

Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmabstoffe

Msterumweltproduktdeklaration für die Baustoffkategorie Lehmmauermörtel (UPD LMM) nach DIN EN 15804

Stand: Januar 2023

INHALT

1	Allgemeines.....	5
1.1	Normative Grundlagen.....	5
1.2	Nachverfolgung der Versionen.....	5
1.3	Begriffe / Abkürzungen.....	6
2	Produktdefinition.....	7
2.1	Geltungsbereich.....	7
2.2	Produktbeschreibung.....	7
2.3	Einsatzzweck.....	7
2.4	Produktnorm / Zulassung / Inverkehrbringen / Anwendungsregeln.....	7
2.5	Gütesicherung.....	8
2.6	Lieferzustand.....	8
2.7	Bautechnische Eigenschaften.....	8
2.8	Brandschutz.....	9
2.9	Sonstige Eigenschaften.....	9
3	Ausgangsstoffe.....	9
3.1	Auswahl / Eignung.....	9
3.2	Stoffekläuterung.....	10
3.3	Bereitstellung.....	11
3.4	Verfügbarkeit.....	11
4	Produktherstellung.....	12
4.1	Herstellungsprozess.....	12
4.1.1	Erdfeuchtverfahren.....	12
4.1.2	Trockenverfahren.....	13
4.1.3	Trockendosierverfahren.....	14
4.2	Gesundheits- und Arbeitsschutz Herstellung.....	14
4.3	Umweltschutz Herstellung.....	14
4.3.1	Abfall.....	14
4.3.2	Wasser / Boden.....	14
4.3.3	Lärm.....	15
4.3.4	Luft.....	15

5	Produktverarbeitung	15
5.1	Verarbeitungshinweise	15
5.2	Arbeitsschutz / Umweltschutz.....	15
5.3	Restmaterial.....	15
5.4	Verpackung	16
6	Nutzungszustand	16
6.1	Ausgangsstoffe	16
6.2	Wirkungsbeziehungen Umwelt / Gesundheit.....	16
6.3	Beständigkeit / Nutzungsdauer.....	16
7	AUSSERGEWÖHNLICHE Einwirkungen.....	17
7.1	Brand	17
7.2	Hochwasser	17
7.3	Havarie Wasserleitungen.....	17
8	Hinweise zur Nutzungsphase	17
9	Nachnutzungsphase	17
9.1	Recycling von LMM	17
9.2	Verwertung von Abfällen und Verpackungen.....	18
9.3	Entsorgung.....	18
10	Nachweise	18
10.1	Produkterstprüfung nach DIN 18942-100	18
10.2	VOC, TVOC.....	18
10.3	Radioaktivität	19
TEIL A SACHBILANZ		19
A.1	Funktionale Einheit	19
A.2	Betrachtungszeitraum	19
A.3	Ergebnisse der Sachbilanz.....	19
Teil B ÖKOBILANZ.....		20
B.1	Ziel der Analyse	20
B.2	Zielgruppen der Analyse	20
B.3	Referenznutzungsdauer	21
B.4	Abschneidekriterium	21

B.5	Annahmen und Abschätzungen.....	21
B.6	Datenqualität	23
B.7	Allokation.....	23
B.8	Ergebnisse der Ökobilanzierung (LCA).....	24
TEIL C INTERPRETATION DER ÖKOBILANZ		31
C.1	Primärenergieeinsatz (PEI).....	31
C.2	Treibhausgaspotenzial GWP	33
C.3	Aufbereitung und Rückgewinnungspotenzial	35
C.4	Zusammenfassung	40
Zitierte Standards / Literaturhinweise		41

1 ALLGEMEINES

1.1 Normative Grundlagen

Dieses Dokument wurde auf der Grundlage folgender Normen sowie der in *Abs. 2.4* genannten Normen und Regeln erstellt:

- DIN EN 15804:2022-03, *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*,
- DIN EN 15942: 2022-04, *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Kommunikationsformate zwischen Unternehmen*,
- DIN EN ISO 14025:2011-10, *Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen, Grundsätze und Verfahren*,
- DIN EN ISO 14040:2021-02, *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*,
- DIN EN ISO 14044:2021-02, *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*.

1.2 Nachverfolgung der Versionen

Version	Kommentar	Stand
Ü1	<i>Erster Entwurf ohne Datenerhebung</i>	<i>Sep 2020</i>
Ü2	<i>Datenerhebung und -auswertung</i>	<i>Juli 2021</i>
Ü3	<i>Berechnung und Bilanzierung</i>	<i>Okt 2021</i>
Ü4	<i>Interpretation und Überarbeitung der Darstellung</i>	<i>Jan 2022</i>
Ü5	<i>Vorlage Muster UPD Anhang A-C</i>	<i>April 2022</i>
Ü6	<i>Verifizierung als UPD LMM.03.2_ML.HS.05</i>	<i>Mai 2022</i>
Ü7	<i>Überarbeitung als UPD LMM.03.2_ML.HS.06.2.1</i>	<i>Juli 2022</i>
Ü8	<i>Endredaktion</i>	<i>Jan 2023</i>

Version Ü8

Weimar, Januar 2023

Kontakt:

Dachverband Lehm e. V., Postfach 1172; 99409 Weimar, Deutschland
dvl@dachverband-lehm.de · upd.dachverband-lehm.de

© Dachverband Lehm e. V.

1.3 Begriffe / Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokumentes gelten in Verbindung mit den Allgemeinen Regeln für die Erstellung von Typ III UPD für Lehmbaustoffe (Teil 2) [1] die nachfolgenden Begriffe und Abkürzungen:

Produktkategorieregeln (PKR) nach DIN EN 15804 enthalten eine Zusammenstellung spezifischer Regeln, Anforderungen oder Leitlinien, um Typ III Umweltproduktdeklarationen für eine oder mehrere Produktkategorien zu erstellen.

Typ III Umweltproduktdeklarationen (UPD) nach DIN EN 15804 sind freiwillig und stellen auf der Grundlage festgelegter Parameter quantitative, umweltbezogene Daten und ggf. umweltbezogene Informationen bereit, die den Lebensweg des Bauprodukts vollständig oder in Teilen abbilden.

Ökobilanz (LCA): nach DIN EN 15804 Zusammenstellung und *Beurteilung* der In- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenszyklus

Sachbilanz (LCI): Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und *Quantifizierung* von In- und Outputs eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenszyklus umfasst.

Werk(trocken)mörtel werden aus ihren Ausgangsstoffen nach festen Rezepturen (trocken) im Herstellerwerk vorgemischt und in Gebinden (Sackware) / lose (Silo) an die Baustelle geliefert.

Lehmmauermörtel (LMM) besteht aus Baulehm sowie Zusatzstoffen und wird gemäß DIN 18946 nach steigenden Festigkeitsklassen M1 – M4 sowie den Rohdichteklassen 0,9 bis 2,2 klassifiziert. LMM der Rohdichteklassen 0,9 – 1,2 können als *Leichtlehmmauermörtel (LLMM)* bezeichnet werden.

Lehmsteine (LS) nach DIN 18945 sind ungebrannte, i. a. quaderförmige Baustoffe. Sie bestehen aus Baulehm, Sand und ggf. organischen Faserstoffen.

Lehmsteinmauerwerk (LSM) nach E DIN 18940 besteht aus Lehmsteinen (LS) nach DIN 18945, Lehmmauermörtel (LMM) nach DIN 18946 und ggf. Lehmputzmörtel (LPM) nach DIN 18947.

Lehm-Rezyklat: nach Abbruch von Lehmsteinmauerwerk LSM rückgewonnenes Gemisch aus LS-Bruch / LS-Bruch mit anhaftenden Lehmmörtelresten.

Trockenlehm ist getrockneter, ggf. gemahlener Grubenlehm.

Tonmehl ist getrockneter, gemahlener Ton. Es kann zur Erhöhung der Bindekraft magerer Baulehme verwendet werden.

PKR Produktkategorieregeln (engl.: PCR – Product Category Rules)

UPD Umweltproduktdeklaration (engl.: EPD – Environmental Product Declaration)

LS Lehmstein

LSM Lehmsteinmauerwerk

LMM Lehmmauermörtel

LPM Lehmputzmörtel

LR Lehmbauregeln des Dachverbandes Lehm e. V. (DVL) [2]

AVV Europäische Abfallverzeichnis-Verordnung [3]

2 PRODUKTDEFINITION

2.1 Geltungsbereich

Diese Umweltproduktdeklaration (UPD) ist eine Musterdeklaration des Dachverbandes Lehm e. V. (DVL) für Lehmmauermörtel (LMM), die auf hinterlegten originären Ökobilanzdaten typischer Herstellungsverfahren von Verbandsmitgliedern für das Jahr 2019 beruht. Individuelle Hersteller-UPD geben in *Tab. 2.1* den Geltungsbereich der nach dieser Muster-UPD deklarierten Produkte an.

Tab. 2.1 Hersteller, Verfahrensart und Produktbezeichnung

Nr.	Hersteller	Werksanschrift	Verfahrensart	Produktbezeichnung
X	xxxx	1234 XXXX	XXXX	XXXX
Y	xxxx	1234 XXXX	XXXX	XXXX

Diese Muster-UPD ist anwendbar auf im Werk hergestellte mineralische LMM nach DIN 18946 / 18942-1 mit Tonmineralien als alleinigem Bindemittel. Sie gilt für normierte LMM, die nach einem der in *Abs. 4.1* deklarierten Verfahren hergestellt werden. Für die Anwendung gelten die DIN 18946, die LR DVL [2] sowie die PKR LMM des DVL [4].

2.2 Produktbeschreibung

Die Ausgangsmischung für LMM nach DIN 18946 besteht aus Baulehm, mineralischen und pflanzlichen Zusatzstoffen. Die Erhärtung des LMM im Mauerwerk erfolgt durch Verdunstung des Anmachwassers. Erhärteter LMM kann durch Wasserzugabe replastifiziert werden.

Die Deklaration unterscheidet zwei produktspezifische, branchentypische Verfahren zur werksmäßigen Herstellung von LMM:

- *ungetrocknete* LMM, die im erdfeuchten Zustand hergestellt werden (*Erdfeuchtverfahren*),
- *getrocknete* LMM, die technisch (nach)getrocknet oder mit vorgetrockneten Ausgangsstoffen hergestellt werden (*Nachtrochnungsverfahren*).

2.3 Einsatzzweck

LMM nach DIN 18946 dient als Baustoff zur Herstellung von tragendem und nichttragendem Mauerwerk (Wände, Trennwände, Ausfachungen) aus Lehmsteinen (LS) nach DIN 18945 und LR DVL [2]. Für tragendes Lehmsteinmauerwerk (LSM) gilt E DIN 18940.

Leichtlehmmauermörtel LLMM ($\rho_d \leq 1.200 \text{ kg/m}^3$) werden zur Ausführung von nicht tragendem Mauerwerk aus wärmedämmenden Leichtlehmsteinen angewendet.

2.4 Produktnorm / Zulassung / Inverkehrbringen / Anwendungsregeln

Für die Zulassung / das Inverkehrbringen von LMM gelten folgende Normen und Anwendungsregeln:

- E DIN 18940:2023-03, *Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Bemessung, Konstruktion u. Ausführung*,
- DIN 18942-1:2018-12, *Lehmbaumstoffe und Lehmbaumprodukte – Teil 1: Begriffe*,
- DIN 18942-100:2018-12, *Lehmbaumstoffe und Lehmbaumprodukte – Teil 100: Konformitätsnachweis*,
- DIN 18946:2018-12, *Lehmmauermörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*,

- Lehmbau Regeln des Dachverbandes Lehm e. V. (LR DVL) [2],

Weiterhin gelten die PKR LMM [4] und damit im Zusammenhang das Dokument „Teil 2“ mit den entsprechenden Begriffsbestimmungen und Abkürzungen [1], das Technische Merkblatt TM 05 des DVL [5] sowie die entsprechenden Arbeitsblätter der Hersteller. Darüber hinaus müssen die Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung AVV) [3] sowie die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) [6] beachtet werden.

2.5 Gütesicherung

Die Gütesicherung des Herstellungsprozesses von LMM nach DIN 18946 erfolgt gem. DIN 18942-100.

2.6 Lieferzustand

Die deklarierten LMM sind Werkmörtel, denen bei der Aufbereitung auf der Baustelle Anmachwasser zugesetzt wird, um eine verarbeitungsfähige Konsistenz zu erreichen. LMM sollen in trockener Umgebung und frostfrei gelagert werden.

Erdfeucht hergestellte LMM werden in nicht luftdicht verschlossene, wasserfeste Gewebesäcke verpackt, transportiert, gelagert und zu den Baustellen geliefert.

Getrocknete LMM (Werk-Trockenmörtel) werden in geschlossenen Papiersäcken oder Großbehältern verpackt, transportiert, gelagert und zu den Baustellen geliefert. Getrocknete LMM sind unbegrenzt lagerfähig.

2.7 Bautechnische Eigenschaften

Die deklarierten LMM (Tab. 2.2) sind marktübliche LMM mit Rohdichteklassen 1,4 bis 1,8 sowie Festigkeitsklassen M1 bis M2,5.

Der LMM mit der Rohdichteklasse 1,4, der nach dem Trockenverfahren hergestellt wird, enthält organische Anteile. Er ist dadurch „leichter“, aber noch kein Leichtlehmmauermörtel LLMM ($\rho_d \leq 1.200 \text{ kg/m}^3$). Der „schwere“ LMM nach dem Erdfeuchtverfahren mit der Rohdichteklasse 1,8 / Festigkeitsklasse M2,5 erfüllt die Anforderungen für tragendes Lehmsteinmauerwerk (LSM) nach E DIN 18940.

Die deklarierten LMM erfüllen die Vorgaben nach DIN 18946 bzgl. des linearen Trocknungsschwindmaßes: $\leq 2,5 \%$ (LMM) sowie entsprechend $\leq 4,0 \%$ bei Faserbewehrung.

Tab. 2.2 Bautechnische Eigenschaften der deklarierten LMM

Nr.	Eigenschaft / Prüfung n. DIN 18946	Klasse / Wert	Dimension
1	Rohdichte ρ_d / Abs. 8.5	1,4 bis 1,8	kg/m ³
2	Festigkeit ¹		
2.1	• Druckfestigkeit, Abs. 8.7	Klasse M1 – M2,5 ³ $\geq 0,04$	N/mm ²
2.2	• Haftscherfestigkeit, Abs. 8.8		N/mm ²
3	Wärmeleitfähigkeit λ_R , Abs. 5.4.8		W/mK
4	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, Abs. 8.9		-
5	lineares Trocknungsschwindmaß ² , Abs. 8.6		%
6	Überkorn, Abs. 5.2.4		M.-%
7	Aktivitätskonzentrationsindex natürlicher Radionuklide I_A , Abs. A.3	< 1	-

¹LMM für tragendes Mauerwerk muss eine Druckfestigkeit $\geq 2 \text{ N/mm}^2$ und einen charakteristischen Wert der Haftscherfestigkeit $\geq 0,04 \text{ N/mm}^2$ aufweisen; ²zulässige Werte LMM: $\leq 2,5 \%$, faserbewehrt $\leq 4 \%$; ³nach DIN EN 998-2 / DIN 20000-412

Eine Untersuchung auf natürliche Radionuklide erfolgt entspr. DIN18946, A.2. Es gelten die Stoffverbote und -beschränkungen nach DIN18946 und natureplus RL 0803 [7].

2.8 Brandschutz

Die Baustoffklasse von Lehmwerkemörteln wird durch Prüfung nach DIN 4102-1 bzw. DIN EN 13501-1 bestimmt. LMM ohne bzw. mit einem Gehalt $\leq 1 \text{ M.-%}$ an homogen verteilten organischen Zusatzstoffen können gemäß DIN 4102-4 ohne weitere Prüfung der Baustoffklasse A1 (nicht brennbar) zugeordnet werden. LMM mit einem Gehalt $> 1 \text{ M.-%}$ an organischen Zusatzstoffen werden nach Prüfung der Baustoffklasse B gemäß DIN 4102-4 zugeordnet. Es gelten die Herstellerangaben.

2.9 Sonstige Eigenschaften

LMM nach DIN 18946 können nach Erhärtung durch Wässerung replastifiziert oder trocken zermahlen werden. Sie können dann als LMM oder Ausgangsstoff für neue Lehmbaumstoffe wieder bzw. für Anwendungen außerhalb des Lehmbaus weiterverwertet werden (*Abs. 8.1*).

Der zulässige Gesamtgehalt an bauschädlichen Salzen von $0,12 \text{ M.-%}$ wird von den durch die Hersteller deklarierten Produkten nicht überschritten.

3 AUSGANGSSTOFFE

3.1 Auswahl / Eignung

Für die Auswahl der Ausgangsstoffe / Vorprodukte gelten die PKR LMM [4]. *Tab. 3.1* zeigt typische Beispiele der Ausgangsstoffe der analysierten LMM.

Tab. 3.1 Typische Anteile der Ausgangsstoffe von LMM¹

Nr.	Ausgangsstoffe	Anteile in der Ausgangsmischung nach Verfahren M.-%	
		Erdfeuchtverfahren	Trockenverfahren
1	Primärgrubenlehm		
2	Sekundärgrubenlehm	60 %	70 %
3	Primärrecyclinglehm		
4	Trockenlehm		
5	Sand 0/2, ungetrocknet	40 %	20 %
6	Sand 0/4, getrocknet		
7	Sand 0/4, ungetrocknet		
8	Pflanzenteile / -fasern		
9	Anorganische Pigmente / pflanzliche Farbstoffe		
10	Unbehandelte Holzteile/-späne		10 %

¹LMM mit abweichenden Zusammensetzungen und weiteren mineralischen Zusatzstoffen sind neu zu bilanzieren.

