

# Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmbaustoffe

## Msterumweltproduktdeklaration für die Baustoffkategorie Lehmputzmörtel (UPD LPM) 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	Stoffeklärerung.....	10
3.3	Bereitstellung.....	11
3.4	Verfügbarkeit.....	11
4	Produkt Herstellung.....	12
4.1	Herstellungsprozess.....	12
4.1.1	Erdfeuchtverfahren.....	12
4.1.2	Trockenverfahren.....	13
4.2	Gesundheits- und Arbeitsschutz.....	15
4.3	Umweltschutz Herstellung.....	15
4.3.1	Abfall.....	15
4.3.2	Wasser / Boden.....	15
4.3.3	Lärm.....	15
4.3.4	Luft.....	15

5	Produktverarbeitung .....	15
5.1	Verarbeitungsempfehlungen.....	15
5.2	Arbeitsschutz / Umweltschutz.....	16
5.3	Restmaterial.....	16
5.4	Verpackung .....	16
6	Nutzungszustand .....	16
6.1	Ausgangsstoffe .....	16
6.2	Wirkungsbeziehungen Umwelt / Gesundheit.....	17
6.3	Beständigkeit / Nutzungsdauer.....	17
7	Aussergewöhnliche Einwirkungen.....	18
7.1	Brand .....	18
7.2	Hochwasser .....	18
7.3	Havarie Wasserleitungen.....	18
8	Hinweise zur Nutzungsphase .....	18
9	Nachnutzungsphase .....	18
9.1	Recycling von LPM.....	18
9.2	Verwertung von Abfällen und Verpackungen.....	19
9.3	Entsorgung.....	19
10	Nachweise .....	19
10.1	Produkt-Erstprüfung nach DIN 18942-100.....	20
10.2	VOC, TVOC.....	20
10.3	Radioaktivität .....	20
TEIL A SACHBILANZ .....		20
A.1	Funktionale Einheit .....	20
A.2	Betrachtungszeitraum .....	20
A.3	Ergebnisse der Sachbilanz.....	20
Teil B ÖKOBILANZ.....		23
B.1	Ziel der Analyse .....	23
B.2	Zielgruppen der Analyse .....	23
B.3	Referenznutzungsdauer .....	23
B.4	Abschneidekriterium .....	23

B.5	Annahmen und Abschätzungen.....	23
B.6	Datenqualität .....	25
B.7	Allokation.....	26
B.8	Ergebnisse der Ökobilanzierung (LCA).....	26
Teil C	INTERPRETATION DER ÖKOBILANZ.....	32
C.1	Primärenergieeinsatz (PEI).....	32
C.2	Treibhausgaspotenzial (GWP).....	34
C.3	Abbruch (IM C1) und Aufbereitung (IM C3) .....	36
C.4	Rückgewinnungsszenarien .....	38
C.4.1	Szenario D1 .....	38
C.4.2	Szenario D2 .....	39
C.4.3	Szenario D3 .....	40
C.5	Interpretation des Rückgewinnungspotenzials .....	41
	Zitierte Standards / Literaturhinweise .....	44

## 1 ALLGEMEINES

### 1.1 Normative Grundlagen

Dieses Dokument wurde durch den Programmbetreiber Dachverband Lehm e. V. (DVL) 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 u. Rahmenbedingungen*,
- DIN EN ISO 14044:2021-02, *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*

### 1.2 Nachverfolgung der Versionen

<b>Version</b>	<b>Kommentar</b>	<b>Stand</b>
Ü1	<i>Erster Entwurf mit Datenerhebung</i>	<i>Juni 2018</i>
Ü2	<i>Überarbeiteter Entwurf mit Datenerhebung und -auswertung</i>	<i>Juli 2018</i>
Ü3	<i>Überarbeitung I</i>	<i>Aug 2018</i>
Ü4	<i>Überarbeitung II</i>	<i>Sep 2018</i>
Ü5	<i>Endfassung</i>	<i>Sep 2018</i>
Ü6	<i>Verifizierung I</i>	<i>Okt 2018</i>
Ü7	<i>Redaktionelle Überarbeitung nach DIN EN 15804:2022-03</i>	<i>Juli 2022</i>
Ü8	<i>Überarbeitung Teile A-D</i>	<i>Sep 2022</i>
Ü9	<i>Verifizierung II</i>	<i>Dez 2023</i>
Ü10	<i>Endredaktion</i>	<i>Jan 2023</i>
Ü11	<i>Layout Grafiken und Tabellen geändert</i>	<i>Apr 2023</i>

Version Ü11

Weimar, Januar 2023

Kontakt:

Dachverband Lehm e. V., Postfach 1172; 99409 Weimar, Deutschland  
[dvl@dachverband-lehm.de](mailto:dvl@dachverband-lehm.de) · [upd.dachverband-lehm.de](http://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.

*Baustellenmörtel* werden aus ihren Ausgangsstoffen auf der Baustelle zusammengesetzt.

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

*Lehmputzmörtel* (LPM) besteht aus Baulehm sowie Zusatzstoffen und wird gemäß DIN 18947 nach steigenden Festigkeitsklassen SI –SII sowie den Rohdichteklassen 0,9 bis 2,2 klassifiziert. LPM der Rohdichteklassen 0,9 bis 1,2 können als *Leichtlehmputzmörtel* (LLPM) bezeichnet werden.

*Lehm-Rezyklat*: nach Abbruch von Lehmsteinmauerwerk rückgewonnenes, in Brecheranlagen aufbereitetes Gemisch aus 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)

LCA Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)

LS Lehmstein

LMM Lehmmauermörtel

LPM Lehmputzmörtel

LSM Lehmsteinmauerwerk

LP Lehmplatte

LR Lehm bau Regeln 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 Lehmputzmörtel (LPM), die auf hinterlegten 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 LPM nach DIN 18947 / 18942-1 mit Tonmineralien als alleinigem Bindemittel. Sie gilt für normierte LPM, die nach einem der in *Abs. 4.1* deklarierten Verfahren hergestellt werden. Für die Anwendung gelten die DIN 18947, die LR DVL [2] sowie die PKR LPM des DVL [4].

### 2.2 Produktbeschreibung

Die Ausgangsmischung für LPM nach DIN 18947 besteht aus Baulehm, mineralischen und pflanzlichen Zusatzstoffen. Die Erhärtung des LPM erfolgt durch Verdunstung des Anmachwassers. Erhärteter LPM nach DIN 18947 kann durch Wasserzugabe replastifiziert werden.

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

- *ungetrocknete* LPM, die im erdfeuchten Zustand hergestellt werden (*Erdfeuchtverfahren*),
- *getrocknete* LPM, die technisch getrocknet oder ausschließlich mit vorgetrockneten Ausgangsstoffen hergestellt werden (*Trockenverfahren*).

### 2.3 Einsatzzweck

LPM nach DIN 18947 dienen zur ein- oder mehrlagigen Beschichtung von Wänden und Decken im Innenbereich als Unter- bzw. Oberputz, ggf. auch als Unterputz für Lehmdünnlagenbeschichtungen (LDB), sowie im witterungsgeschützten Außenbereich, hier ggf. auch als Unterputz für witterungsbeständigen Oberputz. In den Lehmputz-Frischmörtel können Temperierungssysteme sowie Bewehrungsgewebe zur Vermeidung von Rissbildungen eingearbeitet werden.

Die Auftragsdicken von LPM entsprechend dieser UPD sind 5 – 30 mm je nach Anwendungsfall. Dabei bilden *Lehmunterputze* die untere(n) Lage(n) eines mehrschichtigen Putzaufbaus mit bis zu 30 mm pro Lage, *Lehmoberputze* mit mindestens 5 mm die obere Lage eines Putzaufbaus.

*Leichtlehmputzmörtel* ( $\rho_d \leq 1.200 \text{ kg/m}^3$ ) werden zur Innenwärmedämmung von Bauteiloberflächen angewendet.

### 2.4 Produktnorm / Zulassung / Inverkehrbringen / Anwendungsregeln

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

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

- DIN 18942-100:2018-12, *Lehmbaustoffe und Lehmbauprodukte – Teil 100: Konformitätsnachweis*,
- DIN 18947:2018-12, *Lehmputzmörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*,
- DIN 18550-2 in Verbindung mit DIN EN 13914-2 für Lehmputzmörtel LPM,
- Lehmbau Regeln des Dachverbandes Lehm e. V. (LR DVL) [2].

Weiterhin gelten die PKR LPM [4] und damit im Zusammenhang das Dokument „Teil 2“ mit den entsprechenden Begriffsbestimmungen und Abkürzungen [1], die Technischen Merkblätter TM 05 [5] und TM 01 des DVL [6] sowie die entsprechenden Arbeitsblätter der Hersteller. Darüber hinaus müssen die Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung AVV) [3] sowie die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) [7] beachtet werden.

## 2.5 Gütesicherung

Die Gütesicherung des Herstellungsprozesses von LPM nach DIN 18947 erfolgt gem. DIN 18942-100.

