brechen/Vorbrechen von festen trockenen Stoffen	00099900	Staub, nicht weiter aufgeteilter Rest	staubförmig	0,025
Brechen/Klassieren von festen nassen Stoffen	00099900	Staub, nicht weiter aufgeteilter Rest	staubförmig	0,003
Brechen/Klassieren von festen trockenen Stoffen	00099900	Staub, nicht weiter aufgeteilter Rest	staubförmig	0,015
Nachbrechen von festen nassen Stoffen	00099900	Staub, nicht weiter aufgeteilter Rest	staubförmig	0,003
Nachbrechen von festen trockenen Stoffen	00099900	Staub, nicht weiter aufgeteilter Rest	staubförmig	0,015



¹ BUBE-Online, 2016: Betriebliche Umweltdatenberichterstattung. Fachhilfe zur Emissionsberechnung (11. BImSchV). Emissionsspektren und Emissionsfaktoren. Bund-/Länder Kooperation VKoopUIS. Version 2.2 vom 01.12.2016.

3.3 Fahrbewegungen

Für befestigte Fahrwege und für unbefestigte Fahrwege sind in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 Berechnungsformeln angegeben.

Die Staubemissionen werden durch folgende Vorgänge verursacht:

- Emissionen aufgrund von Aufwirbelungen von aufliegender Feinkorn,
- Partikelemissionen im Abgas (Dieselmotoremissionen),
- Emissionen durch Abrieb von Reifen und Straßenbelag bei Bremsvorgängen.

3.3.1 Fahrbewegungen auf befestigten Fahrwegen

Die Emissionen aufgrund von Staubaufwirbelungen durch Fahrbewegungen hängen von folgenden Eingangsgrößen ab:

- die Feinkornauflage auf dem Fahrbahnbelag,
- das mittlere Gewicht der Fahrzeugflotte,
- die Anzahl der Niederschlagstage pro Jahr,
- Emissionsminderungsmaßnahmen,
- empirische korngößenabhängige Parameter.

Mit diesen Parametern errechnet sich die Staubemission auf befestigten Fahrwegen (Aufwirbelung von aufliegendem Feinkorn) folgendermaßen:

$$E = k_{Kgv} \cdot (sL)^{0,91} \cdot (W \cdot 1,1)^{1,02} \cdot \left(1 - \frac{p}{3365}\right) \cdot (1 - k_M) \quad (6)$$

- E Emissionsfaktor in g/(km · Fahrzeug).
 k_{Kgv} Faktor zur Berücksichtigung der Korngößenverteilung (siehe Tabelle 3.3).
 sL Flächenbelastung auf dem Fahrbahnbelag in g/m².
 W Mittlere Masse der Fahrzeugflotte in t.
 p Anzahl der Tage pro Jahr mit mindestens 1 mm natürlichem Niederschlag.
 k_M Kennzahl für Maßnahmenwirksamkeit von Emissionsminderungsmaßnahmen.

Die Berechnungsformel berücksichtigt im letzten Term den Faktor 1/3, da befestigte Flächen relativ schnell abtrocknen und die Flächen nach einem Regenereignis nicht während des gesamten Tages feucht sind.

Tabelle 3.3: Korngößenabhängige Faktoren bei befestigten Fahrwegen.

Bezeichnung	PM _{2,5}	PM ₁₀	PM ₃₀
k _{Kgv}	0,15	0,62	3,23



3.3.2 Fahrbewegungen auf unbefestigten Fahrwegen

Eingangsgrößen zur Berechnung der Emissionen durch Staubaufwirbelungen sind:

- der Feinkornanteil des Straßenmaterials,
- das mittlere Gewicht der Fahrzeugflotte,
- die Anzahl der Niederschlagstage pro Jahr,
- Emissionsminderungsmaßnahmen,
- empirische korngößenabhängige Parameter.

Die Staubemission wird nach Nr. 7.3.1 der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 folgendermaßen berechnet:

$$E = k_{Kgv} \cdot \left(\frac{s}{12}\right)^a \cdot \left(\frac{W}{2,7}\right)^b \cdot \left(1 - \frac{p}{365}\right) \cdot (1 - k_M) \quad (7)$$

- E Emissionsfaktor für die Staubaufwirbelung aufgrund von Fahrbewegungen in g/(m × Fahrzeug).
 k_{Kgv} Faktor zur Berücksichtigung der Korngößenverteilung (siehe Tabelle 3.4).
 a, b Korngößenabhängige Exponenten (siehe Tabelle 3.4).
 s Feinkornanteil des Straßenmaterials < 75 µm (bezogen auf Gesamt-Staubbelastung) in %.
 W Mittleres Gewicht der Fahrzeugflotte in t.
 p Anzahl der Tage pro Jahr mit mindestens 1 mm natürlichem Niederschlag.
 k_M Kennzahl für die Wirksamkeit von Emissionsminderungsmaßnahmen.

Tabelle 3.4: Korngößenabhängige Faktoren und Exponenten bei unbefestigten Fahrwegen.

Bezeichnung	PM _{2,5}	PM ₁₀	PM ₃₀
k _{Kgv}	0,042	0,42	1,38
a	0,9	0,9	0,7
b	0,45	0,45	0,45



3.4 Zusammenfassung der wichtigsten Parameter zur Berechnung der Staubemissionen

Die wichtigsten Parameter zur Berechnung der Staubemissionen sind in Tabelle 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.5: Parameter zur Berechnung der Staubemission.

Parameter	Umschlag und Aufbereitung	Fahrbewegungen	Windabwehung
Staubneigung SN	x		
Schüttdichte ρS	x		
Freie Fallhöhe H	x		
Empirischer Korrekturfaktor $k_{Gerät}$	x		
Umfeldfaktor k_U	x		
Abwurfmasse M	x		
Massenstrom M'	x		
Feinkornanteil s		x	
Mittlere Masse der Fahrzeugflotte W		x	
Anzahl der Niederschlagstage p		x	
Flächenbeladung sL		x	
Windgeschwindigkeit vW			x



4 Sensitivitätsanalyse

4.1 Allgemeines

Einige Parameter wirken sich erheblich auf die Staubemissionen aus, während andere einen geringeren Einfluss haben. Daher wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um Hinweise auf den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Staubemission zu liefern.

Einerseits kann durch eine Differenzierung der Formeln (Kapitel 3) eine analytische Aussage getroffen werden, wie groß der Einfluss einzelner Parameter ist (siehe Kapitel 4.2). Zusätzlich wird am Beispiel einer typischen Bauschuttrecyclinganlage ein Ensemble an Emissionsprognosen angefertigt, bei dem Parameter sukzessive variiert werden.

4.2 Analytische Formelbetrachtung

Für eine analytische Betrachtung des Einflusses der Parameter in den Berechnungsformeln kann das vollständige Differential verwendet werden. Vereinfacht ist das totale Differential einer Funktion f mit den zwei unabhängigen Variablen x und y

$$df(x, y) = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy. \quad (8)$$

Da die Variablen in den Gleichungen (4) bis (7) verschiedene Wertebereiche umfassen¹ und daher nicht zwingend unabhängig voneinander sind (z. B. hängen Schüttdichte

ρ_S und Zuladung M voneinander ab) und von keiner gemeinsamen Größe abhängen², ist die Bildung des totalen Differentials streng genommen nicht korrekt. Es lässt sich aber von den Gleichungen ablesen, dass die meisten Parameter als lineare Faktoren Einfluss auf die Emissionsfaktoren haben. Lediglich die Staubneigung SN fließt als Exponent in den Emissionsfaktor ein (vgl. Gleichung (3)). Die Fallhöhe H , die Abwurfmasse M bzw. Massenstrom M' , sowie die Parameter der Fahrbewegungen, Feinkornanteil s , Flächenbeladung sL und mittlere Masse W , bilden die Basis für in die Formeln einfließende Potenzen. Ein exponentieller Einfluss ist im Allgemeinen für eine Gleichung bedeutender als ein linearer. Aufgrund der verschiedenen Wertebereiche der Parameter hängt der Einfluss eines Parameters also stark vom letztlich eingesetzten Wert ab. Mit Hilfe von Tabelle 4.1 kann man ablesen, wie sich die Zunahme eines Parameters auf die Staubemission auswirkt, also Zunahme oder Abnahme der Staubemission. Eine Relevanzstruktur der Parameter lässt sich damit noch nicht herleiten, da alle Parameter eher vom verwendeten Wert als ihrem Exponenten abhängen.

Eine Relevanzstruktur aufgrund der empirisch ermittelten Werte aus einer Bauschuttrecyclinganlage wird in Kapitel 4.3 hergeleitet.

1 Eigentlich sollten die einzelnen Parameter den gleichen Wertebereich, beispielsweise die positiven, reellen Zahlen (Wertebereich 0 bis ∞), umfassen. Während aber die Zuladung theoretisch alle positiven reellen Zahlen beinhalten kann, sind es beim Umfeldfaktor nur die positiven reellen Zahlen von 0 bis 1.

2 In der Physik ist die den Variablen gemeinsame Größe häufig die Zeit t , sodass ein totales Differential der Funktion $f(x(t), y(t))$, wie folgt, geschrieben werden kann: $\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dt}$.

Tabelle 4.1: Einfluss der Zunahme eines Parameters auf den Emissionsfaktor.

Parameter	Zunahme der Staubemission	Abnahme der Staubemission
Umschlag und Lagerung:		
Staubneigung SN	x	
Umfeldfaktor k_U	x	
Freie Fallhöhe H	x	
Schüttdichte ρ_s	x	
Durchsatzleistung/Abwurf-/Aufnahmemasse M'/M		x
Korrekturfaktor $k_{Gerät}$	x	
Zuladung der Fahrzeuge		x
Minderungsmaßnahmen*		x
Fahrbewegungen:		
Flächenbeladung s_L (befestigte Fahrwege)	x	
Feinkornanteil s (unbefestigte Fahrwege)	x	
Mittlere Masse der Fahrzeugflotte W	x	
Zuladung der Fahrzeuge		x
Anzahl der Niederschlagstage p		x
Kennzahl für Maßnahmenwirksamkeit k_M		x

* Minderungsmaßnahmen beim Umschlag können z. B. in Form einer Befeuchtung der Aufbereitungsaggregate vorkommen. Sie können durch einen Faktor $m = (1 - k_M)$ in den Formeln ähnlich wie bei Fahrbewegungen berücksichtigt werden.



4.3 Auswertung der Einflussgrößen am Beispiel einer typischen Anlage

Für eine typische Bauschuttrecyclinganlage werden die Eingangsparameter variiert, um daraus Rückschlüsse auf den emissionsseitigen Einfluss der Eingangsparameter zu gewinnen.

Die staubemittlerenden Vorgänge für das Berechnungsbeispiel sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Der Bauschutt wird per Lkw angeliefert und nach der Entladung per Radlader aufgehaldet. Anschließend wird er per Radlader von der Halde aufgenommen, in einen Brecher aufgegeben und zerkleinert. Per Transportband wird das zerkleinerte Material in ein Sieb ausgetragen. Die so aufbereiteten Abfälle werden per Band auf Halde ausgetragen und bis zum Abtransport zwischengelagert.

Ein Radlader beschickt die abholenden Lkw. Fallen bei einem Prozess neben den Emissionen durch Umschlagvorgänge auch Emissionen durch Lkw- oder Radladerfahrbewegungen an, so ist dies in Abbildung 4.1 blau, bzw. grün markiert.

Um den Einfluss der Eingangsparameter auf die Emissionen einer typischen Bauschuttrecyclinganlage zu untersu-

chen, werden die Emissionen gemäß VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 und VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 ermittelt.

Die in der Emissionsermittlung verwendeten Parameter sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Auf diese Parameter wird im Folgenden als ‚Standardparameter‘ verwiesen.

Um den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Emissionen zu ermitteln, wird jeder Parameter minimal variiert, während alle anderen Parameter festgehalten werden. Je nach Parameter werden zwischen 2 und 7 Emissionsermittlungen durchgeführt. Hieraus ergibt sich ein Ensemble von Emissionsermittlungen aus deren Ergebnis eine Sensitivität der einzelnen Parameter ableiten lässt.

4.3.1 Sensitivität der Parameter für Umschlag- und Aufbereitungsvorgänge

In Tabelle 4.3 sind sowohl die angesetzten Minimal- und Maximalwerte der einzelnen Parameter (für Umschlagvorgänge), als auch deren Einfluss auf die Emissionen dargestellt. Anhand der Spalte „Ab-/Zunahme“ kann abgelesen werden, welchen Einfluss auf die Staubemission die Veränderung eines Parameters um eine Stufe hat. Eine Zunahme der Staubemission wird durch rötlich hinterlegte Zellen, eine Abnahme durch bläulich hinterlegte Zellen beschrieben.



LUBW

Abbildung 4.1: Staubemittierende Vorgänge einer typischen Bauschuttrecyclinganlage.

Den größten Einfluss der Parameter hat in diesem Beispiel die Staubneigung des Schüttguts. Aus einer Änderung der Staubneigung um eine Stufe (z. B. von 2 auf 3) resultiert eine Erhöhung der Emissionen um etwa 72 %. Mit deutlich geringerem Einfluss folgt die Vergrößerung der Bandabwurfhöhe um 0,5 m mit (Erhöhung um etwa 18 % der Staubemission). Eine Befeuchtung an der Brecheraufgabe und am Brecherauslauf würde die Emission der Anlage um

Tabelle 4.2: Parameter für das Berechnungsbeispiel.

Parameter	Einheit	Wert
Staubneigung	–	3
Schüttdichte	t/m ³	1,5
Jahrestonnage (Input)	t/a	50.000
Lkw-Leergewicht	t	10
Lkw-Zuladung	t	10
Fahrweglänge der Lkw auf dem Gelände	m	500
Leergewicht der Radlader	t	12
Zuladung der Radlader	m ³	2,5
Fahrweglänge der Radlader pro Vorgang	m	10
Anzahl der Niederschlagstage	d/a	120
Flächenbelastung der Fahrwege	g/m ²	5
Durchsatzleistung des Austragbands	t/h	150

LUBW

18 % verringern. Den geringsten Einfluss hat in diesem Beispiel die Erhöhung der Abwurfhöhe des Lkw um 0,5 m mit einer Erhöhung der Staubemission um 2 %.

Eine Veränderung der Abwurfmengen bzw. Zuladungen der Lkw und Radlader beeinflusst sowohl die Emissionen aus den Umschlagvorgängen als auch die der Fahrbewegungen. Diese Emissionen wurden in diesem Abschnitt kombiniert betrachtet.

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für Parameter, die sich auf die Emissionen des Umschlags und der Aufbereitung auswirken.

Umschlagparameter	Standardwert	Minimalwert	Maximalwert	Änderung um	Ab-/Zunahme
Staubneigung (ohne Befeuchtung)	3	0	5	1	72 %
Schüttdichte	1,5 t/m ³	0,3 t/m ³	2,0 t/m ³	0,1 t/m ³	6 %
Durchsatzleistung Band	150 t/h	25 t/h	300 t/h	25 t/h	-13 %
Zuladung Lkw	10 t	2,5 t	20 t	1,0 t	-1 %
Schaufelvolumen Radlader	2,5 m ³	1,0 m ³	5,0 m ³	0,5 m ³	-3 %
Greifervolumen Bagger	2,5 m ³	1,0 m ³	5,0 m ³	0,5 m ³	-4 %
Abwurfhöhe Band	1,5 m	0,5 m	3,5 m	0,5 m	18 %
Höhe Bandübergabe	0,5 m	0,2 m	0,8 m	0,1 m	3 %
Abwurfhöhe Lkw	1,5 m	0,5 m	3,5 m	0,5 m	2 %
Abwurfhöhe Radlader	1,0 m	0,5 m	3,5 m	0,5 m	11 %
Befeuchtung bei der Aufgabe in den Brecher und dem Brechvorgang	0 %	0 %	70 %	70 %	-18 %

LUBW

4.3.2 Sensitivität der Parameter für Fahrbewegungen

Für die Parameter, die zur Berechnung der Staubemissionen bei Fahrbewegungen von Bedeutung sind, sind die Ergebnisse in Tabelle 4.4 dargestellt.

Es ist zu beachten, dass die Emissionen der Fahrbewegungen auf die Gesamtanlage bezogen wurden. Da der Emissionsanteil der Fahrbewegungen im vorliegenden Beispiel relativ gering ist, wirken sich einzelne Parameter vergleichsweise wenig aus.

Die wichtigste Einflussgröße ist die Befestigung der Fahrwege. Eine Befestigung der Fahrwege resultiert in einer Reduktion der Emissionen um etwas mehr als 40 %.

Eine Befeuchtung der Fahrwege führt zum Anhaften der Stäube, was bei unbefestigten Fahrwegen eine Verringerung der Staubemission um 17 % bewirkt.

Den geringsten Einfluss auf die Staubemission hat die Anzahl der jährlichen Niederschlagstage bei befestigten Fahrwegen. Eine Erhöhung um 10 Niederschlagstage pro Jahr verringert die Staubemission im vorliegenden Beispiel um weniger als 0,1 %. Es ist aber davon auszugehen, dass sich die Anzahl der Niederschlagstage auch auf die Fahrbahnverschmutzung auswirkt, so dass der Effekt höher sein wird und vom Gutachter zu bewerten ist.

4.4 Relevanz der Parameter im Hinblick auf die Ermittlung der Staubemissionen

Die Sensitivitätsanalyse soll es erleichtern, die Parameter, die zur Berechnung der Staubemissionen erforderlich sind, hinsichtlich ihrer Relevanz zu bewerten.

Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gefundene Relevanzstruktur zunächst nur für das dargestellte Beispiel einer Bauschuttrecycling-Anlage gilt. Die Sensitivität der Parameter ist erheblich vom Anlagentyp abhängig und muss für weitere Anlagen angepasst werden. Zum Beispiel spielen die Fahrbewegungen und somit der Einfluss von Fahrwegbefeuchtungen oder Fahrwegreinigungen bei Anlagen mit großen Fahrweglängen (Deponien, Steinbrüche, Kiesabbaugebiete usw.) eine deutlich größere Rolle als im vorliegenden Beispiel.

Die Ergebnisse des Kapitels 4.3 können bzgl. der prozentualen Veränderung der Staubemission geordnet werden (siehe Tabelle 4.5).

Als wichtigster Einflussparameter lässt sich die Staubneigung identifizieren, was auch an den Formeln in Kapitel 3.1 erkennbar ist. Der Gewichtungsfaktor a geht linear in den Emissionsfaktor ein, wobei die Staubneigung den Gewichtungsfaktor exponentiell beeinflusst (Gleichung 3). Wird die Staubneigung 3 anstatt Staubneigung 2 angesetzt, erhöht sich die Emission um den Faktor 3,2. Weitere wichtige Ein-

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für Parameter, die sich auf Emissionen der Fahrbewegungen auswirken.

Parameter	Standardwert	Minimalwert	Maximalwert	Änderung um	Ab-/Zunahme
befestigter/unbefestigter Fahrweg	befestigt	--	--	befestigt → unbefestigt	43 %
Leergewicht	10 t	2,5 t	20,0 t	1,0 t	0,4 %
Fahrweg Radlader pro Vorgang	10 m	10 m	100 m	10 m	5 %
Länge Fahrweg	500 m	100 m	1500 m	100 m	1 %
Flächenbeladung (befestigt)	5 g/m ²	2 g/m ²	60 g/m ²	2 g/m ²	2 %
Feinkornanteil (unbefestigt)	8 %	2 %	10 %	2 %	10 %
Niederschlagstage (befestigt)	110 d/a	80	140	10	-0,05 %
Niederschlagstage (unbefestigt)	110 d/a	80	140	10	-1,4 %
Minderung der Fahrgeschwindigkeit (befestigt)	0 %	0 %	20 %	20 %	-1 %
Minderung der Fahrgeschwindigkeit (unbefestigt)	0 %	0 %	50 %	50 %	-17 %
Befeuchtung (unbefestigt)	0 %	0 %	50 %	50 %	-17 %

LUBW

flussgrößen sind die Abwurfhöhe und Durchsatzleistung von Bändern, die Befeuchtung von Aufbereitungsaggregaten, die Minderung der Fahrgeschwindigkeit auf unbefestigten Fahrwegen sowie die Befeuchtung und Befestigung der Fahrwege. Der Einfluss der Abwurfhöhe von Bändern geht auch aus Düring & Sörgel (2014) hervor. So zieht eine Erhö-

hung der Abwurfhöhe von 1,0 m auf 1,5 m eine Erhöhung der Emission des Bandabwurfs um 66 % nach sich.

Weniger relevant sind hingegen die Anzahl der Niederschlagstage pro Jahr und das Leergewicht der Lkw.

Tabelle 4.5: Relevanz der Eingangsparameter zur Berechnung der Staubemission einer Bauschuttrecyclinganlage.

Parameter	Änderung bezüglich des Standardfalls
Staubneigung	72,2 %
Fahrweg befestigt/unbefestigt	43,1 %
Abwurfhöhe von Band	18,1 %
Befeuchtung an Aufgabe/Abwurf Brecher/Sieb	18,0 %
Minderung Fahrgeschwindigkeit (unbefestigte Fahrwege)	17,5 %
Befeuchtung Fahrwege (unbefestigte Fahrwege)	17,5 %
Transportleistung des Austragsbands	12,6 %
Abwurfhöhe vom Radlader	11,3 %
Feinkornanteil (unbefestigte Fahrwege)	9,9 %
Schüttdichte	5,6 %
Fahrweglänge Radlader	4,9 %
Greifervolumen Bagger	3,5 %
Abwurfhöhe an Bandübergaben	3,2 %
Schaufelvolumen Radlader	3,0 %
Abwurfhöhe aus Lkw	2,3 %
Flächenbeladung (befestigte Fahrwege)	2,2 %
Minderung der Fahrgeschwindigkeit (befestigte Fahrwege)	1,4 %
Anzahl der Regentage pro Jahr (unbefestigte Fahrwege)	1,4 %
Länge des Lkw-Fahrwegs	1,2 %
Zuladung der Lkw	1,0 %
Leergewicht der Lkw	0,4 %
Regentage (befestigt)	0,05 %



5 Ermittlung der Eingangsgrößen zur Emissionsberechnung

5.1 Allgemeines

Die Ansätze in den VDI-Richtlinien 3790, Blatt 3 und Blatt 4 wurden für den Umschlag von Schüttgütern und für Fahrbewegungen abgeleitet. Mangels besserer Erkenntnisse werden sie in der Praxis auch auf andere Materialien (z. B. Schrotte) und andere Vorgänge (z. B. Brechen und Sieben) angewendet.

Für viele derartige Anwendungen sind in den VDI-Richtlinien 3790, Blatt 3 und Blatt 4 keine Werte angegeben. Daher werden in diesem Kapitel die wichtigsten Eingangsgrößen zur Berechnung der Staubemissionen anhand von Literaturquellen recherchiert und zusammengestellt. Zusätzlich werden die Ergebnisse einer Umfrage, die bei Fachbehörden und Gutachtern durchgeführt wurde, ausgewertet.

Die Eingangsgrößen sind in die Bereiche „Umschlag und Aufbereitung“ (Kapitel 5.2), „Fahrbewegungen“ (Kapitel 5.3), „Windabwehungen“ (Kapitel 5.4) und „Sonderfälle“ (Kapitel 5.5) unterteilt.