Abweichungen ergeben sich durch unterschiedliche Massenverhältnisse zwischen Lehm und mineralischen Zusatzstoffen (Sandkörnungen). Die Abweichungen in den Massenverhältnissen haben keine signifikanten Auswirkungen auf die Ökobilanz.

Die Pflanzenanteile in den bilanzierten Trockenprodukten sind unbehandelte Holzspäne.

Für die Eignungsprüfungen von Baulehm gelten die LR DVL [2] sowie das TM DVL 05 [5].

3.2 Stoffeläuterung

Baulehm gemäß LR DVL [2] ist zur Herstellung von Lehmbauprodukten geeigneter Lehm, bestehend aus einem Gemisch aus schluffigen, sandigen bis kiesigen Gesteinskörnungen und bindekräftigen Tonmineralien. Der Abbau geschieht oberflächennah frei von Wurzeln und Humusanteilen mittels Schürfkübelraupe /Radlader nach DIN18300. Beim Abbau von Grubenlehm und Sand werden Belange des Naturschutzes beachtet (natureplus RL5003 [7]).

Baulehm wird unterschieden nach Grubenlehm, Trockenlehm / Tonmehl und Recyclinglehm. Presslehm kann ebenfalls als Baulehm verwertet werden [1].

Grubenlehm wird erdfeucht dem geologisch „gewachsenen“ Boden entnommen und ist natürlicher Primärrohstoff [2] mit unterschiedlicher granulometrischer sowie schwankender mineralogischer Zusammensetzung (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaCO_3). Dadurch können sich je nach Lehmvorkommen unterschiedliche plastische Eigenschaften während der Aufbereitung und Verarbeitung (mager / fett) sowie Farben des Endprodukts ausbilden.

Je nach weiterer Verwendung wird unterschieden [1]:

Primärgrubenlehm wird zielgerichtet für die Herstellung von Lehmbauprodukten abgebaut und verwendet. *Sekundärgrubenlehm* fällt beim Ton-, Sand-, Kies- und Kalkabbau oder anderen Erdarbeiten für Baumaßnahmen als *Bodenaushub* [1] an und kann als Sekundärstoff im Lehmabbau weiterverwertet werden. Er verliert dann seine Abfalleigenschaft (*Abs. 8.1*).

Trockenlehm ist getrockneter, ggf. gemahlener Grubenlehm. Tonmehl ist natürlicher, getrockneter, ggf. gemahlener Ton, der zur Erhöhung der Bindekraft magerer Baulehme verwendet werden kann. Beide Produkte sowie getrocknete Sande enthalten „graue“ Wärmeenergie aus Vorprozessen, die nach Art und Menge im Rahmen der Ökobilanz erfasst werden (*Abs. 8.1*).

Recyclinglehm ist aus Abbruchbauteilen rückgewonnener Lehmbaustoff [2]. Er liegt i. d. R. als Bestandteil von Baumischabfall (Bauschutt / Baustellenabfälle) vor und muss durch geeignete Trennverfahren von anderen Abfällen separiert werden. Er kann trocken zerkleinert oder durch Zugabe von Wasser replastifiziert und als Baulehm im Produktionsprozess weiterverwertet werden. Je nach Verwertung wird unterschieden (*Abs. 8.1*) [1]:

Primärrecyclinglehm wird zielgerichtet als Lehmbaustoff wiederverwertet. *Sekundärrecyclinglehm* wird für Anwendungen außerhalb des Lehmbaus weiterverwertet (z. B. Abtrennung der Sandkornfraktion für Betonherstellung).

Presslehm ist ein bei der Kiesgewinnung anfallendes Abfallprodukt, das als Kies-Wasch-Schlamm zunächst in Silos oder Becken aufgefangen wird [8]. Der Schlamm enthält die bei der Kieswäsche anfallenden, für die Betonindustrie nicht nutzbaren Feinstkörnungen Schluff, Ton und Feinsand. Der nach Entwässerung zurückbleibende Filterkuchen besitzt noch einen hohen Wassergehalt, der durch Siebandpressen reduziert wird und dadurch die Masse des „Presslehms“ erheblich verringert. Tensidhaltige Schlämme sollen von einer Weiterverwertung als Baulehm ausgeschlossen werden.

Mineralische Zusatzstoffe / natürlich: natürliche Sandkörnungen (DIN EN 12620 / DIN EN 13139) mit dem Hauptmineral Quarz sowie natürlichen Neben- und Spurenmineralien. Sie beeinflussen die bauphysikalischen (Trockenrohdichte, Wärmeleitung, Trocknungsschwindmaß) und die baumechanischen (Festigkeits-) Eigenschaften des Endprodukts, vor allem aber die plastischen Eigenschaften des Baulehms. Natürliche Sandkörnungen sind Bestandteile geologisch „gewachsener“ Strukturen und können problemlos in geogene Kreisläufe zurückgeführt werden.

Organische Zusatzstoffe / natürlich: landwirtschaftliche Nebenprodukte (hier: Stroh, Hanfschäben, Miscanthus) ohne relevante Rückstände aus Herbiziden, Tierhaar sowie zerkleinertes, chemisch unbehandeltes Holz / -späne (keine Holzwerkstoffe). Durch organische Zusatzstoffe können die bauphysikalischen Eigenschaften des Endprodukts beeinflusst werden. Faserartige Zusatzstoffe wirken einer Rissbildung des LMM bei Austrocknung / Erhärtung entgegen.

Natürliche organische Zusatzstoffe sind biologisch abbau- / kompostierbar und können problemlos in biogene Kreisläufe zurückgeführt werden. Sie werden dabei durch Bakterien und Pilze unter Energiefreisetzung wieder vollständig zu CO₂ und H₂O umgebaut.

Wasser ist „Anmachwasser“ und zum Erreichen der geeigneten Verarbeitungskonsistenz des LMM grundsätzlich notwendig. Durch Verdunstung des Anmachwassers erhärtet der LMM und erreicht seine vorgesehenen Produkteigenschaften. Erhärteter LMM kann durch Wasserzugabe replastifiziert und für neuen LMM oder in anderen Prozessen baustofflich verwertet werden.

3.3 Bereitstellung

Die Baulehmkategorien müssen vor einer Bilanzierung im IM A1 hinsichtlich der Art ihrer Bereitstellung klassifiziert werden (Tab. 3.2). Dabei sind vertragsrechtliche Aspekte bzgl. Bereitstellung / Verwertung / Entsorgung zu beachten, um die weitere Verwertung rechtssicher regeln zu können [3].

Tab. 3.2 Arten der Bereitstellung von Baulehm (Beispiele)

Art der Bereitstellung	Baulehm					
	Grubenlehm		Trockenlehm / Tonmehl	Recyclinglehm		Presslehm
	Primär~	Sekundär~		Primär~	Sekundär~	
Rohstoff	X	X				
Recyclingmaterial				X	X	
Vorprodukt			X			
Abfallstoff					X	

3.4 Verfügbarkeit

Alle mineralischen Rohstoffe sind in ihrer Verfügbarkeit als „geologisch gewachsene“ Naturstoffe generell begrenzt. Bei lokalen Erdarbeiten (z. B. Kies-, Sandgewinnung, Kalkabbau, Tiefbau) anfallender, geeigneter lehmhaltiger Bodenaushub [1] wird als Sekundärrohstoff für einen überwiegenden Teil der in dieser Deklaration erfassten LMM verarbeitet.

Bodenaushub bildet mit 130,3 Mio. t/a den größten Teil (59,6 %) der 218,8 Mio. t mineralischer Bauabfälle in Deutschland [9]. Die Weiterverwertung von lehmhaltigem Bodenaushub als *Sekundärgrubenlehm* für die Herstellung von Lehmbaumstoffen spart Deponieraum, ersetzt Primärrohstoffe und verlängert dadurch deren Verfügbarkeit.

Ein bisher kaum erschlossenes Rohstoffpotenzial für die Herstellung von Lehmbaustoffen ist die Rückgewinnung von LMM oder von mineralischen Komponenten in LMM aus Abbruchbauteilen / Baumischabfall als Primär- bzw. Sekundärrecyclinglehm (*Abs. 8.1*) [10]. Aufgrund der besonderen hydraulischen Eigenschaften des Bindemittels Lehm ist eine Replastifizierung und Wiederverwertung vom Lehmsteinbruch mit LMM-Anhaftungen jederzeit möglich. Eine Rohstoffknappheit besteht nicht.

Alle Pflanzenteile und -fasern sind nachwachsende Rohstoffe.

4 PRODUKTHERSTELLUNG

4.1 Herstellungsprozess

Die Herstellungsprozesse von LMM nach DIN 18946 werden aufgrund signifikanter Abweichungen in der Energiebilanz bzw. der Wirkungsanalyse nach Verfahrensart gesondert bewertet. Untersucht wurden LMM nach dem Erdfeuchtverfahren und nach einem diesem Verfahren nachgelagerten Trocknungsprozess (Nachtrocknungsverfahren).

Die verwendeten Rezepturen werden den jeweiligen Rohstoffeigenschaften angepasst und variieren innerhalb der in *Tab. 3.1* angegebenen Bereiche. *Lehmmauermörtel* (LMM) bestehen aus Baulehm und dem Zusatzstoff Sand. *Leichtlehmmauermörtel* (LLMM) enthalten zusätzlich Stroh oder andere Pflanzenfasern. Weitere Stoffe sind nicht enthalten.

4.1.1 Erdfeuchtverfahren

LMM können aufgrund ihrer hydraulischen Eigenschaften im erdfeuchten Zustand gemischt, verpackt, gelagert, transportiert und verarbeitet sowie nach Erhärtung replastifiziert werden. Das ermöglicht ein Verfahren zur Dosierung, Mischung und gravimetrischen Absackung, das keine thermische Behandlung der Komponenten und keine Wasserzugabe erfordert (Erdfeuchtverfahren).

Das Erdfeuchtverfahren umfasst folgende Prozessschritte mit ggf. dazwischen liegenden Transporten:

1. Bereitstellung von erdfeuchtem Baulehm / Ausgangsstoffen,
2. mechanische Zerkleinerung des Baulehms im Kollergang / Walzwerk / Siebung. Der fertig aufbereitete Baulehm ist erdfeucht, besitzt eine krümelige Struktur und ist gut rieselfähig. Einfache Produktionen verzichten auf den Kollergang / das Walzwerk und geben den Baulehm durch ein grobmaschiges Sieb direkt in einen Mischer.
3. Aussiebung von groben Gesteinskörnungen (Überkorn nach DIN 18946) im Baulehm und im Zusatzstoff Sand,
4. Förderung des aufbereiteten Lehms und des ungetrockneten, gesiebten Sandes gemäß Rezeptur in den Mischer,
5. nur für LMM „leicht“: Zufuhr und ggf. mechanische Zerkleinerung von pflanzlichen Zusatzstoffen (hier: Holzspäne) gemäß Rezeptur in den Mischer,
6. Mischvorgang (ohne Wasserzugabe),
7. Absackung des Fertigproduktes in feuchtestabile Transportverpackungen (PE/PP-Big bags) zum Transport auf Holzpaletten.

Bild 4.1 zeigt ein Produktionsschema für LMM nach dem Erdfeuchtverfahren

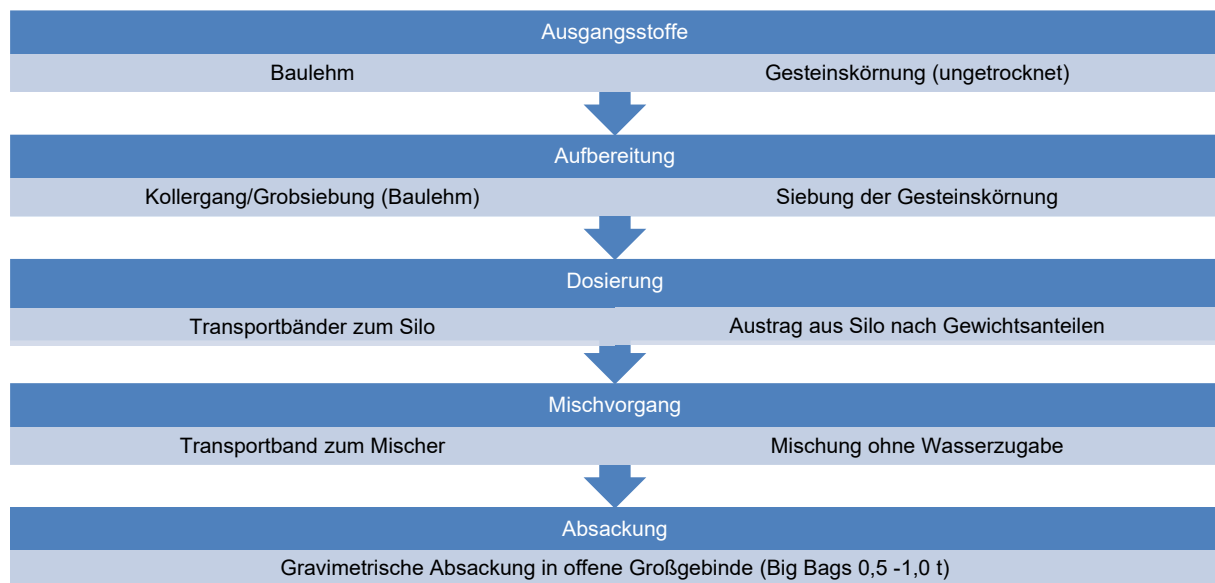


Bild 4.1 Produktionsschema für LMM „schwer“ nach dem Erdfeuchtverfahren

4.1.2 Trockenverfahren

Nach dem Trockenverfahren hergestellte „leichte“ LMM (hier: Rohdichteklasse 1,4) nach DIN 18946 werden als getrocknete feinkörnige, rieselfähige Massen in geeigneten Gebinden zwischengelagert und ggf. auf Holzpaletten mit Schrumpffolie ausgeliefert.

„Schwere“ LMM der Rohdichteklasse 1,8 sind für dieses Verfahren nicht geeignet. Sie werden ausschließlich im Erdfeuchtverfahren (*Abs. 4.1.1*) hergestellt.

Die am Markt erhältlichen getrockneten „leichten“ LMM werden als Fertigmischungen nach dem Erdfeuchtverfahren hergestellt und unmittelbar anschließend in eine Trocknungsanlage zur Nachtrocknung überführt. Die Trocknung erfolgt in Trommeltrocknern für Schüttgüter, befeuert mit unterschiedlichen Energieträgern (Biogas, Erdgas oder Flüssiggas). Nach Trocknung werden sie als feinkörnige, rieselfähige Massen in 25 kg Kraftpapiersäcke abgepackt und ausgeliefert.

Die Nachtrocknung schließt unmittelbar an den Mischvorgang an (*Abs. 4.1.1, Pkt. 6*):

8. direkte Zuführung in den Trommeltrockner (z. B. offene Transportbänder),
9. Trocknung, z. B. nach dem Drehofenprinzip in einem speziell angepassten Trommeltrockner,
10. Reduktion des Feuchtegehaltes von „erdfeucht“ (10 – 13 M.-%) auf bis zu 2 – 4 M.-%,
11. Absackung in Kraftpapiersäcke ohne Folieneinlagen.

Bild 4.2 zeigt als Beispiel das Schema der Nachtrocknung von zuvor erdfeucht hergestellten leichten LMM. (Stand: Dezember 2019).

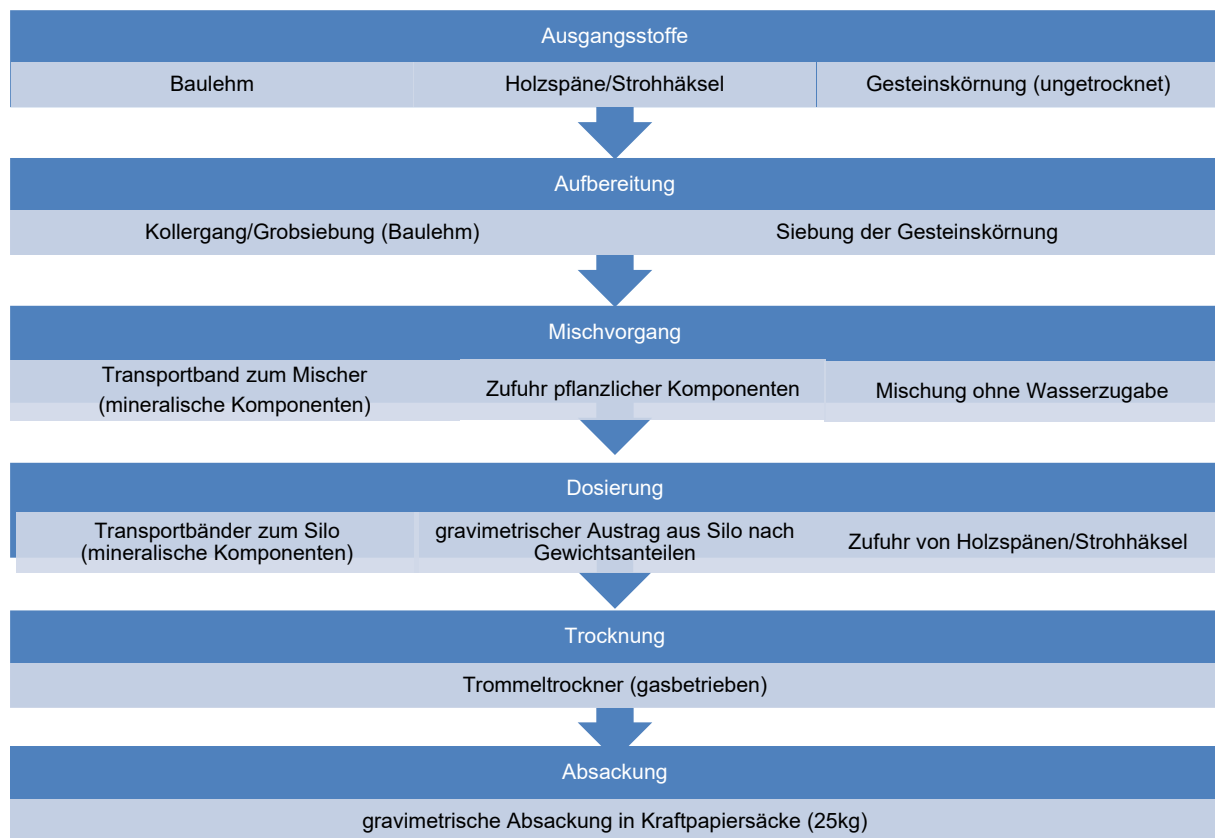


Bild 4.2 Herstellung von LMM „leicht“ nach dem Nachtrocknungsverfahren

4.1.3 Trockendosierverfahren

LMM können auch nach dem Trockendosierverfahren hergestellt werden, obwohl das durch die hier deklarierten LMM nicht belegt wird. Auf ein solches Verfahren wird in *Abs. B.5*, IM D3 für die Wiederverwertung der Ausgangsstoffe von LMM für andere Lehmbaustoffe beispielhaft Bezug genommen.