## 2.6 Lieferzustand

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

*Erdfeuchte* LPM werden in nicht luftdicht verschlossene, wasserfeste Gewebesäcken verpackt, transportiert, gelagert und zu den Baustellen geliefert. Erdfeucht gelieferte LPM mit Pflanzenanteilen haben eine begrenzte Lagerungszeit von drei Monaten. Rein mineralische, erdfeucht gelieferte LPM sind bei sachgemäßer Lagerung unbegrenzt lagerfähig.

*Getrocknete* LPM werden in geschlossenen Papiersäcken, Eimern oder Großbehältern verpackt, transportiert, gelagert und zu den Baustellen geliefert. Getrocknete LPM sind unbegrenzt lagerfähig.

## 2.7 Bautechnische Eigenschaften

Die deklarierten LPM (Tab. 2.2) sind marktübliche LPM mit Rohdichteklassen 1,8 bis 2,0 sowie Festigkeitsklasse S II nach DIN 18947.

Tab. 2.2 Bautechnische Eigenschaften der deklarierten LPM<sup>1</sup>

Nr.	Eigenschaft / Prüfung n. DIN 18947 / Abs.	Klasse / Wert	Einheit
1	Rohdichte $\rho_d$ , Tab.2 / Abs. 8.5	1.800 – 2.000	kg/m <sup>3</sup>
2	Festigkeit, Klasse S II, Tab.3		
2.1	• Biegezugfestigkeit, Abs. 8.7.1	0,9 – 1,0	N/mm <sup>2</sup>
2.2	• Druckfestigkeit, Abs. 8.7.1	1,8 – 3,0	N/mm <sup>2</sup>
2.3	• Haftfestigkeit, Abs. 8.8	≥ 0,1 – 0,2	N/mm <sup>2</sup>
3	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_R$ , Abs. 5.5.10	0,91 – 1,1	W/mK
4	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $\mu$ , Abs. 8.10	5/10	–
5	lineares Trocknungsschwindmaß, Abs. 8.6	1,1 – 2,0	%
6	Überkorn, Abs. 8.2.2		M.-%
7	mechanischer Abrieb, Tab. 3, Abs. 8.9	0,1 – 0,2	G
8	Aktivitätskonzentrationsindex natürlicher Radionuklide I, Abs. A.3	< 1	–
9	Wasserdampfadsorptionsklasse $WS^2$ , Tab. A.1	II u. III	g/m <sup>2</sup>



<sup>1</sup>Hersteller geben hier die spezifischen Werte der deklarierten Produkte an. <sup>2</sup>optional

Eine Untersuchung auf natürliche Radionuklide erfolgt entsprechend DIN 18947, A.3. Es gelten die Stoffverbote und -beschränkungen nach DIN 18947 und natureplus RL 0803 [8].

## 2.8 Brandschutz

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

## 2.9 Sonstige Eigenschaften

LPM nach DIN 18947 können nach Erhärtung entweder durch Wässerung replastifiziert oder trocken zermahlen und als LPM 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 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 LPM [3]. *Tab. 3.1* zeigt typische Zusammensetzungen der Ausgangsstoffe der analysierten LPM.

Tab. 3.1 Anteile der Ausgangsstoffe von LPM<sup>1</sup> nach Verfahrensart

Nr.	Ausgangsstoffe	In den Mischungen enthaltene Ausgangsstoffe nach Verfahren			
		Erdfeuchtv erfahren	Nach-trocknung	Vor-trocknung	Passive Solartrocknung (Treibhaustrocknung)
1	Primärgrubenlehm				X
2	Sekundärgrubenlehm	X	X		
3	Primärrecyclinglehm				
4	Trockenlehm			X	
5	Sand 0/2, ungetrocknet				X
6	Sand 0/4; getrocknet			X	
7	Sand 0/4; ungetrocknet	X	X		
8	Pflanzenteile/-fasern			X	X
9	Anorganische Pigmente / pflanzliche Farbstoffe				

<sup>1</sup>LPM mit abweichenden Zusammensetzungen sind neu zu bilanzieren.

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

### 3.2 Stoffreläuterung

**Baulehm** gemäß LR DVL [2] ist zur Herstellung von Lehmbaumprodukten 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 DIN 18300. Beim Abbau von Grubenlehm und Sand werden Belange des Naturschutzes beachtet (natureplus RL 5003 [9]).

Baulehm wird unterschieden nach Grubenlehm, Trockenlehm / Tonmehl und Recyclinglehm. Presslehm kann ebenfalls als Baulehm weiterverwertet werden.

Grubenlehm wird erdfeucht dem geologisch „gewachsenen“ Boden entnommen und ist natürlicher Primärrohstoff [2] mit unterschiedlicher granulometrischer sowie schwankender mineralogischer Zusammensetzung ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ). Dadurch können sich je nach Lehmvorkommen unterschiedliche plastische Eigenschaften während der Aufbereitung und Verarbeitung (mager / fett) sowie Farben des Endprodukts ausbilden. Je nach Verwertung wird unterschieden [1]:

*Primärgrubenlehm* wird zielgerichtet für die Herstellung von Lehmbaumprodukten abgebaut und verwendet. *Sekundärgrubenlehm* fällt beim Ton-, Sand-, Kies- und Kalkabbau oder anderen Erdarbeiten für Baumaßnahmen als *Bodenaushub* [1] an und kann als Sekundärrohstoff 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 erfasst werden (*Abs. 8.1*).

Recyclinglehm ist aus Abbruchbauteilen rückgewonnener Lehmbaumstoff [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 Lehmbaumstoff 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 [10]. 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:** Pflanzenteile und -fasern (z. B. Hanf, Flachs, Strohhäcksel), ohne relevante Rückstände aus Herbiziden, Tierhaar, zerkleinertes, chemisch unbehandeltes Holz / -

späne (keine Holzwerkstoffe). Durch organische Zusatzstoffe können die bauphysikalischen Eigenschaften (Trockenrohdichte, Trocknungsschwindmaß) des Endprodukts beeinflusst werden. Faserartige Zusatzstoffe wirken einer Rissbildung des LPM bei Austrocknung / Erhärtung entgegen.

Natürliche organische Zusatzstoffe sind biologisch abbaubar / kompostierbar und können problemlos in biogene Kreisläufe zurückgeführt werden. Sie werden dabei durch Bakterien und Pilze unter Energiefreisetzung wieder vollständig zu CO<sub>2</sub> und Wasser umgebaut.

**Anorganische Pigmente / pflanzliche Farbstoffe:** Erden oder Mineralien (DIN EN 12878) bzw. „Tier“- oder „Pflanzenfarben“ zur Erzielung einer bestimmten Farbgebung des Bauteils Lehmputz.

**Wasser:** „Anmachwasser“ ist zum Erreichen der geeigneten Verarbeitungskonsistenz des LPM grundsätzlich notwendig. Durch Verdunstung des Anmachwassers erhärtet der LPM und erreicht seine vorgesehenen Produkteigenschaften. Erhärteter LPM kann durch Wasserzugabe replastifiziert werden.

### 3.3 Bereitstellung

Die vier identifizierten Baulehmkategorien müssen vor einer Bilanzierung im IM A1 hinsichtlich der Art ihrer Bereitstellung unterschieden werden (Tab. 3.2). Dabei müssen vertragsrechtliche Aspekte bzgl. Gewinnung / Verwertung / Entsorgung beachtet werden, 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 wird als Sekundärrohstoff für einen überwiegenden Teil der in dieser Deklaration erfassten LPM verarbeitet.

Bodenaushub bildet mit 130,3 Mio. t/a den größten Teil (59,6 %) der 218,8 Mio. t mineralischer Bauabfälle in Deutschland [11]. Die Weiterverwertung von lehmhaltigem Bodenaushub als *Sekundärgrubenlehm* [1, Bild 3.3] für die Herstellung von Lehmbaustoffen spart Deponieraum und verlängert die Verfügbarkeit von Primärrohstoffen.

Ein bisher kaum erschlossenes Rohstoffpotenzial für die Herstellung von Lehmbaustoffen ist die sortenreine Rückgewinnung von LPM oder von mineralischen Komponenten in LPM aus Abbruchbauteilen / Baumischabfall als Primär- bzw. Sekundärrecyclinglehm [1, Bild 3.3]. Aufgrund der besonderen hydraulischen Eigenschaften des Bindemittels Lehm ist eine Replastifizierung und Wiederverwertung von auf Putzgeweben haftenden, abgerissenen LPM oder trocken rückgebautem LSM mit anhaftenden Mörtelresten jederzeit möglich. Eine Rohstoffknappheit besteht nicht.

Alle Pflanzenteile und -fasern sind nachwachsende Rohstoffe.

## 4 PRODUKTHERSTELLUNG

### 4.1 Herstellungsprozess

Die Herstellungsprozesse von LPM nach DIN 18947 werden aufgrund signifikanter Abweichungen in der Energiebilanz bzw. der Wirkungsanalyse nach Verfahrensart gesondert bewertet. Untersucht wurden LPM nach dem Erdfeuchtverfahren und drei verschiedenen Trockenverfahren.