Untersuchungen von Düring & Sörgel (2014) zeigen, dass die VDI-Richtlinie die Emissionen aus der Lkw-Verladung einschließlich Transport um den Faktor 2 bis 3 überschätzt, ebenso die Emissionen aus den Vorgängen Brechen, Sieben, Umlagern, gefasste Quellen sowie Bahnverladung. Die Emissionen aus den Abwehungsprozessen werden um den Faktor 2 überschätzt.

Auch Strobl & Kuntner (2014) stellen eine Überschätzung von Staubemissionen gegenüber Messdaten fest. Sie weisen insbesondere auf die überschätzten Staubemissionen von kontinuierlichen Abwurfverfahren (Bandabwürfe, Bandübergaben) hin. Daher wurden von BMWFJ (2013) die Formeln der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 entsprechend verändert.

Messstudien von Tudeshki, Xu & Feldbach (2008), die den Umschlag von Steinkohle untersuchen, sowie Forschungsergebnisse von Braun et al. (2012) für den Stein- und

Braunkohleumschlag kommen ebenso zum Schluss, dass die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 die Staubemission überschätzt. Umso wichtiger ist eine verlässliche Schätzung der Eingangsparameter.

5.2 Umschlag und Aufbereitung

Unter „Umschlag“ werden Materialbewegungen wie das Entladen von Lkw, Aufhalten per Radlader, Sortieren per Bagger, Aufgabe in Brecher oder Siebe, Abwurf von Bändern, Verladen in Lkw usw. verstanden. „Aufbereitung“ bedeutet die Zerkleinerung und ggf. das Sieben von Materialien.

Für die Vorgänge „Umschlag und Aufbereitung“ werden die Eingangsgrößen zusammengetragen, die zur Berechnung der Emissionen gemäß VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 Verwendung finden.

5.2.1 Materialspezifische Parameter

Zur Berechnung von Emissionsfaktoren sind Eingangsgrößen nötig, die vom umgeschlagenen Material abhängen. Hierzu gehören die Staubneigung (Kapitel 5.2.1.1), die Schüttdichte (Kapitel 5.2.1.2) sowie Inhaltsstoffe (Kapitel 5.2.1.3).

5.2.1.1 Staubneigung

Einer der wichtigsten Einflussparameter zur Ermittlung der Staubemission eines Schüttguts ist dessen Staubneigung, da der Emissionsfaktor exponentiell von der Staubneigung abhängt (vgl. Gleichung (3)). Die Staubneigung beschreibt die Neigung eines Stoffes zum Stauben.

Die Staubneigung ist wesentlich von der Materialfeuchte abhängig. Aus der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 kann abgeleitet werden, dass ein Schüttgut ab einem Feuchtegehalt von mindestens 3 % als feucht angesehen werden kann (Wichert (2019)).

Beobachtungen des Umschlages der Schredderleichtfraktion (SLF) auf einem Schrottplatz zeigen, dass diese bei einem Feuchtegehalt 5 % nicht mehr staubt.¹

¹ Eventuell kommt es bei der SLF auch bei einem Feuchtegehalt < 5 % zu keiner Staubentwicklung, das wurde nicht untersucht.

Tabelle 5.1: Staubneigung mineralischer Schüttgüter. Quelle: BMWFJ (2013).

Material	Gewichtungsfaktor a*	Staubneigung SN	Materialeigenschaft
Bauschutt, Betonabbruch, Asphaltbruch, Kalkstein	10	2	stark staubend
Schotter, Kies oder Sand (gelagert)	3,2	1	leicht bis deutlich staubend
Schotter, Kies, Sand, Bodenaushub oder Tunnelausbruch (erdfeucht bis nass verarbeitet)	1	0	schwach bis nicht wahrnehmbar staubend

* In der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 wird der Gewichtungsfaktor a aus der Staubneigung SN wie folgt berechnet: . Der Gewichtungsfaktor a = 10 entspricht also einer Staubneigung SN von 2, was in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 die Eigenschaft „Staub nicht wahrnehmbar“ beschreibt, während es vom BMWFJ (2013) als „stark staubend“ bezeichnet wird. Die Emissionsfaktoren nach BMWFJ (2013) sind somit deutlich niedriger als nach VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3.



Laut Aussage des Betreibers einer Bauschuttrecyclinganlage tritt beim Brechen und Sieben von Beton kein Staub mehr auf, wenn der Feuchtegehalt des Materials zwischen 4 % bis 5 % liegt.

Die Staubneigung wird gemäß VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, S. 21 visuell bei einer Abwurfhöhe von 2 m bestimmt. In den Anhängen A und B der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, S. 46ff. sind Tabellen mit Staubneigungen, aufgeteilt in organische und anorganische Schüttgüter, dargestellt. Diese gehen auf Pieper (1995b) zurück. Für viele gebräuchliche Schüttgüter sind keine Staubneigungen angegeben, sodass diese entweder durch visuelle Eindrücke ermittelt oder aus anderen Forschungsarbeiten entnommen werden müssen.

Vom österreichischen Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend werden für eine Reihe mineralischer Schüttgüter Hinweise zur Staubneigung angegeben, die in Tabelle 5.1 vereinfacht zusammengefasst sind (BMWFJ (2013)). Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass für den Gewichtungsfaktor a andere Definitionen als in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 zugrunde gelegt werden.

Untersuchungen von Londershausen & Schmidt (2018) zur analytischen Bestimmung der Staubneigung liefern keine quantitativen Aussagen bezüglich der Partikelgrößenfraktionen des Schüttguts, weil die Prozesse zur Freisetzung von Staub sehr komplex sind. Die Bestimmung der Staubneigung nach visueller Einschätzung gemäß VDI-Richtlinie ist folglich als Standard anzunehmen.

Da die visuelle Methode subjektiv ist und Expertenwissen fordert, kann die Umfrage (siehe Kapitel 2.4) eine statistische Aussage zu Staubneigungen treffen, die als Richtwert zur Berechnung von Emissionsfaktoren dienen kann.

In Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der Umfrage dargestellt. Die Tabelle enthält die Kenngrößen Mittelwert, Median, Minimum, Maximum, sowie die 20- und 80-Perzentile. Der Median ist grün hinterlegt, da er im Gegensatz zum Mittelwert die üblicherweise verwendeten Staubneigungskategorien liefert und weniger sensibel auf Ausreißerwerte reagiert.

Für Eisen- und Nichteisen-Schrotte sind vom Landesamt für Umwelt, Natur und Verbraucherschutz NRW (LANUV) weitere Aussagen bezüglich der Staubneigungen bekannt. Für Eisen-Schrotte wird üblicherweise die Staubneigung 2 angenommen, wobei der Einzelfall berücksichtigt werden sollte, da bei besonders kleinteiligen, stark korrodierten oder mit hohem Fremdstoffanteil versehenen Fraktionen auch eine höhere Staubneigung in Erwägung gezogen werden kann (Wichert (2019)).

Für Nichteisen-Schrotte und Edelstähle wird ein Siebtel der Staubneigung von Eisen-Schrotten angesetzt, was einer Staubneigung von etwa 1 entspricht. Dies ist abhängig vom Reinheitsgrad und dem Fremdstoffgehalt der Nichteisen-Fraktion. Bei höherem Anteil von Fremdstoffen sollte eine höhere Staubneigung angesetzt werden.

5.2.1.2 Schüttdichte

Die Schüttdichte eines Materials, angegeben in t/m^3 , geht linear in die Gleichung des Emissionsfaktors ein. Die Anhänge A und B der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, S. 46 ff. enthalten Angaben für eine Vielzahl von Schüttgütern (nach Pieper (1995b)). Vielfach handelt es sich jedoch um Wertespanssen, die zwar den Bereich eingrenzen, dennoch zu deutlichen Unterschieden in der Berechnung des Emissionsfaktors führen.

Weitere Werte für Schüttdichten finden sich in der Literatur. Für mineralische Schüttgüter wird vom BMWFJ (2013)

Tabelle 5.2: Umfrageergebnisse zur Staubneigung SN (Definition siehe Kapitel 5.2.1.1).

Schüttgut	Anzahl Werte N	Mittelwert	Minimum	20 %- Perzentil	Median	80 %- Perzentil	Maximum
Boden	11	2,4	1,5	2,0	2,5	3,0	3,0
Boden (erdfeucht)	12	1,8	0,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Bauschutt	13	3,1	2,5	3,0	3,0	3,0	4,0
Bauschuttgemische	13	3,2	2,5	3,0	3,0	3,8	4,0
Baustellenmischabfälle	12	2,7	1,5	2,5	3,0	3,0	3,0
Gipshaltige Baustoffe	10	3,7	3,0	3,4	4,0	4,0	4,0
Beton (grob)	13	2,7	2,0	2,2	3,0	3,0	3,0
Erdaushub	13	2,4	1,5	2,0	2,0	2,8	4,0
Sand	13	2,6	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
Kies	13	2,4	1,5	2,0	2,5	3,0	3,0
RC-Material	12	2,7	1,5	2,1	3,0	3,0	4,0
Straßenaufbruch	13	2,6	1,0	2,0	2,5	3,0	4,0
Splitt	11	2,6	2,0	2,0	2,5	3,0	3,5
Gleisschotter	14	2,6	1,5	2,3	3,0	3,0	3,0
Gesteinsbruch	10	2,9	1,0	3,0	3,0	3,0	4,0
Brechsand	9	2,9	2,0	2,6	3,0	3,2	4,0
Pflastersteine	8	1,9	0,0	1,6	2,0	2,5	3,0
Siebschutt	7	3,2	2,0	3,0	3,0	3,9	4,0
Gewerbeabfall	12	2,2	1,0	2,0	2,0	2,9	3,0
Schrott	8	1,6	0,0	0,8	2,0	2,2	3,0
Metall	6	1,3	0,0	0,0	1,0	2,4	3,0
Stahl	6	1,3	0,0	0,0	1,0	2,4	3,0
Altglas	3	0,7	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0
Altholz	10	2,0	0,0	1,6	2,3	2,5	3,0
PPK (Papier, Pappe, Kartonnagen)	8	1,5	0,0	0,0	2,0	2,0	3,0
Kunststoffe	6	1,5	0,0	0,8	2,0	2,0	2,0
Verpackungsabfall	6	1,3	0,0	0,0	2,0	2,0	2,0
Bioabfall	8	1,5	0,0	0,8	1,7	2,1	3,0
Klärschlamm	4	1,1	0,0	0,0	1,4	2,0	2,0
Restmüll	7	2,1	1,5	2,0	2,0	2,4	3,0
Grünschnitt, frisch	6	1,3	0,0	0,4	1,7	2,0	2,0
Grünschnitt, gehäckselt	7	1,5	0,0	0,8	2,0	2,0	2,5
Frischkompost (feucht)	5	1,0	0,0	0,0	1,0	2,0	2,0
Fertigkompost (trocken)	10	2,3	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0
Getreide	9	3,2	3,0	3,0	3,0	3,5	4,0
Futtermittel	7	3,2	3,0	3,0	3,0	3,4	4,0
EBS-Inputmaterial	8	2,3	1,0	2,0	2,3	2,8	3,0
EBS zerkleinert	7	2,3	1,0	2,0	2,5	2,9	3,0
Düngemittel	7	3,6	3,0	3,0	3,0	4,0	5,0

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Umfrage zur Schüttdichte.

Schüttgut	Anzahl Werte N	Mittelwert	Minimum	20 %- Perzentil	Median	80 %- Perzentil	Maximum
Boden	10	1,6	1,3	1,6	1,6	1,8	1,8
Boden (erdfeucht)	9	1,7	1,4	1,6	1,8	1,8	2,0
Bauschutt	9	1,5	1,1	1,3	1,6	1,6	1,8
Bauschuttgemische	10	1,5	0,9	1,3	1,6	1,7	1,8
Baustellenmischabfälle	9	1,0	0,3	0,5	1,3	1,5	1,7
Gipshaltige Baustoffe	7	0,7	0,3	0,3	0,4	1,2	1,5
Beton (grob)	8	1,7	1,3	1,5	1,6	1,8	2,2
Erdaushub	9	1,6	1,4	1,5	1,6	1,8	1,8
Sand	9	1,8	1,5	1,6	1,8	1,8	2,0
Kies	8	1,7	1,5	1,5	1,8	1,8	1,8
RC-Material	9	1,7	1,4	1,6	1,7	1,8	1,8
Straßenaufbruch	10	1,6	1,0	1,5	1,7	1,8	1,8
Splitt	9	1,6	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8
Gleisschotter	10	1,6	1,4	1,5	1,6	1,8	1,8
Gesteinsbruch	6	1,5	1,2	1,2	1,6	1,7	1,8
Brechsand	5	1,6	0,8	1,4	1,8	1,8	1,8
Pflastersteine	3	1,4	1,2	1,3	1,5	1,6	1,6
Siebschutt	4	1,0	0,5	0,7	1,0	1,4	1,6
Gewerbeabfall	5	0,6	0,2	0,3	0,4	0,7	1,5
Schrott	6	1,0	0,5	0,7	0,9	1,0	1,8
Metall	3	0,9	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2
Stahl	4	2,1	0,7	0,8	1,0	2,9	5,5
Altglas	7	0,7	0,3	0,4	0,8	1,0	1,2
Altholz	10	0,4	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8
PPK (Papier, Pappe, Kartonnagen)	6	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4
Kunststoffe	6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
Verpackungsabfall	7	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4
Bioabfall	6	0,4	0,2	0,3	0,4	0,7	0,7
Klärschlamm	5	1,0	0,7	0,9	1,1	1,1	1,2
Restmüll	6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6
Grünschnitt, frisch	8	0,4	0,2	0,3	0,3	0,4	0,8
Grünschnitt, gehäckselt	8	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5	0,8
Frischkompost (feucht)	7	0,8	0,5	0,6	0,8	1,1	1,2
Fertigkompost (trocken)	8	0,7	0,5	0,6	0,7	0,8	1,2
Getreide	3	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8
Futtermittel	2	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
EBS-Inputmaterial	3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4
EBS zerkleinert	3	0,3	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
Düngemittel	1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

grundsätzlich eine Schüttdichte von 1,6 t/m³ vorgeschlagen, falls keine anderen Vorgaben gemacht werden.

Von einem abfallwirtschaftlichen Betrieb wird die Tabelle 10.2 in Anhang 10.2.1 verwendet. Die Schüttgüter sind in dieser Tabelle nach AVV-Nummern sortiert, betreffen allerdings Abfälle.

Weitere gängige Schüttdichten wurden durch die Umfrage ermittelt. Sie sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Hier wird der Mittelwert grün hinterlegt, da er für die Schüttdichte das geeignete Maß darstellt. Während bei Böden Schüttdichten zwischen 1,3 t/m³ und 1,8 t/m³ angegeben werden, ist die Schwankungsbreite bei Sanden oder Kiesen deutlich geringer.

5.2.1.3 Staubinhaltsstoffe

Staubinhaltsstoffe sind beim Umschlag und der Aufbereitung von Schüttgütern, die einen erhöhten Anteil an potenziell gesundheitsschädlichen Inhaltsstoffen aufweisen, zu berücksichtigen. Bei mineralischen Schüttgütern handelt es sich üblicherweise um Abfälle, die in Deponien der Klassen DK 1 und höher eingebaut werden oder die den Zuordnungswerten Z1.2 oder höher entsprechend der Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums Baden-Württemberg für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial (AbfR 4.2.8 (2007)) zuzuordnen sind.

Bei Althölzern sind Staubinhaltsstoffe bei den Klassen A3 und A4 von Bedeutung.

Als plausibler Ansatz wird üblicherweise davon ausgegangen, dass die beim Umschlag und der Aufbereitung emittierten Stäube die gleichen Staubinhaltsstoffgehalte wie die Ausgangsmaterialien enthalten.

Zur Abschätzung der Staubinhaltsstoffgehalte werden in der Praxis folgende Ansätze verwendet:

- Verwendung der 80 %-Perzentile der Inhaltsstoffgehalte von Abfällen aus der Abfalldatenbank des Landes Nordrhein-Westfalen, ABANDA, 2019 (vgl. Tabelle 5.4 mit einigen typischen Abfällen).
- Entnahme von Kehrproben im Bereich der Emissionsquellen und Analyse der Schluff-Fraktion (< 123 µm). Kehrproben von Schrottplätzen, die vom Regierungspräsidium Gießen zusammengestellt wurden, sind in Tabelle 10.3 bis Tabelle 10.5 dargestellt (Gülchhre (2019)).
- Verwendung von Annahmegrenzwerten aus einschlägigen Regelwerken (z. B. DIN EN 10020 (2000), AbfR 4.2.8 (2007)).

Tabelle 5.4 enthält beispielhaft Staubinhaltsstoffgehalte aus der ABANDA-Datenbank für einige Abfälle.

5.2.2 Gerätespezifische Parameter

In diesem Kapitel werden die gerätespezifischen Eingangsgrößen, die zur Berechnung der Emissionen bei Umschlag- und Aufbereitungsprozessen erforderlich sind, dargestellt.

Tabelle 5.4: Staubinhaltsstoffgehalte aus der ABANDA-Datenbank (80 %-Perzentile, Stand: 12.05.2021).

Inhaltsstoff	170106 (3052) Beton-, Ziegel-, Fliesen- u. Keramikgemische oder Fraktionen, die gefährliche Stoffe enthalten (mg/kg)	030105 (101) Sägemehl, Späne, Abschnitte, Holz, Spanplatten und Furniere ohne 030104 (mg/kg)	120102 (24) Eisenstaub und -teilchen (mg/kg)	90112 (735) Rost- u. Kessel- aschen, Schlacken m. Aus- nahme derjenigen, die unter 190111 fallen (mg/kg)
Arsen	15	2,52	45,4	18
Blei	210	115	3196	1022
Cadmium	1,61	0,588	15,8	6,1
Nickel	40	3,31	654	230
Quecksilber	0,64	0,08	0,152	1,4
Thallium	1		0,5	1,9
Chrom	42,2	22,5	1795	430
Kupfer	110	20,3	1346	3099
Vanadium	116			100
Benzo(a)pyren	6	1,5		0,3



Tabelle 5.5: Zusammenfassung der Kehrproben der RP Gießens auf Schrottplätzen. Quelle: verändert nach Gülcehre (2019).

Stoff	Shredder Eingangslager	Shredder Ausgangslager	Schere Eingangslager	Schere Ausgangslager	Presse	Paketierpresse Eingangslager	Paketierpresse Ausgangslager	Mischprobe der Fahrwege /ggf. über Kehrmaschine	Sonstige Orte mit Kehrproben
Cadmium [mg/kg TS]	39	48	4,8–7,5	7–17	15–16	7,2	30	5,8–11	15
Zink [mg/kg TS]	17000	17600	18800–12200	5030–28300	3060–9100	24000	51600	19200–20800	6800
Thallium [mg/kg TS]	0,35	0,39	0,12–16	<NW–29	< NW	0,22	0,15	0,12–4,5	--
Nickel [mg/kg TS]	1190	1070	648	130–605	160–1780	1130	1780	539–5980	280
Blei [mg/kg TS]	2150	2060	1640–2040	1300–5270	780–1200	631	1840	1230–3830	1300
Chrom [mg/kg TS]	2020	1320	674–781	180–664	220–3580	1570	11500	740–5330	370
Kupfer [mg/kg TS]	4510	6290	249–672	494–1140	670–1830	1600	3130	940–11700	870
Arsen [mg/kg TS]	52	40	14–27	13–75	15–27	25	45	26–34	18



Die Zuladungen der Transportfahrzeuge (in t) sind im Hinblick auf die Masse des zu entladenen Guts von Bedeutung. Die Masse des Guts spielt auch beim Abwurf von Radladern und Baggern eine Rolle. Auf die Zuladungen wird in Kapitel 5.2.2.1 eingegangen.

Bei Förderbändern sind die Förderleistungen in t/h von Bedeutung (siehe Kapitel 5.2.2.2).

Bei allen Umschlaggeräten ist darüber hinaus die Abwurfhöhe ein wichtiger Parameter zur Berechnung der Staubemission (siehe Kapitel 5.2.2.3).

Umfeldfaktoren zur Berücksichtigung von Einhausungen und sonstigen baulichen Maßnahmen werden in Kapitel 5.2.2.4 dargestellt.

5.2.2.1 Zuladungen

Die Zuladungen der Lkw, Radlader und Bagger sind projektabhängig, sodass ein Standardwert hierfür nicht ableitbar ist. Hingegen liefern Aussagen der Anlagenbetreiber die notwendigen Informationen.

Bei abfallwirtschaftlichen Anlagen variieren insbesondere die Zuladungen der anliefernden Fahrzeuge über einen großen Bereich. Da die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 ein mittleres Fahrzeuggewicht verlangt, ist es Aufgabe des Gutachters, einen plausiblen Wert aus den Angaben des Anlagenbetreibers abzuleiten.

Im Folgenden werden die Zuladungen von Fahrzeugflotten der gängigen Lkw-, Radlader-, Löffelbagger- und Greifer-Bagger-Hersteller untersucht, um einen Durchschnitts-

Tabelle 5.6: Zuladungen verschiedener Lkw-Hersteller bzw. Unternehmer.

Hersteller/Unternehmen	Typ	Zuladung (t)
Glück*1	Klein-Lkw	3,2
	2-Achser	9,6
	3-Achser	14,4
	Sattelzug	26,8
	Sattelzug	26,1
	Sattelzug	25,2
	Sattelzug	23,9
	Sattelzug	23,9
	2-Achser	8,7
	3-Achser	11,0
Fuhrpark Hasse*2	Sattelzug	22,0
	2-Achser	7,5
	2-Achser	9,0
	3-Achser	15,0
Zürcher*3	4-Achser	18,0
	Lieferwagen	0,8
	Lieferwagen	1,1
	2-Achser	9,0
	3-Achser	14,0
	4-Achser	18,0
	5-Achser	24,0
	Mittelwert	14,8

Quellen:

*1 <https://www.glueck-kies.de/kies-sand-hartsteinsplitt/transport.php> (Stand: Mai 2019)

*2 <https://www.hasse-transport.de/fuhrpark/#/page/1> (Stand: Mai 2019)

*3 <https://www.hasse-transport.de/fuhrpark/#/page/1> (Stand: Mai 2019)

wert zu erhalten. Dieser kann bei fehlenden Angaben des Anlagenbetreibers einen Richtwert darstellen.

In Tabelle 5.6 sind Lkw-Zuladungen von drei Herstellern zusammengestellt. Daraus ergibt sich eine mittlere Zuladung von ca. 15 t, was einem 3-Achsen-Lkw entspricht. Es handelt sich um einen Durchschnittswert, der je nach Anlagentypus variieren kann. Im Berechnungsbeispiel der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 wird ebenfalls eine Zuladung von 15 t pro Lkw angenommen, sodass es sich um einen typischen Wert handeln dürfte. Grundsätzlich sollte jedoch die spezifische Fahrzeugflotte der Anlage angesetzt werden, sofern entsprechende Daten geliefert werden können.

Analog sind Radlader-Zuladungen von zwei Herstellern in Tabelle 5.7 dargestellt. Von den Herstellern werden minimale und maximale Schaufelvolumina angegeben, sodass im Mittel eine Zuladung von 3 m³ angenommen werden kann. Anlagenspezifische Radlader sollten jedoch berücksichtigt werden.