4.2 Gesundheits- und Arbeitsschutz Herstellung

Staubemissionen von pflanzlichen oder mineralischen Zusatzstoffen während des Produktionsprozesses werden durch Filter begrenzt. Ausgefilterte Zusatzstoffe werden wiederverwertet. Die Grenzwerte der TA Luft [11] werden eingehalten.

4.3 Umweltschutz Herstellung

4.3.1 Abfall

Stand der Technik ist die vollständige Wiederverwertung aller mineralischen Abfälle, die während des Produktionsprozesses anfallen, z. B. abgeseibtes Überkorn und Reste bei Produktwechseln auf derselben Anlage.

4.3.2 Wasser / Boden

Belastungen von Wasser / Boden entstehen nicht. Die erfassten und beschriebenen Herstellungsverfahren arbeiten abwasserfrei. Die Restfeuchte des ungetrockneten LMM (Erdfeuchtverfahren) wird zusammen mit dem Anmachwasser während des Trocknungsprozesses im / am Bauteil in Form von Wasserdampf wieder freigesetzt.

4.3.3 Lärm

Die geforderten Grenzwerte werden eingehalten.

4.3.4 Luft

Staubemissionen während des Produktionsprozesses werden durch Zyklone, Filter oder Sprühwasser begrenzt. Ausgefilterte Stäube von pflanzlichen und trockenen mineralischen Zusatzstoffen werden dem Herstellungsprozess erneut zugeführt. Luftemissionen durch den Betrieb von Dieselfahrzeugen im Werk werden im Rahmen der Ökobilanz als Output des spezifischen Deseinsatzes erfasst und bewertet.

5 PRODUKTVERARBEITUNG

5.1 Verarbeitungshinweise

Die deklarierten LMM sind trocken oder erdfeucht gelieferte Lehmwerkmörtel für die Herstellung von Mauerwerk. Sie sind verarbeitungsfertig und werden auf der Baustelle mit Wasser angemacht.

Trocken / erdfeucht gelieferte LMM werden i. d. R. mit üblicher Mischtechnik (Freifall- oder Zwangsmischer) aufbereitet. Sie können automatisch mit einem Trockenfördergerät aus dem Silo oder aus einzelnen Gebinden entnommen werden. Die Verwendung von Silomischpumpen ist möglich. Kleinere Mengen werden mit einem Rührgerät oder manuell gemischt.

LMM werden nach DIN 18946 bzw. LR DVL [2] aufbereitet und verarbeitet. Sie sollen nach der Aufbereitung noch eine gewisse Zeit ruhen (mauken), damit sich die Bindekraft der Tonminerale voll entfaltet. Unmittelbar vor der Verarbeitung werden sie nochmals durchgemischt.

Verarbeitungshinweise der Hersteller, insbesondere zu Maukzeiten, sind einzuhalten.

Die Verarbeitung von LMM zu Lehmsteinmauerwerk (LSM) nach LR DVL [2] und E DIN 18940 erfolgt i. d. R. manuell. In Mörtelkästen erhärteter LMM kann durch Wasserzugabe wieder in die erforderliche Verarbeitungskonsistenz überführt werden.

LMM werden abfallfrei verarbeitet, indem frischer oder erhärteter Mörtel der Wiederverwendung zugeführt wird. Trocken / erdfeucht an die Baustelle gelieferter LMM muss witterungsgeschützt gelagert werden.

5.2 Arbeitsschutz / Umweltschutz

Es gelten die Regelwerke der Berufsgenossenschaften und die jeweiligen Sicherheitsdatenblätter der Hersteller.

Während der Verarbeitung von LMM sind keine besonderen Maßnahmen zum Schutz der Umwelt zu treffen. LMM nach DIN 18946 erzeugen bei Hautkontakt während der Verarbeitung keine Reizungen oder Schäden. Der Kontakt von LMM mit den Augen ist zu vermeiden.

Die Reinigung der für die Verarbeitung verwendeten Maschinen von erhärtetem LMM ist problemlos mit Wasser möglich. LMM, die bei der Verarbeitung oder Reinigung in den Boden gelangen, stellen keine Gefährdung der Umwelt dar.

5.3 Restmaterial

Während der Verarbeitung herabgefallener, erhärteter LMM wird von einem Mörtelfangbrett sauber aufgenommen und zusammen mit Frischmörtel in den Verarbeitungsprozess zurückgeführt. Nicht

verarbeiteter Lehmestmörtel kann jederzeit durch Wasserzugabe ohne zusätzlichen Energieaufwand wieder in die entsprechende Verarbeitungskonsistenz überführt und weiter verarbeitet werden.

Reste von LMM dürfen nicht über die Kanalisation entsorgt werden (Verstopfung).

5.4 Verpackung

Mörtelsäcke aus ungebleichtem Kraftpapier und Großgebände aus Kunststoffgewebe (PE/PP) werden sortenrein als Transportverpackungen durch duale Entsorgungssysteme dem Recyclingprozess zugeführt.

Holzpaletten werden vom Hersteller oder durch den Baustoffhandel zurückgenommen (EURO-Pfandsystem) und mehrfach verwendet.

PE-Schrumpffolien werden sortenrein durch duale Entsorgungssysteme dem Recyclingprozess zugeführt (Folienhersteller, AVV Abfallschlüsselnr. 15 01 02 [3]).

Die Hersteller sind verantwortlich für den Nachweis des Entsorgungssystems. (z. B. RePack, Interseroh.

6 NUTZUNGSZUSTAND

6.1 Ausgangsstoffe

Bei der Produktion von LMM werden ausschließlich die natürlichen Ausgangsstoffe nach *Abs. 3* verwendet. Diese Ausgangsstoffe sind im Nutzungszustand durch die Tonminerale des Baulehms als feste Stoffe im Bauteil gebunden. Dieser Verbund bleibt nach Erhärtung an der Luft wasserlöslich.

Die mineralischen Gesteinsrohstoffe können auf Grund ihrer geologischen Entstehung in geringen Mengen bestimmte Spurenelemente als natürliche Beimengungen enthalten.

6.2 Wirkungsbeziehungen Umwelt / Gesundheit

LMM der beteiligten Hersteller enthalten keine schädlichen Stoffe in gesundheitsschädigenden Konzentrationen wie z. B. flüchtige organische Komponenten (VOC), Formaldehyd, Isocyanate usw. Der Nachweis erfolgt nach DIN EN ISO 16000-9. Entsprechende schädigende Emissionen sind deshalb auch nicht zu erwarten. LMM sind im verarbeiteten Zustand geruchsneutral.

Die Mikroporenstruktur der Tonminerale des Baulehms ermöglicht eine rasche, besonders hohe Adsorption / Desorption von überschüssigem Wasserdampf im Innenraum.

Die natürliche ionisierende Strahlung der LMM ist gering und gesundheitlich unbedenklich. Die deklarierten LMM weisen einen Aktivitätskonzentrationsindex $I < 1$ gemäß DIN 18946 auf.

6.3 Beständigkeit / Nutzungsdauer

Tonminerale sind nicht hydraulische Bindemittel, d. h. sie erhärten nur an der Luft und werden bei Wiederbefeuchtung erneut plastisch. Die Anwendung von LMM ist deshalb auf den Innen- und witterungsgeschützten Außenbereich begrenzt. Sie sind über den gesamten Nutzungszeitraum vor stehendem und fließendem Wasser oder dauerhafter Durchfeuchtung zu schützen.

7 AUSSERGEWÖHNLICHE EINWIRKUNGEN

7.1 Brand

LMM mit einem pflanzlichen Faseranteil < 1 M.-% sind der Baustoffklasse A1 nach DIN 4102-1 bzw. B2 bei entsprechendem Anteil > 1 M.-% zugeordnet. Eine bessere Einordnung ist vorbehaltlich brandschutztechnischer Belegprüfungen möglich. Der untersuchte „schwere“ LMM erfüllt die Anforderungen der Baustoffklasse A1, der „leichte“ LMM die der Baustoffklasse B2.

Im Brandfall können sich keine toxischen Gase / Dämpfe entwickeln. Bei LMM mit organischen Zusatzstoffen können geringe Mengen CO entstehen.

Zur Brandbekämpfung eingesetztes Löschwasser kann Schäden an LMM erzeugen. LMM im Löschwasser erzeugt keine Umweltrisiken.

7.2 Hochwasser

Unter Wassereinwirkung (z. B. Hochwasser) können LMM nach DIN 18946 replastifiziert und ausgewaschen werden. Dabei werden keine wassergefährdenden Stoffe freigesetzt. Aufgeweichte Bereiche des mit LMM aufgeführten Mauerwerks müssen ggf. auf ihre Stabilität und untersucht werden.

7.3 Havarie Wasserleitungen

Infolge von Schäden an Wasserleitungen kann im Gebäude Wasser austreten und im Mauerwerk verarbeiteten LMM aufweichen. Dadurch können in betroffenen Bereichen partielle Tragfähigkeitsverluste eintreten, die ggf. fachlich zu begutachten sind.

8 HINWEISE ZUR NUTZUNGSPHASE

LMM emittieren keine umwelt- oder gesundheitsgefährdenden flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, TVOC). Der Nachweis erfolgt nach DIN EN ISO 16000-9.

Die dynamische Luftfeuchtesorption von LMM in der Nutzungsphase hat Auswirkungen auf das Raumklima und trägt damit zur energetischen Optimierung notwendiger Luftwechselraten bei.

Die Lebensdauer von verarbeiteten LMM ist abhängig von der jeweiligen Konstruktion, der Nutzungssituation, dem Nutzer selbst, Unterhalt und Wartung usw. Deshalb ist die Nutzungsphase nur in Form von Szenarien zu beschreiben.

9 NACHNUTZUNGSPHASE

9.1 Recycling von LMM

Ergebnisse von Rückbauversuchen von Lehmsteinmauerwerk LSM zeigen, dass eine sortenreine Rückgewinnung von LMM unter praktischen / betriebswirtschaftlichen Bedingungen ausgeschlossen werden kann [10]. Praktikabel ist eine Rückgewinnung von Lehmsteinbruch mit anhaftenden LMM- / LPM-Resten, der in Brecheranlagen zu Lehm-Rezyklat aufbereitet und danach als Primärrecycling-lehm für LMM oder andere Lehmbaustoffe weiterverwertet werden kann.

Dabei darf das rückgebaute LSM keine lehmfreien Reststoffe (Zement-, Gips- und Kalkmörtel) sowie keine relevanten Spuren aus chemischen und biologischen Einwirkungen aus zurückliegenden

Nutzungen enthalten (bauschädigende Salze, Moose / Algen, Hausschwamm, Schimmelpilze usw.). Gleiches gilt für die Weiterverwertung von separierten mineralischen Komponenten (z. B. Sand) als Ausgangsstoff für andere Baumstoffe (Sekundärrecyclinglehm).

Das trockene Lehm-Rezyklat kann zermahlen in geeigneten Gebinden im Baumstoffhandel angeboten und / oder durch Wasserzugabe ohne zusätzlichen Energieaufwand replastifiziert und direkt auf der Baustelle verarbeitet werden. Bei einer Wiederverwertung als LMM für *tragendes* LSM muss vom Hersteller eine Druckfestigkeitsklasse $\geq M2,5$ nachgewiesen werden.

Der Ersatz von Primärgrubenlehm durch Sekundärgrubenlehm oder Recyclinglehm (*Abs. 3.2*) sowie deren Wiederverwertung für die Herstellung von LMM oder andere Lehmbaumstoffe schont unberührte Naturräume und erbringt durch Reduzierung mineralischer Bauabfälle ökologische Vorteile. Bei optimierten technologischen Abläufen können Hersteller von LMM oder anderen Wiederverwertungen für Lehmbaumstoffe positive betriebswirtschaftliche Ergebnisse erzielen.

Sofern die o. g. Möglichkeiten der Wiederverwertung nicht praktikabel sind, können rückgewonnene LMM aus Gebäudeabriss mit natürlichen mineralischen Zusatzstoffen und einem homogen verteilten Gehalt an natürlichen organischen Zusatzstoffen ≤ 1 M.-% nach Aufbereitung zu rezyklierter Körnung wie Bodenaushub weiterverwertet werden, z. B. im Landschaftsbau, zur Rekultivierung, zur Trassierung von Verkehrswegen oder in der Land- und Forstwirtschaft entsprechend der Zuordnungswerte Z (LAGA-Liste) für Einbauklassen für Böden und mineralische Reststoffe [12].

9.2 Verwertung von Abfällen und Verpackungen

Die Verwertung von Holz, Papier- und Kunststoffverpackungen wird bei individuellen UPD durch einen zertifizierten Entsorger gemäß Abfallwirtschaftsgesetz (KrW-/AbfG) [13] von den jeweiligen Herstellern nachgewiesen. Bei der Herstellung von LMM entstehen keine Produktionsabfälle.

9.3 Entsorgung

Bei Gebäudeabriss zurückgebaute, nicht sortenrein gewinnbare LMM, die für eine Weiterverwertung ungeeignet sind, können auf Grund ihres chemisch neutralen, inerten Verhaltens auf Deponien der Deponieklasse DK 0 eingelagert werden (AVV 17 09 04, gemischte Bau- u. Abbruchabfälle [3]). Sie stellen keine außergewöhnlichen Belastungen für die Umwelt dar und können in *Tab. B.4.1/2* als Siedlungsabfall (NHWD) deklariert werden.

10 NACHWEISE

10.1 Produkterstprüfung nach DIN 18942-100

Liegt dem Programmbetreiber vor.

10.2 VOC, TVOC

LP werden nach DIN EN 16516 und Prüfkammerbedingungen nach DIN EN ISO 16000-9 geprüft. Die Mustertabelle *Tab. 10.1* beschreibt verschiedene zu prüfende organische Verbindungen als Emissionen aus LMM.

Tab. 10.1 Mustertabelle für VOC u. TVOC von LMM

Prüfparameter	Konzentration nach 3 Tagen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Grenzwert
---------------	---	-----------

VOC (inkl. VVOC u. TVOC)		
TVOC (Summe flüchtige organische Verbindungen incl. SVOC)		
VOC	flüchtige organische Verbindungen	
VVOC	leicht flüchtige organische Verbindungen	
SVOC	schwerflüchtige organische Verbindungen	
TVOC	Summe flüchtiger organischer Verbindungen	

10.3 Radioaktivität

Die Messung des Radionuklidgehaltes [Bq/kg] für Ra-226, Th-232 und K-40 von LMM nach DIN 18948, A.4 ergibt einen Aktivitätskonzentrationsindex von $I < 1$.

TEIL A SACHBILANZ

A.1 Funktionale Einheit

Die funktionale Einheit für die Herstellung von LMM ist in DIN 18946, A.3 sowie in der entsprechenden PKR geregelt und wird massebezogen mit einem Kilogramm (1 kg) festgelegt.

A.2 Betrachtungszeitraum

Die eingesetzten Mengen an Rohstoffen, Energien sowie Verpackungen sind als Mittelwert von 12 Monaten in den betrachteten Werken berücksichtigt.

A.3 Ergebnisse der Sachbilanz

Die Sachbilanz nach DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044 bzw. DIN EN 15804 dient der Quantifizierung der Input- und Outputströme des Produktsystems auf Basis der Datenerhebung bei beteiligten Herstellern und eines Berechnungsverfahrens. Dabei beziehen sich die Inputs auf die benannten Ressourcen (z. B. Ausgangs-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Energieträger, Strom), die Outputs auf die entsprechenden Emissionen des Systems in Luft, Wasser und Boden sowie Abfälle.

Die Daten beziehen sich auf das Erdfeuchtverfahren zur Herstellung von „schweren“ LMM1 und das Nachrocknungsverfahren für getrocknete „leichte“ LMM2 nach Abs. 4.1.

Tab. A.1 bildet die Sachbilanz für die Muster-UPD für beide LMM ab. Der Hauptaustauschstoff ist Baulehm mit unterschiedlichen mineralischen und natürlichen Zusatzstoffen. Hauptinputfaktoren sind Strom und Flüssiggas. Weitere Inputfaktoren sind die Transporte ins Werk und Verpackungsmaterial. Outputfaktoren sind Abfälle aus Vorprodukten.