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

#### 4.1.1 Erdfeuchtverfahren

LPM 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 Grubenlehm / Ausgangsstoffen
2. mechanische Zerkleinerung des Grubenlehms 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 18947) im Baulehm und im Zusatzstoff Sand,
4. Förderung des aufbereiteten Lehms und des gesiebten Sandes gemäß Rezeptur zur Mischung,
5. *nur für LLPM*: Zufuhr und ggf. mechanische Zerkleinerung von pflanzlichen Zusatzstoffen (z. B. Strohfasern) gemäß Rezeptur in den Mischer,
6. Mischvorgang (ohne Wasserzugabe),
7. lose Lagerung und Abholung oder Absackung des Fertigproduktes in feuchtestabile Transportverpackungen (PE/PP-Big bags) zum Transport / Auslieferung auf Mehrwegholzpaletten.

*Bild 4.1* zeigt ein Produktionsschema für LPM nach dem Erdfeuchtverfahren.

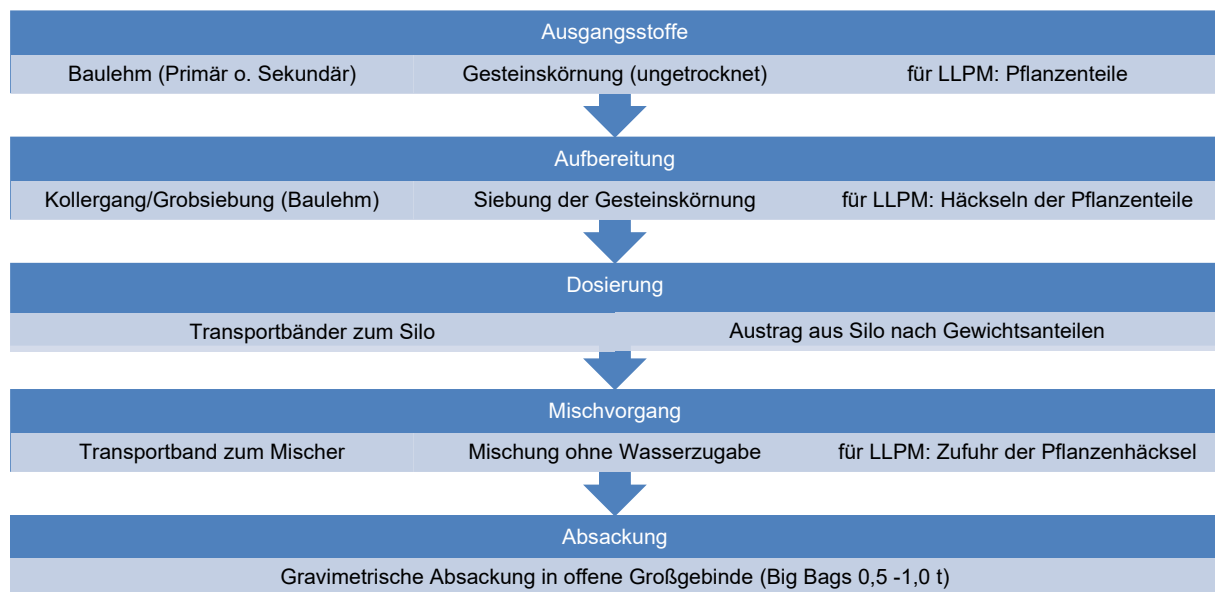


Bild 4.1 Produktionsschema „Erdfeuchtverfahren“ für LPM 1

#### 4.1.2 Trockenverfahren

Nach dem Trockenverfahren hergestellte LPM nach DIN 18947 werden als getrocknete, feinkörnige, rieselfähige Massen in geeigneten Gebinden (Papiersäcke, PE-Big Bags, Silos) zwischengelagert und ggf. auf Holzpaletten mit Schrumpffolie ausgeliefert. Die deklarierten getrockneten LPM unterscheiden sich nach der Art der Zufuhr der Trocknungsenergie (*Bild 4.2*). Die Nachtrocknung (*Abs. 4.1.2.1*) folgt nach dem Mischverfahren. Beim Trockendosierverfahren (*Abs. 4.1.2.2*) sind die Ausgangsstoffe vorgetrocknet und durchlaufen nur noch den Dosier- und Mischvorgang bis zur Absackung. Die passive Solartrocknung (*Abs. 4.1.2.3*) erfolgt unter Ausnutzung des Wärmeeintrages in ein Gewächshaus während des Mischvorgangs. Der Mischvorgang sorgt zugleich für ein Durchtrocknen der Masse.

##### 4.1.2.1 Nachtrocknung

Erdfeuchte LPM, die als Fertigmischung nach dem Erdfeuchtverfahren vorbehandelt wurden, können in einem unmittelbar anschließenden Prozess getrocknet werden (Nachtrocknungsverfahren). Die Trocknung erfolgt in Trommeltrocknern für Schüttgüter, befeuert mit unterschiedlichen Energieträgern, z. B. Biogas, Erdgas oder Flüssiggas.

Die Nachtrocknung findet Anwendung für LPM und LLPM.

Die nach dem Erdfeuchtverfahren hergestellten LPM werden unmittelbar anschließend in eine Trocknungsanlage zur Nachtrocknung überführt. Nach Trocknung bis zu einer rieselfähigen Masse folgt die automatisierte Verpackung in 25 – 30 kg Kraftpapiersäcke.

Das Nachtrocknungsverfahren mit Hilfe eines Trommeltrockners schließt unmittelbar an das Erdfeuchtverfahren unter Auslassung der Absackung in Großgebände an (*nach Nr.6, Abs. 4.1.1*):

8. Direkte Zuführung in den Trockner (z. B. offene Transportbänder),
9. Trocknung nach dem Drehofenprinzip in einem speziell angepassten Trommeltrockner,
10. Reduktion des Feuchtegehaltes von erdfeuchten 10 – 13 M.-% auf bis zu ca.5 M.-%,
11. Absackung in Kraftpapiersäcke ohne PE/PP-Folieneinlagen.

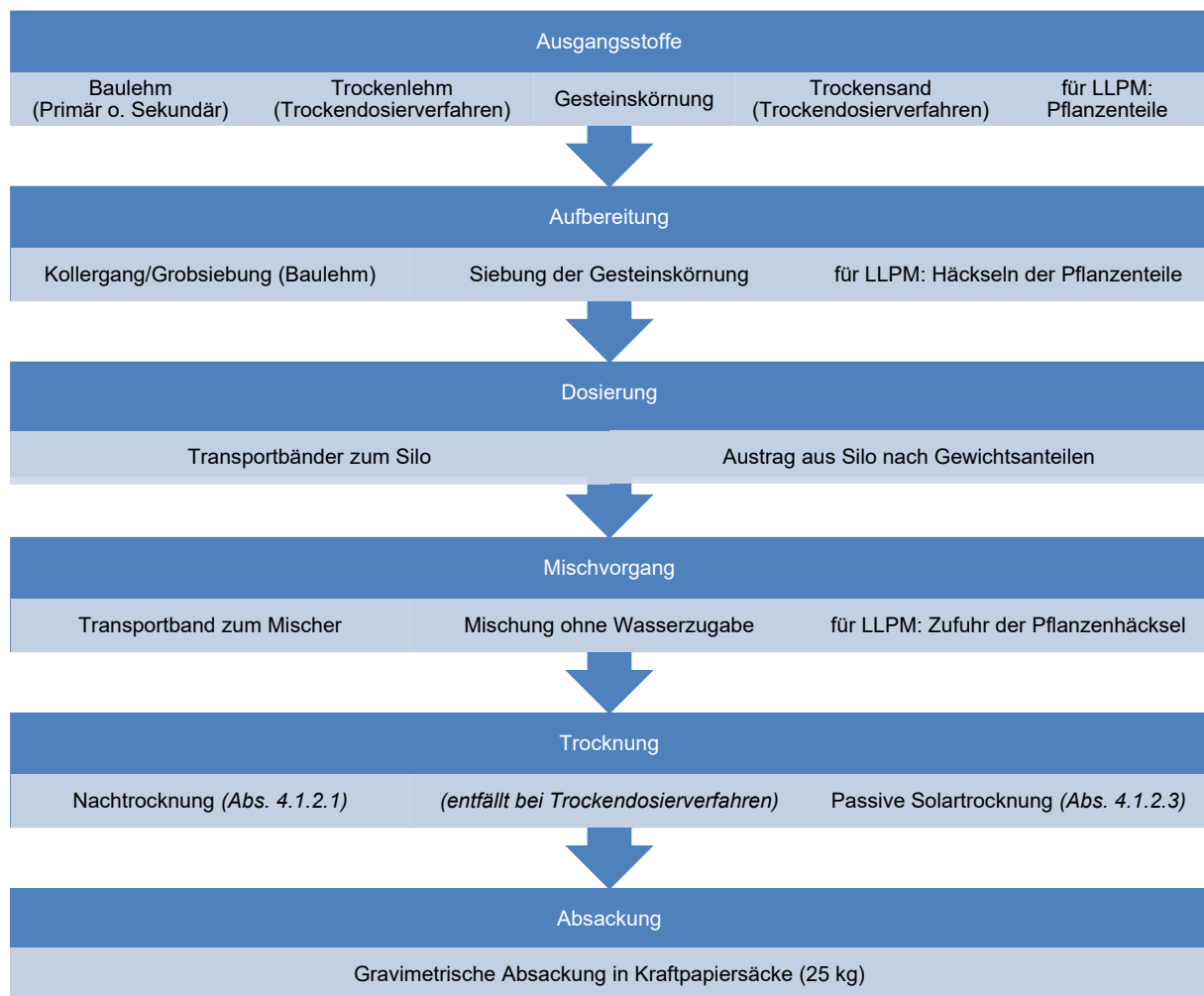


Bild 4.2 Produktionsschema für LPM 2, LPM 3 und LPM 4 mit verschiedenen Trockenverfahren