Tabelle 5.7: Zuladungen verschiedener Radlader.

Hersteller	Modell	Minimaler Schaufelinhalt (m ³)	Maximaler Schaufelinhalt (m ³)
Liebherr*4	L 506 Compact	0,7	0,8
	L 507 Stereo	0,8	1,6
	L 508 Compact	0,9	1,0
	L 509 Stereo	1,0	2,0
	L 514 Stereo	1,4	3,5
	L 518 Stereo	1,5	4,0
	L 526	1,8	2,3
	L 538	2,3	2,8
	L 546	2,5	3,1
	L 550 Xpower	3,2	3,6
	L 556 Xpower	3,6	4,0
	L 566 XPower	4,2	4,7
	L 576 Xpower	4,7	5,2
L 580 Xpower	5,2	5,7	
L 586 Xpower	5,5	8,5	
Kramer*5	KL10.5	0,3	
	KL12.5	0,4	
	KL19.5	0,6	
	KL25.5e	0,7	
	KL31.5	0,8	
	KL37.5	1,0	
	KL37.8	1,0	
	KL43.8	1,2	
	KL60.8	1,4	1,6
Mittelwert	1,9	3,4	

Quellen:

*4 <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/baumaschinen/erdbewegung/radlader/radlader.html?measureUnit=metric&size=10&page=1> (Stand: Mai 2019)

*5 <https://www.kramer-online.com/de/branchen-produkte/landwirtschaft/radlader/> (Stand: Mai 2019)

Die Rechercheergebnisse für Greifer-Bagger und Löffelbagger sind in Tabelle 10.7 und Tabelle 10.8 in Anhang 10.2.2 zusammengestellt. Für beide Geräte kann eine typische Zuladung von 1 m³ abgeleitet werden. Auch hier sollten die anlagenspezifischen Werte abgefragt werden.

5.2.2.2 Durchsatzleistungen

Durchsatzleistungen werden für Bänder, Brecher und Siebanlagen benötigt. Maßgebend für die Emissionsberechnungen sind die Durchsatzleistungen während des Betriebs der Geräte, nicht die durchschnittlichen Durchsatzleistungen unter Einbeziehungen von Pausen.

In Tabelle 10.9 sind Angaben typischer Durchsatzleistungen für Brecher und Siebanlagen von gängigen Herstellern dargestellt. Wie die zuvor in Kapitel 5.2.2.1 genannten Zu-

Tabelle 5.8: Typische Durchsatzleistungen für mineralische Schüttgüter, sowie Grünschnitt und Altholz.

Material	Aggregat	Durchsatzleistung (t/h)
Mineralische Schüttgüter	Prallmühle	150
	Backenbrecher	80
	Siebanlagen	150
	Austragsbänder	150
Altholz/ Grünschnitt	Schredder/Sieb	30
	Austragsbänder*	30

* Hinweis: Austragsbänder sind meist auf Schredder/Sieb von der Durchsatzleistung abgestimmt.



ladungen sind auch die Durchsatzleistungen anlagenspezifisch, insbesondere aber auch materialspezifisch zu berücksichtigen. In Tabelle 5.8 sind einige Standardwerte, die den Autoren aus der Praxis bekannt sind, zusammengestellt.

5.2.2.3 Abwurfhöhen

Die Abwurfhöhe ist nach VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, S. 25 als der „vertikale Fallweg des Guts nach dem Verlassen des Ladegeräts“ definiert. Im Folgenden werden typische Fallhöhen beim Abwurf von Lkw, Radladern, Löffelbaggern, Greifer-Baggern und Bändern hergeleitet.

Die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 setzt in einem Beispiel auf S. 30 eine Abwurfhöhe von 1 m für die Entladung von Lkw an. Das Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG (2016) führt an, dass dies besonders bei geringen Staubneigungen zu einer Überschätzung der Staubemission führe. Außerdem verringere der sich aufbauende Schüttkörper die Abwurfhöhe, sodass eine mittlere Abwurfhöhe von 0,5 m vorgeschlagen wird. Hingegen wird in BMWFJ (2013), S. 56 die Abwurfhöhe in einem Beispiel auf 2 m angesetzt.² Das LANUV setzt üblicherweise 1 m als Abwurfhöhe für Lkws an (Wichert (2019)).

Vom LANUV NRW wird für Schrottscheren, Bagger und Radlader ebenfalls eine Abwurfhöhe von 1 m vorgeschlagen, die als möglichst standardisiert betrachtet werden soll (Wichert, pers. Mitteilung (2019)). Diese Vereinheitlichung soll Diskussionen um Abwurfhöhen verringern. Diesem Zweck dienen auch die folgenden Umfrageergebnisse.

In Tabelle 5.9 sind die Ergebnisse der Umfrage bezüglich der Abwurfhöhen dargestellt. Die Tabelle enthält die Kenngrößen Mittelwert, Median, sowie Minimum und Maximum.

Tabelle 5.9: Umfrageergebnisse für die Abwurfhöhen beim Umschlag.

Abwurfvorgang	Anzahl Werte N	Maximum (m)	Minimum (m)	Mittelwert (m)	Median (m)
Abkippen Lkw auf Halde	14	1,1	0,5	0,9	1,0
Abwurf Greifer auf Halde	12	1,8	0,5	1,0	1,1
Abwurf Radlader auf Halde	14	1,0	0,5	1,0	1,0
Abwurf Band auf Halde	8	2,0	0,8	1,2	1,5
Offene Bandübergabe	10	0,6	0,3	0,5	0,5
Abkippen Lkw auf Freifläche	12	1,0	0,5	0,8	1,0
Aufgabe Radlader in Brecher/Sieb	14	0,9	0,5	1,0	1,0
Aufgabe Greifer in Brecher/Sieb	12	1,0	0,5	0,5	1,0
Verladung Radlader in Lkw	14	1,0	0,5	1,0	1,0
Verladung Greifer in Lkw	12	1,1	0,5	0,6	1,0
Verladung Band in Lkw	9	1,5	0,5	1,0	1,5
Abwurf aus Baggerschere (Vorzerkleinerung)	8	0,8	0,5	0,5	0,6
Vorsortierung mit einem Greifer	8	1,0	0,5	0,6	1,0



² Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die zur Berechnung des diskontinuierlichen Abwurfs verwendete Formel von der in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 abweicht.

Tabelle 5.10: Umfeldfaktoren für stationäre Geräte. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, S. 27f.

Ort der Emission (stationäre Geräte)	Umfeldfaktor
Bunker/Silo	
■ mit Absaugung und Filter ^a	–
■ ohne Absaugung	0,7
Trichter, abgesaugt	
■ gute Wirkung, z. B. Rost mit Lamellenverschluss	≥ 0,1
■ schlechte Wirkung	≤ 0,5
Trichter, nicht abgesaugt	
■ hohe Seitenwände	0,8
■ praktisch ohne Seitenwände	1
■ Rost mit Lamellenverschluss	0,5
Schüttgasse, abgesaugt	
■ seitlich offen	0,5
■ völlig eingehaust ^a	–
Halde	0,9

a Gerichtete Quelle, als solche zu berechnen



Der Median ist grün hinterlegt, da er im Gegensatz zum Mittelwert weniger sensibel auf Extremwerte reagiert.

5.2.2.4 Umfeldfaktoren

Die Reduktion der Staubemission durch Einhausungen, Absaugungen oder sonstige Windschutzeinrichtungen werden in den Formeln der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 nicht direkt berücksichtigt. Daher sind in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 Umfeldfaktoren eingeführt worden, deren Zahlenwert zwischen 0 und 1 liegt und mit denen die Emissionsfaktoren zu multiplizieren sind (vgl. Gleichung (4) und Gleichung (5) auf Seite 11 f.).

In Tabelle 5.10 und Tabelle 5.11 sind die aus der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 bekannten Werte dargestellt.

Wird durch eine Einhausung der Emissionsfaktor gemindert, ist dies über den Umfeldfaktor zu berücksichtigen. Für eine einseitig offene Halle wird vom LANUV NRW

(Wichert, pers. Mitteilung (2019)) ein Umfeldfaktor von $k_U = 0,7$ empfohlen, was einer Minderung um 30 % entspricht. Für eine Halle mit Absaugung, in der die Tore nur für Ein- und Ausfahrten geöffnet sind, schlägt das LANUV NRW einen Umfeldfaktor $k_U = 0,06$ vor. Dieser Wert deckt sich mit demjenigen der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 für geschlossene Hallen (siehe Tabelle 5.11). Sind darüber hinaus noch Doppelschleusentore vorhanden, kann der Umfeldfaktor laut LANUV NRW weiter reduziert werden.

In Tabelle 5.12 sind die Ergebnisse der Umfrage zu den Umfeldfaktoren, die nicht durch die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 abgedeckt sind, zusammengefasst. Die Tabelle enthält die Kenngrößen Mittelwert, Median sowie Minimum und Maximum. Der Mittelwert ist grün hinterlegt.

5.2.2.5 Emissionen der Brech- und Siebmaschinen

Beim Brechen oder Sieben fallen ggf. Staubemissionen an, die zusätzlich zur Aufgabe in das Gerät und zum Abwurf

Tabelle 5.11: Umfeldfaktoren für Fahrzeuge. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, S. 27 f.

Ort der Emission (Fahrzeuge)	Umfeldfaktor
Fahrzeug in geschlossener Halle	
■ mit Absaugung und Filter ^a	–
■ mit natürlicher Entlüftung	0,06
Silofahrzeug	
■ mit Absaugung ^a	0,5
■ ohne Absaugung	0,5
LKW mit Abdeckplane, geöffnet	0,9
Seeschiff, Luke völlig offen ^b	0,7
Binnenschiff, Luke völlig offen	0,9
Güterwaggon	
■ Spezialausführung mit Absaugung ^a	–
■ Spezialausführung ohne Absaugung	0,3
■ mit festem Dach	0,7
■ oben offen	0,9

a Gerichtete Quelle, als solche zu berechnen

b Bei nur teilweise offener Luke ändert sich dieser Faktor proportional zum Öffnungsgrad



Tabelle 5.12: Umfrageergebnisse zu Umfeldfaktoren, die nicht in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 aufgeführt sind.

Ort der Emission	Anzahl Werte N	Mittelwert	Minimum	Median	Maximum
Lagerboxen (3-seitig umschlossen)	12	0,8	0,5	0,7	0,8
Halle (einseitig offen)	12	0,5	0,3	0,5	0,5
Halle mit permanent offenen Toren an einer Seite	10	0,4	0,1	0,2	0,5
Halle mit zwei permanent offenen Toren an gegenüberliegenden Seiten	8	0,6	0,2	0,5	0,7
Aufgabetrichter Aufbereitungsaggregat	13	0,8	0,6	0,8	0,8

LUBW

Tabelle 5.13: Umfrageergebnisse zu den Emissionen von Brech- und Siebanlagen.

Fragestellung	Ja	Nein
Werden Emissionen durch den Brech-/Siebvorgang selbst berücksichtigt?	11	3
Werden die Abwürfe der Teilströme separat betrachtet?	4	5
Werden die Staubneigungen für die einzelnen erzeugten Fraktionen angepasst?	4	6

LUBW

aus dem Gerät berücksichtigt werden müssen. Dies ist insbesondere bei undichten Geräten, bei denen während des Betriebs sichtbare Staubwolken austreten, der Fall.

Solche Emissionen werden in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 nicht behandelt. Da in der Literatur ebenfalls keine Angaben zu finden sind, wird auf die Ergebnisse der Umfrage zurückgegriffen.

In Tabelle 5.13 sind die Umfrageergebnisse dargestellt. Alle befragten Experten berücksichtigen Staubemissionen, die aus Brech- und Siebanlagen austreten. Wenn beim Sieben der Materialien mehrere Fraktionen erzeugt werden, berücksichtigen die meisten Gutachter die dadurch entstehenden Teilströme mit geringerer Durchsatzleistung (t/h) nicht separat. Durch Siebvorgänge können ggf. Materialien mit unterschiedlichen Staubneigungen erzeugt werden (vgl. Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 auf Seite 21 f.). Die Be-

rücksichtigung eines solchen Effekts wird von den meisten Gutachtern nicht vorgenommen.

5.2.2.6 Dieselmotoremissionen

Im Vergleich zu den Emissionen der Umschlag-, Aufbereitungs- und Transportvorgänge sind die Dieselmotoremissionen vergleichsweise gering. Ggf. müssen die Dieselmotoremissionen somit nicht explizit berücksichtigt werden, sofern dies gutachtlich begründbar ist.

In diesem Bericht werden nur die partikelförmigen Dieselmotoremissionen behandelt. Die Partikel werden der PM_{2,5}-Partikelfraktion zugeordnet.

In den VDI-Richtlinien sind keine Hinweise auf Emissionsfaktoren gegeben. Aus der vom Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) bereitgestellten „Non-road-Datenbank“ (Schäffeler & Keller (2016)) können Emissionsfaktoren für verschiedene Geräte übernommen werden. In

Tabelle 5.14: Umfrageergebnisse zu den Dieselmotoremissionen.

Emissionsort	Mittelwert (kg/h)	Minimum (kg/h)	Maximum (kg/h)	Anzahl Werte N
Aufbereitungsaggregat	0,023	0,004	0,041	2
Raupenbagger	0,011	0,002	0,020	2
Planierdraupe	0,011	0,002	0,021	2
Radbagger	0,008	0,002	0,014	2
Stapler	0,003	0,001	0,006	2
Güterschiff	0,070	0,013	0,127	2
Notstromaggregat	0,004	0,001	0,007	2
Walzenzug	0,003	0,001	0,006	2

LUBW

Tabelle 5.15: Umfrageergebnisse zum PM₁₀-Anteil am Gesamtstaub beim Umschlag für verschiedene Schüttgüter.

PM ₁₀ -Anteil an Gesamtstaub %	Anzahl Werte N	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum
Boden	11	22%	25%	1%	30%
Boden (erdfeucht)	10	20%	25%	0%	30%
Bauschutt	10	25%	25%	20%	30%
Bauschuttgemische	10	23%	25%	10%	30%
Baustellenmischabfälle	9	23%	25%	10%	30%
Gipshaltige Baustoffe	8	30%	25%	10%	50%
Beton (grob)	10	23%	25%	10%	30%
Erdaushub	9	23%	25%	10%	30%
Sand	11	22%	25%	10%	30%
Kies	10	23%	25%	10%	30%
RC-Material	10	26%	25%	10%	50%
Straßenaufbruch	10	23%	25%	10%	30%
Splitt	10	26%	25%	10%	50%
Gleisschotter	10	26%	25%	10%	50%
Gesteinsbruch	8	28%	25%	20%	50%
Brechsand	8	24%	25%	20%	30%
Pflastersteine	6	30%	25%	25%	50%
Siebschutt	6	25%	25%	20%	30%
Gewerbeabfall	7	23%	25%	10%	30%
Schrott	6	21%	20%	10%	30%
Metall	4	24%	23%	20%	30%
Stahl	4	24%	23%	20%	30%
Altglas	4	25%	25%	20%	30%
Altholz	8	26%	25%	10%	40%
PPK (Papier, Pappe, Kartonnagen)	6	23%	25%	10%	30%
Kunststoffe	5	26%	25%	20%	30%
Verpackungsabfall	5	25%	25%	20%	30%
Bioabfall	5	26%	25%	20%	30%
Klärschlamm	4	25%	25%	20%	30%
Restmüll	5	26%	25%	20%	30%
Grünschnitt, frisch	5	23%	25%	10%	30%
Grünschnitt, gehäcksel	6	23%	25%	10%	30%
Frischkompost (feucht)	6	23%	25%	10%	30%
Fertigkompost (trocken)	5	22%	25%	10%	30%
Getreide	5	24%	25%	10%	35%
Futtermittel	5	24%	25%	10%	35%
EBS-Inputmaterial	3	27%	25%	25%	30%
EBS zerkleinert	3	27%	25%	25%	30%
Düngemittel	4	25%	25%	20%	30%



Anhang 10.2.5 in Tabelle 10.10 sind diese Emissionsfaktoren für gängige Geräte dargestellt.

in etwa denen, die in Schäffeler & Keller (2016) aufgelistet sind (vgl. Tabelle 10.10 auf Seite 64).

Die Ergebnisse der Umfrage zu den Dieselmotoremissionen sind in Tabelle 5.14 aufgeführt. Aufgrund der geringen Stichprobe können aus der Umfrage keine weiteren Erkenntnisse gewonnen werden. Die Werte entsprechen

5.2.3 PM₁₀-Anteil am Gesamtstaub

In der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 sind keine PM₁₀-Anteile, bezogen auf den Gesamtstaub, angegeben. Diese sind für Immissionsprognosen jedoch von besonderer Bedeutung.

Nach Düring & Sörgel (2014) schwanken die PM_{10} -Anteile in der Literatur zwischen 11 % und 47 %.

In BMWFJ (2013) ist eine Tabelle angegeben, in der aus verschiedenen Berichten und Forschungsarbeiten Korngrößenanteile unterschiedlicher Schüttgüter zusammengestellt sind. Tabelle 10.6 in Anhang 10.2.2 enthält einen Auszug aus dieser Tabelle.

Kummer et al. (2010) erhielten aus Messungen an Bauschuttrecyclinganlagen einen mittleren PM_{10} -Anteil von 14,2 % am Gesamtstaub. Es bestand jedoch eine Abhängigkeit vom eingesetzten Material, sodass folgende Konvention vorgeschlagen wurde:

- Materialbewegung (unzerkleinertes Material): 25 % PM_{10} -Anteil
- Materialbewegung (zerkleinertes Material): 20 % PM_{10} -Anteil
- Bodenaufbereitung: 25 % PM_{10} -Anteil

Das LANUV NRW schlägt für Umschlag- und Aufbereitungsvorgänge einen PM_{10} -Anteil von 20 % am Gesamtstaub vor. Bei hohen Mineralanteilen im Schüttgut kann der PM_{10} -Anteil laut LANUV aber bis auf 35 % ansteigen (Wichert (2019)).

Von Messungen an einem Kalksteinbruch ist ein PM_{10} -Anteil von 15 % am Gesamtstaub bekannt (Gronewäller(2009)). Hierzu wurde die Sprenghalde nach der Sprengung analysiert und mittels Laserbeugungsverfahren die Korngrößenverteilung nach Absiebung ermittelt. Diesen Wert übernimmt auch das Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA).

An einer Anlage zum Umschlag von Schrotten wurden im Auftrag der iMA Richter & Röckle GmbH & Co.KG Mes-

sungen des PM_{10} -Gehalts beim Abwurf unterschiedlicher Schrottsorten ermittelt. Die PM_{10} -Anteile am Gesamtstaub lagen zwischen 8 und 12 %. In Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde wurde ein PM_{10} -Gehalt von 12 % für den Umschlag von Schrotten angesetzt. Dies stimmt auch mit der Vorgabe in der VDI-Richtlinie 4085 überein, nach der für Schrotte der PM_{10} -Anteil deutlich unterhalb von 20 % liegt.

In Tabelle 5.15 sind die Ergebnisse der Umfrage bezüglich der PM_{10} -Anteile zusammengestellt. Die Tabelle enthält die Kenngrößen Mittelwert, Median sowie Minimum und Maximum. Der Median ist grün hinterlegt.

Bei der Erstellung eines Gutachtens ist es wichtig, für den jeweiligen Anwendungsfall einen sachgerechten Ansatz für den Feinkornanteil zu wählen und zu begründen. Im Einzelfall kann von den hier aufgeführten Werten abgewichen werden.

5.2.4 Minderungsmaßnahmen

In Kapitel 9 der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 sind Möglichkeiten zur Emissionsminderung für den Umschlag und die Lagerung aufgelistet. Eine quantitative Aussage zum Minderungseffekt ist nicht angegeben. Einige Minderungsmaßnahmen wirken sich direkt auf die Parameter zur Berechnung der Staubemissionen aus. Dies betrifft z. B. die Verringerung von Abwurfhöhen oder die Anpassung der Geräte und Zuladungen an die Umschlagvorgänge. Zur Berücksichtigung von Kapselungen und Einhausungen können Umfeldfaktoren angepasst werden.

5.2.4.1 Befeuchtung des Guts

Untersuchungen des Umweltbundesamtes Leuthold (2011) und der Universität Wuppertal (Klenk et al. (2016)) zeigen, dass eine Materialbefeuchtung eine der effektivsten Staub-



Abbildung 5.1: Einfluss von Befeuchtungsmaßnahmen an einer Aufbereitungsanlage. Links: ohne Befeuchtung. Rechts: mit Befeuchtung. Quelle: Klenk et al., 2016.

schutzmaßnahmen darstellt. Ein Flüssigkeitsfilm an einer Oberfläche führt üblicherweise zum sofortigen Haftbleiben von Partikeln, da sich Flüssigkeitsbrücken zwischen den Haftpartnern bilden (Suppan (2017)). Abbildung 5.1 zeigt beispielhaft den Effekt einer Befeuchtung an einer Aufbereitungsanlage.

Das BMWFJ (2013) gibt für mobile Brecher beim Einsatz einer Wasserbedüsung oder von Schaum eine Minderung von bis zu 90 % an. Leuthold (2011) (Umweltbundesamt) findet in einer messtechnischen Studie zu mobilen Brechern bei Wasserbedüsung eine Emissionsreduktion um 63 %–90 % je nach Brechermodell. Beim Schaumeinsatz werden Emissionsreduktionen zwischen 77 %–90 % ermittelt. Demgegenüber hinaus gibt Leuthold (2011) bei einer Brecher-Absaugung eine Emissionsminderung von 32 % an, wobei bei einigen Brechermodellen keine Minderung festgestellt wurde.

Laut Angaben des Betreibers einer Bauschuttrecyclinganlage staubt Bauschutt beim Brechen nicht mehr, wenn am Vortag während etwa 8 Stunden 2 % Wasser (bezogen auf die Betonmasse) aufgesprüht werden. Die Grundfeuchte von Beton liegt zwischen 2 % und 3 %, so dass nach diesen Angaben eine Materialfeuchte von 4 bis 5 % erforderlich ist, damit kein Staub mehr auftritt. Asphalt sollte nach Auskunft des o. g. Anlagenbetreibers ebenfalls befeuchtet werden, am besten bereits beim Ausbau.

Für Schrotte geht das LANUV NRW von einer 70-prozentigen Minderung aus, wenn diese beim Umschlag befeuchtet werden (Wichert (2019)). Dieser Wert soll jedoch nicht pauschal angesetzt werden. Vielmehr sollte zunächst von einer 50 % Minderung ausgegangen werden, die durch eine Einzelfallbetrachtung mit durchdachten, effektiven Befeuchtungssystemen auf 70 % aufgestockt werden kann. So kann laut Auskunft des LANUV NRW eine bessere Differenzierung von Befeuchtungsanlagen erfolgen, die Anreiz für Anlagenbetreiber schafft, möglichst geringe Staubemissionen durch technische Aufrüstung zu generieren.

In der Umfrage ergeben sich die in Tabelle 5.16 aufgelisteten Werte zur Minderung durch Befeuchtung an Aufbereitungsaggregaten. Hier resultiert eine Minderung von 70 % wie vom LANUV NRW vorgeschlagen wird.