Tab. A.1 Sachbilanz der untersuchten Lehmmauermörtel (LMM)

Kategorie	Produkte		Einheit	Erläuterungen
Lehmmauermörtel LMM (Trockenrohddichte ρ_d)	LMM1 (1.800kg/m ³)	LMM2 (1.400kg/m ³)		Rohdichteklassen 1,8 bzw. 1,4 nach DIN 18946
INPUT				
Ausgangsstoffe				
Baulehm	0,6	0,7	kg/kg LMM	Sekundärgrubenlehm

<i>Gesteinskörnung 0/2</i>	0,4	0,2	kg/kg LMM	nach Rezeptur unterschiedlich
<i>Holzspäne, unbehandelt</i>	-	0,1	kg/kg LMM	nach Rezeptur unterschiedlich
Energie / ET				
<i>Strom</i>	8,5	8,5	kWh/t LMM	Strom aus Wasserkraft
<i>Flüssiggas</i>	-	0,01	kg/kg LMM	Propan
FW / Verpackungen				
<i>Frischwasser</i>	0,6	0,28	l/kg LMM	aus Vorprodukten
<i>Holzpaletten</i>	0,02	0,02	kg/kg LMM	Mehrweg
<i>PE Folie</i>	-	0,0002	kg/kg LMM	t > 20µ; 2 m ² pro Palette mit 1 t LMM
OUTPUT				
<i>Abfälle</i>	0,00024	0,00024	kg/kg LMM	aus Vorketten

Der Baulehm der untersuchten LMM besteht zu 60 – 70 % aus Sekundärgrubenlehm, der als Abfall aus der Kiesgewinnung oder anderen Erdaushüben stammt.

Die in *Tab. A.1* aufgelisteten mineralischen und pflanzlichen Zusätze entsprechen DIN 18946. Die Hersteller verwenden spezifische Rezepturen mit abweichenden Anteilen der einzelnen Komponenten. Ungetrockneter Sand ist der mineralische Zusatzstoff. Als pflanzlichen Zusatz nutzen die Hersteller für LMM2 Holzspäne (hier: rund 10 M.-%).

Die Herkunfts- und Verbrauchsangaben zu Strom und Flüssiggas basieren auf Rechnungsangaben der Energielieferanten für den beispielhaft untersuchten Produktionsstandort. Es wurde der durchschnittliche Energieeinsatz (MJ / kg LMM) bezogen auf die produzierte Gesamtmasse auf derselben Produktionsanlage angesetzt (massenbezogene Allokation).

TEIL B ÖKOBILANZ

Die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO 14044 / DIN EN15804 zur Erstellung einer Typ III UPD beruht auf einer Lebenszyklusanalyse (LCA) von LMM der beteiligten Hersteller, bei der für jede deklarierte Zyklusstufe die Ressourcenverbräuche und entsprechende potenzielle Umweltwirkungen abgeleitet werden (massenbezogene Allokation).

B.1 Ziel der Analyse

Ein erstes Ziel der Analyse ist die Erstellung einer Typ III UPD nach DIN EN ISO 14025 als Umweltinformation für die Planung und Ausführung von Bauteilen mit LMM. Ein weiteres Ziel bezieht sich auf die Optimierung von Produktionsprozessen und Verfahrenstechniken durch das Aufzeigen ökologischer Schwachstellen, einschließlich Ansätzen zu deren Beseitigung.

Ein drittes Ziel ist die Beantwortung der Frage, wie sich aus Gebäudeabbruch oder Demontage Baulehm und mineralische Ausgangsstoffe zurückgewinnen und mit „ökologischem Gewinn“ wieder- bzw. weiterverwerten lassen.

B.2 Zielgruppen der Analyse

Zielgruppen der Analyse sind neben Herstellern auch Anwender von LMM, Planer und Entscheidungsträger, die die Ergebnisse zur ökologischen Bewertung eines Bauteils oder Bauwerks verwenden können.

B.3 Referenznutzungsdauer

Die Referenznutzungsdauer (RSL – Reference Service Life) ist die Nutzungsdauer, die unter der Annahme bestimmter Nutzungsbedingungen (z. B. Standardnutzungsbedingungen) für ein Bauprodukt zu erwarten ist. Mit Bezug auf den Nutzungsdauerkatalog der Bau-EPD GmbH, Version 2014 [14] wird eine RSL für LMM von 100 Jahren zugrunde gelegt.

B.4 Abschneidekriterium

Entsprechend DIN 18946, A.3 werden alle Stoffflüsse berücksichtigt, die in das Produktionssystem fließen (Inputs) und mehr als 1 % der Gesamtmasse der Stoffflüsse oder mehr als 1 % des Primärenergieverbrauchs betragen.

Abweichend davon werden auch alle Stoffflüsse erfasst, die das System verlassen (Outputs) und deren Umweltauswirkungen > 1 % der gesamten Auswirkungen einer in der Bilanz berücksichtigten Wirkungskategorie darstellen. Das trifft insbesondere auf Holzspäne in der Rezeptur für „leichte“ LMM zu und deren Absackung in Kraftpapiersäcke.

Die Stoffflüsse zur Herstellung der benötigten Maschinen, Anlagen und Infrastruktur wurden nicht einbezogen.

B.5 Annahmen und Abschätzungen

Annahmen und Abschätzungen betreffen Grubenlehm als Primär- bzw. Sekundärrohstoff, Verpackungen, Pflanzenanteile, die Abfallaufbereitung (IM C1 u. C3) und das Rückgewinnungspotenzial (IM D).

Grubenlehm (Abs. 3.2): Nach Angaben der Hersteller zur Bereitstellung des Ausgangsstoffes Grubenlehm wird ausschließlich Sekundärgrubenlehm eingesetzt (Tab. 3.1). *Sekundärgrubenlehm* und *Recyc-linge* entstammen Vorprozessen, die ursprünglich mineralische Abfallstoffe außerhalb der System-grenze waren und sich beim Eintritt in das System LMM zu Ausgangsstoffen für deren Herstellung wandeln.

Der Ressourceneinsatz und die Umweltwirkungen der Prozesse des Grubenbetriebes entfallen auf die Endprodukte des Betriebes zur Kiesgewinnung. Für den Abbau von Primärgrubenlehm sowie für den bereitgestellten Sekundärgrubenlehm wurden folgende Annahmen getroffen: erdfeucht, mittelbindig, steife Konsistenz, Gewinnungsklasse GK 3 – 4 nach DIN 18300:2012-09, $\rho = 2.000 \text{ kg/m}^3$.

Verpackungen: Holzpaletten lassen sich nicht vollständig den LMM zuordnen, da solche Universalpaletten in einem Pfand-Mehrwegsystem für verschiedene Produkte verwendet werden. Die im Holz der Paletten gebundenen biogenen Kohlenstoffe und Gutschriften aus der möglichen energetischen Verwertung werden nicht berücksichtigt. Das Abschneidekriterium gem. Abs. B.4 findet hier Anwendung.

Erdfeucht produzierte und transportierte „schwere“ LMM werden in *Großgebinden* (*Big bags*) mit einer Kapazität von 1,0 – 1,2 t abgesackt. Mangels originärer UPD für Big bags erfolgte die Bilanzierung durch generische Daten für PE/PP-Vliese nach ÖKOBAUDAT, Z. 6.6.04 als annähernd vergleichbares Produkt (worst case Annahme). Gutschriften durch die stoffliche / thermische Verwertung der Big bags über ein Entsorgungssystem werden nicht berücksichtigt.

Ungebleichte Kraftpapiersäcke ohne Kunststoffeinlage dienen der Verpackung und dem Feuchteschutz für getrocknete „leichte“ LMM. Die Verpackungseinheit für getrocknete LMM ist 25

kg. Ein Kraftpapiersack wiegt 90 g. Gutschriften durch die stoffliche oder thermische Verwertung der Kraftpapiersäcke über ein Entsorgungssystem werden nicht berücksichtigt.

PE Folie schützt die palettierten, in Kraftpapiersäcke abgefüllten, getrockneten „leichten“ LMM. Die 150 cm breite Folie umschließt eine Palette mit 48 Sack LMM und einem Gesamtgewicht von 1,2 t. Für PE-Folie findet das Abschneidekriterium nach *Abs. B.4 Anwendung*.

Holzspäne: Die Umrechnung der Holzmasse in CO₂ erfolgt über die im Holz enthaltene Kohlenstoffmenge und das Verhältnis der Molmassen von CO₂ zu C (44/12). Der Kohlenstoffgehalt im Holz wird für alle Holzarten mit 50 % der absolut trockenen Holzmasse angenommen. Somit entspricht 1 kg absolut trockene Holzmasse etwa 1,832 kg CO₂ [15]. Die verwendeten Holzspäne sind nicht absolut trocken, sie entstehen bei der Verarbeitung von unterschiedlichen Hölzern mit nicht definierten Restfeuchten. Die angelieferten Holzspäne werden im Werk nicht weiter getrocknet, zumal sie zusammen mit Baulehm und Wasser vermischt werden. Angenommen wird ein Sicherheitsabschlag auf die CO₂-Speicherung einer absolut trockenen Holzmasse von -30 % durch die in den Holzspänen enthaltene Restfeuchte von bis zu $w = 30 \%$ (fasergesättigt).

Während der Wachstumsphase eines Baumes wird der Atmosphäre durch die Photosynthese CO₂ entzogen und in Form von Kohlenstoff in das Holz einlagert, welches am Lebensende nur bei energetischer Verwertung wieder in die Atmosphäre entlassen wird. „Leichte“ LMM werden am Lebensende ausschließlich stofflich verwertet, und das gebundene CO₂ verbleibt im System.

Abbruch/Abriss (C1): LMM bilden im Lehmsteinmauerwerk LSM einen festen Verbund mit den Lehmsteinen LS (E DIN 18940). Durch Abriss von LSM kann LMM nicht sortenrein, sondern nur als LS-Bruch mit anhaftenden Lehmmörtelresten rückgewonnen werden.

Für die nachfolgende Modellrechnung wird auf die Leistungsdaten eines branchentypischen Abrissbaggers für LSM der Fa. Liebherr mit einem Dieserverbrauch von 0,16 l / Betriebsstunde bei einer Abrissleistung von 30 m³/h zurückgegriffen.

Abfallaufbereitung (C3): Die Annahmen im IM C3 basieren auf experimentellen Untersuchungen der FH Potsdam [10] zur Aufbereitung von LSM mit anhaftenden Mörtelresten durch Auflösung in Wasser (Einsumpfen) oder Zermahlen in entsprechenden Mühlen. Für die nachfolgende Modellrechnung werden die Verbrauchs- und Leistungsdaten einer branchentypischen Prallbrecheranlage (SBM Remax 200 [22]; mobil / stationär einsetzbar) für mineralische Baustoffe unterstellt. Die Anlage benötigt 0,23 l Diesel / t Abbruchmaterial, einschließlich des Betriebs eines integrierten Stromgenerators.

Rückgewinnungspotenzial (D): Im Modul D werden die Netto-Outputfaktoren des Recyclings der rückgewonnenen Sekundärrohstoffe mit den substituierbaren Primärrohstoffen zur Herstellung eines Lehmbaumstoffes bewertet.

Die Darstellung eines Rückgewinnungspotenzials für LMM ist abhängig von der Entwicklung betriebswirtschaftlich sinnvoller und praxistauglicher Trenn- und Aufbereitungsverfahren. LMM können nur als Bestandteil von Abbruchmaterial, bestehend aus LS mit anhaftenden Lehmmörtelresten, rückgewonnen und wiederverwertet werden. Vorteilhaft ist jedoch die homogene Zusammensetzung von LS und LMM, die beide überwiegend aus Baulehm bestehen.

Gemäß DIN EN 15942 werden in den nachfolgenden Modellrechnungen drei unterschiedliche Szenarien D1 bis D3 dargestellt:

IM D1 unterstellt eine Wiederverwertung des trocken rückgewonnenen Abbruchmaterials aus LSM als Sekundärstoff für *neuen LMM „schwer“ im Erdfeuchtverfahren*. Die Einsparung bei der Bereitstellung von primären Ausgangsstoffen bilden das Rückgewinnungspotenzial dieses Szenarios.

IM D2 unterstellt eine Wiederverwertung des trocken rückgewonnenen Abbruchmaterials aus LSM als Sekundärstoff für *neuen LMM „leicht“ im Nachtrocknungsverfahren*. Im Szenario D2 ersetzen die trocken rückgewonnenen Sekundärstoffe nicht nur die primären Ausgangsstoffe, sondern auch die Energie für die Nachtrocknung erdfeuchter LMM.

IM D3 unterstellt eine Wiederverwertung des trocken rückgewonnenen Abbruchmaterials aus LSM mit LMM-Anhaftungen als Sekundärstoff für *andere Lehmbaumstoffe*, die im *Trockendosierverfahren* hergestellt werden, z. B. für „neuen“ LPM. Bei diesem Verwertungsszenario ersetzen die Bestandteile des LSM und der LMM ansonsten vorgetrockneten Baulehm und Sand.

B.6 Datenqualität

Die verwendeten Daten beziehen sich auf das Geschäftsjahr 2019. Die Ökobilanzen wurden für den Bezugsraum Deutschland erstellt.

Die Datenerfassung für die untersuchten Produkte und Verfahren erfolgte durch Nachweis der Energieeinsätze und Ermittlung weiterer Daten mittels eines strukturierten Erfassungsbogens. Alle Daten und Berechnungen sind beim Programmbetreiber hinterlegt. Die untersuchten, nach dem beschriebenen Verfahren hergestellten LMM sind typisch für die am Markt befindlichen Produkte in Deutschland.

Zur Modellierung der Umweltwirkungen wurden die in *Tab. B.1* aufgeführten Hintergrunddatensätze, Studien und weitere Fachliteratur herangezogen.

Tab. B.1 Übersicht Datengrundlagen

Nr.	Daten	Hintergrunddatensätze
1	Primärgrubenlehm	Ecoinvent 3.9, Nov. 2015 [16]
2	Trockenlehm	UPD LPM [17]
3	Holzspäne	Forschungszentrum Karlsruhe/ BFH [18]
4	Elt. Energie regenerativ (z. B. Wasserkraft)	ÖKOBAUDAT 9.2.05 (2021-06) [19]; zum Vergleich: GEMIS 5.0
5	Flüssiggas	ÖKOBAUDAT 9.2.02 (2021-06) [19]
6	Transport zum Werk (35-40 t, EURO 5, 27 t Nutzlast, 85 % Auslastung)	ÖKOBAUDAT 9.3.01 (2021-06) [19]
7	Abbruch/Abriss	Herstellerdaten LIEBHERR; Abrissbagger [21]
8	Abfallaufbereitung	FH Potsdam [10]; Herstellerdaten REMAX 200, Prallbrecher [22]
9	Wiederverwendungspotenzial	FH Potsdam [10]; UPD LPM [17]

B.7 Allokation

Als Allokation wird die Zuordnung der Input- und Outputströme eines Ökobilanzmoduls auf das untersuchte Produktsystem und weitere Produktsysteme definiert (DIN EN ISO 14040).

Grubenlehm als *Sekundärrohstoff* wird als Bodenaushub bereitgestellt und in anderen Prozessen stofflich ohne Veränderung der Produkteigenschaften wiederverwertet. Der Hauptanteil der Belastungen wird entsprechend der nach DIN EN ISO 14044, Abs. 4.3.2 zugrunde gelegten

physikalischen Allokation der Kiesgewinnung als Hauptprodukt zugewiesen. Der gemessene Energieinput wird nach der auf derselben Produktionsanlage hergestellten Masse aller Lehmbaumstoffe proportional auf die Masseanteile der untersuchten Produkte aufgeteilt.

B.8 Ergebnisse der Ökobilanzierung (LCA)

Für das Produkt „Gebäude“ sind alle IM A – D nach *Tab. B.3.1 – B.5.2* zu berücksichtigen. In der Produktebene „Baustoff“ entstehen in der Errichtungs- und Nutzungsphase i. d. R. keine Ressourcenverbräuche mit entsprechenden Umweltauswirkungen (MNR). Nach DIN EN 15804 ist die Deklaration der IM A1 – A3, C1 – C4 und D für alle zu untersuchenden Bauprodukte verpflichtend. Diese Auswahl entspricht der UPD-Art „von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen“. Sie wird für die nachfolgende Bilanzierung zugrunde gelegt. Die Daten basieren auf nachgewiesenen Werten für erdfeuchte (*Tab. B.3.1; B.4.1 u. B.5.1*) und getrocknete „leichte“ LMM (*Tab. B.3.2; B.4.2 u. B.5.2*). Die Rückgewinnungspotenziale IM D1 – D3 werden im *Teil C* in Form von Balkendiagrammen dargestellt und interpretiert (*Abb. C.4.3– C.4.5*).

Zu folgenden erweiterten Umweltindikatoren in *Tab. B.2* liegen keine Daten vor:

Tab. B.2: Erweiterte Umweltindikatoren

Nr.	Indikator	Symbol	Einheit	Umweltwirkung /Wirkungskategorie
1	Feinstaubemission	PM	Krankheitsfälle	Potenzielles Auftreten von Krankheiten aufgrund v. Feinstaubemissionen (PM: Particulate Matter)
2	Ionisierende Strahlung, menschliche Gesundheit ²	IRP	kBq U235-Äq.	Potenzielle Wirkung durch Exposition des Menschen mit U235 (IRP: Ionizing Radiation Potential)
3	Ökotoxizität (Süßwasser) ¹	ETP-fw	CTUe	Potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für Ökosysteme (CTUe: Comparative Toxic Unit for ecosystems; ETP: Ecological Toxic Potential)
4	Humantoxizität kanzerogene Wirkungen ¹	HTP-c	CTUh	Potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen (CTUh: Comparative Toxic Unit for humans; HTP-c: Human Toxic Potential-carcinogenic)
5	Humantoxizität nicht kanzerogene Wirkungen ¹	HTP-nc	CTUh	Potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen (HTP-nc: Human Toxic Potential-non carcinogenic)
6	Mit der Landnutzung verbundene Wirkungen / Bodenqualität ¹	SQP	-	Potenzieller Bodenqualitätsindex (SQP: Soil Quality Index)

Als Tabellenformat für die Darstellung der Ergebnisse wird die *Informationstransfermatrix ITM* nach DIN EN 15942 genutzt.