#### 4.1.2.2 Trockendosierverfahren

Vorgetrocknete Rohstoffe werden in Großgebinden, häufig in Austauschsilos, an die Herstellerwerke geliefert und dort entsprechend der jeweiligen Rezeptur dosiert und intensiv miteinander vermischt. Insbesondere für Oberputze kommen Lehm, Sandkörnungen und andere Zusatzstoffe als vorgetrocknete Rohstoffe in die jeweiligen Mischungen.

Solche Anlagen bestehen aus mehreren Bunkern oder Silos mit den jeweiligen, vorgetrockneten Ausgangsstoffen. Der Austrag über Transportschnecken oder -bänder zur Mischanlage ist mit Wiegezellen zur Dosierung der jeweiligen Rezepturen ausgestattet.

#### 4.1.2.3 Passive Solartrocknung

Grubenlehm wird aus einer Grube nahe dem Herstellerwerk entnommen. Ungetrocknete Sande und Pflanzenfasern werden aus der Nähe des Werkes angeliefert. Die Komponenten werden in einer „gläsernen Halle“ ähnlich einem Gewächshaus durch Ausnutzung des passiven Solarenergieeintrages mit automatisierter Luftventilation getrocknet. Um ein gleichmäßiges Durchtrocknen der Massen zu erzielen, erfolgt eine regelmäßige Umwälzung der Sand-/Lehmgemische mit einem automatisch gesteuerten Wenderoboter (Schaufelroboter).

## **4.2 Gesundheits- und Arbeitsschutz**

Staubemissionen von pflanzlichen oder mineralischen Zusatzstoffen während des Produktionsprozesses werden durch Filter begrenzt. Ausgefilterte Zusatzstoffe werden wieder verwendet. Die Grenzwerte der TA Luft [12] 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 der ungetrockneten LPM (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**

Ausgefilterte Stäube von pflanzlichen, 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 Einsatzes von Diesel erfasst und bewertet [12].

## **5 PRODUKTVERARBEITUNG**

### **5.1 Verarbeitungsempfehlungen**

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

Trocken / erdfeucht gelieferte LPM werden i. d. R. maschinell 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.

LPM werden nach DIN 18947 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 zu beachten.

LPM werden auf größere Flächen mit einer Putzmaschine, bei kleineren Flächen oder zur Erzielung besonderer Oberflächenstrukturen / zum Glätten auch manuell aufgetragen, insbesondere Lehmoberputz. In Schläuchen oder Mörtelkästen erhärteter LPM kann durch Wasserzugabe wieder in die erforderliche Verarbeitungskonsistenz überführt werden.

LPM müssen nach dem Auftrag schnell austrocknen können, bevorzugt durch natürliche Lüftung. In ungünstigen Fällen (z. B. hohe Luftfeuchtigkeit im Außenbereich) ist eine künstliche Trocknung

sinnvoll. Eine Überwachung mittels Trocknungsprotokoll nach TM 01 DVL [5] oder Herstellerangaben wird empfohlen.

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

## **5.2 Arbeitsschutz / Umweltschutz**

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

Während der Verarbeitung von LPM sind keine besonderen Maßnahmen zum Schutz der Umwelt zu treffen. LPM nach DIN 18947 erzeugen bei Hautkontakt während der Verarbeitung keine Reizungen oder Schäden. Der Kontakt von LPM mit den Augen ist zu vermeiden.

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

## **5.3 Restmaterial**

Während der Verarbeitung wird herabgefallener, erhärteter LPM von einem Mörtelfangbrett sauber aufgenommen und zusammen mit Frischmörtel in den Verarbeitungsprozess zurückgeführt. Nicht verarbeiteter Lehmestmörtel kann durch Wasserzugabe ohne zusätzlichen Energieaufwand wieder in die entsprechende Verarbeitungskonsistenz überführt und weiter verarbeitet werden.

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

## **5.4 Verpackung**

Mörtelsäcke aus ungebleichtem Kraftpapier und Großgebilde aus Kunststoffgewebe (PE/PP) werden sortenrein als Transportverpackungen durch duale Entsorgungssysteme dem Recyclingprozess zugeführt. Teilweise haben Hersteller ein eigenes Pfandsystem für Großgebilde.

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. 150102 [3]).

Die Hersteller sind verantwortlich für den Nachweis des Entsorgungssystems. Die beteiligten Verbandshersteller sind Entsorgungssystemen (z. B. RePack, Interseroh) angeschlossen.

# **6 NUTZUNGSZUSTAND**

## **6.1 Ausgangsstoffe**

Bei der Produktion von LPM 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

LPM der beteiligten Hersteller enthalten keine schädlichen Stoffe in gesundheitsschädigenden Konzentrationen wie z. B. flüchtige organische Komponenten (VOC), Formaldehyd, Isocyanate usw. Die Kriterien nach natureplus RL 0803 [8] werden erfüllt. Der Nachweis erfolgte nach DIN EN ISO 16000-9. Entsprechende schädigende Emissionen sind deshalb auch nicht zu erwarten. LPM sind im verarbeiteten Zustand geruchsneutral.

Die Mikroporenstruktur der Tonmineralien des Baulehms ermöglicht eine rasche, besonders hohe Adsorption / Desorption von überschüssigem Wasserdampf im Innenraum. LPM auf inneren Bauteiloberflächen tragen deshalb zu einem ausgeglichenen Innenraumklima bei. LPM der beteiligten Hersteller können den in *Tab. 2.2* ausgewiesenen Wasserdampfadsorptionsklassen WS II und WS III gemäß DIN 18947 zugeordnet werden.

Bei Taupunktunterschreitung der Innenraumluft wird ggf. an trockenen Bauteiloberflächen ausfallendes Tauwasser durch die kapillare Porenstruktur des LPM sofort verteilt. Dadurch wird der möglichen Bildung von Schimmel an gefährdeten Stellen („kalte Ecken“ von Außenwänden) entgegengewirkt.

Die natürliche ionisierende Strahlung der LPM ist sehr gering und gesundheitlich unbedenklich. Die deklarierten LPM weisen einen Aktivitätskonzentrationsindex  $I < 1$  gemäß DIN 18947 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 LPM 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.

LPM zeichnen sich wegen der Möglichkeit der Replastifizierung des Festmörtels durch vorübergehende Befeuchtung (z. B. Schwammbrett) durch besondere Reparaturfreundlichkeit aus. Sie sind zum Auftrag auf verschiedene Untergründe gut geeignet, z. B. Beton, Gipsplatten (vorbehandeln), Holzfaserplatten, Mauerwerk.

Anforderungen an Lehmputz als Bauteil (Trocknung nach Putzauftrag, Weiterbehandlung / Überarbeitung, Gebrauchstauglichkeit, optische Anforderungen) sind in TM 01 DVL [5] ergänzend zu den LR DVL [2] festgelegt und in den Verarbeitungshinweisen der Hersteller spezifiziert.

LPM können im Nutzungszeitraum bei mechanischer Beanspruchung einen Abrieb aus Sandkörnungen aufweisen. Die Prüfung der Abriebfestigkeit durch Bestimmung der Abriebmenge wird nach DIN 18947, Abs. 8.9 vorgenommen. Die Klassifizierung der Abriebmenge erfolgt nach der Festigkeitsklasse LPM, *Tab. 2.2*. Die deklarierten LPM sind der Festigkeitsklasse S II zugeordnet.

Die deklarierten LPM erfüllen die Vorgaben nach DIN 18947 bzgl. des linearen Trocknungsschwindmaßes:  $\leq 2 \%$  sowie entsprechend  $\leq 3,0 \%$  bei Faserbewehrung.

Der Risswiderstand der deklarierten LPM kann durch eine geeignete Gewebearmierung in der zugbelasteten Zone des Putzes erhöht werden (DIN 18550-2).

Die Lebensdauer von LPM ist abhängig von der jeweiligen Konstruktion, der Nutzungssituation, dem Nutzer selbst sowie von Unterhalt und Wartung. Die Nutzungsphase kann deshalb nur in Form von Szenarien beschrieben werden.