Tabelle 5.16: Umfrageergebnisse zur Minderung durch Befeuchtung der Aufbereitungsaggregate.

Anzahl Werte N	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum
9	0,7	0,7	0,5	0,9

LUBW

An Feinkohle-Halden wurde festgestellt, dass eine Befeuchtung der Oberfläche ebenfalls zu einer Staubminderung führt (Braun et al. (2012)). Sofern ein Schüttgut auf eine abgetrocknete Halde ausgetragen wird, können kleine Materialkügelchen, die auf dem trockenen Gut aufliegen, durch das abgeworfene Material in Bewegung gesetzt werden. Durch Abrieb kann es bei trockener Oberfläche zu Staubemissionen kommen (siehe Abbildung 5.2). Dieser Vorgang tritt allerdings nur bei Feinguthalden auf, im vorliegenden Fall bei Kohlehalden.

5.2.4.2 Wasserschleier, Nebelkanonen

Durch den Einsatz von Wasserschleiern können Staubkörner von Wassertropfchen aufgefangen werden. Hierdurch erhöht sich das Gewicht der Staubkörner und sie sinken zum Boden. Die Verwendung der richtigen Tropfengröße ist ausschlaggebend für die Effektivität des Systems. Sind die Tropfen wesentlich größer als die Staubpartikel, folgen die Partikel der Luftströmung um die Tropfen herum. Wenn die Tropfen und die Partikel ungefähr dieselbe Größe haben, berühren sie sich (Cecala & O'Brien (2012), siehe Abbildung 5.3.



Abbildung 5.2: Staubemission beim Abwurf eines Schüttguts auf eine trockene Halde. Staubemissionen entstehen durch Abrieb (rote Pfeile). Quelle: IMA, 2007.

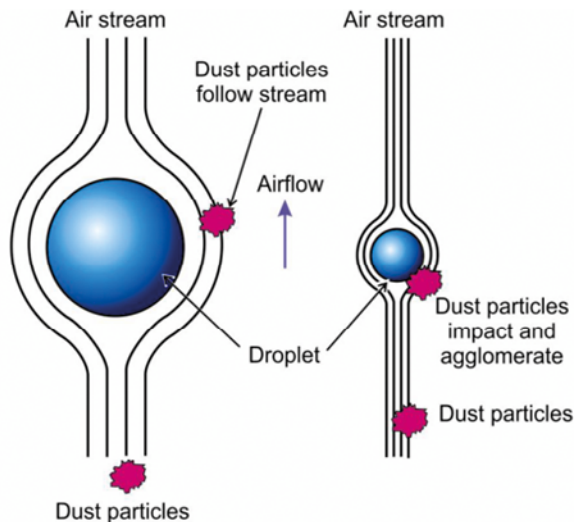


Abbildung 5.3: Einfluss der Tropfengröße auf die Staub-Absorption. Quelle: Cecala & O'Brien, 2012.

5.2.4.3 Minimierung der Abwurfhöhe

Die Minimierung der Abwurfhöhe führt dazu, dass sich die Aufprallgeschwindigkeit des Schüttguts verringert. Hierdurch löst sich weniger Feinmaterial vom Gut ab.

Sofern das Schüttgut nicht abgeworfen, sondern auf eine Halde aufgesetzt wird, treten nur noch geringe Staubemissionen auf.

5.2.4.4 Vergrößerung der Abwurfmasse

Die Vergrößerung der Abwurfmasse (bzw. des Massenstroms beim Bandabwurf) führt dazu, dass die Partikel einen engeren Kontakt zueinander haben. Hierdurch wird das Loslösen von Teilchen erschwert

5.2.4.5 Abschirmung der Abwurfstelle

Durch Abschirmung der Abwurfstelle wird der Windanriff verringert. Insbesondere die Grobstäube, die üblicher-

weise den größten Massenanteil beinhalten, sinken ab. Üblicherweise wird diese Vorgabe durch Lagerboxen bewerkstelligt und über Verringerung des Umfeldfaktors in der Berechnung realisiert.

5.2.4.6 Abwurfverfahren

Die Art des Abwurfverfahrens hat nach VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 einen bedeutenden Einfluss auf die Staubemission. Bei Betrachtung von Gleichung (1) und Gleichung (2) unterscheiden sich diskontinuierliche und kontinuierliche Abwurfverfahren grundsätzlich um einen Faktor. Dieser Faktor hat folgende Zahlenwerte:

diskontinuierliche Abwurfverfahren:	2,7
kontinuierliche Abwurfverfahren:	83,3

Für ein Rechenbeispiel besitzt der Zwei-Schalen-Greifer (diskontinuierliches Verfahren) ein Volumen von 3 m^3 . Dies entspricht einer Masse von $M = 4,8 \text{ t}$ pro Hub, wenn eine typische Schüttdichte der Abfälle von $1,6 \text{ t/m}^3$ angesetzt wird. Mit dem Faktor 2,7 errechnet sich das Produkt von Gleichung (2) zu .

Abwurfbänder weisen Massenströme bis zu $M = 300 \text{ t/h}$ auf. Mit dem Faktor 83,3 errechnet sich das Produkt aus Gleichung (1) zu .

Dies bedeutet, dass die Emission von diskontinuierlichen Verfahren bei ansonsten gleichen Randbedingungen (gleiche Staubneigung, gleiche Abwurfhöhe, gleiches Schüttgewicht) etwa 25 % der Emissionen von kontinuierlichen Verfahren beträgt.



Abbildung 5.4: Einfluss des Massenstroms auf die Staubentwicklung. Quelle: iMA, 2016.



Abbildung 5.5: Beispiele für absenkbare Verladeköpfe. Fotos: iMA, 2007. Oben links ist das Fallrohr eingefahren, in Aktion (oben rechts) abgesenkt. Unten links ist das Fallrohr (Mitte) und das Absaugrohr (außen) erkennbar.

Laut Strobl & Kuntner (2014) überschätzen die Formeln der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 die Emissionen des Bandabwurfs jedoch deutlich, sodass der Unterschied zwischen dem kontinuierlichen und dem diskontinuierlichen Abwurf in der Praxis deutlich geringer sein dürfte.

5.2.4.7 Absaugung und Filterung

Durch Kapselung der Staubquellen und Absaugung der staubhaltigen Luft können Emissionen effektiv verringert werden. Die Kapselungen und Absaugungen sollten direkt an der Entstehungsstelle (z. B. Bandübergabestellen, Verladebereiche) installiert werden.

Ein Beispiel für eine effektive Kapselung und Absaugung sind Verladeköpfe, die als konzentrische Fallrohre auf dem Gut aufliegen. Das Gut fällt durch das innere Rohr auf das Schüttgut, wobei die Stäube vom außenliegenden Rohr abgesaugt und einer Filteranlage zugeführt werden (siehe Ab-



Abbildung 5.6: Abgesaugte Schürze zur Verladung auf interne Lkw. Foto: iMA, 2007.

bildung 5.5). In der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 ist für abgesaugte Schüttgossen ein Umfeldfaktor von 0 angegeben.

Auch eine Schürze, mit der die komplette Ladefläche eines Lkw abgedeckt wird, ist möglich (siehe Abbildung 5.6). Diese Methode funktioniert allerdings nur, wenn die Lkw eine einheitliche Größe aufweisen (z. B. Dumper für den internen Transport von Schüttgütern auf dem Betriebsgelände).

5.3 Fahrbewegungen

Bei Fahrbewegungen entstehen Staubemissionen durch Aufwirbelung von Feingut auf den Fahrwegen, Abriebe von Bremsen, von Reifen und vom Oberflächenmaterial sowie durch Partikel in den Auspuffabgasen (Dieselmotor-emissionen). Die Formeln der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 berücksichtigen hiervon nur die Aufwirbelung und die Abriebe von Oberflächenmaterial, Bremsen und Reifen. Die Richtlinie behandelt nicht die motorbedingten Dieselpartikelemissionen. Hierzu wird in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 auf das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) verwiesen.

Bei Anlagen mit langen Fahrwegen (z. B. Deponien, Steinbrüche, Kiesabbaugebiete) können die Fahrbewegungen je nach Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche den größten Beitrag zur Gesamtstaubemission liefern (VDI-Richtlinie 3790, Blatt 2).

Für die Fahrbewegungen ergibt sich ein differenziertes Bild im Vergleich von messtechnisch ermittelten und nach VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 berechneten Emissionsfaktoren (Tudeshki & Rittmeier (2016)). Denn je nach untersuchtem Vorgang wurde die Staubemission durch die Berechnung gegenüber der Messung sowohl über- und unterschätzt als auch übereinstimmend ermittelt. In Untersuchungen an Anlagen der Natursteinindustrie konnten als bestimmende Einflussgrößen auf die Staubemission die Jahreszeit, das Gestein, der Wassergehalt der Fahrbahnoberfläche und die Fahrgeschwindigkeit ermittelt werden (Tudeshki & Xu, 2017).

5.3.1 Allgemeine Parameter

Als allgemeine Parameter werden die Eingangsgrößen bezeichnet, die gleichermaßen in die Formeln für befestigte und unbefestigte Fahrwege eingehen. Es handelt sich um

die Anzahl der Niederschlagstage (siehe Kapitel 5.3.1.1) und die Masse des Flottenmittels (siehe Kapitel 5.3.1.2).

5.3.1.1 Anzahl der Niederschlagstage

Die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 definiert auf S. 13f einen Niederschlagstag als Tag, an dem mindestens 1 mm Niederschlag gefallen ist. Davon geht auch BMWFJ (2013) aus, wobei für Aktivitäten, die kürzer als drei Monate andauern, die Anzahl der Niederschlagstage vernachlässigt wird. Laut amerikanischer Umweltbehörde EPA (2006) liegt ein Niederschlagstag hingegen schon ab 0.254 mm/d vor, allerdings werden diese in der Formel für befestigte Fahrwege mit dem Faktor $\frac{1}{4}$ berücksichtigt, während es in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 der Faktor $\frac{1}{3}$ ist.

Die jährliche Anzahl der Niederschlagstage kann aus der Karte A1 im Anhang der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 abgelesen werden. Optional können die Niederschlagstage aus den Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD)³ für sämtliche Stationen Deutschlands bestimmt werden.

5.3.1.2 Masse der Fahrzeugflotte

Die Berechnungsformeln der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 basieren auf der mittleren Masse der anliefernden und abtransportierenden Fahrzeuge (Flottenmittel).

Sofern die Zuladungen der Lkw bekannt sind, kann ihr Leergewicht abgeschätzt werden. Hierzu wurden von den gängigen Herstellern (vgl. Tabelle 5.6) neben den Zuladungen auch die Leergewichte der Lkw recherchiert. Daraus konnte ein quadratischer Zusammenhang abgeleitet werden (siehe Abbildung 10.1 im Anhang 10.2.5):

$$\text{Leergewicht}_{Lkw} = -0,02 \cdot \text{Zuladung}_{Lkw}^2 + 1,08 \cdot \text{Zuladung}_{Lkw} + 1,33 \quad (9)$$

(Angaben in t)

Analog wird für den Zusammenhang der Radlader-Zuladung und dem Leergewicht ein linearer Fit (siehe Abbildung 10.2 im Anhang 10.2.5) gemacht mit dem Ergebnis:

$$\text{Leergewicht}_{Radlader} = 5,2 \cdot \text{Zuladung}_{Radlader} - 1,1 \quad (10)$$

(Angaben in t)

Die mittlere Masse der Fahrzeugflotte kann damit entsprechend VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 berechnet werden.

Die Abschätzung des Leergewichts anhand der Zuladung ist nur dann empfehlenswert, wenn vom Anlagenbetreiber keine Angaben vorliegen.

5.3.2 unbefestigte Fahrwege

Die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 bezeichnet Fahrwege, deren Oberflächenmaterialien nicht dauerhaft fest miteinander verbunden sind und daher leicht abgetragen werden können, als unbefestigte Fahrwege. Bezogen auf die Staubemission nehmen diese Fahrwege einen großen Stellenwert ein, weil mehr staubendes Material als bei befestigten Fahrwegen verfügbar ist.

In den folgenden Unterkapiteln sind die Parameter, die zur Berechnung der Staubemissionen erforderlich sind, dargestellt. Ihr Einfluss wird diskutiert.

5.3.2.1 Mittlerer Feinkornanteil

Der mittlere Feinkornanteil berücksichtigt laut VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 den Massenanteil der Korngrößen kleiner

Tabelle 5.17: Mittlerer Feinkornanteil auf Straßen verschiedener Industriebetriebe. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4, Tabelle 2.

Industriebetrieb	Mittlerer Feinkornanteil s in %	Spannbreite in %	Anzahl der Proben
Eisen- und Stahlproduktion	6	0,2 bis 19	135
Sand- und Kiesverarbeitung (Werkstraße)	4,8	4,1 bis 6,0	3
Steinbruch (Werkstraße)	10	2,4 bis 16	10
Steinbruch (Transportweg von/zur Grube)	8,3	5,0 bis 15	20
Baustellenbereich	8,5	0,56 bis 23	20
Siedlungsabfalldeponie	6,4	2,2 bis 21	20



³ <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/> (Stand: Juni 2019)

Tabelle 5.18: Aus der Umfrage ermittelter Feinkornanteil s der Flächenbelastung auf unbefestigten Fahrwegen.

Anzahl Werte N	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum
6	7,9 %	7,5 %	5,0 %	14,0 %

LUBW

75 μm an der Gesamtbelastung des aufliegenden Schluffs. Nach EPA (2006), Kapitel 13.2.2 liegt der Wert meistens zwischen 5 % und 10 %.

Von BMWFJ (2013) wird ein Konventionswert von 5,2 % als Feinkornanteil empfohlen.

Speziell für einen Steinbruch setzen Moldenhauer et al. (2014) einen mittleren Feinkornanteil von 10 % an.

Des Weiteren werden in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 für mehrere Industriebetriebe typische Feinkornanteile vorgeschlagen (siehe Tabelle 5.17).

In der Umfrage konnten die in Tabelle 5.18 dargestellten Ergebnisse ermittelt werden. Als Median resultiert ein Feinkornanteil der Flächenbelastung von 7 %, was den Vorgaben der EPA (2006) entspricht.

5.3.2.2 Minderungsmaßnahme Fahrgeschwindigkeit

Die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 weist darauf hin, dass mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit auch höhere Staubemissionen einhergehen. Eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit soll über die Minderungskennzahl k_M berücksichtigt werden, die Werte zwischen 1 (keine Minderung) und 0 (100 %ige Minderung) annehmen kann. Für k_M werden jedoch keine Angaben gemacht. Somit werden Ansätze aus der Literatur benötigt, um den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit in die Berechnung einzu beziehen.

Tabelle 5.19: Minderung bei Geschwindigkeitsreduktion nach Kühn (2002).

Geschwindigkeit (km/h)	Minderung (%)
50	0
40	30
30	50
20	66

LUBW

Von der EPA (1998) wurden die Emissionsfaktoren auf unbefestigten Fahrwegen bei durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten zwischen 30 und 40 Meilen/h ermittelt. Dies entspricht etwa einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h^4 .

Kühn (2002) leitet eine exponentielle Zunahme der Emission bei Zunahme der Fahrgeschwindigkeit her. Bei Anwendung der von Kühn (2002) hergeleiteten Formel unter Annahme einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h erhält man die folgenden Minderungen durch Geschwindigkeitsreduktion (siehe Tabelle 5.19).

Die Autoren dieses Berichts empfehlen eine Minderung um 50 % gegenüber den Formeln der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4, sofern auf dem Betriebsgelände eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h vorliegt. Diese Fahrgeschwindigkeit ist typisch bei abfallwirtschaftlichen Anlagen und sollte bei Lkw und Radladern verwendet werden.

Da die Fahrgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluss auf die Emissionen hat, ist die Wahl eines geeigneten Emissionsminderungsansatzes wichtig. Eine Interpolation der von Kühn (2002) ermittelten Werte hin zu niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten ist physikalisch sinnvoll.

Die Umfrage bei den Gutachtern liefert die in Tabelle 5.20 aufgelisteten Ergebnisse für die Minderungskennzahl k_M . Um Ausreißerwerte weniger stark zu berücksichtigen, wird

Tabelle 5.20: Umfrageergebnisse zur Minderungskennzahl k_M bei Geschwindigkeitsreduktion auf unbefestigten Fahrwegen.

Geschwindigkeitsreduktion	Anzahl Werte N	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum
auf unbefestigten Fahrwegen (auf 30 km/h)	5	0,2	0,2	0,0	0,6
auf unbefestigten Fahrwegen (auf 20 km/h)	8	0,4	0,2	0,0	0,8
auf unbefestigten Fahrwegen (auf 10 km/h)	8	0,5	0,4	0,0	0,9

LUBW

⁴ Der Umrechnungsfaktor von Meilen in Kilometer beträgt ca. 1,6. Die Geschwindigkeiten liegen folglich zwischen 48 km/h und 64 km/h . Die Annahme von 50 km/h ist somit konservativ angesetzt, um den Einfluss der prozentualen Minderung entsprechend nicht zu überschätzen.

Tabelle 5.21: Kennzahlen für Minderungsmaßnahmen bei unbefestigten Fahrwegen. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 und BMWFJ (2013).

Minderungsmaßnahme	Kennzahl zur Minderung nach VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 (2018) und BMWFJ (2013)
Manuelle Befeuchtung	0,5 (bei 3 l/m ² alle 3 Stunden)
Automatische Befeuchtung	bis 0,8
Calium-Magnesium-Acetat (CMA)	0,5 (bei 150 ml/m ² alle 5 Stunden)



der Median betrachtet. Die Minderung fällt mit 0,2 (also 20 %) deutlich geringer aus als nach Kühn (2002). Hierfür sind mehrere Ursachen verantwortlich. Ein Gutachter beruft sich auf einen konservativen Ansatz, indem Minderungen bei unbefestigten Fahrwegen generell nicht berücksichtigt werden. Hingegen weist ein anderer Gutachter auf die in VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 (1999) hin, in der die Fahrzeuggeschwindigkeit direkt in die Gleichung (7) einfließt.

5.3.2.2 Minderungsmaßnahme Befeuchtung

Analog zum Umschlag und zur Aufbereitung von Schüttgütern stellt die Befeuchtung der Fahrwege einen wesentlichen Parameter zur Minderung der Staubemissionen dar. Laut VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 lassen sich die Emissionen damit um bis zu 80 % reduzieren (vgl. Tabelle 5.21).

5.3.3 Befestigte Fahrwege

5.3.3.1 Feinkornauflage auf dem Fahrbahnbelag

Zur Bestimmung der Feinkornauflage auf dem Fahrbahnbelag (auch Flächenbelastung) sind in EPA (2011) Messwerte für öffentliche Fahrwege zwischen 0,03 g/m² und 0,6 g/m² angegeben. Oftmals führen jedoch Schmutzverschleppungen aus unbefestigten Bereichen zu einem erhöhten Verschmutzungsgrad der Fahrwege.

Ohne Berücksichtigung von Emissionsminderungsmaßnahmen ist bei Lkw-Fahrstrecken auf Deponien von einer etwa um den Faktor 10 höhere Feinkornauflage gegenüber öffentlichen Fahrwegen, entsprechend ca. 5 g/m², auszugehen.

In der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 sind Konventionswerte in Tabelle 5.22 angegeben. Diese dienen zur Orientierung,

Tabelle 5.22: Konventionswerte für die Flächenbelastung befestigter Fahrwege. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4, S. 10.

Verschmutzung	Konventionswert in g/m ²
gering	1
mäßig	5
hoch	60



es können aber auch Flächenbelastungen zwischen 1 g/m² und 60 g/m² verwendet werden.

Das LANUV NRW schlägt für die Flächenbelastung in Anlehnung an BMWFJ (2013) einen Wert von 2 g/m² für Fahrwege, die regelmäßig gereinigt werden, vor (Wichert (2019)). Dies wird damit begründet, dass eine typische Verschmutzung von 5 g/m² durch die regelmäßige Reinigung, z. B. mit Nasskehrmaschinen, um maximal 60 % auf 2 g/m² reduziert werden kann. Es sollte darüber hinaus jedoch eine Definition für regelmäßige Reinigung festgelegt werden, um Maßnahmen voneinander zu differenzieren. Dadurch könnten Anlagenbetreiber veranlasst werden, in ihre Reinigungssysteme zu investieren. Minderungsmaßnahmen bezüglich der Flächenbelastung sollten direkt über diese berücksichtigt werden und nicht über die Kennzahl k_M .

Für einen Steinbruch werden von Moldenhauer et al. (2014) Flächenbelastungen zwischen 5 g/m² und 8 g/m² angenommen.

Klenk & Rühling (2015) weisen auf den quasi-linearen Einfluss der Flächenbelastung auf den Emissionsfaktor in ihren Untersuchungen zu Staubemissionen auf befestigten Fahrwegen hin. Die Flächenbelastung ist folglich ein wichtiger Parameter zur Berechnung der Staubemission.

5.3.3.2 Fahrgeschwindigkeit

Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit wird in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 lediglich über eine Abnahme der Emission um 20 % bei einer Reduktion von 30 km/h auf 20 km/h angegeben.

5.3.3.3 Reinigung der Fahrwege

Als weitere Emissionsminderungsmaßnahme ist die Reinigung der Fahrwege zu berücksichtigen. Entsprechend VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 führt diese Maßnahme zu einer Reduzierung der Feinkornauflage auf dem Fahrbahnbelag. Sie wird folglich nicht über eine Emissionsminderungskennzahl berücksichtigt.

Tabelle 5.23: Umfrageergebnis für die Geschwindigkeitsreduktion auf befestigten Fahrwegen.

Geschwindigkeitsreduktion	Anzahl Werte N	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum
auf befestigten Fahrwegen (auf 10 km/h)	9	0,4	0,4	0,2	0,4



Tabelle 5.24: Auswirkung von Minderungsmaßnahmen auf befestigten Fahrwegen auf die Flächenbeladung. Quelle: BMWFJ (2013).

Maßnahme	Flächenbeladung (g/m ²)
Keine	60
Regelmäßiges Kehren	10
Reifenwaschanlage und regelmäßiges Kehren	5
Reifenwaschanlage, regelmäßiges Kehren und Waschen	1
Regelmäßiges Kehren und Waschen (kein Schmutzeintrag von unbefestigten Fahrwegen)	1



5.3.3.2.3 Befeuchtung der Fahrwege

Eine Befeuchtung der Fahrwege führt nach VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 zu einer Reduzierung der Feinkornaufgabe auf dem Fahrbahnbelag.

Wie sich das Säubern auf die Flächenbeladung befestigter Fahrwege auswirkt, wird in Tabelle 5.24 des BMWFJ (2013) beschrieben. Hierbei wird von einer stark verschmutzten Fahrbahn ausgegangen.

5.3.4 PM₁₀-Anteil am Gesamtstaub

Der PM₁₀-Anteil am Gesamtstaub wird in den Gleichungen (6) und (7) durch den Faktor kK_{gv} berücksichtigt. Er ist für die Korngrößen PM_{2,5}, PM₁₀ und PM₃₀ in Tabelle 3.2 für befestigte und in Tabelle 3.3 für unbefestigte Fahrwege dargestellt.