Tab. B.3.1 Ökobilanz für 1 kg LMM „schwer“, erdfeucht, Inputfaktoren

LMM "schwer", erdfeucht nach DIN 18946												
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA												
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM												
Funktionale Einheit kg		Parameter	PERE	PERM	PERT	PENRE	PENRM	PENRT	SM	RSF	NRSF	FW
		IM/Einheit	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	kg	MJ H _u	MJ H _u
Produktstadium	Rohstoffe	A1	2,48E-03	5,90E-09	2,48E-03	2,15E-02	0,00E+00	2,15E-02	5,27E-01	0,00E+00	0,00E+00	6,08E-04
	Transport	A2	2,18E-03	0,00E+00	2,18E-03	3,24E-02	0,00E+00	3,24E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,51E-06
	Herstellung	A3	4,19E-02	7,64E-11	4,19E-02	5,91E-02	7,36E-02	1,33E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,74E-05
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	4,66E-02	5,97E-09	4,66E-02	1,13E-01	7,36E-02	1,87E-01	5,27E-01	0,00E+00	0,00E+00	6,28E-04
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	1,56E-05	0,00E+00	1,56E-05	4,26E-03	0,00E+00	4,26E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,07E-08	5,07E-10
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	3,61E-05	0,00E+00	3,61E-05	9,84E-03	0,00E+00	9,84E-03	0,00E+00	0,00E+00	4,78E-08	1,17E-09
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwertung LMM "schwer", erdfeucht	D1	-1,88E-03	-4,13E-09	-1,88E-03	-3,88E-02	0,00E+00	-3,88E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,30E-04
	Wiederverwertung LMM "leicht", trocken	D2	-3,94E-03	-2,75E-09	-3,90E-03	-6,57E-01	0,00E+00	-6,57E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-9,91E-06
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D3	-2,81E-03	0,00E+00	-2,81E-03	-5,09E-01	0,00E+00	-5,09E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-5,33E-03

PERE Nutzung erneuerbarer Primärenergie ausgenommen erneuerbare Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

PERM Nutzung erneuerbarer Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

PERT Gesamtnutzung erneuerbarer Primärenergieressourcen (Primärenergie und Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden)

PENRE Nutzung nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen außer nicht erneuerbare Energieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

PENRM Nutzung nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

PENRT Gesamtnutzung nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen (Primärenergie u. Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden)

SM Nutzung von Sekundärstoffen

RSF Nutzung erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

NRSF Nutzung nicht erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

FW Nettonutzung von Frischwasser

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

Tab. B.3.2 Ökobilanz für 1 kg LMM „leicht“, getrocknet, Inputfaktoren

LMM "leicht", getrocknet nach DIN 18946												
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA												
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM												
Funktionale Einheit kg		Parameter	PERE	PERM	PERT	PENRE	PENRM	PENRT	SM	RSF	NRSF	FW
		IM/Einheit	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	kg	MJ H _u	MJ H _u	m ³
Produktstadium	Rohstoffe	A1	5,75E-03	0,00E+00	5,75E-03	3,45E-01	0,00E+00	3,45E-01	7,04E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,07E-06
	Transport	A2	2,18E-03	0,00E+00	2,18E-03	3,24E-02	0,00E+00	3,24E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,51E-06
	Herstellung	A3	3,49E-02	7,64E-11	3,49E-02	6,18E-01	0,00E+00	6,18E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,25E-06
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	4,28E-02	7,64E-11	4,28E-02	9,95E-01	0,00E+00	9,95E-01	7,04E-01	0,00E+00	0,00E+00	7,83E-06
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	1,56E-05	0,00E+00	1,56E-05	4,26E-03	0,00E+00	4,26E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,07E-08	5,07E-10
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	3,61E-05	0,00E+00	3,61E-05	9,84E-03	0,00E+00	9,84E-03	0,00E+00	0,00E+00	4,78E-08	1,17E-09
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwertung LMM "schwer", erdfeucht	D1	-1,88E-03	-4,13E-09	-1,88E-03	-3,88E-02	0,00E+00	-3,88E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,30E-04
	Wiederverwertung LMM "leicht", trocken	D2	-3,94E-03	-2,75E-09	-3,90E-03	-6,57E-01	0,00E+00	-6,57E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-9,91E-06
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D3	-2,81E-03	0,00E+00	-2,81E-03	-5,09E-01	0,00E+00	-5,09E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-5,33E-03

PERE Nutzung erneuerbarer Primärenergie ausgenommen erneuerbare Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

PERM Nutzung erneuerbarer Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

PERT Gesamtnutzung erneuerbarer Primärenergieressourcen (Primärenergie und Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden)

PENRE Nutzung nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen außer nicht erneuerbare Energieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

PENRM Nutzung nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

PENRT Gesamtnutzung nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen (Primärenergie u. Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden)

SM Nutzung von Sekundärstoffen

RSF Nutzung erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

NRSF Nutzung nicht erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

FW Nettonutzung von Frischwasser

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

Tab. B.4.1 Ökobilanz für 1 kg LMM „schwer“, erdfeucht, Umweltwirkungsfaktoren

LMM "schwer", erdfeucht nach DIN 18946												
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										Ergänzende Parameter		
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM												
Funktionale Einheit kg		Parameter	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	GWP Prozess (fossil)	GWP (biogen)	GWP LuL
		IM/Einheit	kg CO ₂ äquiv	kg CFC-11 äquiv	kg SO ₂ äquiv	kg PO ₄ ³⁻ äquiv	kg C ₂ H ₆ äquiv	kg Sb äquiv	MJ H _u äquiv	kg CO ₂ äquiv	kg CO ₂ äquiv	kg CO ₂ äquiv
Produktstadium	Rohstoffe	A1	9,41E-04	2,18E-10	6,18E-06	1,98E-06	1,00E-06	7,85E-09	1,33E-02	8,21E-04	0,00E+00	1,20E-04
	Transport zum Werk	A2	3,00E-03	3,00E-03	5,48E-06	1,28E-06	1,57E-06	2,54E-07	3,23E-02	3,00E-03	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	4,29E-03	2,92E-12	5,70E-06	3,28E-08	6,69E-06	1,10E-09	1,47E-01	4,26E-03	3,67E-05	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	Gesamt	8,23E-03	3,00E-03	1,74E-05	3,29E-06	9,27E-06	2,63E-07	1,93E-01	8,07E-03	3,67E-05	0,00E+00
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	3,81E-05	1,76E-14	1,40E-07	9,41E-09	2,39E-08	1,06E-08	4,25E-03	3,81E-05	0	0
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	8,80E-05	4,07E-14	3,25E-07	2,18E-08	5,53E-08	2,46E-08	9,82E-03	8,80E-05	0,00E+00	0,00E+00
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwertung LMM "schwer", erdfeucht	D1	-2,33E-03	-4,60E-10	-1,71E-05	-4,57E-06	-2,90E-06	-6,07E-09	-3,34E-02	-1,45E-03	0,00E+00	-8,79E-04
	Wiederverwertung LMM "leicht", trocken	D2	-3,13E-02	-4,81E-10	-4,48E-05	-6,60E-06	-7,02E-06	-1,58E-06	-6,52E-01	-2,88E-02	0,00E+00	-2,49E-03
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D3	-6,01E-02	-7,70E-03	-7,73E-03	-7,70E-03	-7,73E-03	-7,70E-03	-5,10E-01	-6,01E-02	0,00E+00	0,00E+00

GWP Globales Erwärmungspotenzial

ODP Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht

AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser

EP Eutrophierungspotenzial

POCP Potenzial hinsichtlich der Bildung von troposphärischem Ozon

ADPE Potenzial für den abiotischen Ressourcenabbau - Elemente für nicht fossile Ressourcen

ADPF Potenzial für den abiotischen Ressourcenabbau - fossile Brennstoffe

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

Tab. B.4.2 Ökobilanz für 1 kg LMM „leicht“, getrocknet, Umweltwirkungs faktoren

LMM "leicht", getrocknet nach DIN 18946												
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										Ergänzende Parameter		
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM												
Funktionale Einheit kg		Parameter	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	GWP Prozess (fossil)	GWP (biogen)	GWP LuL
		IM/Einheit	kg CO ₂ äquiv	kg CFC-11 äquiv	kg SO ₂ äquiv	kg PO ₄ ³⁻ äquiv	kg C ₂ H ₄ äquiv	kg Sb äquiv	MJ H ₂ äquiv	kg CO ₂ äquiv	kg CO ₂ äquiv	kg CO ₂ äquiv
Produktstadium	Rohstoffe	A1	-1,01E-01	1,31E-09	2,12E-05	3,43E-06	2,67E-06	3,55E-09	6,02E-03	4,26E-04	-1,00E-01	0,00E+00
	Transport zum Werk	A2	2,38E-03	4,71E-13	5,48E-06	1,28E-06	1,57E-06	2,54E-07	3,23E-02	2,38E-03	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	3,17E-02	5,71E-12	3,84E-05	1,80E-06	2,10E-05	1,58E-06	6,17E-01	3,17E-02	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	Gesamt	-6,67E-02	1,32E-09	6,51E-05	6,51E-06	2,52E-05	1,84E-06	6,55E-01	3,45E-02	-1,00E-01	0,00E+00
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	1,32E-06	6,11E-16	4,87E-09	3,27E-10	8,30E-10	3,69E-10	1,47E-04	1,32E-06	0	0
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	8,80E-05	4,07E-14	3,25E-07	2,18E-08	5,53E-08	2,46E-08	2,18E-08	8,80E-05	0,00E+00	0,00E+00
Rückgewinnungspotenzial	Wiederverwertung LMM "schwer", erdfeucht	D1	-2,33E-03	-4,60E-10	-1,71E-05	-4,57E-06	-2,90E-06	-6,07E-09	-3,34E-02	-1,45E-03	0,00E+00	-8,79E-04
	Wiederverwertung LMM "leicht", trocken	D2	-3,13E-02	-4,81E-10	-4,48E-05	-6,60E-06	-7,02E-06	-1,58E-06	-6,52E-01	-2,88E-02	0,00E+00	-2,49E-03
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D3	-6,01E-02	-7,70E-03	-7,73E-03	-7,70E-03	-7,73E-03	-7,70E-03	-5,10E-01	-6,01E-02	0,00E+00	0,00E+00

GWP = Globales Erwärmungspotenzial

ODP = Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht

AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser

EP = Eutrophierungspotenzial

POCP = Potenzial hinsichtlich der Bildung von troposphärischem Ozon

ADPE = Potenzial für den abiotischen Ressourcenabbau - Elemente für nicht fossile Ressourcen

ADPF = Potenzial für den abiotischen Ressourcenabbau - fossile Brennstoffe

MB = Modul beschrieben

MND = Modul nicht deklariert

MNR = Modul nicht relevant

Tab. B.5.1 Ökobilanz für 1 kg LMM „schwer“, erdfeucht, Outputfaktoren

LMM "schwer", erdfeucht nach DIN 18946										
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM										
Funktionale Einheit kg		Parameter	HWD	NHWD	RWD	CRU	MFR	MER	EEE	EET
		IM/Einheit	kg	kg	kg	kg	kg	kg	MJ	MJ
Produktstadium	Versorgung mit Rohstoffen	A1	2,87E-05	1,30E-04	2,05E-07	4,07E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	A2	2,03E-06	2,49E-06	4,90E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	3,56E-06	7,07E-05	1,64E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	3,43E-05	2,03E-04	2,55E-07	4,07E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	3,70E-08	3,79E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	8,55E-08	8,78E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwertung LMM "schwer", erdfeucht	D1	-3,54E-05	-1,03E-04	-3,17E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung LMM "leicht", trocken	D2	-3,18E-05	-7,96E-05	-9,28E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D3	-2,45E-07	-4,90E-03	-4,61E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

HWD Gefährlicher Abfall zur Deponie

NHWD Entsorgter nicht gefährlicher Abfall

RWD Entsorgter radioaktiver Abfall

CRU Komponenten für die Wiederverwendung

MFR Stoffe zum Recycling

MER Stoffe für die Energierückgewinnung

EEE Exportierte Energie elektrisch

EET Exportierte Energie thermisch

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

Tab. B.5.2 Ökobilanz für 1 kg LMM „leicht“, getrocknet, Outputfaktoren

LMM "leicht", getrocknet nach DIN 18946										
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM										
Funktionale Einheit kg		Parameter	HWD	NHWD	RWD	CRU	MFR	MER	EEE	EET
		IM/Einheit	kg	kg	kg	kg	kg	kg	MJ	MJ
Produktstadium	Versorgung mit Rohstoffen	A1	1,30E-05	5,89E-05	9,27E-08	0,00E+00	1,00E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	A2	2,03E-06	2,49E-06	4,90E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	3,56E-06	7,68E-05	6,23E-07	0,00E+00	3,06E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	1,86E-05	1,38E-04	7,65E-07	0,00E+00	1,00E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	1,28E-09	1,32E-10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	8,55E-08	8,78E-09	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwertung LMM "schwer", erdfeucht	D1	-3,54E-05	-1,03E-04	-3,17E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung LMM "leicht", trocken	D1	-3,18E-05	-7,96E-05	-9,28E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D2	-2,45E-07	-4,90E-03	-4,61E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

HWD Gefährlicher Abfall zur Deponie

NHWD Entsorgter nicht gefährlicher Abfall

RWD Entsorgter radioaktiver Abfall

CRU Komponenten für die Wiederverwendung

MFR Stoffe zum Recycling

MER Stoffe für die Energierückgewinnung

EEE Exportierte Energie elektrisch

EET Exportierte Energie thermisch

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

TEIL C INTERPRETATION DER ÖKOBILANZ

Im *Teil C* werden ausgewählte Ergebnisse der Ökobilanz (*Tab. B.3.1 – B.5.2*) in Form von Balkendiagrammen für die Parameter PEI, GWP sowie für die IM C1, C3 und D1 – D3 dargestellt und interpretiert (*Abb. C.1.1 – C.4.5*).

C.1 Primärenergieeinsatz (PEI)

Die Durchschnittswerte zum PEI in der *Sachbilanz (Tab. A.1)* basieren auf der Jahresabrechnung eines Energielieferanten für die Herstellung im Werk, die Berechnungsgrundlagen für Vorprodukte und Verpackung auf generischen Daten. Die Herstellung erfolgt auf einer Dosier- und Mischanlage, auf der außer LMM auch andere Putzmörtel und Stampflehm produziert werden. Der jährliche Stromverbrauch wird auf den gesamten Produktionsoutput in kg auf derselben Anlage bezogen. Daraus ergibt sich in der *Sachbilanz (Tab. A.1)* ein PEI von 8,5 kWh pro t LMM (30,6 MJ / t LMM).

Erdfeuchte LMM bestehen aus einem mineralischen Rohstoffmix aus Baulehm (57 %) und Sand (43 %). Der Baulehm fällt bei der Kiesgewinnung als Abfall an und wird als Sekundärgrubenlehm ohne weitere Aufbereitung zur Herstellung von LMM weiterverwertet. Der Sand wird ungetrocknet zugemischt.

In der *Ökobilanz (Tab. B.3.1)* wird der PEI bezogen auf den eingesetzten Energieträger (Strom aus Flusslaufkraftwerken) mit bewertet. Der PEI für die Herstellung von erdfeuchtem LMM beträgt einschließlich der Vorkette zur Bereitstellung des Stroms und der Transporte zum Werk 0,091 MJ/kg LMM. Das sind ca. 40 % des gesamten PEI in Höhe von $2,33E-01$ MJ/kg LMM (*Abb. C.1.1*). Die Verpackung in Großbinden von 1 t Fassungsvermögen trägt mit 0,142 MJ/kg LMM oder 60 % den Hauptanteil am Primärenergieeinsatz im gesamten Herstellungsprozess vom Ausgangsstoff bis zur Absackung. Es handelt sich dabei um eine worst case-Betrachtung mit Annahmen zur Ökobilanz solcher Großgebäude, abgeleitet aus Werten für ähnliche Kunststoffgewebe, die in der ÖKOBAUDAT gelistet sind (*Abb. B.6*). Der Anteil regenerativer Energieträger (PERT) beträgt 26 % des Gesamtenergieinput vom Ausgangsstoff bis zur Verpackung.