## **7 AUSSERGEWÖHNLICHE EINWIRKUNGEN**

### **7.1 Brand**

LPM 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.

Unabhängig von der Baustoffklassifizierung erwiesen sich LPM aus mineralischen Inhaltsstoffen als Bauteilbeschichtung (z. B. Holz, Strohdämmung) unter Brandtemperatureinwirkung als günstig auf das Brandverhalten des Bauteils (z. B. Entzündungszeitpunkt, Flammausbreitung, REI nach DIN EN 13501-2).

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

Zur Brandbekämpfung eingesetztes Löschwasser kann Schäden am Lehmputz erzeugen. LPM im Löschwasser verursacht keine Umweltrisiken.

### **7.2 Hochwasser**

Unter Wassereinwirkung (z. B. Hochwasser) können LPM nach DIN 18947 replastifiziert und ausgewaschen werden. Dabei werden keine wassergefährdenden Stoffe freigesetzt. Aufgeweichte LPM-Bereiche müssen ggf. auf ihre Stabilität und Haftung am Untergrund untersucht werden.

### **7.3 Havarie Wasserleitungen**

Infolge von Schäden an Wasserleitungen kann im Gebäude Wasser austreten und verarbeiteten LPM aufweichen. Die Haftung der aufgeweichten Bereiche am Untergrund ist zu überprüfen.

## **8 HINWEISE ZUR NUTZUNGSPHASE**

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

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

Die Lebensdauer von verarbeiteten LPM 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 LPM**

Lehmputz als Bauteil kann während und nach Ablauf der Nutzungsphase üblicherweise als Putzgrund für das Aufbringen eines neuen Putzes (oder einer Wärmedämmung) weiterverwendet werden. Reststoffe (Altanstriche, alte Ausbesserungen mit Gips, Zement- und Kalkmörtel) sind zu entfernen. Durch Anfeuchten (z. B. Sprühnebel) und Bearbeiten der Oberfläche lassen sich die Klebkkräfte des alten Lehmputzes vor Auftrag des neuen LPM aktivieren.

LPM können bei Verwendung von Bewehrungsgeweben in einfacher Weise sortenrein zurückgebaut werden. Bewehrungsgewebe sind manuell leicht abziehbar und erleichtern den Rückbau des LPM [13]. Bei Gebäudeabbruch auf diese Weise rückgewonnene LPM können aufgrund der hydraulischen Eigenschaften der Tonminerale durch Wasserzugabe ohne zusätzlichen Energieaufwand replastifiziert und wiederverwertet werden. Ihre ursprüngliche Zusammensetzung entspricht nach praktischen Erfahrungen den für eine Wiederverwertung als LPM gemäß DIN 18947 geforderten Eigenschaften. Durch die Wiederaufbereitung des rückgewonnenen LPM kann sich dessen Plastizität und dadurch die Gefahr der Rissbildung beim Austrocknen vergrößern und eine Abmagerung durch Sand erforderlich werden.

Bei einer Wiederverwertung als (Primär)recyclinglehm dürfen die rückgebauten LPM keine relevanten Spuren aus chemischen und biologischen Einwirkungen aus der zurückliegenden Nutzung enthalten (bauschädigende Salze, Moose / Algen, Hausschwamm, Schimmelpilze usw.). Gleiches gilt für die Weiterverwertung von gelösten mineralischen Komponenten (z. B. Sand) als Rohstoff für andere Baustoffe (Sekundärrecyclinglehm). Sie müssen darüber hinaus frei von Reststoffen (Altanstriche, alte Ausbesserungen mit Gips, Zement- und Kalkmörtel) sein.

Sofern die o. g. Möglichkeiten der Wiederverwertung nicht praktikabel sind, kann LSM-Bruch mit anhaftenden LPM-Resten in Brecheranlagen zu Lehm-Rezyklat aufbereitet und danach als Primärrecyclinglehm für LPM oder andere Lehmbaustoffe weiterverwertet werden (*Teil C.4*).

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

Nicht sinnvoll für neue Lehmprodukte verwertbare LPM aus Gebäudeabriss mit natürlichen mineralischen Zusatzstoffen und einem homogen verteilten Gehalt an natürlichen organischen Zusatzstoffen  $\leq 1$  M.-% lassen sich als Bodenaushub weiterverwerten, z. B. im Landschaftsbau, zur Rekultivierung, zur Trassierung von Verkehrswegen oder in der Land- und Forstwirtschaft entsprechend der Zuordnungswerte Z für Einbauklassen für Böden und mineralische Reststoffe. Die Z-Werte werden ab 01.08.2023 durch die Ersatzbaustoffverordnung [14] ersetzt.

## 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) [15] von den jeweiligen Herstellern nachgewiesen. Bei der Herstellung von LPM entstehen keine Produktionsabfälle.

## 9.3 Entsorgung

Bei Gebäudeabriss zurückgebaute, nicht sortenrein gewinnbare LPM, sowie LPM aus Landwirtschaftsbauten, die für eine Weiterverwertung ungeeignet sind, können aufgrund ihres chemisch neutralen und inerten Verhaltens auf Deponien der Deponieklasse DK 0 eingelagert werden (AVV Abfallschlüssel 170904 Bau- und Abbruchabfälle [3]). Sie stellen keine außergewöhnlichen Belastungen für die Umwelt dar und können in *Tab. A.4* als Siedlungsabfall (NHWD) deklariert werden.

## 10 NACHWEISE

Wasserdampfadsorptionsklassen nach DIN 18947, Tab. A.1 liegen dem Programmbetreiber vor.

### 10.1 Produkt-Erstprüfung nach DIN 18942-100

Liegt dem Programmbetreiber vor.

### 10.2 VOC, TVOC

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

Tab. 10.1 Mustertabelle für VOC u. TVOC von LP

<b>Prüfparameter</b>	<b>Konzentration nach 3 Tagen [<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>]</b>	<b>Grenzwert</b>
VOC (inkl. VVOC u. TVOC)		
TVOC (Summe flüchtige organische Verbindungen incl. SVOC)		
VOC	flüchtige organische Verbindungen	
VVOC	leichtflüchtige 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, K-40. nach DIN 18947, A.3 von LPM ergibt einen Aktivitätskonzentrationsindex  $I < 1$ .

## TEIL A SACHBILANZ

### A.1 Funktionale Einheit

Die funktionale Einheit für die Herstellung von LPM ist in DIN 18947, 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 zwölf 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 vier unterschiedliche Verfahren zur Herstellung von LPM nach *Abs. 4*:

- Erdfeuchtverfahren ohne technische Trocknung der Ausgangsstoffe und des Endproduktes (LPM1)
- Nachtrocknungsverfahren mit technischer Trocknung des Endproduktes (LPM2)

- Trockendosiervverfahren zur Dosierung und Mischung vorgetrockneter Ausgangsstoffe (LPM3)
- Passives Solartrocknungsverfahren zur technischen Trocknung der erdfeuchten mineralischen Ausgangsstoffe (LPM4).

Tab. A.1 bildet die Sachbilanz für die Muster-LPM nach den vier untersuchten Verfahrensarten ab. Je nach Rezeptur gibt es unterschiedliche Mischungen von Baulehm mit variierenden Anteilen mineralischer und natürlicher Zusätze. Die Sachbilanz zeigt je zwei vergleichbare Mischungen für verschiedene Verfahrensarten. Hauptinputfaktoren sind Strom, Flüssiggas, Erdgas und Diesel. Weitere Inputfaktoren sind die Transporte ins Werk und Verpackungsmaterial. Outputfaktoren sind Abfälle aus Vorprodukten.

Tab. A.1 Sachbilanz der untersuchten Lehmputzmörtel (LPM)

Lehmputzmörtel LPM (nach Verfahrensart)	Produkte				Einheit	Erläuterungen
	LPM1 (Erdfeuchtmischung)	LPM2 (Nachrocknung <sup>3</sup> )	LPM3 (Trockendosierung)	LPM4 (Solartrocknung)		
<b>INPUT</b>						
Baulehm	0,52	0,52	0,32	0,3	kg/kg LPM	
- Primärgrubenlehm	-	-	-	0,3	kg/kg LPM	LPM3 Trockenlehm
- Sekundärgrubenlehm	0,52	0,52	-	-	kg/kg LPM	Bodenabfall
Trockenlehm	-	-	0,32	-	kg/kg LPM	Vorprodukt
Gesteinskörnung 0/2	0,48	0,48	0,67	0,69	kg/kg LPM	LPM3 getrockneter Sand
Pflanzliche Zusätze	-	-	0,01	0,01	kg/kg LPM	Strohfasern
<b>ENERGIEINPUT (direkt) Herstellung/Verpackung</b>						
Strom	29,1 (0,1)	29,1 (0,1)	5,88 (0,02)	41,3 (0,15)	kWh/t LPM (MJ/kg LPM)	Strom LPM1 –LPM3 aus Wasserkraft; LPM4 Bundesstrommix (in kWh/t LPM erfasst; Umrechnung in MJ/kg LPM)
Flüssiggas	-	0,018	-	-	kg/kg LPM	Propan
Diesel	-	-	-	0,00058	l/kg LPM	LPM1 u. 2, e-Fahrzeuge im Werk
<b>ENERGIEINPUT (indirekt) Ausgangsstoffe</b>	<b>0,029</b>	<b>0,029</b>	<b>1,8</b>	<b>0,19</b>	<b>MJ/kg LPM</b>	Herstellung Vorprodukte
<b>FW / Verpackungen</b>						
Frischwasser	0,7	0,7	0,06	1,0	l/kg LPM	von Vorprodukten und Ausgangsstoffen
Holzpaletten	0,02	0,02	0,02	0,02	kg/kg LPM	Mehrweg
PE/PP Großgebinde	0,0016	-	-	0,0016	kg/kg LPM	1,6 kg Big bag für 1000kg LPM
Kraftpapiersack		0,036	0,036	0,036	kg/kg LPM	90 g pro 25 kg LPM, ohne Inlet
PE Folie	-	0,0002	0,0002	0,0002	kg/kg LPM	t > 20 µm; 2 m <sup>2</sup> / Palette mit 1000 kg LPM
<b>OUTPUT</b>						
Abfälle	0,00032	0,00028	0,017	0,00036	kg/kg LPM	aus Vorketten