5.4 Windabwehungen

Windabwehungen haben üblicherweise einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Gesamtstaubemission. In der Excelanwendung werden die Windabwehungen daher nicht berücksichtigt.

Aus der Umfrage bei den Gutachterbüros geht hervor, dass grundsätzlich Windabwehungen von Halden berücksichtigt werden, wobei diese größtenteils abhängig von den örtlichen meteorologischen Bedingungen bei genügend hohen mittleren Windgeschwindigkeiten berechnet werden. Anlagenspezifische Parameter wie die Zeitdauer der Lagerung oder der Feinkornanteil des gelagerten Guts werden von einigen Gutachtern berücksichtigt. Die Angabe eines Emissionsfaktors liefert hingegen ein stark differenziertes Bild (vgl. Tabelle 5.25). Während ein Teil der

Gutachter Emissionsfaktoren unter 1 kg/(ha · h) ansetzt, verwenden andere Gutachter einen Emissionsfaktor von 10 kg/(ha · h). Für beide Ansätze gibt es Referenzen in der Literatur (VDI-Richtlinie 3790, Blatt 2; BMWFJ (2013)).

Tabelle 5.25 fasst die Ergebnisse der Umfrage zur Berücksichtigung von Windabwehungen zusammen. Die Tabelle enthält die Kenngrößen Mittelwert, Median, Minimum und Maximum. Der Median ist grün hinterlegt.

Windabwehungen von ruhenden Langerhalden können nur auftreten, wenn bestimmte Randbedingungen hinsichtlich der meteorologischen Parameter (Windgeschwindigkeit, Anzahl der Niederschlagstage pro Jahr) und hinsichtlich der Beschaffenheit des Materials (Materialfeuchte, Feinkörnigkeit usw.) erfüllt sind.

Die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 gibt für mittlere Windgeschwindigkeiten von 6 m/s die Emissionsfaktoren in Tabelle 5.26 an. Diese beziehen sich allerdings ausschließlich auf trockene Feinerze, Steinkohle und Petrolkoks. Nach VDI-Richtlinie 3790, Blatt 1 ist eine Abwehung unterhalb von Windgeschwindigkeiten von ca. 4 m/s bis 5 m/s unwahrscheinlich. Nach Nr. 9.3.4 VDI-Richtlinie 3790, Blatt 2 (2017) kann bei Jahresmitteln der Windgeschwindigkeit von weniger als etwa 3 m/s, gemessen in 10 m Höhe, der Anteil der Winderosion an der Gesamtemission von Staub

Tabelle 5.25: Umfrageergebnis für den Emissionsfaktor zur Abwehung von ruhenden Halden.

Anzahl Werte N	Mittelwert (kg/(ha · h))	Median (kg/(ha · h))	Minimum (kg/(ha · h))	Maximum (kg/(ha · h))
5	6,4	10	0,8	10



Tabelle 5.26: Typische Emissionsfaktoren* für die Windabwehung. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, S.39.

Schüttgut	Korndichte ρ_K (g/cm ³)	Mittlere Korngröße d ₅₀ (mm)	Abtragung q _L (g/(m ² d))
Eisenerz			
■ Konzentrat	4,9	0,2 – 0,4	10 bis 150
■ Feinerz	4,7	0,4 – 4,0	≤ 10
■ Stückerz	4,7	9,0 – 12,0	≤ 2**
Steinkohle	1,3	2,0 – 7,0	≤ 50
Petrolkoks	1,4	0,5 – 1,2	25 bis 400

* als Anhaltswerte zu betrachten

** in Anlehnung an den Wert für Feinerz aufgrund des am Grobkorn anhaftenden, abwehbaren Feinanteils geschätzter Wert $\bar{u}_W \approx 6$ m/s; $\tan \alpha = 0,82$; $k_f \approx 2$ bis 3

LUBW

in der Regel vernachlässigt werden. Ein Forschungsprojekt, bei dem u. a. die Winderosion von Stein- und Braunkohlehaldden untersucht wurde, zeigt, dass auch bei höheren Windgeschwindigkeiten keine nennenswerten Windabwehungen vorliegt (Braun et al. (2012)).

Laut BMWFJ (2013) tragen die Faktoren Umschlagfrequenz und Windgeschwindigkeit maßgeblich zur Staubemission von ruhenden Halden bei. Eine für die Staubemission relevante Winderosion findet demnach nur bei einer Umschlagfrequenz von mehr als 10 Umschlägen/Jahr statt, weil so keine Verkrustung an den Halden auftritt (siehe auch VDI-Richtlinie 3790, Blatt 1 (2015)). Erst oberhalb einer mittleren Windgeschwindigkeit von etwa 5 m/s in 10 m Höhe sind relevante Emissionen zu erwarten. In Tabelle 5.27 sind abgeschätzte Emissionsfaktoren für Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeiten zwischen 3 m/s und 6,5 m/s aufgeführt. Sie beziehen sich auf den Gesamtstaub und sind als Maximalwerte zu betrachten.

Laut Moldenhauer et al. (2014) treten erst oberhalb einer mittleren Windgeschwindigkeit (Halbstundenmittelwerte) von 6 m/s bis 7 m/s relevante Emissionen durch Abwehungen auf. Lohmeyer et al. (1998) untersuchten die Emissionen ruhender Bergehalden. Demnach liegt bei ruhenden Halden nur eine geringe Staubemission im Vergleich zu aktiven Halden vor. Bei Starkwindereignissen (> 6 m/s) wurde abwehfähiges Material innerhalb kurzer Zeit ausgebracht, sodass die Haldenoberfläche verarmte und die Emissionsrate zurückging. Verkrustungen des Materials

Tabelle 5.27: Abgeschätzte maximale Emissionsfaktoren für Gesamtstaub bei Windabwehung in Abhängigkeit vom Jahresmittel der Windgeschwindigkeit. Quelle: verändert nach BMWFJ (2013).

Jahresmittel der Windgeschwindigkeit (m/s)	Emissionsfaktor (kg/(ha a))
3,0	7300
3,5	10950
4,0	14600
4,5	21900
5,0	29200
5,5	36500
6,0	47450
6,5	58400

LUBW

Anmerkung der Verfasser: Diese Emissionsfaktoren erscheinen uns deutlich zu hoch. Sie liegen um mehr als den Faktor 500 über den üblichen Ansätzen.

aufgrund von Feuchtigkeitseinfluss und Setzungseffekten hatten einen analogen Effekt. Unterhalb von Windgeschwindigkeiten zwischen 4 m/s und 5 m/s wurden analog zur VDI-Richtlinie 3790, Blatt 1 keine Emissionen aufgrund von Abwehungen festgestellt. Emissions-Zeitreihen (Tagesmittelwerte) wurden für Tage mit Starkwindereignissen ohne Niederschlag generiert. Mit gemessenen Emissionsraten (Tagesmittelwerte des abwehfähigen Materials, ermittelt per Saugversuch) wurden anschließend Ausbreitungsrechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Emissionsrate deutlich niedriger lag als bei der Nichtberücksichtigung einer Verarmung der Haldenoberfläche an abwehfähigem Material.

iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG & IUTA e.V. (2011) stellten fest, dass die Abwehung von ruhenden Halden nur einen vernachlässigbaren Anteil der Staubentwicklung beim Umschlag von Steinkohle ausmacht. Die Messwerte von Abwehungen belaufen sich hier auf < 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Nahbereich großer Halden.

Eine Aussage zum PM₁₀-Anteil am Gesamtstaub ist nur BMWFJ (2013) aufgeführt. Danach kann davon ausgegangen werden, dass der PM₁₀-Anteil am Gesamtstaub etwa 50 % beträgt.

5.5 Sonderfälle

In diesem Kapitel werden Berechnungsansätze und Emissionsfaktoren für Vorgänge zusammengestellt, die in VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 nicht behandelt werden.

5.5.1 Abkratzen von Kohle aus Lagerhalden

Das Abkratzen von Kohle beschreibt das Abschürfen von Kohlehalden mit einem Abkratzer (z. B. Halbportalkratzer oder Egge), wie in Abbildung 5.7 dargestellt. Hierbei werden mehrere Zentimeter dicke Schichten Kohle abgekratzt, die über ein Band abtransportiert werden. Es bleibt eine typische Rillenstruktur an der Halde zurück.

Die Emissionsberechnung kann nach iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG & IUTA e.V. (2011) als diskontinuierlicher Abwurf analog zu Gleichung (2) erfolgen. An Stelle der Abwurfmasse M wird der Massenstrom in t/h angesetzt. Als Emissionsfaktor wurde 0,24 g/t für den Halbportalkratzer ermittelt.

5.5.2 Zerkleinern von Schrotten mittels Schrottscheren

Größere Schrottteile können mittels Schrottscheren zerkleinert werden, um den Schrott auf chargierfähige Maße zu trimmen. Weitere Informationen hierzu können der VDI-Richtlinie 4085 entnommen werden.

Staubemissionen entstehen durch folgende Vorgänge:

1. Aufnahme der Schrotte mittels Bagger (meist Magnetgreifer)
2. Aufgabe der Schrotte ins Scherenbett (typische Fallhöhe = 0,5 m)
3. Schneiden der Schrotte
4. Austrag der geschnittenen Schrotte (typische Fallhöhe = 1,5 m)
5. Aufnahme des geschnittenen Schrotts mittels Bagger
6. Absetzen des geschnittenen Schrotts auf Halde (typische Fallhöhe = 0,5 m)

Die Staubemissionen können mit den Formeln für die Aufnahme und den Abwurf (siehe Kapitel 3.1) berechnet werden, wobei die Staubneigungen gemäß Kapitel 5.2.1.1



Abbildung 5.7: Halbportalkratzer beim Abkratzen von Kohle an einer Halde. Foto: iMA, 2011.

anzusetzen sind (typischerweise $SN = 2$ für Eisenschrotte, $SN = 1$ für NE-Metalle).

5.5.3 Zerkleinern von Schrotten mittels Brennschneiden

Große Metallteile werden auf Schrottplätzen üblicherweise mit thermischen Verfahren zerkleinert. Die VDI-Richtlinie 4085 unterscheidet autogenes Brennschneiden, Plasmaschneiden, Lanzenbrennen und Pulverschneidverfahren. In der Praxis wird vielfach das autogene Brennschneidverfahren angewandt, bei dem ein Bereich des Metallstücks durch eine Brenngas-Sauerstoff-Flamme erwärmt und im Sauerstoffstrahl verbrannt wird.

Beim Brennschneiden werden die Emissionen in Form von Schweißrauch freigesetzt, so dass die Partikelgrößen gering sind ($< 2,5 \mu\text{m}$). Der Staubmassenstrom hängt von der Blechdicke, dem Brenngas, dem Schneidgasdruck und der Schneidegeschwindigkeit ab (BGI 593 (2012)). Für das Brennschneiden von unlegiertem und niedriglegierten Stählen gibt BGI 593 (2012) eine Schweißrauchemissionsrate von 10–50 mg/s an.

Sofern der Staubmassenstrom konservativ abgeschätzt werden soll, kann gemäß Auskunft des LANUV NRW (Wichert, pers. Mitteilung (2019)) die obere Grenze des von BGI 593 (2012) ermittelten Werts von 50 mg/s bzw. 180 g/h angesetzt werden. Üblicherweise betragen die Schnittstärken beim Brennschneiden jedoch maximal 30 mm, so dass nur ein Massenstrom von 60 g/h freigesetzt wird. Laut LANUV NRW können bis zum Erreichen des Massenstrom-Grenzwerts von 0,2 kg/h nach Nr. 5.2.1 der TA Luft (2002)⁵ somit drei Brennlampen gleichzeitig betrieben werden, ohne dass eine Kapselung und Absaugung erforderlich ist.

5 Nach neuestem Referentenentwurf der TA Luft sollen auch beim Betrieb von nur einer Brennlampe stationäre oder mobile Schweißrauchabsaugungen eingesetzt werden.

Tabelle 5.28: Emissionsfaktoren nach Messungen in einem Kalksteinbruch. Quelle: BMWFJ (2013).

Partikelfraktion	Emissionsfaktor (g/t)	Anteil an PM ₁₀₀₀ (%)
PM ₅₀₀	26	56
PM ₇₅	12	26
PM ₁₀	7	15
PM _{2,5}	3	6

LUBW

5.5.4 Sprengungen

Sprengungen werden in Steinbrüchen durchgeführt, um Gesteinsschichten zu lockern. Auch beim Abriss von Hochhäusern wird diese Methode z. T. eingesetzt. Während des Sprengvorgangs kommt es kurzzeitig zu hohen Staubentwicklungen, für die in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 kein Massenstrom angegeben ist.

In der Technischen Grundlage des BMWFJ (2013) wird beispielhaft die Sprengung in einem Kalksteinbruch beschrieben. Hierfür werden die in Tabelle 5.28 angegebenen Emissionsfaktoren, die auf Basis von Messungen abgeleitet wurden, angegeben.

Für Hochhaussprengungen wird ein PM₁₀-Emissionsfaktor von 1 g/t (bezogen auf die Masse des gesprengten Betons) angegeben, der sowohl aus Messungen als auch aus Berechnungen ermittelt wurde (BMWFJ (2013)). Dabei wurde die Berechnung analog zum diskontinuierlichen Abwurf durchgeführt. Als Abwurfhöhe wird die Etagen- bzw. Gebäudehöhe angenommen. Die verminderte Fallhöhe durch den sich aufbauenden Sprengschutt wird vernachlässigt.

Tabelle 5.29: Emissionsfaktoren für Deponien. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 1 (2015).

Vorgang	Emissionsfaktor
Umschlag von Abraummaterial	10 g/t – 20 g/t
Umschlag von Schluff- oder Mischboden	10 g/t
Fahrbewegungen auf einer Schlackenhalde	0,7 g/m – 4 g/m
Fahrbewegungen auf einer Abraumhalde	4 g/m
Fahrbewegungen auf Kohlelagerplätzen	10 g/m – 12 g/m
Fahrbewegungen auf einer Schlicklagerstätte	1 g/m
Winderosion	150 kg/(ha · a)

LUBW

Von Gronewäller (2009) wurden Immissionsmessungen in einem Kalksteinbruch bei einer Absprenghöhe von 13 m durchgeführt. Zur Modellierung der Staubemission zieht Gronewäller (2009) die Gleichung (2) aus der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 (2015) heran, wobei $k_{\text{Gerät}}$ mit 1,5 und die freie Fallhöhe H_{frei} als mittlere Absprenghöhe angenommen wird. Unter Ansatz einer Staubneigung $SN = 4$ konnten die Ergebnisse der Messung gut reproduziert werden.

5.5.5 Deponien

Die Berechnung der Staubemissionen beim Betrieb einer Deponie erfolgt mit den in Kapitel 3 beschriebenen Gleichungen. Da Deponien speziell in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 2 (2017) behandelt werden und die Beiträge des Umschlags und der Fahrbewegungen sich von anderen Anlagentypen unterscheiden, werden sie in diesem Kapitel behandelt.

Die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 2 (2017) listet für Deponien pauschalisierte Emissionsfaktoren aus Messstudien auf, die in Tabelle 5.29 dargestellt sind.

6 Erstellung einer IT-Anwendung

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Parameter und Berechnungsansätze werden in einer IT-Anwendung verarbeitet, mit der die Staubemissionen abgeschätzt werden können. Damit soll insbesondere den Immissionschutzbehörden eine einfache Möglichkeit der Überprüfung von Prognosegutachten gegeben werden. Für die Anwendung wird das Programm Microsoft Excel in der Version von 2019 verwendet, das zum einen weit verbreitet ist und zum anderen einer Vielzahl Nutzern vertraut ist. Das Programm lässt sich bis Version Microsoft Excel 2010 verwenden.

Eine ausführliche Beschreibung der Excel-Anwendung ist dem Tutorial der Excel-Anwendung zu entnehmen (Damian et al. (2019)). Darin wird die Funktionsweise erklärt und Beispielrechnungen werden durchgeführt. Deshalb werden in diesem Kapitel nur grundlegende Informationen zur Anwendung erwähnt.

Die Anwendung gliedert sich in die Bereiche Umschlag, Fahrbewegungen und Sonderfälle, bei denen nach Möglichkeit die in der Projektstudie ermittelten Werte als Standardwerte in die Berechnung einfließen sollen. Für den Nutzer besteht die Möglichkeit, sämtliche Standardwerte durch eigene Werte zu ersetzen. Auf einer zusammenfassenden Seite werden sämtliche Emissionen dargestellt und die Gesamtemission berechnet.

Der Nutzer kann die Berechnung auf Grundlage von Fließbildern ähnlich Abbildung 4.1 durchführen. Damit werden die staubenden Vorgänge anschaulich gegliedert und automatisch in die einzelnen Prozesse übersetzt. Die Berechnung wird von der Anlage zunächst mit den Eingangsparametern durchgeführt, die in dieser Studie ermittelt wurden. Der Nutzer kann diese Standardwerte an jeder Stelle durch eigene Werte ersetzen oder Minderungsmaßnahmen ansetzen.

7 Resümee

7.1 Allgemeines

In Tabelle 7.1 sind die Parameter, die zur Berechnung der Staubemission erforderlich sind, zusammenfassend dargestellt.

In Kapitel 7.2 bis 7.12 sind die Ergebnisse aus der Literaturrecherche und der Umfrage bei den Experten zusammengestellt und es werden typische Werte für die Parameter, die zur Berechnung der Staubemissionen erforderlich sind, empfohlen.

7.2 Staubneigung SN

Tabelle 7.2 enthält eine Zusammenfassung der Staubneigungen von Schüttgütern, die in der gutachtlichen Praxis

häufig auftreten. Die letzte Spalte enthält die von den Verfassern dieses Berichts empfohlenen Werte. In vielen Fällen korrespondieren diese mit den Medianwerten. In einigen Fällen weichen sie jedoch von diesen ab, sofern dies von den Verfassern aufgrund weitergehender Kenntnisse für erforderlich angesehen wird.

Die Staubneigungen gelten für unbefeuchtete Güter. Eine Befeuchtung auf Materialfeuchten von 3 % bis 5 % bewirkt eine Reduzierung der Staubneigung um etwa eine Stufe. Alternativ kann für diesen Fall auch eine Minderung von 70 % angesetzt werden.

Tabelle 7.1: Parameter zur Berechnung der Staubemission.

Parameter	Umschlag und Aufbereitung	Fahrbewegungen
Staubneigung SN	x	
Umfeldfaktor k_U	x	
Freie Fallhöhe H	x	
Schüttdichte ρ_S	x	
Durchsatzleistung/Abwurf-/Aufnahmemasse M'/M	x	
Korrekturfaktor $k_{Gerät}$	x	
Minderungsmaßnahmen*	x	
Flächenbeladung sL (befestigte Fahrwege)		x
Feinkornanteil s (unbefestigte Fahrwege)		x
Mittlere Masse der Fahrzeugflotte W		x
Zuladung der Fahrzeuge	x	x
Anzahl der Niederschlagstage p		x
Kennzahl für Maßnahmenwirksamkeit k_M		x

* Minderungsmaßnahmen beim Umschlag können z. B. in Form einer Befeuchtung der Aufbereitungsaggregate vorkommen. Sie können durch einen Faktor $m = (1 - k_M)$ in den Formeln ähnlich wie bei Fahrbewegungen berücksichtigt werden.



Tabelle 7.2: Staubneigungen SN (sofern nicht anders beschrieben, jeweils unbefeuchtete Güter).

Schüttgüter	Median	Minimum	Maximum	Empfohlener Wert
Boden	2,5	1,5	3,0	2,5
Boden (erdfeucht)	2,0	0,0	2,0	2
Bauschutt	3,0	2,5	4,0	3
Bauschuttgemische	3,0	2,5	4,0	3,5
Baustellenmischabfälle	3,0	1,5	3,0	3
Gipshaltige Baustoffe	4,0	3,0	4,0	4
Beton (grob)	3,0	2,0	3,0	3
Erdaushub	2,0	1,5	4,0	2
Sand	2,5	1,5	4,0	2,5
Kies	2,5	1,5	3,0	2,5
RC-Material	3,0	1,5	4,0	3
Straßenaufbruch	2,5	1,0	4,0	2,5
Splitt	2,5	2,0	3,5	3
Gleisschotter	3,0	1,5	3,0	3
Gesteinsbruch	3,0	1,0	4,0	3
Brechsand	3,0	2,0	4,0	3
Pflastersteine	2,0	0,0	3,0	2
Siebschutt	3,0	2,0	4,0	3
Gewerbeabfall	2,0	1,0	3,0	2,5
Schrott	2,0	0,0	3,0	2 *
Metall	1,0	0,0	3,0	1 *
Stahl	1,0	0,0	3,0	1
Altglas	0,0	0,0	2,0	0
Altholz	2,3	0,0	3,0	2,5
PPK (Papier, Pappe, Kartonnagen)	2,0	0,0	3,0	2
Kunststoffe (sortenrein)	2,0	0,0	2,0	2
Verpackungsabfall	2,0	0,0	2,0	2
Bioabfall	1,7	0,0	3,0	1,5
Klärschlamm	1,4	0,0	2,0	1,5
Restmüll	2,0	1,5	3,0	2
Grünschnitt, trocken und ungehäckselt	1,7	0,0	2,0	1,5
Grünschnitt, gehäckselt	2,0	0,0	2,5	2
Frischkompost (feucht)	1,0	0,0	2,0	2
Fertigkompost (trocken)	2,0	1,0	3,0	2,5
Getreide	3,0	3,0	4,0	3
Futtermittel	3,0	3,0	4,0	3
EBS-Inputmaterial	2,3	1,0	3,0	2
EBS zerkleinert	2,5	1,0	3,0	2
Düngemittel	3,0	3,0	5,0	3

* Entspricht auch der Empfehlung des LANUV NRW



Tabelle 7.3: Umfeldfaktoren für Minderungsmaßnahmen, die nicht in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 beschrieben sind.

Ort der Emissionsfreisetzung	Mittelwert	Minimum	Maximum	Empfohlener Wert
Lagerboxen (3-seitig umschlossen)	0,8	0,5	0,9	0,8
Halle (einseitig offen)	0,5	0,3	0,8	0,6
Halle mit permanent offenen Toren an einer Seite	0,4	0,1	0,7	0,25
Halle mit zwei permanent offenen Toren an gegenüberliegenden Seiten	0,6	0,2	0,8	0,3
Aufgabetrichter Aufbereitungsaggregat	0,8	0,6	0,9	0,8
Halle mit Absaugung, Tore nur für Ein- und Ausfahrten geöffnet				0,06*

* Empfehlung des LANUV NRW. Eine weitere Reduzierung ist bei Doppelschleusentoren möglich.



7.3 Umfeldfaktor k_U

Der Umfeldfaktor k_U kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Da er als linearer Faktor in die Emissionsberechnung eingeht, hat er einen maßgebenden Einfluss auf die Staubemission.

Auf Seite 27 f der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 sind Umfeldfaktoren für eine Reihe von Geräten und Fahrzeugen aufgeführt. Hieraus geht hervor, dass in den meisten Fällen ein Umfeldfaktor von 0,9 oder kleiner anzusetzen ist (wenn sich z. B. Lagerhalden auf dem Betriebsgelände befinden).