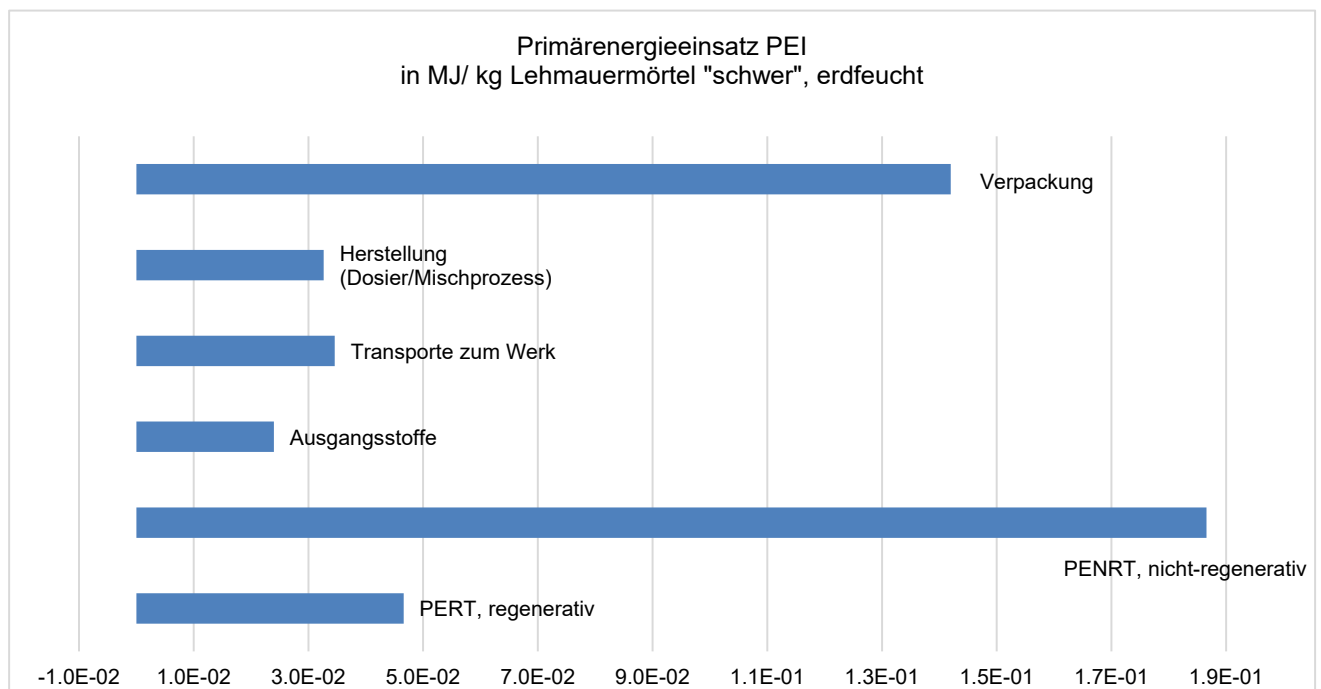


Abb. C.1.1 Primärenergieeinsatz PEI für LMM „schwer“, erdfeucht

Getrocknete LMM „leicht“ bestehen aus einem Rohstoffmix aus Baulehm (70 M.-%), Sand (20 M.-%) und unbehandelten Holzspänen (10 M.-%). Der Baulehm stammt, wie bei erdfeuchten LMM, als Sekundärgrubenlehm aus der Kiesgewinnung und wird ohne Veränderung im Herstellungsprozess von LMM weiterverwertet.

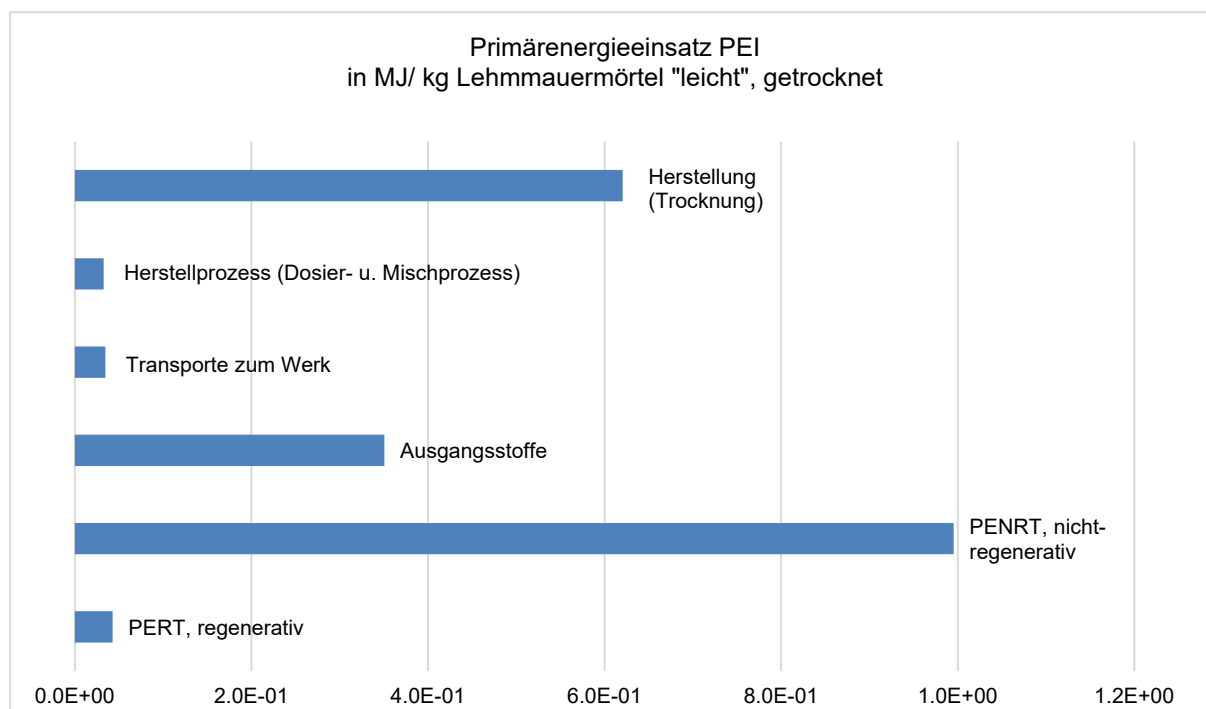


Abb. C.1.2 Primärenergieeinsatz PEI für LMM „leicht“, getrocknet

In *Abb. C.1.2* wird der Herstellungsprozess ohne Verpackung dargestellt. Kraftpapiersäcke tragen mit 90 g / 25 kg LMM weniger als 1 % zur Masse und zum PEI bei ($4,000E-08$ MJ/kg LMM, getrocknet), so dass hier das Abschneidekriterium zutrifft.

Das Herstellungsverfahren unterscheidet sich von LMM „schwer“, erdfeucht insofern, als dass nach demselben Dosier- und Mischvorgang (mit anderer Mischung) ein zusätzlicher Durchlauf durch einen mit Flüssiggas betriebenen Trommeltrockner folgt. Die Ausgangsstoffe und der Dosier- und Mischprozess verbrauchen zusammen 0,38 MJ/kg LMM „leicht“ (*Abb. C.1.2*) oder 37 % aller PE-Einträge. Auf Transporte ins Werk entfallen 3,3 % aller PE-Einträge.

Nach Herstellerangaben werden mehrere Lehmprodukte im selben Trommeltrockner getrocknet. Der nachgewiesene Gesamteinsatz an Propangas für den Trommeltrockner wurde dementsprechend auf die gesamte Produktionsmasse proportional verteilt. Daraus errechnet sich ein PE-Anteil für Trocknung in Höhe von 0,01 kg Propangas pro kg LMM „leicht“, getrocknet (*Tab. A.1*). In der Ökobilanz wird der Energieträger Propangas über die gesamte Vorkette bis zur Bereitstellung bewertet. Mit 0,62 MJ/kg LMM „leicht“ entfallen ca. 60 % des gesamten PEI in Höhe von 1,04 MJ/kg LMM auf diese Prozessstufe.

Die Trocknungsenergie im Herstellungsprozess und die Transporte zum Werk sind die Hauptursachen für den im Vergleich zu LMM „schwer“ höheren Anteil (96 %) der nicht regenerativen Energieträger am Gesamtprimärenergiemix. Der regenerative PE-Anteil (4 %) bezieht sich auf den Strom aus Wasserkraft für den Dosier- und Mischprozess.

C.2 Treibhausgaspotenzial GWP

Die Treibhausgaspotenziale $\text{CO}_2_{\text{equiv.}}$ werden als GWP 100 in ihrer Klimawirkung über 100 Jahre betrachtet. Untersucht wurde das GWP für beide LMM. Die für die Rezeptur von getrockneten LMM „leicht“ verwendeten unbehandelten Holzspäne enthalten gebundenes CO_2 , das in die Berechnung einbezogen wurde.

Bei erdfeuchten LMM mit $\rho = 1.800 \text{ kg/m}^3$ beträgt das über die IM A1 – A3 aufsummierte Treibhausgaspotential (GWP 100) $0,01 \text{ kg CO}_2_{\text{equiv.}}$ pro kg LMM (Tab. B.4.1). In Abb. C.2.1 werden die Beiträge der einzelnen Module dargestellt und nachfolgend interpretiert.

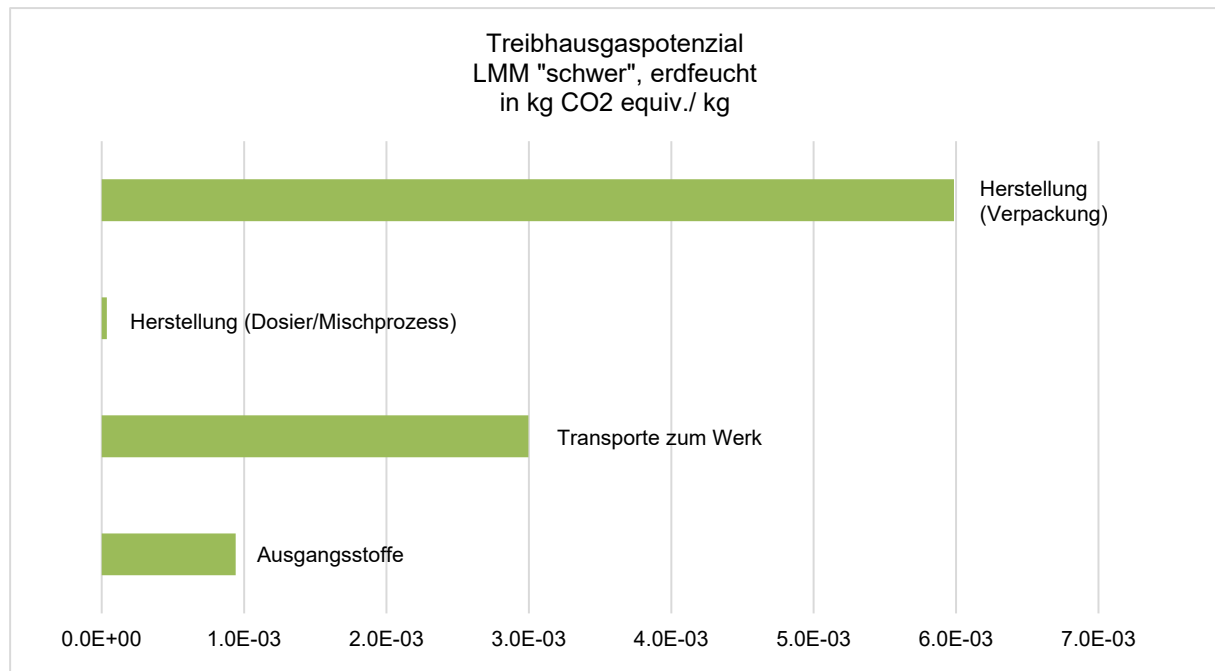


Abb. C.2.1 Treibhausgaspotenziale (GWP 100) LMM „schwer“, erdfeucht

Sand ist der einzige Ausgangsstoff der Rezeptur (43 M.-%) für erdfeuchten LMM, der mit 11 % zu den Treibhausgaspotenzialen von insgesamt $8,23\text{E-}03 \text{ kg CO}_2_{\text{equiv.}} / \text{kg LMM}$ „schwer“ beiträgt. Die Verwendung von Sekundärgrubenlehm (57 M.-%) verursacht Treibhausgasemissionen beim Abbagern, die jedoch außerhalb der Systemgrenze entstehen und der Kiesgewinnung zuzurechnen sind.

Transporte zum Werk berücksichtigen neben anderen Rohstofflieferungen auch den Weg des Sekundärgrubenlehms von der Kiesgewinnung zur Produktionsstätte. Die Transporte mit LKW (EURO 5) mit 34 – 40 t zulässigem Gesamtgewicht und 27 t Nutzlast bei 85 % Auslastung verursachen $0,003 \text{ kg CO}_2_{\text{equiv.}}$ oder 36 % der gesamten Treibhausgasemissionen für LMM „schwer“. Die durchschnittliche Transportentfernung beträgt 45 km.

Der Dosier- und Mischprozess erfolgt mit 100 % Wasserkraft aus Flusskraftwerken. Dieser regenerative Energieträger und der sparsame Verbrauch in Höhe von $8,5 \text{ kWh/t}$ ($30,6 \text{ MJ/t}$) LMM führen insgesamt zu einem mit $3,76\text{E-}05 \text{ kg CO}_2_{\text{equiv.}} / \text{kg LMM}$ „schwer“ oder 0,45 % vergleichsweise marginalen Anteil an den Treibhausgasemissionen.

Für die Absackung des Produktes werden offene Großgebände aus PE/PP (Big bags) mit bis zu 1 t LMM Fassungsvermögen genutzt. Mangels originärer UPD für diese Großgebände wurde ein vergleichbares Produkt PE/PP Vliese (ÖKOBAUDAT Nr. 06.6.04 [19]) bilanziert.

Wie beim PEI (Abb. C.1.1) stellen diese Gebinde mit 60 % der Treibhausgasemissionen den größten Emissionsfaktor dar. Sie sind jedoch mehrwegfähig. Einige Hersteller haben ein eigenes Pfandsystem eingerichtet. Die meisten Hersteller schließen sich einem Entsorgungssystem nach KrW-/AbfG [13] an. Verpackungen der Hersteller von erdfeuchten LMM werden entsprechend der gesetzlichen Regelungen für Transportverpackungen stofflich oder energetisch verwertet, die jeweiligen Verwertungssysteme weisen die Mengen nach. Die Verwertungspflicht reduziert die Treibhausgasemissionen je nach Verwertungsweg bei Einbeziehung der stofflichen oder energetischen Rückgewinnungspotenziale. Solche Gutschriften sind nicht in dieser Muster-UPD (worst case-Szenario) enthalten, können aber in individuellen Hersteller-UPD nachgewiesen werden.

Die Rezeptur für getrocknete LMM „leicht“ führt zu einem anderen Bild der Treibhausgasemissionen (Abb. C.2.2). Insgesamt ergibt sich eine negative Bilanz mit $-6,67\text{E-}02$ kg $\text{CO}_2\text{equiv./kg}$ LMM „leicht“.

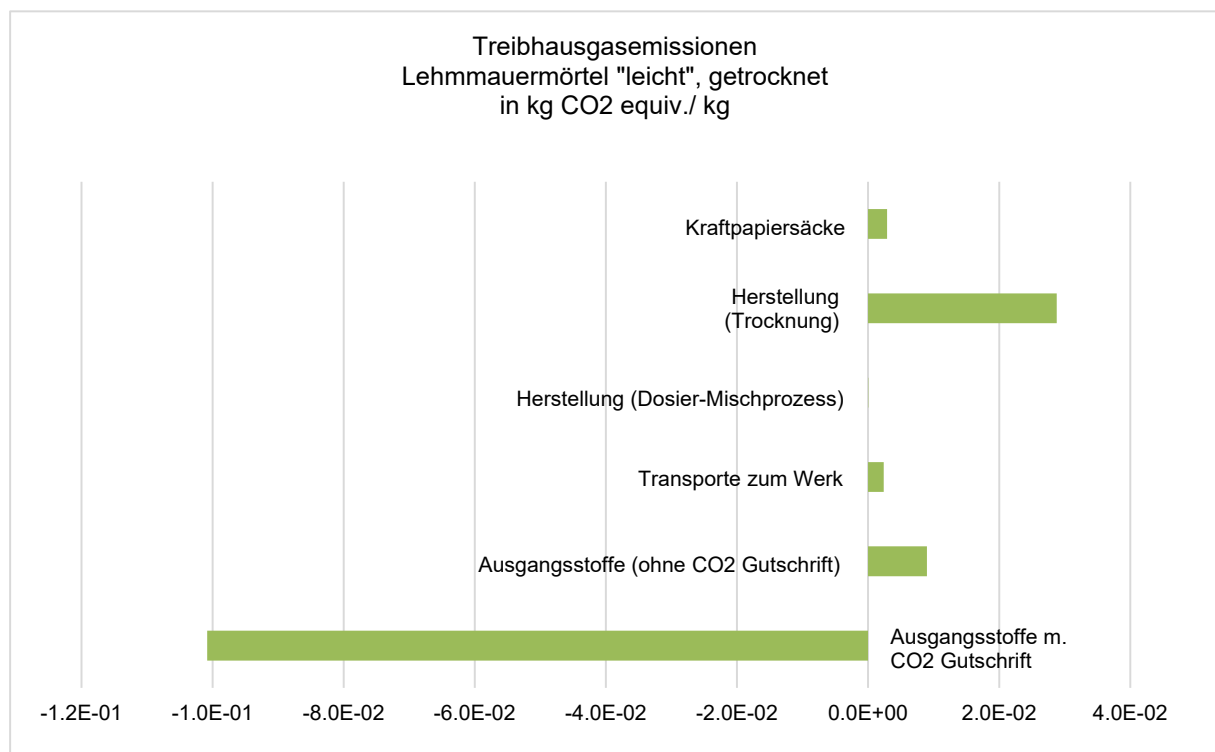


Abb. C.2.2 Treibhausgaspotentiale (GWP 100) LMM „leicht“, getrocknet

Die Rezeptur enthält 10 M.-% Holzspäne. Der darin gebundene Kohlenstoff reduziert die Summe der Treibhausgasemissionen der eingesetzten Ausgangsstoffe (Baulehm, Sand, Holzspäne) auf einen negativen Wert von $-0,101$ kg $\text{CO}_2\text{equiv./kg}$ LMM „leicht“, getrocknet. Der in Holzspänen enthaltene Kohlenstoff wird im Verhältnis der Molmassen von CO_2 zu C (44/12) umgerechnet. Der Kohlenstoffgehalt im Holz wird für alle Holzarten mit 50 % der absolut trockenen Holzmasse angenommen. Somit entspricht 1 kg absolut trockene Holzmasse etwa $1,832$ kg CO_2 [15]. Die Berechnung des gebundenen CO_2 in ungetrockneten Holzspänen geht von einem Abschlag von 30 % aus. Gegenüber absolut trockener Holzmasse reduziert sich das gebundene CO_2 von $1,83$ kg CO_2 auf $1,09$ kg CO_2 pro kg Holzspäne. Bezogen auf den Anteil der Holzspäne in der Rezeptur (10 M.-%) sind das $0,109$ kg CO_2 . Ohne diese Gutschrift trüge die Bereitstellung der Ausgangsstoffe mit ca. $8,98\text{E-}03$ ($0,00898$) kg CO_2 oder 22 % zu den Treibhausgasemissionen bei. Das gesamte GWP ohne Gutschrift für gebundene Kohlenstoffe würde sich auf $+4,3\text{E-}02$ ($0,043$) kg $\text{CO}_2\text{equiv./kg}$ LMM „leicht“ erhöhen (Abb. C.2.2, Ausgangsstoffe ohne CO_2 Gutschrift).