Der Baulehm der untersuchten LPM1 und LPM2 besteht zu 52 M.-% aus Sekundärgrubenlehm, der als Abfall aus der Kiesgewinnung oder anderen Erdaushüben stammt. Der untersuchte LPM3 nutzt das Vorprodukt Trockenlehm. LPM4 verwendet Baulehm aus einer werkseigenen Lehmgrube als Primärgrubenlehm.

Die in *Tab. A.1* aufgelisteten mineralischen und pflanzlichen Zusätze entsprechen DIN 18947. Die Hersteller verwenden spezifische Rezepturen mit abweichenden Anteilen der einzelnen Komponenten. Außer für die Rezeptur LPM3 verwenden die untersuchten Verfahren ungetrockneten Sand als mineralischen Zusatzstoff. Der Sand magert den Baulehm ab und verbessert die Verarbeitungsfähigkeit der LPM. Als pflanzlichen Zusatz nutzen die Hersteller für LPM3 und LPM4 Strohfasern (ca. 1 M.-%).

Die Herkunfts- und Verbrauchsangaben zu Strom bzw. Flüssiggas in den Werken (Modul A3) basieren auf Rechnungsangaben der Energielieferanten (LPM1 u. 2) oder Herstellerangaben (LPM3 u. 4) für die beispielhaft untersuchten Produktionsstandorte. Es wurde der durchschnittliche Energieeinsatz (MJ/kg LPM) bezogen auf die produzierte Gesamtmasse auf derselben Produktionsanlage angesetzt (massenbezogene Allokation). Der Energieinput für die Herstellung und Absackung (einschließlich indirekte Energieeinträge der Verpackung) im Werk variiert nach Verfahrensart. Die LPM1, 2 u. 4 benötigen zwischen 0,1 und 0,15 MJ/kg LPM. Das Trockendosierverfahren verbraucht mit 0,02 MJ/kg LPM deutlich weniger elektrische Energie für die Mischung, Dosierung, Absackung und Verpackung.

Beim Trockendosierverfahren LPM3 steckt der Hauptenergieinput in den getrockneten Vorprodukten Trockenlehm und Trockensand. Diese erhöhen den Energieinput um 1,8 MJ/kg LPM3 auf insgesamt 1,82 MJ/kg (IM A1 u. A3). Der Abbau von Primärgrubenlehm und höhere Anteile der Gesteinskörnung erhöhen den Energieinput für Ausgangsstoffe für LPM4 signifikant auf 0,19 MJ/kg LPM4 verglichen mit LPM1 u. 2 (0,029 MJ/kg LPM).

Die Nachtrocknung erdfeucht hergestellter LPM1 erfolgt in einer mit Flüssiggas betriebenen Trockentrommel. Der Flüssiggasverbrauch, nach Rechnungsangaben 0,018 kg/kg LPM2, erhöht den Gesamtenergieinput gegenüber dem Ausgangsprodukt um 0,9 MJ/kg LPM2 auf ca. 1 MJ/kg LPM2.

Die Baumaschinen zum Betrieb im Werk arbeiten bei den Herstellern der LPM1-3 mit elektrischen Antrieben, die in *Tab. A1* in den Stromverbräuchen enthalten sind. Nur LPM4 benötigte direkte Dieselverbräuche für erdbewegende Baumaschinen im Werk in einer Größenordnung weit unter 1 MJ/kg.

Die Wasserverbräuche für LPM1, 2 u. 4 entstehen indirekt aus Vorprodukten (z. B. Sandgewinnung). Die Dosierung vorgetrockneter Ausgangsstoffe hat verfahrensbedingt den geringsten Wasserverbrauch mit 0,06 l/kg LPM3.

Schrumpffolien und Mehrwegpaletten bleiben unterhalb des Abschneidekriteriums.

Die Abfälle entstehen nicht im Herstellungsprozess der untersuchten LPM, sondern durch die Bereitstellung von Energieträgern und Vorprodukten.

## **TEIL B ÖKOBILANZ**

Die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO 14044 / DIN EN 15804 zur Erstellung einer Typ III UPD beruht auf einer Lebenszyklusanalyse (LCA) von LPM 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 LPM. 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 LPM, Planer und Entscheidungsträger, die die Ergebnisse zur ökologischen Bewertung eines Bauteils / 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 [16] wird eine RSL für LPM von 100 Jahren zugrunde gelegt.

### **B.4 Abschneidekriterium**

Entsprechend DIN 18947, 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, deren Umweltauswirkungen  $> 1\%$  der gesamten Auswirkungen einer in der Bilanz berücksichtigten Wirkungskategorie darstellen. Das trifft insbesondere auf natürliche Pflanzenfasern (z. B. Stroh, Miscanthus) zu.

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 D1 - D3).

*Grubenlehm (Abs. 3.2):* Die Hersteller von LPM1 u. LPM2 verwenden 52 M.-% Sekundärgrubenlehm. Der Ressourceneinsatz und die Umweltwirkungen der Prozesse des Grubenbetriebes entfallen auf die Endprodukte des Betriebes zur Kiesgewinnung. Sekundärgrubenlehm kann als Sekundärrohstoff

weiterverwertet werden und reduziert das Aufkommen an Bauabfällen (AVV Nr. 17 05 04 [3]). Er verliert damit seine Abfalleigenschaft, tritt in ein neues Produktsystem über und erfährt dort eine Aufwertung (Upcycling). Durch Gewinnungstechnik verursachter Aufwand wird deshalb bei der Berechnung der Ökobilanz nicht in Ansatz gebracht (IM A1).

Der Hersteller von LPM4 verwendet Primärgrubenlehm aus einer Lehmgrube auf dem Werksgelände. Der durch Gewinnungstechnik verursachte Aufwand wird IM A1 zugerechnet („Verursacherprinzip“).

Für LPM3 wird das Vorprodukt Trockenlehm eingesetzt. Die im Trockenlehm enthaltene „graue“ Energie wird in IM A1 dem Produkt LPM3 zugerechnet. Tonmehl und Trockenlehm sind Vorprodukte mit einem eigenen generischen Datensatz in der ÖKOBAUDAT (Lehmpulver 1.1.04) [17].

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,  $\rho = 2.000 \text{ kg/m}^3$ .

Recyclinglehm (Abs. 3.2): Recyclinglehm zur Herstellung von LPM wird von keinem der an der Analyse beteiligten Hersteller als Ausgangsstoff für die Herstellung ihrer Produkte eingesetzt.

Wie Sekundärgrubenlehm den Verbrauch natürlich gewachsener Primärrohstoffe verringert, reduziert Recyclinglehm das Aufkommen an Bauabfällen. Bei der Berechnung der Ökobilanz wird die Verwendung von Recyclinglehm dem Einsatz von Primärgrubenlehm gegenübergestellt und im IM D ein möglicher „ökologischer Gewinn“ als Rückgewinnungspotenzial ausgewiesen.

Gesteinskörnungen: Für LPM3 wird das Vorprodukt „getrockneter Sand“ eingesetzt. Die im Trockensand enthaltene „graue“ Energie wird in IM A1 dem Produkt LPM3 zugerechnet.

Pflanzenteile: LPM3 u. LPM4 enthalten jeweils 1 M.-% Pflanzenfasern (Stroh, Miscanthus). Im Rahmen der Muster UPD LPM fand die UPD Baustroh Anwendung [18]. Die darin enthaltenen Rückgewinnungspotenziale blieben unberücksichtigt, nicht jedoch das gebundene CO<sub>2</sub>.

Verpackungen: Holzpaletten lassen sich nicht vollständig den LPM 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.

Großgebände (Big bags): erdfeucht produzierte und transportierte LPM werden in offene Großgebände (*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 [17] 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 LPM. 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 LPM. Die ca. 150 cm breite Folie umschließt eine Palette mit 48 Sack LPM pro Standardpalette und einem Gesamtgewicht von bis zu 1,2 t. Für PE-Folie findet das Abschneidekriterium nach Abs. B.4 Anwendung.