Emissionsmindernde Maßnahmen, die durch Abschirmungen oder Einhausungen bewerkstelligt werden, können über den Umfeldfaktor berücksichtigt werden. In Tabelle 7.3 sind Umfeldfaktoren für Minderungsmaßnahmen, die nicht in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 beschrieben sind dargestellt. Die letzte Spalte enthält die von den Verfassern dieses Berichts empfohlenen Werte.

7.4 Abwurfhöhe H

Die Abwurfhöhe geht mit dem Exponenten 1,25 in den Emissionsfaktor ein. Sie ist somit ein wichtiger Parameter zur Berechnung der Staubemission.

Tabelle 7.4 enthält eine Zusammenfassung der Abwurfhöhen für eine Reihe von typischen Vorgängen sowie die empfohlenen Werte. Da die Emissionen, insbesondere bei kontinuierlichen Abwurfverfahren, von der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 deutlich überschätzt werden (siehe z. B. Strobl & Kuntner (2014)), sind für diesen Vorgang eher die unteren Werte der recherchierten/abgefragten Spannweite anzuwenden. Dies wird in der Tabelle dokumentiert.

Die empfohlenen Abwurfhöhen können sich von Anlage zu Anlage deutlich unterscheiden. Sofern die tatsächlichen Abwurfhöhen bekannt sind, sollten diese verwendet werden.

Tabelle 7.4: Abwurfhöhen H beim Umschlag von Schüttgütern.

Abwurfvorgang	Median (m)	Minimum (m)	Maximum (m)	Empfohlener Wert (m)
Abkippen von Lkw auf Halde	1,0	0,5	2,0	1
Abwurf von Greifer auf Halde	1,1	0,5	6,0	1
Abwurf von Radlader auf Halde	1,0	0,5	1,8	1
Abwurf von Band auf Halde	1,5	0,8	5,5	1*
Offene Bandübergabe	0,5	0,3	1,0	0,5*
Abkippen von Lkw auf Freifläche	1,0	0,5	2,0	1
Aufgabe von Radlader in Brecher/Sieb	1,0	0,5	1,3	1
Aufgabe von Greifer in Brecher/Sieb, Schrottschere	1,0	0,5	3,0	1
Verladung von Radlader in Lkw	1,0	0,5	1,5	1
Verladung von Greifer in Lkw	1,0	0,5	3,0	1
Verladung von Band in Lkw	1,5	0,5	3,0	1*
Abwurf aus Baggerschere (Vorzerkleinerung)	0,6	0,5	2,0	1
Vorsortierung mit einem Greifer	1,0	0,5	2,0	1

* Empfehlung der Verfasser, da die Formeln der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 die Emissionen bei kontinuierlichen Abwurfverfahren deutlich überschätzen.



7.5 Schüttdichte ρ_s

Die Schüttdichte geht linear in die Berechnung zur Staubemission ein, was sie zu einem wichtigen Einflussparameter macht. Die Zusammenfassung der Schüttdichte für typische Materialien sind in Tabelle 7.5 dargestellt. Für Abfälle sind im Anhang in gängige Schüttdichten eingetragen.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Schüttdichte erheblich von der Beschaffenheit des Materials abhängt und deutlich von den Werten der Tabelle 10.2 abweichen kann. Sofern verlässliche Angaben des Betreibers vorliegen, können diese verwendet werden.

Tabelle 7.5: Schüttdichten ρ_s .

Schüttgut	Mittelwert (t/m ³)	Minimum (t/m ³)	Maximum (t/m ³)	Empfohlener Wert (t/m ³)
Boden	1,6	1,3	1,8	1,6
Boden (erdfeucht)	1,7	1,4	2,0	1,7
Bauschutt	1,5	1,1	1,8	1,5
Bauschuttgemische	1,5	0,9	1,8	1,5
Baustellenmischabfälle	1,0	0,3	1,7	1,0
Gipshaltige Baustoffe	0,7	0,3	1,5	0,7
Beton (grob)	1,7	1,3	2,2	1,7
Erdaushub	1,6	1,4	1,8	1,6
Sand	1,8	1,5	2,0	1,8
Kies	1,7	1,5	1,8	1,7
RC-Material	1,7	1,4	1,8	1,7
Straßenaufbruch	1,6	1,0	1,8	1,6
Splitt	1,6	1,3	1,8	1,6
Gleisschotter	1,6	1,4	1,8	1,6
Gesteinsbruch	1,5	1,2	1,8	1,5
Brechsand	1,6	0,8	1,8	1,6
Pflastersteine	1,4	1,2	1,6	1,4
Siebschutt	1,0	0,5	1,6	1,0
Gewerbeabfall	0,6	0,2	1,5	0,6
Schrott	1,0	0,5	1,8	1,0
Metall	0,9	0,7	1,2	0,9
Stahl	2,1	0,7	5,5	2,1
Altglas	0,7	0,3	1,2	0,7
Altholz	0,4	0,1	0,8	0,4
PPK (Papier, Pappe, Kartonnagen)	0,2	0,1	0,4	0,2
Kunststoffe	0,2	0,2	0,3	0,2
Verpackungsabfall	0,2	0,1	0,4	0,2
Bioabfall	0,4	0,2	0,7	0,4
Klärschlamm	1,0	0,7	1,2	1,0
Restmüll	0,4	0,3	0,6	0,4
Grünschnitt, trocken und ungehäckselt	0,2	0,2	0,8	0,2
Grünschnitt, gehäckselt	0,4	0,3	0,8	0,4
Frischkompost (feucht)	0,8	0,5	1,2	0,8
Fertigkompost (trocken)	0,7	0,5	1,2	0,7
Getreide	0,7	0,6	0,8	0,7
Futtermittel	0,7	0,7	0,8	0,7
EBS-Inputmaterial	0,3	0,2	0,4	0,3
EBS zerkleinert	0,3	0,2	0,4	0,3
Düngemittel	--	1,0	1,0	1,0

7.6 Durchsatzleistungen M^*

Maßgebend für die Emissionsberechnungen sind die Durchsatzleistungen (t/h) während des Betriebs der Geräte, nicht die durchschnittliche Durchsatzleistungen unter Einbeziehungen von Pausen.

In Tabelle 7.6 sind typische Durchsatzleistungen für Brecher und Siebanlagen dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Durchsatzleistungen anlagenspezifisch sind und bei den Betreibern abgefragt werden sollten. Es können also keine Werte empfohlen werden.

Weitere typische Durchsatzleistungen für Brecher und Siebanlagen von gängigen Herstellern sind in Tabelle 10.9 auf Seite 63 dargestellt.

Tabelle 7.6: Typische Durchsatzleistungen M^* für mineralische Schüttgüter, Grünschnitt und Altholz.

Material	Aggregat	Durchsatzleistung (t/h)
Mineralische Schüttgüter	Prallmühle	150
	Backenbrecher	80
	Siebanlagen	150
	Austragsbänder	150
Altholz/ Grünschnitt	Schredder/Sieb	30
	Austragsbänder *	30

* Hinweis: Austragsbänder sind meist auf Schredder/Sieb von der Durchsatzleistung abgestimmt.

LUBW

7.7 Korrekturfaktor $k_{Gerät}$

Der Korrekturfaktor $k_{Gerät}$ berücksichtigt das Abwurfverfahren. Er ist in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 fest vorgegeben. Folgende Werte sind anzusetzen:

Tabelle 7.7: Korrekturfaktoren $k_{Gerät}$

Abwurfverfahren	Korrekturfaktor $k_{GERÄT}$
Greifer	2
Sonstige diskontinuierliche Abwurfverfahren (Lkw, Radlader)	1,5
Kontinuierliche Beladegeräte (Schüttröhre, Transportband)	1

LUBW

7.8 Flächenbelastung sL

Die Flächenbelastung sL ist in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 mit den Konventionenwerten aus Tabelle 10.1 angegeben. Es ist zu berücksichtigen, dass je nach Verschmutzungsgrad auch Zwischenwerte verwendet werden können.

Tabelle 7.8: Konventionenwerte für die Flächenbelastung befestigter Fahrwege. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4, S. 10.

Verschmutzung	Konventionenwert in g/m^2
gering	1
mäßig	5
hoch	60

LUBW

7.9 Feinkornanteil s

Für den Feinkornanteil s des Straßenbelags sind in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 Hinweise auf Konventionen- bzw. Anhaltswerte für bestimmte Industriebetriebe aufgeführt. Für sonstige Anlagen kann der in Tabelle 7.9 empfohlene Wert verwendet werden.

Tabelle 7.9: Feinkornanteil s des Straßenbelags auf unbefestigten Fahrwegen.

Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Empfohlener Wert
7,9 %	7,5 %	5,0 %	14,0 %	7,0 %

LUBW

7.10 Mittlere Masse der Fahrzeugflotte W

Die Berechnungsformeln der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 basieren auf der mittleren Masse der anliefernden und abtransportierenden Fahrzeuge. Dieses Flottenmittel wird also individuell berechnet, sodass keine Werte empfohlen werden können.

Für den Fall, dass lediglich Zuladungen, aber keine Leergewichte bekannt sind, kann das Leergewicht aus den empirisch ermittelten Gleichungen (9) und (10) für Lkw und Radlader abgeleitet und das Flottenmittel nach VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 berechnet werden.

Tabelle 7.10: Minderung durch Befeuchtung der Aufbereitungsaggregate.

Mittelwert	Minimum	Maximum	Empfohlener Wert
0,7	0,5	0,9	0,7

LUBW

7.11 Anzahl der Niederschlagstage p

Der Einfluss der Anzahl an Niederschlagstagen pro Jahr ist für befestigte und unbefestigte Fahrwege verschieden, da er bei befestigten Fahrwegen mit dem Faktor $\frac{1}{3}$ in die Berechnung eingeht.

Tabelle 7.11: Kennzahlen für Minderungsmaßnahmen bei unbefestigten Fahrwegen. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 und BMWFJ (2013).

Minderungsmaßnahme	Kennzahl zur Minderung nach VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 (2018) und BMWFJ (2013)
Manuelle Befeuchtung	0,5 (bei 3 l/m ² alle 3 Stunden)
Automatische Befeuchtung	bis 0,8
Calium-Magnesium-Acetat (CMA)	0,5 (bei 150 ml/m ² alle 5 Stunden)

LUBW

Zur Bestimmung der Niederschlagstage ist die in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 dargestellte Abbildung zu verwenden. Eine Anzahl von weniger als 100 Niederschlagstagen pro Jahr ist hierbei unwahrscheinlich.

Für eine genauere Bestimmung können meteorologische Messdaten ausgewertet (z. B. vom Deutschen Wetterdienst), bei denen Tage mit > 1 mm Niederschlag als Niederschlagstage gewertet werden.

7.12 Kennzahl für Maßnahmenwirksamkeit k_M

Bei Umschlag- und Aufbereitungsvorgängen kann eine Minderung bei Anwendung von Befeuchtungsmaßnahmen angesetzt werden. Eine effektive Materialbefeuchtung führt zu einer Minderung von im Mittel 70 % (s. Tabelle 7.10). Weitere Minderungsmaßnahmen wie Einhausungen werden über den Umfeldfaktor k_U berücksichtigt (vgl. Kapitel 7.3).

Minderungsmaßnahmen in Form einer Befeuchtung können außerdem für die Emission von unbefestigten Fahrwegen berücksichtigt werden (siehe Tabelle 7.11). Bei befestigten Fahrwegen werden Befeuchtungsmaßnahmen als Reduzierung von Flächenbelastungen angesehen und fließen als solche in die Emissionsberechnung ein.

Fahrwegemissionen können zusätzlich durch eine Verringerung der Fahrgeschwindigkeit bewirkt werden. Als empfohlene Werte können diejenigen in Tabelle 7.12 dienen.

Tabelle 7.12: Umfrageergebnisse zur Minderungskennzahl k_M bei Geschwindigkeitsreduktion auf unbefestigten und befestigten Fahrwegen.

Geschwindigkeitsreduktion	Median	Minimum	Maximum	Empfohlener Wert
auf unbefestigten Fahrwegen (auf 30 km/h)	0,2	0,0	0,6	0,2
auf unbefestigten Fahrwegen (auf 20 km/h)	0,2	0,0	0,8	0,3
auf unbefestigten Fahrwegen (auf 10 km/h)	0,4	0,0	0,9	0,4
auf befestigten Fahrwegen (von 30 km/h auf 20 km/h)				0,2*
auf befestigten Fahrwegen (auf 10 km/h)	0,4	0,2	0,4	0,4

* von der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 empfohlener Wert

LUBW

8 Ausblick und weiterer Untersuchungsbedarf

In der vorliegenden Studie werden die Ansätze der VDI-Richtlinien 3790, Blatt 3 und Blatt 4 zur Ermittlung von diffusen Staubemissionen zusammengefasst und durch weiterführende Literatur ergänzt. Ein wesentliches Ziel ist es, die Ansätze für Staubimmissionsprognosen soweit wie möglich zu vereinheitlichen und den Behörden und Gutachtern ein Werkzeug in die Hand zu geben, mit dem diffuse Staubemissionen abgeschätzt werden können.

Trotz der umfangreichen Recherche hat sich gezeigt, dass in mehreren Bereichen weiterer Untersuchungsbedarf besteht. Zwar können vom Gutachter konservative Ansätze gewählt werden, die einen sicheren Weg der Beurteilung ermöglichen. Werden allerdings an vielen Stellen konservative Ansätze gewählt, so kann dies zu einer unrealistischen Überschätzung der Emissionen und Immissionen führen.

Folgender weiterer Untersuchungsbedarf konnte in der Studie detektiert werden:

- Untersuchungen, die u. a. von Strobl & Kuntner (2014) durchgeführt wurden, zeigen, dass vor allem die Emission von kontinuierlichen Abwürfen durch die Berechnungsformel der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 deutlich überschätzt wird. Um einen geeigneten Ansatz zu erhalten, sind weitere Untersuchungen dringend zu empfehlen.
- Die freigesetzten Stäube weisen unterschiedliche Partikelgrößen auf. In den letzten Jahren sind vor allem die kleinen Partikel in den Fokus geraten, da sie einen maßgebenden Einfluss auf die menschliche Gesundheit haben können. Es ist daher wichtig, die Anteile des Feinstaubes (PM_{10} , $PM_{2,5}$) an den emittierten Stäuben zu ermitteln. In diesem Bereich liegen bisher nur wenig Erkenntnisse vor.
- Ebenso liegen keine Messungen vor, welche Emissionen von Brech- und Siebmaschinen ausgehen. Es liegt im Ermessen des Gutachters, Ansätze auszuwählen und diese zu begründen.
- Wenn staubemittierende Tätigkeiten in Hallen durchgeführt werden, wird die Emission in die Atmosphäre deutlich reduziert. Dies gilt auch dann, wenn es sich um einseitig offene Hallen handelt oder Tore dauerhaft geöffnet sind. Diese Minderung wird über den Umfeldfaktor k_U (siehe Abschnitt 5.2.2.4) berücksichtigt. Die Wahl eines sinnvollen Umfeldfaktors ist allerdings schwierig, da sich durch verschiedene Hallenkonstruktionen und -ausrichtungen in Bezug zur Hauptwindrichtung unterschiedliche Minderungen ergeben. Hier könnten, ggf. mit theoretischen Ansätzen, geeignete Vorgaben ermittelt werden.
- Generell basieren die Berechnungsformeln der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 auf empirischen Erkenntnissen. Seit deren Veröffentlichung sind die Möglichkeiten im Bereich der hochaufgelösten Computersimulationen bei der Ausbreitung von Stäuben weit fortgeschritten. Inzwischen können mit vertretbarem Rechenaufwand Simulationsmodelle erstellt werden, mit deren Hilfe ein Bezug zwischen den Berechnungsformeln und den physikalischen Grundsätzen bei Staubaubreitungen hergestellt werden kann. Auf diese Weise könnten beispielsweise die Staubemissionen bei kontinuierlichen und diskontinuierlichen Abwürfen simuliert und die Berechnungsformeln angepasst werden.
- Durch Anwendung von emissionsmindernden Maßnahmen haben Unternehmen die Möglichkeit, ihre Emissionen gezielt zu reduzieren. In der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 werden z. B. Emissionsminderungsmaßnahmen bei Fahrbewegungen vereinheitlicht und quantitativ in die Berechnungsansätze integriert. Die Abschätzung der Emissionsminderung, die sich durch eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit auf unbefestigten Fahrwegen ergibt, bleibt allerdings dem Gutachter überlassen. Einleuchtend ist der Grenzfall, dass bei einer Fahrgeschwindigkeit von 0 km/h kein Staub emittiert wird. Zwar liefert eine Forschungsarbeit von Kühn (2002) Anhaltspunkte für andere Fahrgeschwindigkeiten, jedoch würden Immissionsmessungen einen wichtigen Erkenntnisgewinn bringen. Als Parameter sollten neben der Fahrgeschwindigkeit auch der Feinkornanteil und die Fahrwegbefeuchtung variiert werden.
- Für Umschlag- und Aufbereitungsvorgängen liefert die VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 keine Vorgaben, wie Minderungsmaßnahmen zu berücksichtigen sind.

Untersuchungen, die u. a. von Klenk et al. (2016) durchgeführt wurden, zeigen, dass eine Materialbefeuchtung eine der effektivsten Staubschutzmaßnahmen darstellt. Es ist davon auszugehen, dass das Minderungspotential durch Befeuchtungsmaßnahmen auch von dem jeweils

vorliegenden Schüttgut abhängt. Durch einen schüttgutbezogenen Reduzierungsansatz bei Materialbefeuchtung könnten Minderungsmaßnahmen gezielter in den Emissionsprognosen berücksichtigt werden.

9 Glossar

Im Glossar können Stichworte nachgeschlagen werden, deren kurze Definitionen den VDI-Richtlinien 3790, Blatt 1 bis Blatt 4 entnommen werden können.

B

befestigter Fahrweg

Fahrweg, dessen Deckschicht dauerhaft gebunden ist (z. B. durch Bitumen oder Zement) und aus dem sich durch Abrieb oder Erosion nur irrelevante Mengen des Oberflächenmaterials lösen.

D

Deponie

oberirdische Anlage zur Beseitigung von Abfällen

E

Emissionsfaktor

Größe, die angibt, wie viel eines Stoffs oder Stoffgemischs bezogen auf geeignete Bezugsgrößen emittiert wird.

F

Fahrweg

sämtliche Flächen innerhalb von Betriebsgeländen, auf denen Fahrbewegungen stattfinden.

Flächenbeladung (sL)

Menge an Staub mit Korngrößen $< 75 \mu\text{m}$ pro Flächeneinheit auf einem befestigten Fahrweg.

G

Gesamtstaub

auch Total Suspended Particles, TSP. Partikel festen Aggregatzustands mit einer Sinkgeschwindigkeit von $\leq 10 \text{ cm/s}$.

M

mittlere Masse der Fahrzeugflotte

arithmetisches Mittel der Massen aller Fahrzeuge, die eine betrachtete Strecke unabhängig von der Fahrtrichtung im Bezugszeitraum befahren.

P

PM₁₀

Partikel, die einen gröÙenselektierenden Lufteinlass gemäß der Referenzmethode für die Probenahme und Messung von PM₁₀ passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von $10 \mu\text{m}$ einen Abscheidegrad von 50 % aufweist.

S

Staub

Dispers verteilte Partikel festen Aggregatzustands in der Luft oder anderen Gasen.

Staubneigung

Materialeigenschaft, welche die Neigung eines Stoffes zum Stauben beschreibt.

U

unbefestigter Fahrweg

Fahrweg, dessen Oberflächenmaterialien nicht dauerhaft fest miteinander verbunden sind und deshalb leicht abgetragen werden können. Zum Beispiel verdichtete Erde oder Kies, Schotter.

10 Anhang

10.1 Umfrage

Tabelle 10.1: Umfrage zur Ermittlung gängiger Größen und Verfahren zur Berechnung von Staubemissionen.