Kraftpapiersäcke tragen mit 0,003 kg CO₂ equiv. oder 5 % zum GWP von getrockneten LMM bei und wurden deshalb für die Berechnung des GWP einbezogen. Eine Gutschrift für stoffliche oder energetische Verwertung der Papiersäcke ist nicht darin enthalten.

Bei einer differenzierten Betrachtung des Herstellungsverfahrens überwiegt der Trocknungsprozess mit 2,9E-02 (0,029) kg CO₂equiv. / kg LMM „leicht“ oder 89,7 % der Treibhausgasemissionen des gesamten Herstellungsprozesses von der Mischung bis zur Absackung in Kraftpapiersäcke. Ein Wechsel des Energieträgers, z. B. auf Biogas, könnte den Beitrag des Trocknungsprozesses zum GWP auf 0,017 kg CO₂ reduzieren. Dieses Alternativszenario berücksichtigt bereits die unterschiedlichen Heizwerte in kWh / MJ der beiden Energieträger Flüssiggas und Biogas. Dieser erste orientierende Vergleich verdeutlicht einen Ansatz zur energetischen Optimierung, verbunden mit Reduktionspotenzial bei den Treibhausgasemissionen.

C.3 Aufbereitung und Rückgewinnungspotenzial

Baumstoffe mit dem Bindemittel Lehm sind replastifizierbar [20]. Bei diesem Prozess lösen sich die Komponenten einer Materialmischung vom Bindemittel und werden wiederverwertbar.

Die Rückgewinnung von verarbeiteten LMM erfolgt aus teilweisem / vollständigem Gebäudeabriss. Dabei lassen sich LMM i. d. R. nur als Anhaftungen im Verbund mit LS als Lehmsteinmauerwerk (LSM) zurückgewinnen (Tab. C.3.1).

Tab. C.3.1 Stoffzusammensetzung LMM und Lehmsteine LS

LMM / LS, Zusammensetzung	LMM, erdfeucht (1.800 kg/m ³)	LMM, getrocknet (1.400 kg/m ³)	LS (1.800 kg/m ³)	LS (1.600 kg/m ³)
Ausgangsstoffe	<i>kg pro kg LMM</i>	<i>kg pro kg LMM</i>	<i>kg pro kg LS</i>	<i>kg pro kg LS</i>
Baulehm	0,6	0,7	1,0	0,9
Gesteinskörnung 0/2	0,4	0,2	0	0
Holzspäne, unbehandelt / Strohhacksel	0	0,1	0	0,1

LMM und LS bestehen überwiegend aus Baulehm (60 bis 100 M.-%). Je nach Produkt werden für LMM Zusätze von Sand bis zu 40 M.-% und Holzspänen von 10 M.-% eingesetzt. Angesichts der homogenen Stoffzusammensetzung von LSM stellt die Entwicklung eines Rückgewinnungsszenarios für LMM in *IM C1 – C3* und *DI – D3* eine Annäherung an den in der Praxis zu erwartenden Verbund von LS und LMM dar.

Für die Quantifizierung des *IM C1* wurden die Leistungsdaten eines branchentypischen Abrissbaggers angenommen und auf LSM mit Anhaftungen von LMM bezogen: Nach Herstellerangaben von Liebherr verbraucht ein Abbruchbagger 7,65 kg Diesel / h bei einer geschätzten Abrissleistung von 50 m³ LSM/h [21]. Dieser Dieselverbrauch und diese Abbruchleistung wurde in der Umweltbilanz des *IM C1* „Abbruch/Abriss“ unterstellt. Abb. C.3.1 veranschaulicht die Kerngrößen der Umweltwirkungen in *IM C1*.

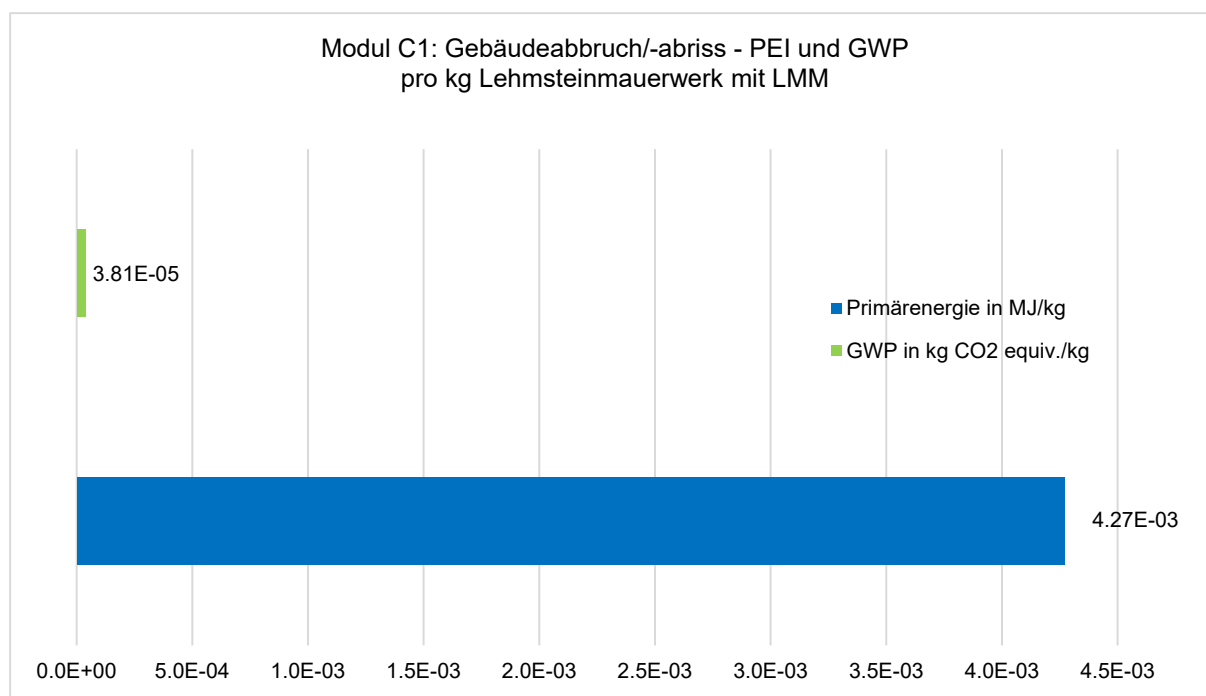


Abb. C.3.1 IM C1: PEI u. GWP für Gebäudeabriss pro kg Lehmsteinmauerwerk LSM

Der Energieaufwand (MJ/kg LMM) und die resultierenden Treibhausgasemissionen (CO₂ equiv./kg LMM) der *IM C1* und *C3* werden in Beziehung zu den Rückgewinnungspotenzialen gesetzt und geben Auskunft über den Netto-Effekt der Rückgewinnung.

In *IM C3* wird die Auflösung der durch Trocknung entstandenen Agglomerate der Lehmischung durch Wasserzugabe („Einsumpfen“) analysiert. Sie erfolgt durch Aufbereitung von Lehmsteinbruch im *Nassverfahren* als Teil des Prozesses zur Wiederverwertung im Werk.

Bei „*trockener*“ Aufbereitung wird die ursprüngliche Produktgestalt des Alt-LMM (leicht und schwer) im Lehmsteinbruch durch mechanische Zerkleinerung verändert. Die entsprechenden Verfahren sind durch Leistungsdaten geeigneter Anlagen bilanzierbar.

Ausgewählt wurde ein für das Baustoffrecycling typischer Prallbrecher (Modell: SBM Remax 200) mit geschätzten 0,23 l/t Dieserverbrauch einschließlich Stromgenerator [22]. Solche Prallmühlen zerkleinern i. d. R. härtere Materialien als Lehm (Beton, Ziegel) mit einem Durchsatz von 250 t/h. Deshalb dürfte der hier zur Bilanzierung angenommene Verbrauch für Lehmsteinbruch tendenziell zu hoch angesetzt sein, wird aber als worst case-Annahme beibehalten. *Abb. C.3.2* zeigt die Umweltkennzahlen zum PEI und zur Wirkung auf das Treibhausgaspotenzials GWP der beschriebenen Aufbereitungstechnik in *IM C3*. Der betrachtete Prallbrecher mit integriertem Stromgenerator erfordert ca. 0,001 MJ pro kg Lehmsteinbruch. Die Treibhausgasemissionen ergeben sich daraus mit 8,8E-05 kg CO₂equiv./ kg Lehmsteinbruch.

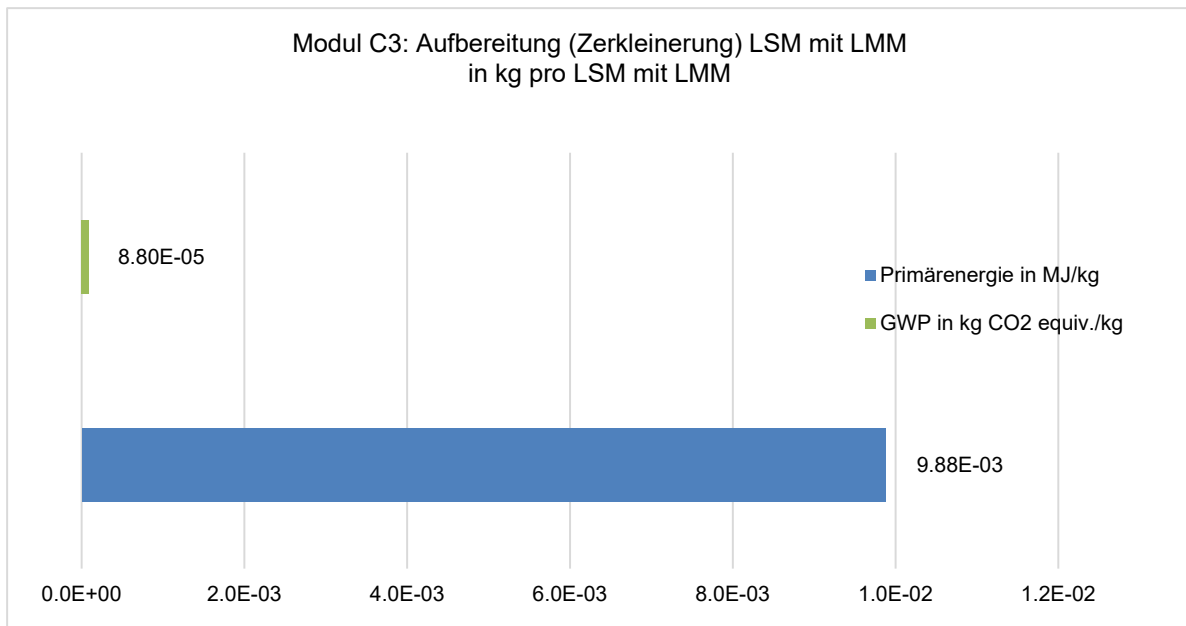


Abb. C.3.2 IM C3: PEI u. GWP für Aufbereitung von Lehmsteinbruch mit LMM

Das trocken rückgewonnene, zerkleinerte LSM mit LMM-Anhaftungen (Lehm-Rezyklat) ermöglicht drei Szenarien der Wiederverwertung in *IM D*:

- für neue *LMM* „schwer“, dargestellt in *IM D1*,
- für neue *LMM* „leicht“, dargestellt in *IM D2*,
- für andere Lehmprodukte als *LMM*, die im *Trockendosierverfahren* hergestellt werden, z. B. Lehmputzmörtel *LPM*, dargestellt in *IM D3*.

Unterstellt wird eine mineralische Zusammensetzung des Lehmsteinbruchs nach *Tab. C.3.1* und Herstellerangaben zum Mörtelanteil (30 l/m² LSM) mit durchschnittlich 70 M.-% trockenen Baulehm und 30 M.-% trockenen Sandanteil [10].

Bei der Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für neue „schwere“ *LMM* (*Abb. C.3.3*) substituiert der im Lehm-Rezyklat enthaltene Baulehm und Sand abgebaute Primärrohstoffe entsprechend der Anteile in der Rezeptur für „schwere“ *LMM* mit 57 M.-% Baulehm und 30 M.-% Sand. 13 M.-% zur Rezeptur fehlender Sand muss im Herstellungsprozess ergänzt werden.

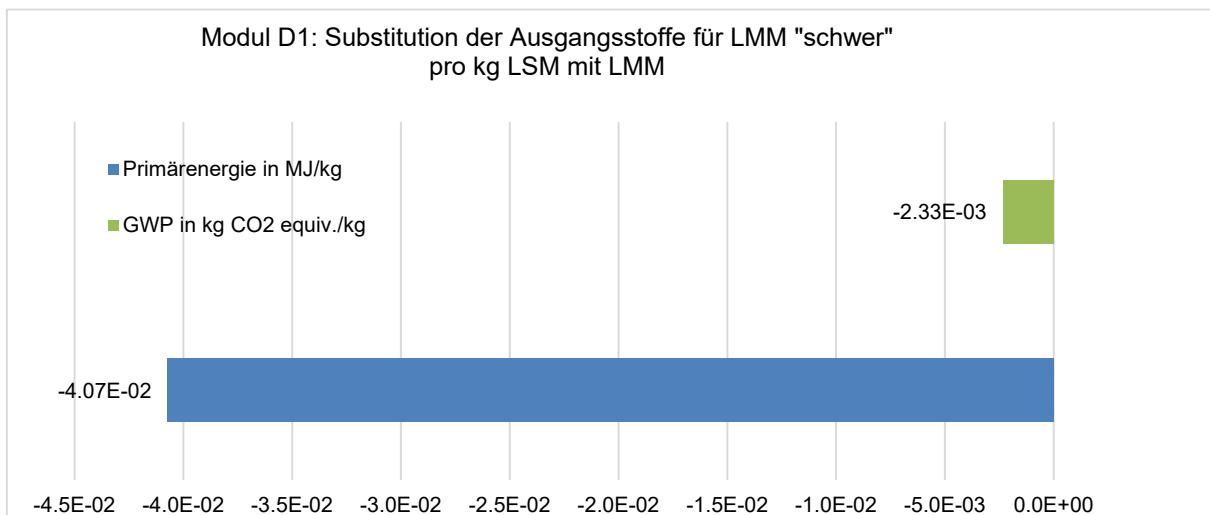


Abb. C.3.3 Modul D1: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für *LMM* „schwer“

Die Transporte der aufbereiteten Ausgangsstoffe, das Herstellungsverfahren und die Verpackung für LMM „schwer“ bleiben gegenüber dem Primärprodukt gleich. Angenommen wird ein „üblicher“ Produktionsdurchlauf für „schwere“ LMM mit dem Unterschied des Ersatzes von Primärressourcen durch Lehm-Rezyklat (Substitutionseffekt). Dieser Austausch primärer durch sekundäre Rohstoffe erspart bei „neuen“ LMM „schwer“ $4,07E-02$ MJ/ kg LMM ($0,011$ kWh) Primärenergie und vermeidet $0,0023$ kg CO₂ equiv. pro hergestelltem kg LMM. Dabei wurden die Umweltparameter für den primären Abbau von Grubenlehm (erdfeucht) und den Prozess der Sandbereitstellung (ungetrocknet) aus der ÖKOBAUDAT [19] unterstellt.

Die Wiederverwertung als LMM „schwer“ erfordert keine Trocknung. Für diesen Verwertungsweg könnte auch die Aufbereitung des Lehmsteinbruches im Nassverfahren durch „Einsumpfen“ im Werk erfolgen. Eine mechanische Zerkleinerung des Lehmsteinbruchs wäre dann nicht zwingend erforderlich.

Bei der Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für neue LMM „leicht“ ergibt sich ein anderer Substitutionseffekt (Abb. C.3.4): Das trockene Lehm-Rezyklat ersetzt nicht nur Primärressourcen, sondern auch das Trocknungsverfahren für neue „leichte“ LMM und die damit verbundenen Energieeinträge.