Abbruch/Abriss (CI): LPM bilden mit dem Mauerwerk oder einer Trockenbaukonstruktion einen festen Verbund mit dem jeweiligen Untergrund. Durch Abriss des Mauerwerks oder der



Trockenbaukonstruktion (z. B. nach Gütezeichen Trockenbau RAL-GZ 531) kann LPM sortenrein durch manuelle Trennung vom Untergrund rückgewonnen werden. Entsprechende Experimente fanden an der FH Potsdam statt [19].

Für den Fall eines maschinellen Mauerwerksabbruchs wird für die nachfolgende Modellrechnung auf die Leistungsdaten eines branchentypischen Abrissbaggers für LSM der Fa. Liebherr [20] mit einem Dieserverbrauch von 0,16 l / Betriebsstunde bei einer Abrissleistung von 30 m<sup>3</sup>/h zurückgegriffen.

Abfallaufbereitung (C3): Die Annahmen in IM C3 basieren auf experimentellen Untersuchungen der FH Potsdam [19] zur Aufbereitung auf Putzgeweben haftender, manuell abgerissener LPM sowie trocken rückgebauten 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 [21], 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 LPM ist abhängig von der Entwicklung betriebswirtschaftlich sinnvoller und praxistauglicher Trenn- und Aufbereitungsverfahren. LPM können i. d. R. nur als Bestandteil von Abbruchmaterial, bestehend aus LS mit anhaftenden Lehmmörtelresten, rückgewonnen und wiederverwertet werden. Vorteilhaft ist jedoch die homogene Zusammensetzung von LS und LPM, die beide überwiegend aus Baulehm bestehen.

Gemäß DIN EN 15942 werden in den nachfolgenden Modellrechnungen drei unterschiedliche Szenarien D1 bis D3 dargestellt. Dabei wird „Abbruchmaterial“ je nach Rückbauverfahren definiert als „abgerissener“ LPM bzw. LSM-Abbruch mit Lehmmörtelresten.

*IM D1* unterstellt eine Wiederverwertung des trocken rückgewonnenen Abbruchmaterials für *neue ungetrocknete LPM durch Einsumpfen / Mauken*. Die Substitution von primären Ausgangsstoffen bildet das Rückgewinnungspotenzial dieses Szenarios.

*IM D2* unterstellt eine Wiederverwertung des trocken rückgewonnenen Abbruchmaterials für *neue trockene LPM im Nachtrocknungsverfahren*. Im Szenario D2 ersetzen die trocken rückgewonnenen Sekundärstoffe nicht nur die primären Ausgangsstoffe (wie in D1), sondern insbesondere die Energie für die Nachtrocknung erdfeuchter LPM.

*IM D3* unterstellt eine Wiederverwertung des trocken rückgewonnenen Abbruchmaterials als Sekundärstoff für *andere Lehmbaumstoffe, die im Trockendosierverfahren* hergestellt werden. Das können auch neue LPM sein. Bei diesem Verwertungsszenario ersetzen die Bestandteile des LPM (überwiegend Trockenlehm und Trockensand) ansonsten technisch getrockneten Baulehm und Sand.

## **B.6 Datenqualität**

Die Datenerfassung für die untersuchten Produkte und Verfahren erfolgte durch Nachweis der Energieeinsätze und Ermittlung weiterer Daten mittels eines strukturierten Erfassungsbogens bei Herstellern aus dem Mitgliederbestand des Dachverbandes Lehm e.V. Alle Daten und Berechnungen sind beim Programmbetreiber hinterlegt. Die untersuchten, nach den beschriebenen Verfahren hergestellten LPM 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 [22]
2	Trockenlehm	EMAS Herstellerdaten [23]; zum Vergleichszwecken: UBA proBAS Gesteinsmehl 2004
3	Gesteinskörnungen	ÖKOBAUDAT 9.2.05 (2021-06) [17]
4	Pflanzenteile	FASBA EPD Strohballen [18]
5	Elt. Energie regenerativ (z. B. Wasserkraft)	ÖKOBAUDAT 9.2.05 (2021-06) [17]; zum Vergleich: GEMIS 5.0
6	Elt. Energie bundesdeutscher Strommix 2020	ÖKOBAUDAT 09.02.05, Juni '21 [17]; UBA ProBas 2020, Studie Climate Change 13/2020
7	Flüssiggas	ÖKOBAUDAT 9.2.02 (2021-06) [17]
8	Transport zum Werk (35-40 t, EURO 5, 27 t Nutzlast, 85 % Auslastung)	ÖKOBAUDAT 9.3.01 (2021-06) [17]
9	Abbruch/Abriss	Herstellerdaten LIEBHERR; Abrissbagger [20]
10	Abfallaufbereitung	FH Potsdam [19][13]; Herstellerdaten REMAX 200, Prallbrecher [21]
11	Rückgewinnungspotenzial	FH Potsdam [19][13]

## 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 zugrundeliegenden physikalischen Allokation der Kiesgewinnung als Hauptprodukt zugewiesen.

Der gemessene Energieinput wird nach der auf derselben Produktionsanlage hergestellten Masse aller Lehmbaustoffe 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.3.3* 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.

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

Tab. B.2: Nicht deklarierte 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 <sup>2</sup>	IRP	kBq U235-Äq.	Potenzielle Wirkung durch Exposition des Menschen mit U235 (IRP: Ionizing Radiation Potential)
3	Ökotoxizität (Süßwasser) <sup>1</sup>	ETP-fw	CTUe	Potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für Ökosysteme (CTUe: Comparative Toxic Unit for ecosystems; ETP: Ecological Toxic Potential)
4	Humantoxizität kanzerogene Wirkungen <sup>1</sup>	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 <sup>1</sup>	HTP-nc	CTUh	Potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen (HTP-nc: Human Toxic Potential-non carcinogenic)
6	Mit der Landnutzung verbundene Wirkungen / Bodenqualität <sup>1</sup>	SQP	-	Potenzieller Bodenqualitätsindex (SQP: Soil Quality Index)

Als Tabellenformat für die Darstellung der Ergebnisse wird die *Informationstransfermatrix ITM* nach DIN EN 15942 genutzt. Die Rückgewinnungspotenziale IM D1 – D3 werden im *Teil C* in Form von Balkendiagrammen dargestellt und interpretiert (*Abb. C.4.1– C.4.3, C.4.5*).

Tab. B.3.1 Ökobilanz für 1 kg LPM nach DIN 18947 – Inputfaktoren

Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA													
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM													
LPM 1 nach DIN 18947 - Erdfeuchtverfahren													
Funktionale Einheit kg		Parameter	PERE	PERM	PERT	PENRE	PENRM	PENRT	PEI = PERT + PENRT	SM	RSF	NRSF	FW
		IM/Einheit	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	kg	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	3,01E-03	7,16E-09	3,01E-03	2,61E-02	0,00E+00	2,61E-02	2,91E-02	4,80E-01	0,00E+00	0,00E+00	7,38E-04
	Transport	A2	3,21E-03	0,00E+00	3,21E-03	4,79E-02	0,00E+00	4,79E-02	5,11E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,71E-06
	Herstellung	A3	3,08E-02	7,31E-11	3,08E-02	3,85E-04	7,36E-02	7,40E-02	1,05E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,74E-05
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	3,71E-02	7,23E-09	3,71E-02	7,43E-02	7,36E-02	1,48E-01	1,85E-01	4,80E-01	0,00E+00	0,00E+00	7,59E-04
LPM 2 nach DIN 18947 - Nachtrocknungsverfahren													
Funktionale Einheit kg		Parameter	PERE	PERM	PERT	PENRE	PENRM	PENRT	PEI = PERT + PENRT	SM	RSF	NRSF	FW
		IM/Einheit	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	kg	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	3,01E-03	7,16E-09	3,01E-03	2,61E-02	0,00E+00	2,61E-02	2,91E-02	4,80E-01	0,00E+00	0,00E+00	7,38E-04
	Transport	A2	3,21E-03	0,00E+00	3,21E-03	4,79E-02	0,00E+00	4,79E-02	5,11E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,71E-06
	Herstellung	A3	3,49E-02	7,31E-11	3,49E-02	9,70E-01	0,00E+00	9,70E-01	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,34E-06
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	4,12E-02	7,23E-09	4,12E-02	1,04E+00	0,00E+00	1,04E+00	1,09E+00	4,80E-01	0,00E+00	0,00E+00	7,48E-04
LPM 3 nach DIN 18947 - Trockendosierverfahren													
Funktionale Einheit kg		Parameter	PERE	PERM	PERT	PENRE	PENRM	PENRT	PEI = PERT + PENRT	SM	RSF	NRSF	FW
		IM/Einheit	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	kg	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	5,82E-02	1,27E-01	1,85E-01	1,61E+00	3,78E-04	1,61E+00	1,79E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,46E-05
	Transport	A2	4,82E-03	0,00E+00	4,82E-03	7,18E-02	0,00E+00	7,18E-02	7,66E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,57E-06
	Herstellung	A3	2,09E-02	4,96E-11	2,09E-02	2,61E-04	0,00E+00	2,61E-04	2,12E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,55E-07
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	8,39E-02	1,27E-01	2,11E-01	1,68E+00	3,78E-04	1,68E+00	1,89E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,05E-05
LPM 4 nach DIN 18947 - Solartrocknung													
Funktionale Einheit kg		Parameter	PERE	PERM	PERT	PENRE	PENRM	PENRT	PEI = PERT + PENRT	SM	RSF	NRSF	FW
		IM/Einheit	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	kg	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	4,42E-03	1,27E-01	1,31E-01	5,29E-02	3,78E-04	5,33E-02	1,85E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,82E-04
	Transport	A2	1,29E-03	0,00E+00	1,29E-03	1,93E-02	0,00E+00	1,93E-02	2,06E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,49E-06
	Herstellung	A3	2,18E-02	0,00E+00	2,18E-02	6,44E-02	6,26E-02	1,27E-01	1,49E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,59E-05
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	2,75E-02	1,27E-01	1,54E-01	1,37E-01	6,29E-02	2,00E-01	3,54E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,01E-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 erneuerb. Primärenergieressourcen (Primärenergie u. Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden)