Institutsbefragung Staubemissionsprognose	
Institut:	
Mitarbeiter:	
Datum:	
Beschreibung:	
<p>Im Auftrag der LUBW wird derzeit eine Excel-Anwendung zur Ermittlung der Staubemissionen aus diffusen Quellen entwickelt. Hierzu sollen die Standard-Parameter, die zur Ermittlung der Staubemissionen erforderlich sind, abgefragt werden. Sofern möglich, sollen daraus typische Werte oder Spannbreiten für die Parameter abgeleitet werden.</p> <p>Um eine möglichst breite Basis der statistischen Auswertung zu bekommen, würden wir Sie bitten, sich kurz Zeit zu nehmen, diesen Fragebogen (A-H) auszufüllen. Bitte tragen Sie in die jeweiligen Felder die Werte ein, die Sie üblicherweise für eine Staubemissionsprognose ansetzen. Es müssen selbstverständlich nicht alle Felder ausgefüllt werden. In die Spalte „Bemerkungen“ können Sie Kommentare (z. B. Spannbreiten) oder Literaturhinweise schreiben.</p> <p>Anschließend wird eine statistische Auswertung der Daten durchgeführt. Über die Ergebnisse sowie den Stand der Veröffentlichung dieser Daten können wir Sie gerne auf dem aktuellen Stand halten.</p> <p>Ihre Angaben werden vertraulich und anonymisiert behandelt.</p> <p>Vielen Dank für Ihre Unterstützung</p>	

A) Parameter Schüttgüter	Staubneigung nach VDI 3790/3	Schüttdichte in t/m ³	PM10-Anteil an Gesamtstaub in %	Bemerkungen
Falls nicht anders gekennzeichnet, werden die Parameter für ein unbefeuchtetes Material nach längerer Lagerung erfragt. Zusätzlich werden für Boden und Kompost die Parameter bei frischem bzw. feuchtem Zustand erfragt.				
Boden				
Boden (erdfeucht)				
Bauschutt				
Bauschuttgemische				
Baustellenmischabfälle				
Gipshaltige Baustoffe				
Beton (grob)				
Erdaushub				
Sand				
Kies				
RC-Material				
Straßenaufbruch				
Splitt				
Gleisschotter				
Gesteinsbruch				
Brechsand				
Pflastersteine				
Siebschutt				
Gewerbeabfall				
Schrott				
Metall				
Stahl				
Altglas				

A) Parameter Schüttgüter	Staubneigung nach VDI 3790/3	Schüttdichte in t/m ³	PM10-Anteil an Gesamtstaub in %	Bemerkungen
Altholz				
PPK (Papier, Pappe, Kartonnagen)				
Kunststoffe				
Verpackungsabfall				
Bioabfall				
Klärschlamm				
Restmüll				
Grünschnitt, frisch				
Grünschnitt, gehäckselt				
Frischkompost (feucht)				
Fertigkompost (trocken)				
Getreide				
Futtermittel				
EBS-Inputmaterial				
EBS zerkleinert				
Düngemittel				

B) Abwurfhöhen	Abwurfhöhe in m	Bemerkungen
Abkippen Lkw auf Halde		
Abwurf Greifer auf Halde		
Abwurf Radlader auf Halde		
Abwurf Band auf Halde		
Offene Bandübergabe		
Abkippen Lkw auf Freifläche		
Aufgabe Radlader in Brecher/Sieb		
Aufgabe Greifer in Brecher/Sieb		
Verladung Radlader in Lkw		
Verladung Greifer in Lkw		
Verladung Band in Lkw		
Abwurf aus Baggerschere (Vorzerkleinerung)		
Vorsortierung mit einem Greifer		

C) Umfeldfaktoren Umschlag	Umfeldfaktor	Bemerkungen
Lagerboxen (3-seitig umschlossen)		
Halle (einseitig offen)		
Halle mit permanent offenen Toren an einer Seite		
Halle mit zwei permanent offenen Toren an gegenüber-liegenden Seite		
Aufgabetrichter Aufbereitungsaggregat		

D) Parameter Fahrwegemission	Bemerkungen
Feinkornanteil in % (unbefestigt)	

E) Minderungsmaßnahmen	Minderungsfaktor in %	Bemerkungen
Durch die Befeuchtung des Materials an Aufbereitungsaggregaten können Emissionen effektiv gemindert werden. Die Anwendung dieser Minderungen ist jedoch nicht einheitlich umgesetzt. Können Sie nachfolgend die effektive prozentuale Minderung oder den von Ihnen gewählten Minderungsansatz beschreiben?		
Minderung durch Befeuchtung der Aufbereitungsaggregate		
Die VDI-Richtlinie 3790 Bl. 4 gibt Kennzahlen zur Wirksamkeit von Emissionsminderung auf befestigten und unbefestigten Fahrwegen vor. Um eine einheitliche Interpretation der jeweiligen Wirksamkeit sicher zu stellen, werden nachfolgend Minderungsfaktoren auf befestigten und unbefestigten Fahrwegen abgefragt.		
Geschwindigkeitsreduktion auf unbefestigten Fahrwegen (auf 30 km/h)		
Geschwindigkeitsreduktion auf unbefestigten Fahrwegen (auf 20 km/h)		
Geschwindigkeitsreduktion auf unbefestigten Fahrwegen (auf 10 km/h)		
Geschwindigkeitsreduktion auf befestigten Fahrwegen (auf 10 km/h)		

F) Dieselmotoremissionen	Emissionsfaktor in kg/h	Bemerkungen
Aufbereitungsaggregat		
Raupenbagger		
Planierraupe		
Radbagger		
Stapler		
Güterschiff		
Notstromaggregat		
Walzenzug		

G) Windabwehung von den ruhenden Halden		Bemerkungen
Für die Bestimmung von Windabwehungen von ruhenden Halden werden aktuell keine einheitlichen Ansätze verwendet. Hier interessiert uns, ob Sie diese Emissionen berücksichtigen und erbitten eine kurze Beschreibung des Ansatzes. Wenn möglich können Sie auch gerne auf Literatur verweisen.		
Werden Emissionen berücksichtigt [ja/nein]		
Wenn ja, ist die Ansetzung abhängig von meteorologischen oder anlagenspezifischen Bedingungen?		
Emissionsfaktor in kg/(ha · h)		
Stichwortartige Beschreibung des Ansatzes		

H) Emissionen durch Brech-/Siebvorgang		Bemerkungen
Es herrscht aktuell Unklarheit darüber, ob neben den Emissionen durch die Materialaufgabe und den Bandaustrag, auch die Emissionen durch die Brech- und Siebvorgänge selbst berücksichtigt werden. Hier interessiert uns, welchen Standpunkt Sie vertreten und ob Sie Emissionen aus Aufbereitungsvorgängen ansetzen.		
Werden Emissionen durch den Brech-/ Siebvorgang selbst berücksichtigt [ja/nein]		
Stichwortartige Beschreibung des Ansatzes		
Beim Sieben entstehen mehrere Teilströme unterschiedlicher Körnung. Die folgenden Fragestellungen sollen Klarheit schaffen, wie ein Siebvorgang im Detail berücksichtigt wird.		
Werden die Abwürfe der Teilströme separat betrachtet [ja/nein]		
Stichwortartige Beschreibung des Ansatzes zur Aufteilung der Teilströme beim Sieben		
Werden die Staubneigungen für die einzelnen Fraktionen angepasst? [ja/nein]		



10.2 Umschlag und Aufbereitung

10.2.1 Schüttdichten

Tabelle 10.2: Schüttdichten nach AVV-Nummern.

	Abfallart	AVV-Nr.	Schüttgewicht (t/m ³) lose /verpresst
PPK	PPK – B12 lose	15 01 01	0,050
	PPK – B12 lose	20 01 01	0,050
	PPK – B12 verpresst	15 01 01	0,150
	PPK – B12 verpresst	20 01 01	0,150
	PPK – B19 lose	15 01 01	0,045
	PPK – B19 lose	20 01 01	0,045
	PPK – B19 verpresst	15 01 01	0,150
	PPK – B19 verpresst	20 01 01	0,150
	PPK – D39	15 01 01	0,300
	PPK – D39	20 01 01	0,300
	PPK – Multidruck 3.01 (K02)	20 01 01	
	PPK – Druckereiabfälle (C02)	20 01 01	
	PPK – Akten	15 01 01	0,360
	PPK – Akten	20 01 01	0,360
AzV	AzV – gem. Verpackungen lose	15 01 06	0,090
	AzV – gem. Verpackungen verpresst	15 01 06	0,220
	AzV – gem. Siedlungsabfälle lose	20 03 01	0,110
	AzV – gem. Siedlungsabfälle verpresst	20 03 01	0,250
	AzV – Sperrmüll	20 03 07	0,145
Baubabfälle	BS – Bauschutt gemischt	17 01 07	1,300
	BS – Stahl-Beton	17 01 01	2,000
	BS – Beton unbew.	17 01 01	1,800
	BS – Ziegel	17 01 03	1,500
	BS – Fliesen/Keramik	17 01 03	1,600
	BS – Erdaushub	17 05 04	1,800
	BS – Altholz (AI-AIII)	15 01 03	0,120
	BS – Altholz (AI-AIII)	17 02 01	0,120
	BS – Holz geschreddert		0,200
	BS – Fenster/Türen Außenbereich, AIV	170204*	0,200
	BS – Asphalt/kohlenteerfreie Bitumgemische	170302	1,300
	BS – Teer u. teerhaltige Produkte (Dachpappe)	170303*	0,900
	BS – Baustoffe auf Asbestbasis	17 06 05*	0,300
	BS – Baustoffe auf Gipsbasis	17 08 02	0,300
	BS – gem. Bau- u. Abbruchabfälle	17 09 04	0,150
	BS – Mineralfaserabfälle/Dämmstoffe/Baustyropor	17 06 04	0,090
	Glas	GLS – Weiß-/Grün-/Braunglas	15 01 07
GLS – Flachglas		17 02 02	1,000
GLS – Autoglas		17 02 02	1,000
GLS – Drahtglas		17 02 02	0,700

	Abfallart	AVV-Nr.	Schüttgewicht (t/m³) lose /verpresst
Kunststoffe	KST – Folie lose	15 01 02	0,017
	KST – Folie verpresst	15 01 02	0,130
	KST – Styropor	15 01 02	0,006
	KST – Umreifungsbänder Kunststoff	15 01 02	0,025
	KST – Mischkunststoffe	15 01 02	0,100
	KST – Mischkunststoffe	20 01 39	0,100
	KST – Leichtfraktion	15 01 05	0,033
Metall/Schrott	MS – Schrott	17 04 05	0,100
	MS – Buntmetalle	17 04 07	wird immer verwogen
	MS – Kupfer	17 04 01	wird immer verwogen
	MS – Aluminium	17 04 02	0,080
	MS – Messing	17 04 01	
	MS – Kabel	17 04 11	
	MS – Gemischte Metalle	17 04 07	
E-Schrott	ES – Kühlgeräte	16 02 11*	0,025/St,
	ES – Bildschirme/Monitore/TV	16 02 13*	0,015/St,
	ES – Kleingeräte	16 02 13*	0,100
	ES – Weiße Ware	16 02 14	0,040/St,
	ES – Elektronikschrott gemischt	16 02 13*	0,100
	ES – Platinen/Leiterplatten	16 02 15*	
Reifen	Reifen – PKW mit Felge	16 01 03	0,016/St,
	Reifen – PKW ohne Felge	16 01 03	0,0085/St,
	Reifen – LKW mit Felge	16 01 03	0,075/St,
	Reifen – LKW ohne Felge	16 01 03	0,040/St,
	Reifen – Sonstige mit Felge	16 01 03	
	Reifen – Sonstige ohne Felge	16 01 03	
Organik	BIO – Klärschlamm	19 08 05	0,666
	BIO – Fettabscheider	02 02 04	0,666
	BIO – Speisereste	20 01 08	0,580
	BIO – Frittierfett	20 01 25	1,000
	BIO – Grünschnitt/Laub	20 02 01	0,150
	BIO – organische Abfälle	20 03 02	0,225
	BIO – Sieb- und Rechenrückstände	19 08 01	

	Abfallart	AVV-Nr.	Schüttgewicht (t/m³) lose /verpresst
Gefährliche Abfälle	SMU – Quecksilberhaltige Abfälle	06 04 04*	0,330
	SMU – Reaktions-/Destillationsrückstände	07 02 08*	
	SMU – Waschflüssigkeiten/Mutterlaugen	07 07 04*	
	SMU – Altlacke/Altfarben	08 01 11*	
	SMU – Lackschlamm	08 01 13*	
	SMU – Kleber	08 04 09*	
	SMU – Entwicklerflüssigkeiten	09 01 01*	1,600
	SMU – Fixierbäder	09 01 04*	1,600
	SMU – Phosphatierschlamm	11 01 08*	
	SMU – halogenfreie Bearbeitungsemulsionen	12 01 09*	1,000
	SMU – Gebr. Wachse und Fette	12 01 12*	
	SMU – Bearbeitgs.-Schlämme mit gef. Stoffen	12 01 14*	
	SMU – Altöl	13 02 05*	0,900
	SMU – feste Abfälle aus Öl-/Wasserabscheidern	13 05 01*	
	SMU – Ölabscheiderinhalte	13 05 02*	1,000
	SMU – Ölhaltiges Wasser aus Öl-/Wasserabscheidern	13 05 08*	1,000
	SMU – andere Brennstoffe	13 07 03*	
	SMU – Verpackungen mit Rückständen gef. Stoffe	15 01 10*	
	SMU – Aufsaug- und Filtermaterialien	15 02 02*	0,300
	SMU – Oelfilter/Kraftstofffilter	16 01 07*	0,410
	SMU – Bremsflüssigkeit	16 01 13*	
	SMU – Frostschutzmittel	16 01 14*	
	SMU – Spraydosen	16 05 04*	
	SMU – anorganische Chemikalien	16 05 07*	
	SMU – organische Chemikalien	16 05 08*	
	SMU – Bleibatterien	16 06 01*	
	SMU – Nickel-Cadmium Batterien	16 06 02*	
	SMU – Dämmmaterial	17 06 03*	0,050
	SMU – Krankenhausabfälle, nicht prävent.	18 01 04	0,115
	SMU – Hydroxidschlamm	19 02 05*	
	SMU – Lösemittel	20 01 13*	
	SMU – Säuren	20 01 14*	
SMU – Laugen	20 01 15*		
SMU – Fotochemikalien	20 01 17*		
SMU – Pestizide	20 01 19*		
SMU – Leuchtstoffröhren	20 01 21*	1 kg/7 Stk	
SMU – gef. Farben, Druckfarben, Klebstoffe	20 01 27*		
SMU – Altmedikamente	20 01 32*	0,330	
Sonstiges	Sonstiges – Textilien	15 01 09	0,139
	Sonstiges – Textilien	20 01 11	0,139
	Sonstiges – Straßenkehrriecht	20 03 03	1,000
	Sonstiges – Fäkalschlamm/Klärschlamm		0,570
	Sonstiges – PET-Schlamm	19 12 12	0,500
	Sonstiges – feste Datenträger (CD/Disk.)		0,400

10.2.2 Staubinhaltsstoffe

Das Regierungspräsidium Gießen hat an Schrottplätzen Kehrproben genommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10.3 bis Tabelle 10.5 dargestellt.

Tabelle 10.3: Staubinhaltsstoffe aus Kehrrichtproben von Schrottplätzen (geliefert vom Regierungspräsidium Gießen (Teil 1)).

Stoff	Schere Ausgangslager	Presse	Mischprobe Lagerflächen Schrott	Sonstige Orte mit Kehrproben
Cadmium [mg/kg TS]	17	15	15	15
Zink [mg/kg TS]	8800	9100	9100	6800
Nickel [mg/kg TS]	130	160	160	280
Blei [mg/kg TS]	1300	1200	1200	1300
Chrom [mg/kg TS]	180	220	220	370
Kupfer [mg/kg TS]	700	670	670	870
Arsen [mg/kg TS]	13	15	15	18



Tabelle 10.4: Staubinhaltsstoffe aus Kehrrichtproben von Schrottplätzen (geliefert vom Regierungspräsidium Gießen (Teil 2)).

Stoff	Schere Eingangslager	Schere Ausgangslager	Presse	Mischprobe der Fahrwege / ggf. über Kehrmaschine
Cadmium [mg/kg TS]	7,5	8,8	16	5,8
Zink [mg/kg TS]	12200	5030	3060	20800
Thallium [mg/kg TS]	0,12	< NW	< NW	0,12
Nickel [mg/kg TS]		337	1780	5980
Blei [mg/kg TS]	2040	5270	780	3830
Chrom [mg/kg TS]	781	308	3580	5330
Kupfer [mg/kg TS]	672	1140	1830	11700
Arsen [mg/kg TS]	27	75	27	34

< NW: Unter der Nachweisgrenze



Tabelle 10.5: Staubinhaltsstoffe aus Kehrichtproben von Schrottplätzen (geliefert vom Regierungspräsidium Gießen (Teil 3)).

Stoff	Shredder Eingangslager	Shredder Ausgangslager	Schere Eingangslager	Schere Ausgangslager	Paketierpresse Eingangslager	Paketierpresse Ausgangslager	Mischprobe der Fahrwege /ggf. über Kehrmaschine
Cadmium [mg/kg TS]	39	48	4,8	7	7,2	30	11
Zink [mg/kg TS]	17000	17600	18800	28300	24000	51600	19200
Thallium [mg/kg TS]	0,35	0,39	16	29	0,22	0,15	4,5
Nickel [mg/kg TS]	1190	1070	648	605	1130	1780	539
Blei [mg/kg TS]	2150	2060	1640	2820	631	1840	1230
Chrom [mg/kg TS]	2020	1320	674	664	1570	11500	740
Kupfer [mg/kg TS]	4510	6290	249	494	1600	3130	940
Arsen [mg/kg TS]	52	40	14	31	25	45	26

LUBW

10.2.3 PM₁₀-Anteil am Gesamtstaub

Die folgende Tabelle 10.6 ist dem BMWFJ (2013) zu entnehmen.

Tabelle 10.6: Korngrößenverteilungen. Quelle: BMWFJ (2013).

	Sektor/Emissionsquelle/Aspekt	PM ₁₀ -Anteil am Gesamtstaub (%)	PM _{2,5} -Anteil am Gesamtstaub (%)
Materialumschlag und -lagerung allgemein	Kalkstein, Dolomit, Basalt, Magnesit, Gips, Sand, Kies	46,5	4,7
	Düngemittel	58,6	30,9
	Erze, Kohlen, Mehle, Getreide, Futtermittel	47,3	14,9
	Steinkohle/Absetzen, Abkratzen, Schiffsentladung	100	3,4 – 19
	Braunkohle/Zugentladung, Schaufelradbagger	100	16 – 18
	Holzhackgut, Sägenebenprodukte	40	16
	Abwurf von (primär mineralischem) Material auf Halde	47	7,2
	Winderosion von Halden und offenen Flächen	50	7,5
Bergbau	Kohletagbau/Sprengarbeit in Kohle und Abraum	52	3
	Kohletagbau/Abraumabtrag, Abschieben, Grädereinsatz	k.A.	1,7 – 10,5
	Kalkbergbau/Sprengabschlag	16	k.A.
	Basaltbergbau/Tiefbohrlochsprengung	20	k.A.
Bauwirtschaft	Erdaushub und Baumaterial/Fahrbewegungen	26	3
	Erdaushub und Baumaterial/ Materialumschlag und Winderosion	20	10
	Hoch- und Tiefbau (inkl. Abbruch)	50	5
Abfallwirtschaft	Bauschutt unzerkleinert, Bodenmaterial/Aufbereitung	25	k.A.
	Bauschutt zerkleinert/Aufbereitung	20	k.A.
	Staubende Abfälle/Materialumschlag auf Deponien	47	15
Landwirtschaft	Acker- und Grünland/Bearbeitung in feuchtem Klima	45	10
	Tierstallungen generell	45	10
	Abrennen von Rückständen/Stoppelfelder	100	95
	Abbrennen von Rückständen/Rebschnitt	100	100
Sonstige Prozesse	Pyrogene Prozesse generell: Brauchtumsfeuer, offene Feuerstellen, Grillfeuer, Feuerwerke, Zigaretten, Holzkohlemeiler	100	100
	Sprengtätigkeit/Plastiksprengstoff	81	58
	Sandstrahlen/Schmiedestahlplatten	14 – 48	1,4 – 4,8

	Sektor/Emissionsquelle/Aspekt	PM ₁₀ -Anteil am Gesamtstaub (%)	PM _{2,5} -Anteil am Gesamtstaub (%)
Befestigte Fahrwege	Generell	19	4,7
	Generell (ohne Winterdienst)	33	10
	Reifenabrieb	60	42
	Bremsabrieb	98	39
Unbefestigte Fahrwege	Generell	30	3
	Off-road-Verkehr generell (Bau, Industrie, Landwirtschaft)	45	12
	Schienenverkehr (ohne Bremsand)	33	10



10.2.4 Zuladungen

Tabelle 10.7: Zuladung der Fahrzeugflotte verschiedener Bagger-Greifer-Hersteller.

Hersteller	Modell	Volumen (m ³)
Terex Fuchs* ⁶	MHL310	0,6
	MHL360	1,7
	MHL320	0,6
	MHL370	1,7
	MHL390	2,5
Kinshofer* ⁷	Grabengreifer C18 VE 60	0,3
	Zweischalengreifer C05 HPX – 60	0,2
	Zweischalengreifer C05 HPX – 40	0,1
	Mehrweckgreifer A05 HPX – 40	0,1
	Mehrweckgreifer A08H – 50	0,1
	Mehrweckgreifer A09HPX – 50	0,2
	Mehrweckgreifer D15H-80	0,3
Soosan* ⁷	Greifer SRG 100	0,4
	Greifer SRG 200	0,5
	Greifer SRG 250	0,7
	Greifer SRG 400	1,0
	Mittelwert	0,7

Quellen:

*⁶ <https://www.terex-fuchs.com/> (Stand: Juni 2019)

*⁷ <https://www.fschuenke.de/mietpark/uebersicht/bagger-mehrweck-sortiergreifer.html> (Stand: Juni 2019)



Tabelle 10.8: Zuladung der Fahrzeugflotte verschiedener Löffelbagger-Hersteller.

Hersteller	Name	Volumen (m ³)
Liebherr* ⁸	A 910 Compact Litronic	0,3
	A 912 Compact Litronic	0,3
	A 913 Compact Litronic	0,5
	A 916 Litronic	0,6
	A 920 Litronic	0,9
	A 922 Rail Litronic	0,6
	A 924 Litronic	1,1
	A 924 Heavy Lift Litronic	1,2

Hersteller	Name	Volumen (m³)	
Zeppelin Cat* ⁹	300.9D	0,1	
	301.5	0,1	
	301.6	0,1	
	301.7 CR	0,1	
	301.8	0,1	
	302 CR	0,1	
	302.7D CR	0,1	
	M314F	0,6	
	M316F	0,8	
	M318F	0,7	
	M320F	1,0	
	M322F	1,0	
	313F L GC	0,5	
	313F L	0,5	
	316F L	0,7	
	318F L	0,7	
	320 GC	1,1	
	320	1,1	
	323	1,1	
	326F LN	1,3	
	330 GC	1,3	
	330	1,3	
	336 GC	1,8	
	336	1,8	
	SMP Parts GmbH* ¹⁰	500HDR	0,5
		550HDR	0,6
		600HDR	0,6
		650HDR	0,7
700HDR		0,7	
750HDR		0,8	
800HDR		0,8	
850HDR		0,9	
900HDR		0,9	
950HDR		1,0	
1000HDR		1,0	
1050HDR		1,0	
1150HDR		1,2	
1250HDR		1,3	
1350HDR		1,4	
1450HDR		1,5	
1550HDR		1,6	
1650HDR		1,7	
1800HDR		1,8	
2000HDR		2,0	
2200HDR		2,2	
2500HDR		2,5	
2700HDR		2,7	
3000HDR		3,0	
DS55		0,1	

Hersteller	Name	Volumen (m³)
SMP Parts GmbH*10	DS85	0,1
	DS145	0,2
	DS165	0,2
	DS200	0,2
	DS240	0,2
	DS250	0,3
	DS265	0,3
	DS285	0,3
	DS320	0,3
	DS370	0,4
	DS385	0,4
	DS400	0,4
	SL 55	0,1
	SL80	0,1
	SL 110	0,1
	SL 150	0,2
	SL 210	0,2
	SL 230	0,2
	SL 300	0,3
	SL 350	0,4
	SL 400	0,4
	SL 450	0,5
	SL 500	0,5
	SL 650	0,7
	SL 750	0,8
	SL 900	0,9
	SL 1000	1,0
	SL 1150	1,2
	SL 1400	1,4
	SL 1600	1,6
	SL 1800	1,8
	SL 2200	2,2
	SL 2500	2,5
	KS 30	0,1
	KS 55	0,1
	KS 80	0,1
	KS 110	0,1
	KS 120	0,1
	KS 155	0,2
	KS 220	0,2
	KS 350	0,4
	KS 550	0,6
KS 800	0,8	
KS 950	1,0	
CG 200	0,2	
CG 350	0,4	
CG 500	0,5	
CG 650	0,7	
CG 1000	1,0	
GS 55	0,1	

Hersteller	Name	Volumen (m³)
SMP Parts GmbH*10	GS 80	0,1
	GS 110	0,1
	GS 150	0,2
	GS 210	0,2
	GS 300	0,3
	GS 350	0,4
	GS 400	0,4
	GS 500	0,5
	GS 650	0,7
	GS 750	0,8
	GS 900	0,9
	GS 1000	1,0
	GS 1150	1,2
	GS 1250	1,3
	GS 1400	1,4
	GS 1600	1,6
GS 1800	1,8	
	Mittelwert	0.8

Quellen:

*8 <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/baumaschinen/erdbewegung/mobilbagger/mobilbagger.html> (Stand: Juni 2019)

*9 <https://www.zeppelin-in-cat.de/produkte/cat-bagger.html> (Stand: Juni 2019)

*10 <https://www.smpparts.com/de/produkte/loeffel/tiefloeffel-bagger/> (Stand: Juni 2019)



10.2.5 Durchsatzleistungen

Tabelle 10.9: Durchsatzleistungen für Prallbrecher, Backenbrecher, Siebanlagen und Altholzschredder von Herstellerangaben.