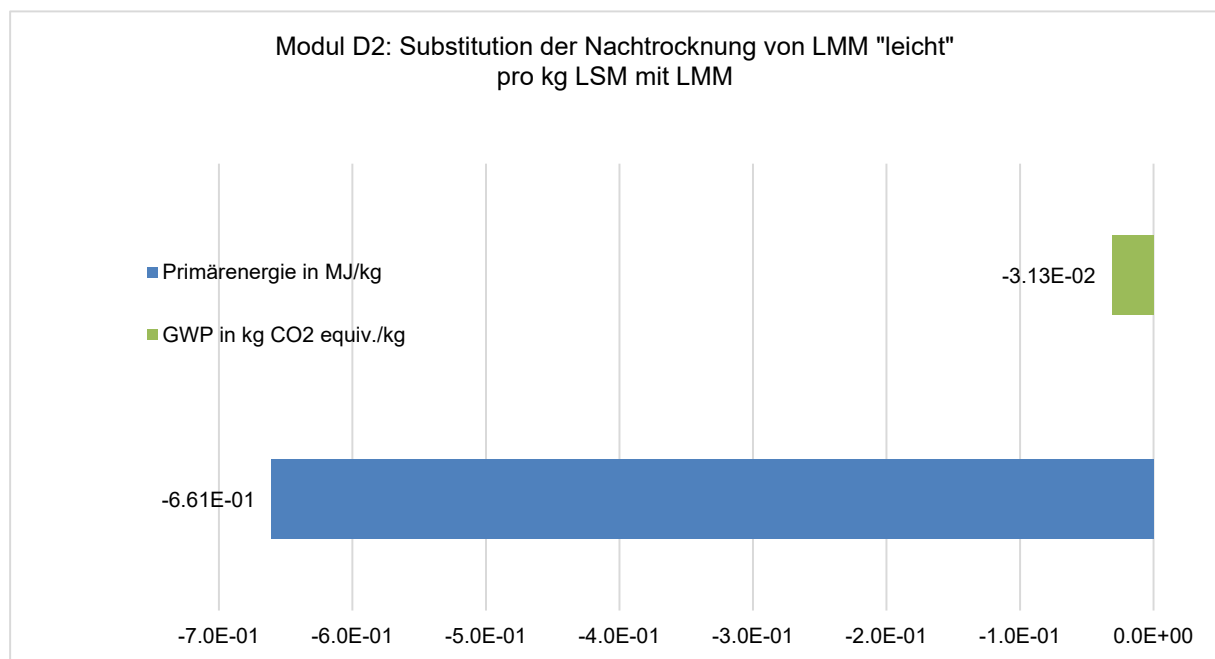


Abb. C.3.4 Modul D2: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für LMM „leicht“

Anders als bei LMM „schwer“, ermöglicht die Rezeptur der LMM „leicht“ die Substitution von 70 M.-% Baulehm und 20 M.-% Sand (30 M.-% wurden als Zusammensetzung des Lehm-Rezyklats angenommen). 10 M.-% Holzspäne müssen im Prozess noch zugeführt werden. In IM D2 entfällt die zusätzliche Trocknung durch Verwendung des ohnehin trockenen Lehm-Rezyklats. Dieser Effekt führt zu höheren Rückgewinnungspotenzialen bei der Wiederverwertung für neue „leichte“ LMM (Abb. C.3.4).

Der PEI vermindert sich um $6,61$ MJ/ kg LMM ($0,18$ kWh/ kg) für „leichte“ LMM durch die verwendeten Sekundärstoffe. Die Treibhausgasemissionen sinken um $0,031$ kg CO₂ equiv. pro kg verwendetes Lehm-Rezyklat. Das ist um einen Faktor mehr als bei der Wiederverwertung der Sekundärstoffe aus Lehmsteinbruch für LMM, „schwer“. Ursächlich dafür ist der mögliche Verzicht

auf eine Nachtrocknung ansonsten erdfeuchter Vorprodukte mit Flüssiggas (-2,88E-02 kg CO₂equiv. / kg LMM „leicht“).

Wird der Aufwand für den Abbruch von LSM (*Abb. C.3.1*) und die Aufbereitung durch Zerkleinerungsmühlen (*Abb. C.3.2*) gegengerechnet, reduzieren sich die in *Abb. C.3.4* betrachteten Nettoeffekte der Substitution in IM D2 um 1,5 % für die Energieeinsparung (MJ/kg) und 0,3 % für Treibhausgasemissionen (kg CO₂equiv./kg).

Abb. C.3.5 zeigt die Umweltkennzahlen zum PEI und zur Wirkung auf das Treibhausgaspotenzial (GWP) bei einer Wiederverwertung von Lehm-Rezyklat als Alternative zur Trocknung erdfeuchter Ausgangsstoffe für andere Lehmbaumstoffe. Die Trocknung der im Lehm-Rezyklat enthaltenen Baulehme und Sande bis zu einem pulverförmigen Zustand, geeignet für gravimetrische Trockendosierverfahren, erfordert im vorgelagerten Herstellungsprozess einen Energieinput mit Erdgas und Strom in Höhe von zusammen 1,15 MJ/kg. Die resultierende Umweltwirkung auf die Kategorie GWP beträgt 0,11 kg CO₂equiv./kg Trockenlehm und Trockensand. In IM D3 ersetzen die Bestandteile im Abbruchmaterial einschließlich LMM mit 70 M.-% Baulehm und 20 M.-% Sand den ansonsten in vorgelagerten Prozessen energetisch aufwändig getrockneten Baulehm und getrockneten Sand für andere Lehmbaumprodukte, z. B. LPM.

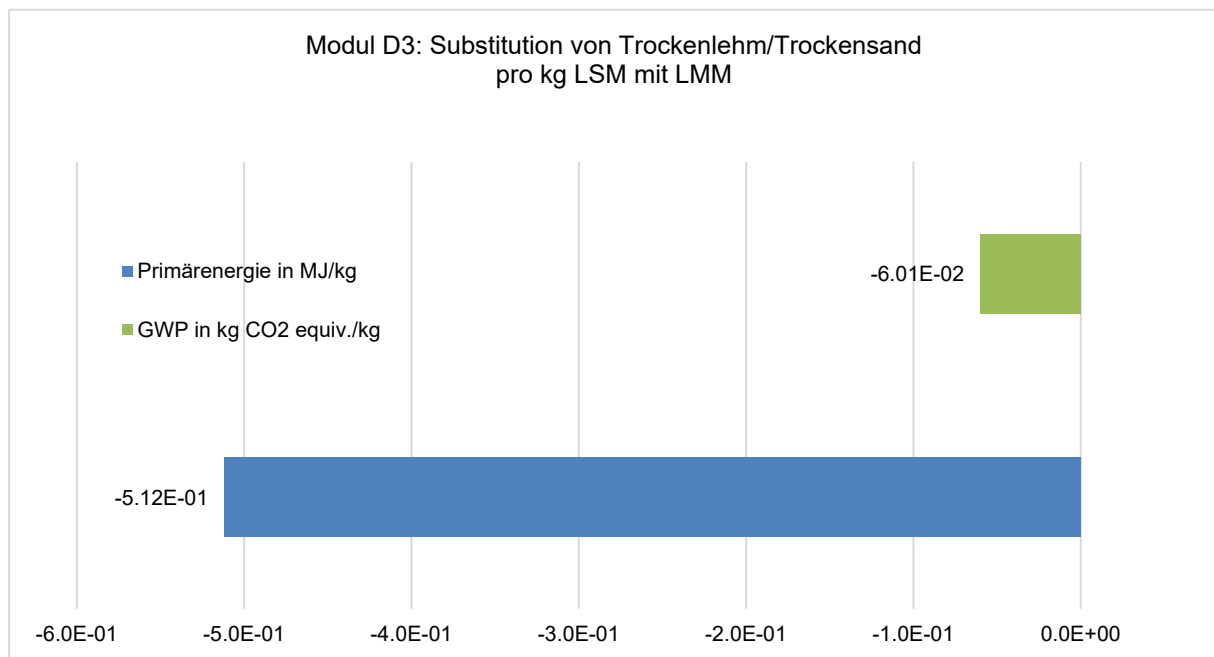


Abb. C. 3.5 Modul D3: Weiterverwertung von Lehmsteinbruch mit LMM im Trockendosierverfahren für andere Lehmbaumstoffe (LPM)

Die unterstellte Zusammensetzung des Lehmsteinbruchs enthält Baulehm (70 M.-%) und Sand (20 M.-%). Damit reduziert sich der PEI für Trockenlehm und getrockneten Sand um 0,512 MJ (0,14 kWh) / kg Lehmsteinbruch mit LMM durch Wiederverwertung als Sekundärstoff für trocken dosierte neue Lehmbaumstoffe, z. B. LPM. Die Treibhausgasemissionen GWP sinken um 0,06 kg / kg LMM als Sekundärrohstoff. Jede t Lehmsteinbruch würde auf diesem Verwertungsweg 512 MJ Energie einsparen und die GWP um 60 kg CO₂equiv. reduzieren.

Wird der Aufwand für den Abbruch von LSM (*Abb. C.3.1*) und die Aufbereitung durch Zerkleinerungsmühlen (*Abb. C.3.2*) gegengerechnet, reduziert sich der Nettoeffekt der Substitution in IM D3 für den Energieinput um 2 % (MJ/kg) und für die GWP um 0,15 % (kg CO₂equiv./kg).

Die Szenarien der *IM D1 – D3* enthalten keine Aussagen über betriebsspezifische Anpassungen, etwa bei der Kontrolle der Ausgangsstoffe und Dosierung. Im Einzelfall erforderliche individuelle Zugaben von Baulehm, Sand und Wasser, je nach Rezeptur, entziehen sich einer allgemeinen szenarischen Betrachtung im Rahmen der Muster-UPD.

C.4 Zusammenfassung

Die untersuchten Verwertungspotenziale bilden Orientierungswerte für die Praxis des Baustoffrecyclings und für Hersteller von Lehmbaumstoffen. Die Einbeziehung von Lehm-Rezyklaten aus Lehmsteinbruch trägt in allen hier untersuchten Verwertungen für „schwere“ und „leichte“ LMM signifikant zu Energieeinsparung und Treibhausgasreduktion bei. Die ermittelten Schwankungsbreiten ergeben sich zum einen aus den unterschiedlichen Mischungsverhältnissen in den Rezepturen und zum anderen aus dem Einsatz fossiler Energieträger bei Trocknung für „leichte“ LMM oder Wiederverwertung in Trockendosierverfahren für andere Lehmbaumstoffe.

Die Wiederverwertung von Abbruchmaterial mit LMM zu neuem LMM „schwer“ kompensiert 28 % der in den *IM A1 – A3* sonst entstehenden Treibhausgase. Bei dieser Bewertung darf nicht außer Acht gelassen werden, dass der Herstellungsprozess von LMM „schwer“ (*IM A1 – A3*) auch bei Verwendung primärer Rohstoffe mit insgesamt $8,23E-03$ kg CO₂ equiv. emissionsarm ist. Anders bei Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für andere Lehmbaumstoffe, z. B. LPM, die im Trockendosierverfahren hergestellt werden: Das trockene, zermahlene Abbruchmaterial besteht überwiegend aus Baulehm und Sand. Damit haben diese Sekundärstoffe das Potenzial, technisch getrockneten Baulehm und Sand zu ersetzen. Dieser Substitutionseffekt bezieht sich auf die Einsparung primärer Rohstoffe und die sonst erforderlichen Energieeinträge zur Trocknung. Die Wiederverwertung von 1 kg Lehmsteinbruch mit Anhaftungen von LMM als Substitut im Trockendosierverfahren für andere Mörtel (z. B. LPM) reduziert die Treibhausgasemissionen um $6,01E-02$ kg CO₂ equiv. oder um das mehr als 5-fache der bei der Produktion des LMM „schwer“ bzw. 100 % bei der Produktion von LMM „leicht“ entstehenden Emissionen in den *IM A1 – A3*.

Die Wiederverwertung von LMM, „leicht“ berücksichtigt eine Nachrocknung der erdfeucht dosierten und gemischten Rezeptur. Die Rückgewinnung trockenen Abbruchmaterials ersetzt den Prozessschritt Nachrocknung. Möglicherweise ist bei dieser Wiederverwertung ein anderes Verfahren, ähnlich dem Trockendosierverfahren, angebracht. Hier geht es um die Quantifizierung des Rückgewinnungspotenzials. Bei Wiederverwertung von Abbruchmaterial zu LMM, „leicht“ werden 47 % aller für die Primärproduktion verursachten Treibhausgase eingespart. Eine Weiterverwertung im Trockendosierverfahren unterscheidet sich nur geringfügig von den Ergebnissen für LMM, „schwer“. Der Unterschied resultiert aus der unterschiedlichen Zusammensetzung der Rezepturen, insbesondere dem Verhältnis von Baulehm und Sand.

Zur Ermittlung der Nettoeffekte der Rückgewinnung enthält die Umweltbilanz in den *IM C1 – C3* den Energieeinsatz und die Wirkungskategorien nach „Echtzahlen“ typischer Baumaschinen für Abbruch und Zerkleinerung von LSM. Für die Zerkleinerung wurde eine Prallmühle unterstellt, die eher für harte Baumaterialien (Ziegel, Beton) eingesetzt wird. LSM ist weicher. Deshalb sind auch andere Verfahren mit geringerem Energieeinsatz möglich. Nach Abzug der CO₂ equiv. der *IM C1* und *C3* ergibt sich ein Netto-Substitutionseffekt, der je nach Verwertungsweg zwischen 98 % und 99 % liegt, bezogen auf den jeweiligen Energieinput und die Treibhausgasemissionen.

Damit erschließen sich mehrere, auch unter Einbeziehung des Aufwandes effektive Optionen für eine Kreislaufführung von LSM-Abbruch, die zu einer klimaneutralen Produktion beitragen und nicht-fossile Ressourcen schonen, teilweise sogar vollständig ersetzen.

ZITIERTE STANDARDS / LITERATURHINWEISE

DIN 4102-1:1998-05: *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*

DIN 4102-4:2016-05: *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*

DIN 18300:2016-09: *VOB/C (ATV) – Erdarbeiten*

E DIN 18940:2023-03, *Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Bemessung, Konstruktion u. Ausführung,*

DIN 18942-1:2018-12: *Lehmbaumstoffe und Lehmbaumprodukte – Teil 1: Begriffe*

DIN 18942-100:2018-12: *Lehmbaumstoffe und Lehmbaumprodukte – Teil 100: Konformitätsnachweis*

DIN 18945:2018-12: *Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*

DIN 18946:2018-12: *Lehmmauermörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*

DIN 18948:2018-12: *Lehmplatten – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*

DIN 20000-412:2019-06: *Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 412: Regeln für die Verwendung von Mauermörtel nach DIN EN 998-2:2017-02*

DIN EN 998-2:2017-02: *Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauermörtel*

DIN EN 12620:2008-07: *Gesteinskörnungen für Beton*

DIN EN 13139 (E):2015-07: *Gesteinskörnungen für Mörtel DIN EN 13501 (zurückgezogen)*

DIN EN 13501-1:2010-01: *Klassifizierung von Bauprodukten u. Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*

DIN EN 15804:2022-03: *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*

DIN EN 15942:2022-04: *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Kommunikationsformate zwischen Unternehmen*

DIN EN ISO 14025:2011-10: *Umweltkennzeichnungen u. -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen; Grundsätze u. Verfahren*

DIN EN ISO 14040:2021-02: *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze u. Rahmenbedingungen*

DIN EN ISO 14044:2021-02: *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*

DIN EN ISO 16000-9:2008-04: *Innenraumluftverunreinigungen – Teil 9: Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen – Emissionskammer-Prüfverfahren*

1 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.), *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Allgemeine Hinweise für die Erstellung von Ökobilanzen und Projektberichten (Teil 2)*, Ausgabe 2022-06

- 2 Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.): *Lehmbau Regeln – Begriffe, Baustoffe, Bauteile*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage, 3., überarbeitete Aufl., 2009
- 3 Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung AVV) v. 10.12.2001 (BGBl. I, S. 3379), letzte Fassg. v. 30.06.2020 (BGBl. I, S.1533)
- 4 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmbaumstoffe – Grundregeln für die Baustoffkategorie Lehmmauermörtel (PKR LMM)*. Weimar 2022-04
- 5 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Qualitätsüberwachung von Baulehm als Ausgangsstoff für industriell hergestellte Lehmbaumstoffe – Richtlinie*. Technische Merkblätter Lehmbau, TM 05. Weimar:2011-06
- 6 Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV) v. 18.04.2017 (BGBl.I, S.896), letzte Fassung v. 09.07.2021 (BGBl. I, S.2598)
- 7 Natureplus e. V., Vergaberichtlinie 5003 zur Vergabe des Qualitätszeichens, *Naturschutz beim Abbau mineralischer Rohstoffe*, Ausgabe April 2015, Neckargemünd 2015
- 8 Krakow, L.: *Waschschlamm als Deponiebaustoff – Ein intelligenter Beitrag zur Rohstoffeffizienz und Ressourcenschonung*. Aggregates International 03/2008, S.29 – 37
- 9 Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. (Hrsg.): *Kreislaufwirtschaft Bau - Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018, Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018*. Berlin 2021
- 10 FH Potsdam: Symposium Baustoffrecycling & Lehmbaumstoffe – Perspektiven für eine Kreislaufwirtschaft im Bauwesen, Potsdam August 2022
- 11 Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft – v. 24.07.2002 (GMBL. S.511), BM f. Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Berlin:2002, Entwurf Neufassung v. 17.12.2020
- 12 Landesarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (Hrsg.): *Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen*. Berlin: LAGA Mitteilung, Heft 20, 2004, 5. Aufl.
- 13 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und zur Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG), BGBl. I, 06.10.1994, S. 2705, letzte Neufassung BGBl. I, S.1324 – 1346 v. 22.05.2013)
- 14 Bau-EPD (Hrsg.): *Nutzungsdauerkatalog der Bau-EPD für die Erstellung von UPDs*. Bau-EPD GmbH, Wien 2014
- 15 Diederichs, S.; Rüter, S.: *Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz*. Institut für Holztechnologie und Holzbiologie Nr. 2012/1
- 16 <https://www.ecoinvent.org>
- 17 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmbaumstoffe – Muster-UPD für die Baustoffkategorie Lehmputzmörtel (UPD LPM) nach DIN EN 15804*. Weimar: 2018-10
- 18 Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (Hrsg.): Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Grunddatensätze für Holz und Holzwerkstoffe im Netzwerk Lebenszyklusdaten - Projektbericht im Rahmen des Forschungsvorhabens FKZ 01 RN 0401 im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Karlsruhe 2007
- 19 www.oekobaudat.de
- 20 Schroeder, H.: *Lehmbau – Mit Lehm ökologisch planen und bauen*. Springer Vieweg: Wiesbaden 2019, 3. akt. Aufl.
- 21 <https://www.liebherr.com/de/deu/specials/spritsparrechner/tool/kalkulator.html#page=3&catid=7&id=R-950-D&v1=&v2=&v3=&ca=l&cu=EUR>

22 <https://www.sbm-mp.at/de/produkte/aufbereitungsanlagen-mobil/mobile-prallbrecher/remax-200.html>