	Hersteller	Modellname	Durchsatzleistung (t/h)	Leistung (m³/h)
Prallmühle	Apollo Maschinenbau GmbH*11	AVS 300	180 – 280	
	Apollo Maschinenbau GmbH*11	AVS 400	250 – 350	
	Apollo Maschinenbau GmbH*11	AVS 500	350 – 450	
	Apollo Maschinenbau GmbH*11	AVS 600	400 – 500	
		Mittelwert	345	
Backenbrecher	Apollo Maschinenbau GmbH*11	BB 600 x 400		10 – 34
	Apollo Maschinenbau GmbH*11	BB 850 x 550		30 – 60
	Apollo Maschinenbau GmbH*11	BB 1050 x 700		50 – 180
	Apollo Maschinenbau GmbH*11	BB 1250 x 900		70 – 235
	C. Christophel GmbH*12	CityTrak 9TX	100	
	Mittelwert	85		
Siebanlage	Apollo Maschinenbau GmbH*11	Radmobile Siebanlage SM 4000/2	bis 300	
	Apollo Maschinenbau GmbH*11	Containermobile Siebmaschine Typ SK 250 SL	250	
	Apollo Maschinenbau GmbH*11	Mobile Schwerlastgrobsiebanlage Typ SM 350 SL	350	
	Apollo Maschinenbau GmbH*11	Kufenmobile Schwerlastgrobsiebanlage SK 350 SL	250	
	C. Christophel GmbH*12	CHIEFTAIN 2400	Bis zu 750	
	C. Christophel GmbH*12	WARRIOR 800	bis 250	
	Mittelwert	360		

	Hersteller	Modellname	Durchsatzleistung (t/h)	Leistung (m³/h)
Altholzschredder	UNTHA shredding technology GmbH ^{*13}		40	
	Weiß Dienstleistungs GmbH & Co. KG ^{*14}	Schredder Lindner URRACO 75 D	bis 60	
	GETAG Entsorgungs-Technik AG ^{*15}	Holz- und Grüngutschredder – CRAMBO	45 – 100	
		Mittelwert	60	

*11 <http://www.apollo-maschinenbau.de/produkte/> (Stand: Juli 2019)

*12 <http://www.christophel.com/> (Stand: Juli 2019)

*13 https://www.untha.com/de/anwendungsgebiete/altholzaufbereitung_a779 (Stand Juli 2019)

*14 <https://weiss-dienstleistungen.net/schredder.html> (Stand: Juli 2019)

*15 <https://www.getag.ch/de/produkte/holz-und-gruengutschredder/> (Stand 2019)

LUBW

10.2.6 Dieselmotoremissionen

Das Non-Road-Internet-Tool nach Schäffeler & Keller (2016) stellt die relevanten Grundlagen für die Berechnungen von Schadstoffemissionen im Non-Road-Sektor bereit. Datengrundlage des Tools ist die Non-Road-Datenbank des BAFU, deren Aufbau und Methodik im BAFU-Bericht Umwelt-Wissen Nr. 1519 dokumentiert sind.

Im folgenden Beispiel sind die Dieselmotoremissionen nach Schäffeler & Keller (2016) für einen minimalen Partikelfilteranteil der Fahrzeugflotte dargestellt. Motortyp, Leistungsklasse und Emissionsstufe sind in diesem Beispiel aggregiert

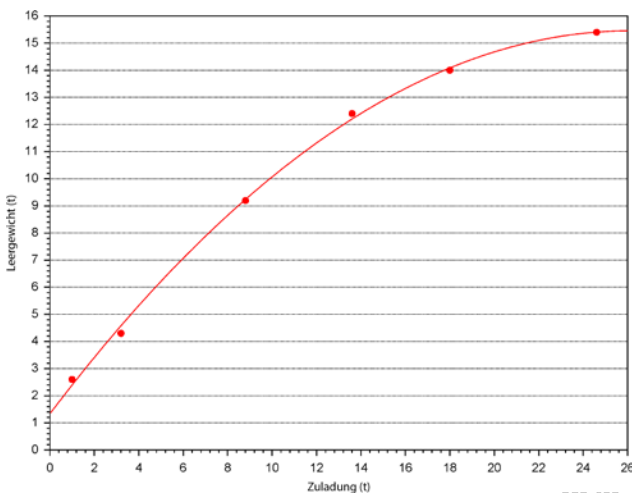
(Durchschnittswerte gewichtet über die jeweiligen Subkategorien).

Table 10.10: Emissionsfaktoren für Dieselmotoremissionen. Quelle: Schäffeler & Keller (2016).

Maschinenkategorie	Emissionsfaktor (kg/h)
Walzenzüge aller Art	0,0055
Notstromaggregate/Generatoren	0,0068
Raupenbagger	0,02
Radbagger	0,0136
Gabelstapler aller Art	0,0057
Planierraupe	0,0205
Güterschiffe, Hauptmotoren	0,1268

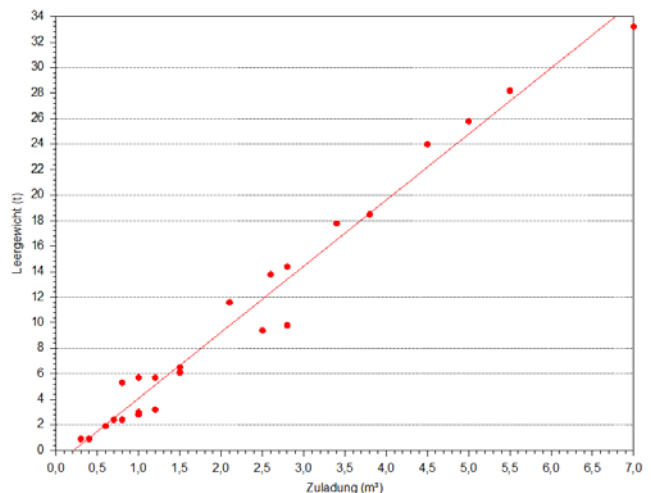
LUBW

10.2.7 Flottenmittel



LUBW

Abbildung 10.1: Quadratischer Zusammenhang zwischen Zuladung und Leergewicht gängiger Lkw-Hersteller.



LUBW

Abbildung 10.2: Linearer Zusammenhang zwischen Zuladung und Leergewicht gängiger Radlader-Hersteller.

11 Abbildungen und Tabellen

11.1 Abbildungen

Abbildung 4.1: Staubemittierende Vorgänge einer typischen Bauschuttrecyclinganlage.	17
Abbildung 5.1: Einfluss von Befeuchtungsmaßnahmen an einer Aufbereitungsanlage. Links: ohne Befeuchtung. Rechts: mit Befeuchtung. Quelle: Klenk et al., 2016.	31
Abbildung 5.2: Staubemission beim Abwurf eines Schüttguts auf eine trockene Halde. Staubemissionen entstehen durch Abrieb (rote Pfeile). Quelle: iMA, 2007.	32
Abbildung 5.3: Einfluss der Tropfengröße auf die Staub-Absorption. Quelle: Cecala & O'Brien, 2012.	33
Abbildung 5.4: Einfluss des Massenstroms auf die Staubentwicklung. Quelle: iMA, 2016.	33
Abbildung 5.5: Beispiele für absenkbare Verladeköpfe. Fotos: iMA, 2007. Oben links ist das Fallrohr eingefahren, in Aktion (oben rechts) abgesenkt. Unten links ist das Fallrohr (Mitte) und das Absaugrohr (außen) erkennbar.	34
Abbildung 5.6: Abgesaugte Schürze zur Verladung auf interne Lkw. Foto: iMA, 2007.	34
Abbildung 5.7: Halbportalkratzer beim Abkratzen von Kohle an einer Halde. Foto: iMA, 2011.	40
Abbildung 10.1: Quadratischer Zusammenhang zwischen Zuladung und Leergewicht gängiger Lkw-Hersteller.	64
Abbildung 10.2: Linearer Zusammenhang zwischen Zuladung und Leergewicht gängiger Radlader-Hersteller.	64

11.2 Tabellen

Tabelle 3.1: Staubneigung.	11
Tabelle 3.2: Emissionsfaktoren beim Brechen und Sieben in kg/t nach BUBE-Online.	12
Tabelle 3.3: Korngrößenabhängige Faktoren bei befestigten Fahrwegen.	13
Tabelle 3.4: Korngrößenabhängige Faktoren und Exponenten bei unbefestigten Fahrwegen.	13
Tabelle 3.5: Parameter zur Berechnung der Staubemission.	14
Tabelle 4.1: Einfluss der Zunahme eines Parameters auf den Emissionsfaktor.	16
Tabelle 4.2: Parameter für das Berechnungsbeispiel.	17
Tabelle 4.3: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für Parameter, die sich auf die Emissionen des Umschlags und der Aufbereitung auswirken.	17
Tabelle 4.4: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für Parameter, die sich auf Emissionen der Fahrbewegungen auswirken.	18
Tabelle 4.5: Relevanz der Eingangsparameter zur Berechnung der Staubemission einer Bauschuttrecyclinganlage.	19
Tabelle 5.1: Staubneigung mineralischer Schüttgüter. Quelle: BMWFJ (2013).	21
Tabelle 5.2: Umfrageergebnisse zur Staubneigung SN (Definition siehe Kapitel 5.2.1.1).	22
Tabelle 5.3: Ergebnisse der Umfrage zur Schüttdichte.	23
Tabelle 5.4: Staubinhaltsstoffgehalte aus der ABANDA-Datenbank (80 %-Perzentile).	24
Tabelle 5.5: Zusammenfassung der Kehrproben der RP Gießens auf Schrottplätzen. Quelle: verändert nach Gülchre (2019).	25
Tabelle 5.6: Zuladungen verschiedener Lkw-Hersteller bzw. Unternehmer.	26

Tabelle 5.7:	Zuladungen verschiedener Radlader.	26
Tabelle 5.8:	Typische Durchsatzleistungen für mineralische Schüttgüter, sowie Grünschnitt und Altholz.....	27
Tabelle 5.9:	Umfrageergebnisse für die Abwurfhöhen beim Umschlag.	27
Tabelle 5.10:	Umfeldfaktoren für stationäre Geräte. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, S. 27f.	28
Tabelle 5.11:	Umfeldfaktoren für Fahrzeuge. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, S. 27 f.	28
Tabelle 5.12:	Umfrageergebnisse zu Umfeldfaktoren, die nicht in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 aufgeführt sind.	29
Tabelle 5.13:	Umfrageergebnisse zu den Emissionen von Brech- und Siebanlagen.	29
Tabelle 5.14:	Umfrageergebnisse zu den Dieselmotoremissionen.	29
Tabelle 5.15:	Umfrageergebnisse zum PM ₁₀ -Anteil am Gesamtstaub beim Umschlag für verschiedene Schüttgüter.	30
Tabelle 5.16:	Umfrageergebnisse zur Minderung durch Befeuchtung der Aufbereitungsaggregate.	32
Tabelle 5.17:	Mittlerer Feinkornanteil auf Straßen verschiedener Industriebetriebe. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4, Tabelle 2.	35
Tabelle 5.18:	Aus der Umfrage ermittelter Feinkornanteil s der Flächenbeladung auf unbefestigten Fahrwegen.	36
Tabelle 5.19:	Minderung bei Geschwindigkeitsreduktion nach Kühn (2002).	36
Tabelle 5.20:	Umfrageergebnisse zur Minderungskennzahl k _M bei Geschwindigkeitsreduktion auf unbefestigten Fahrwegen.	36
Tabelle 5.21:	Kennzahlen für Minderungsmaßnahmen bei unbefestigten Fahrwegen. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 und BMWFJ (2013).	37
Tabelle 5.22:	Konventionswerte für die Flächenbeladung befestigter Fahrwege. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4, S. 10.	37
Tabelle 5.23:	Umfrageergebnis für die Geschwindigkeitsreduktion auf befestigten Fahrwegen.....	38
Tabelle 5.24:	Auswirkung von Minderungsmaßnahmen auf befestigten Fahrwegen auf die Flächenbeladung. Quelle: BMWFJ (2013).	38
Tabelle 5.25:	Umfrageergebnis für den Emissionsfaktor zur Abwehung von ruhenden Halden.	38
Tabelle 5.26:	Typische Emissionsfaktoren* für die Windabwehung. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3, S. 39.	39
Tabelle 5.27:	Abgeschätzte maximale Emissionsfaktoren für Gesamtstaub bei Windabwehung in Abhängigkeit vom Jahresmittel der Windgeschwindigkeit. Quelle: verändert nach BMWFJ (2013).	39
Tabelle 5.28:	Emissionsfaktoren nach Messungen in einem Kalksteinbruch. Quelle: BMWFJ (2013).	41
Tabelle 5.29:	Emissionsfaktoren für Deponien. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 1 (2015).	41
Tabelle 7.1:	Parameter zur Berechnung der Staubemission.	43
Tabelle 7.2:	Staubneigungen SN (sofern nicht anders beschrieben, jeweils unbefeuchtete Güter).....	44
Tabelle 7.3:	Umfeldfaktoren für Minderungsmaßnahmen, die nicht in der VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3 beschrieben sind.	45
Tabelle 7.4:	Abwurfhöhen H beim Umschlag von Schüttgütern.....	45
Tabelle 7.5:	Schüttdichten ρ _s	46
Tabelle 7.6:	Typische Durchsatzleistungen M* für mineralische Schüttgüter, Grünschnitt und Altholz.	47
Tabelle 7.7:	Korrekturfaktoren k _{Gerät}	47
Tabelle 7.8:	Konventionswerte für die Flächenbeladung befestigter Fahrwege. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4, S. 10.	47
Tabelle 7.9:	Feinkornanteil s des Straßenbelags auf unbefestigten Fahrwegen.	47
Tabelle 7.10:	Minderung durch Befeuchtung der Aufbereitungsaggregate.....	48

Tabelle 7.11:	Kennzahlen für Minderungsmaßnahmen bei unbefestigten Fahrwegen. Quelle: VDI-Richtlinie 3790, Blatt 4 und BMWFJ (2013).....	48
Tabelle 7.12:	Umfrageergebnisse zur Minderungskennzahl kM bei Geschwindigkeitsreduktion auf unbefestigten und befestigten Fahrwegen.	48
Tabelle 10.1:	Umfrage zur Ermittlung gängiger Größen und Verfahren zur Berechnung von Staubemissionen..	52
Tabelle 10.2:	Schüttdichten nach AVV-Nummern.	55
Tabelle 10.3:	Staubinhaltsstoffe aus Kehrichtproben von Schrottplätzen (geliefert vom Regierungspräsidium Gießen (Teil 1)).	58
Tabelle 10.4:	Staubinhaltsstoffe aus Kehrichtproben von Schrottplätzen (geliefert vom Regierungspräsidium Gießen (Teil 2)).	58
Tabelle 10.5:	Staubinhaltsstoffe aus Kehrichtproben von Schrottplätzen (geliefert vom Regierungspräsidium Gießen (Teil 3)).	59
Tabelle 10.6:	Korngrößenverteilungen. Quelle: BMWFJ (2013)..	59
Tabelle 10.7:	Zuladung der Fahrzeugflotte verschiedener Bagger-Greifer-Hersteller.	60
Tabelle 10.8:	Zuladung der Fahrzeugflotte verschiedener Löffelbagger-Hersteller.	60
Tabelle 10.9:	Durchsatzleistungen für Prallbrecher, Backenbrecher, Siebanlagen und Altholzschredder von Herstellerangaben.	63
Tabelle 10.10:	Emissionsfaktoren für Dieselmotoremissionen. Quelle: Schöffeler & Keller (2016).	64

12 Literatur und Quellen

- ABANDA (2019):
Abfallanalytendatenbank (ABANDA) des Landes Nordrhein-Westfalen. ABANDA. URL: https://www.abfall-nrw.de/abanda/script/lu_db_portal.php?application=abanda&runmode=aida&initform=MK_Auswertemenue.
- AbfR 4.2.8 (2007):
25-8980.08M20 Land/3 Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums Baden-Württemberg für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial.
- BGI 593 (2012):
Schadstoffe beim Schweißen und bei verwandten Verfahren.
- BMWFJ (2013):
Technische Grundlage zur Beurteilung diffuser Staubemissionen. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Österreich, Österreich.
- BRAUN, F.J., K. HERMSDÖRFER, H.-C. HÖFL, C.-J. RICHTER, P. SCHERER, A. BEYER, A. HUGO, D. JARZYNA, T.A.J. KUHLSBUSCH & A. GÄRTNER (2012):
Diffuse Feinstaub-Emissionen beim Umschlag von Kohle. (Immissionsschutz)01/2012.
- CECALA, A.B. & A.D. O'BRIEN (2012):
Dust Control Handbook for Industrial Mining and Processing. Dep. of Health an Human Services Centers for Disease Control and Prevention. National Institute fpr Occupation Safety and Health Office of Mining Safety an Health Research, Pittsburg, Spokane.
- DAMIAN, T., C. BURCKHARDT, F.J. BRAUN & C.-J. RICHTER (2019):
Tutorial für die Anwendung zur Bestimmung von Emissionsfaktoren nach den VDI-Richtlinien 3790 Blatt 3 und Blatt 4. iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG, Freiburg
- DIN EN 10020 (2000):
Begriffsbestimmung für die Einteilung der Stähle; Deutsche Fassung EN 10020:2000.
- DÜRING, I. & C. SÖRGE (2014):
Anwendung der Richtlinie VDI 3790 Blatt 3 in der Praxis. (Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft) 1-2/2014: 45 – 48.
- EPA (1998):
Emission Factor Documentation for AP-42. Section 13.2.2. Unpaved Roads. Midwest Research Institute, Research Triangle Park, NC
- EPA (2006):
Compilation of air pollutant emission factors. Volume I: Stationary point and the area sources. EPA 's Office of Mobile Sources, Ann Arbor
- EPA (2011):
Fifth Edition, Volume I, Chapter 13: Miscellaneous Sources: 13.2.1 Paved Roads.
- GRONWÄLLER, L. (2009):
Diffuse Emissionen aus Steinbrüchen – Messung diffuser Staubemissionen und Emissionsmodellierung einer Sprengung im Steinbruch.
- GÜLCEHRE, B. (2019):
RP Gießen.
- iMA RICHTER & RÖCKLE GMBH & Co. KG & IUTA E.V. (2011):
Ermittlung von Emissionsfaktoren für die Lagerung und den Umschlag von Kohle: Steinkohle. Freiburg, Duisburg
- INGENIEURBÜRO LOHMEYER GMBH & Co. KG ED. (2016):
Staubemissionen beim Schüttgutabwurf von Lkws – im Rechenverfahren der VDI 3790 Blatt 3 einzusetzende Fallhöhe H. 35.
- KLENK, U., M. KAUL, D. DAHMANN, K. SÜSSELBECK & J.-P. SONNENBERG (2016):
Reduzierung der Staubemissionen von mobilen Anlagen zum Brechen und Klassieren quarzhaltiger Gesteine aus Sicht der Arbeitssicherheit und des Immissionsschutzes. (Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft): 323 – 329.
- KLENK, U. & RÜHLING, A. (2015):
Staubemissionen durch LKW auf befestigten Fahrwegen. Rechenansätze und Messdaten. Konferenzbeitrag der 6. Fachtagung für Diffuse Emissionen in Düsseldorf.
- KÜHN, G. (2002):
Experimentelle Untersuchungen zur Entstehung und Ausbreitung von Staubfahnen hinter Kraftfahrzeugen. Universität Hannover
- KUMMER, V., N. VAN DER PÜTTEN, H. SCHNEBLE, R. WAGNER & H.-J. WINKELS (2010):
Ermittlung des PM₁₀-Anteils an den Gesamtstaubemissionen von Bauschuttzubereitungsanlagen. (Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft) 70 Nr. 11/12: 478 – 482.
- LEUTHOLD, S. (2011):02
Minderung diffuser Staubemissionen bei mobilen Brechern. Ergebnisse eines Projektes im Rahmen des Umweltforschungsplans. VDI-Bericht, 123 – 132 S.
- LOHMEYER, A., P. SCHMIDT, W. THEURER & A. RÜHLING (1998):
Staubabwehrung von ruhenden Halden. (7)5.
- LONDERSHAUSEN, T. & E. SCHMIDT (2018):
Entwicklung von Prognosefunktionen zur Abschätzung der Staubungsneigung von trockenen Schüttgütern. (78)11/12.
- MOLDENHAUER, A., I. DÜRING, U. VOGT, G. BAUMBACH, D. STRAUB & P. FLEISCHER (2014):
PM₁₀-Emissionen aus einem Steinbruch. (1/2)74.
- PIEPER, H. (1995):(A):
Ein Verfahren zur Beurteilung der Staubentwicklung beim Umschlag von Schüttgütern, Teil 1. Staub. (Reinhaltung der Luft) 55: 25 – 29.
- PIEPER, H. (1995):(B):
Ein Verfahren zur Beurteilung der Staubentwicklung beim Umschlag von Schüttgütern, Teil 2. Staub. (Reinhaltung der Luft) 55: 71 – 73.
- PIEPER, H. (1995):(C):
Ein Verfahren zur Beurteilung der Staubentwicklung beim Umschlag von Schüttgütern, Teil 3. Staub. (Reinhaltung der Luft) 55: 107 – 110.
- SCHÄFFELER, U. & M. KELLER (2016):
Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Studie für die Jahre 1980 – 2020. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

- STROBL, A. & M. KUNTNER (2014):
Österreichische Technische Grundlage zur Beurteilung diffuser Staubemissionen. Teil 1: Diffuse Staubemissionen beim Schüttgutumschlag mineralischer Rohstoffe und Baurestmassen. (11/12) 74: 501 – 504.
- SUPPAN, M.K. (2017):
Bunkerentstaubung. Montanuniversität Leoben
- TA LUFT (2002):
Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) (GMBI Nr. 25 – 29 vom 30.07.2002). 511 S.
- TUDESJKI, H. & M. RITTMAYER (2016):
Erfassung repräsentativer Emissionsfaktoren für Staubemissionsprognosen. 5.
- TUDESJKI, H. & T. XU (2017):
Erfassung repräsentativer Staubemissionsfaktoren in der Natursteinindustrie.
- TUDESJKI, H., T. XU & W.-M. FELDBACH (2008):
Untersuchungen zur Erfassung von Staubemissionen beim Umschlag von Steinkohle. Ein Vergleich zwischen Emissionsfaktoren aus VDI-Richtlinie und Messungen. 2.
- VDI-RICHTLINIE 3790, BLATT 1 (2015):
Umweltmeteorologie. Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen Grundlagen.
- VDI-RICHTLINIE 3790, BLATT 2 (2017):
Umweltmeteorologie. Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen Deponien.
- VDI-RICHTLINIE 3790, BLATT 3 (1999):
Umweltmeteorologie. Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen. Lagerung Umschlag und Transport von Schüttgütern.
- VDI-RICHTLINIE 3790, BLATT 3 (2010):
Umweltmeteorologie. Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen. Lagerung Umschlag und Transport von Schüttgütern.
- VDI-RICHTLINIE 3790, BLATT 4 (2018):
Umweltmeteorologie. Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen. Staubemissionen durch Fahrzeugbewegungen auf gewerblich/industriellem Betriebsgelände.
- VDI-RICHTLINIE 4085 (2017):
Planung, Errichtung und Betrieb von Schrottplätzen. Anlagen und Einrichtungen zum Umschlagen, Lagern und Behandeln von Schrotten und anderen Materialien.
- WICHERT, M. (2019):
LANUV NRW.