PEI = Primärenergieinput gesamt

SM Nutzung von Sekundärstoffen

RSF Nutzung erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

NRSF Nutzung nicht erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

FW Nettonutzung von Frischwasser

Tab. B.3.2 Ökobilanz für 1 kg LPM nach DIN 18947 – Umweltwirkungsfaktoren

Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA												
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM												
LPM 1 nach DIN 18947 - Erdfeuchtverfahren										Ergänzende Parameter		
Funktionale Einheit kg		Parameter	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	GWP (fossil)	GWP (biogen)	GWP LuL
		IM/Einheit	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CFC-11 äquiv	kg SO <sub>2</sub> äquiv	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> äquiv	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> äquiv	kg Sb äquiv	MJ H <sub>u</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	1,14E-03	2,65E-10	7,50E-06	2,41E-06	1,22E-06	9,53E-09	1,61E-02	1,02E-03	0,00E+00	1,20E-04
	Transport zum Werk	A2	2,28E-03	4,52E-13	5,25E-06	1,23E-06	1,51E-06	2,44E-07	3,09E-02	2,28E-03	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	4,29E-03	2,79E-12	5,70E-06	3,17E-08	6,68E-06	1,09E-09	1,47E-01	4,26E-03	0,00E+00	3,51E-05
	Summe (des Produktstadiums)	Gesamt	7,72E-03	2,68E-10	1,85E-05	3,66E-06	9,41E-06	2,54E-07	1,94E-01	7,56E-03	0,00E+00	1,55E-04
LPM 2 nach DIN 18947 - Nachtrocknungsverfahren										Ergänzende Parameter		
Funktionale Einheit kg		Parameter	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	GWP (fossil)	GWP (biogen)	GWP LuL
		IM/Einheit	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CFC-11 äquiv	kg SO <sub>2</sub> äquiv	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> äquiv	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> äquiv	kg Sb äquiv	MJ H <sub>u</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	1,14E-03	2,65E-10	7,50E-06	2,41E-06	1,22E-06	9,53E-09	1,61E-02	1,02E-03	0,00E+00	1,20E-04
	Transport zum Werk	A2	2,28E-03	4,52E-13	5,25E-06	1,23E-06	1,51E-06	2,44E-07	3,09E-02	2,28E-03	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	1,36E-02	7,20E-12	5,33E-05	2,81E-06	2,32E-05	2,48E-06	3,48E+00	1,36E-02	0,00E+00	3,51E-05
	Summe (des Produktstadiums)	Gesamt	1,71E-02	2,73E-10	6,61E-05	6,44E-06	2,59E-05	2,73E-06	3,53E+00	1,69E-02	0,00E+00	1,55E-04
LPM 3 nach DIN 18947 - Trockendosierverfahren										Ergänzende Parameter		
Funktionale Einheit kg		Parameter	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	GWP (fossil)	GWP (biogen)	GWP LuL
		IM/Einheit	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CFC-11 äquiv	kg SO <sub>2</sub> äquiv	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> äquiv	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> äquiv	kg Sb äquiv	MJ H <sub>u</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	3,11E-02	5,15E-11	4,09E-05	1,54E-05	4,15E-06	3,98E-06	1,59E+00	4,38E-02	-1,27E-02	0,00E+00
	Transport zum Werk	A2	5,08E-03	1,00E-12	1,17E-05	2,73E-06	3,36E-06	5,43E-07	6,89E-02	5,08E-03	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	2,93E-03	2,20E-12	1,22E-05	1,92E-08	1,71E-05	1,34E-10	2,91E-04	2,90E-03	0,00E+00	2,38E-05
	Summe (des Produktstadiums)	Gesamt	3,91E-02	5,47E-11	6,48E-05	1,82E-05	2,46E-05	4,52E-06	1,66E+00	5,18E-02	-1,27E-02	2,38E-05
LPM 4 nach DIN 18947 - Solartrocknungsverfahren										Ergänzende Parameter		
Funktionale Einheit kg		Parameter	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	GWP (fossil)	GWP (biogen)	GWP LuL
		IM/Einheit	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CFC-11 äquiv	kg SO <sub>2</sub> äquiv	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> äquiv	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> äquiv	kg Sb äquiv	MJ H <sub>u</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv	kg CO <sub>2</sub> äquiv
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	-1,03E-02	5,64E-10	2,63E-05	1,52E-05	3,08E-06	1,43E-08	3,99E-02	1,52E-03	-1,27E-02	8,79E-04
	Transport zum Werk	A2	1,41E-03	2,80E-13	3,26E-06	7,60E-07	9,35E-07	1,51E-07	1,92E-02	1,41E-03	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	7,26E-03	1,27E-11	1,20E-05	8,03E-07	8,56E-06	2,00E-06	1,80E-01	7,26E-03	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	Gesamt	-1,64E-03	5,77E-10	4,16E-05	1,67E-05	1,26E-05	2,16E-06	2,39E-01	1,02E-02	-1,27E-02	8,79E-04

GWP = Globales Treibhausgaspotenzial

GWP fossil = Treibhausgaspotenzial fossiler Energieträger und Stoffe (DIN EN 15804, C.2.3)

GWP biogen = Treibhauspotenzial biogen (DIN EN 15804, C.2.4), z.B. biogener Kohlenstoffgehalt

GWP luluc = Treibhauspotenzial der Landnutzung u. Landnutzungsänderung (engl.: luluc: land use and land use change)

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

Tab. B.3.3 Ökobilanz für 1 kg LPM nach DIN 18947- Outputfaktoren

Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM										
LPM 1 nach DIN 18947 - Erdfeuchtverfahren										
Funktionale Einheit kg		Parameter	HWD	NHWD	RWD	CRU	MFR	MER	EEE	EET
		IM/Einheit	kg	kg	kg	kg	kg	kg	MJ	MJ
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	3,49E-05	1,58E-04	2,48E-07	0,00E+00	9,50E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	A2	3,00E-06	3,67E-06	7,24E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	3,43E-06	1,18E-04	1,21E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	4,13E-05	2,79E-04	1,53E-06	0,00E+00	9,50E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
LPM 2 nach DIN 18947 - Nachtrocknungsverfahren										
Funktionale Einheit kg		Parameter	HWD	NHWD	RWD	CRU	MFR	MER	EEE	EET
		IM/Einheit	kg	kg	kg	kg	kg	kg	MJ	MJ
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	3,49E-05	1,58E-04	2,48E-07	0,00E+00	9,50E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	A2	3,00E-06	3,67E-06	7,24E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	3,41E-06	7,72E-05	9,77E-07	0,00E+00	3,06E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	4,13E-05	2,39E-04	1,30E-06	0,00E+00	9,50E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
LPM 3 nach DIN 18947 - Trockendosiervverfahren										
Funktionale Einheit kg		Parameter	HWD	NHWD	RWD	CRU	MFR	MER	EEE	EET
		IM/Einheit	kg	kg	kg	kg	kg	kg	MJ	MJ
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	1,63E-05	1,70E-02	4,73E-05	0,00E+00	9,41E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	A2	3,00E-06	3,67E-06	7,24E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	3,41E-06	6,76E-05	1,57E-09	0,00E+00	3,06E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	2,27E-05	1,71E-02	4,74E-05	0,00E+00	9,41E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
LPM 4 nach DIN 18947 - Solartrocknungsverfahren										
Funktionale Einheit kg		Parameter	HWD	NHWD	RWD	CRU	MFR	MER	EEE	EET
		IM/Einheit	kg	kg	kg	kg	kg	kg	MJ	MJ
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	5,43E-05	2,16E-04	4,35E-07	0,00E+00	9,41E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	A2	1,21E-06	1,48E-06	2,91E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	4,89E-08	8,21E-05	4,81E-06	0,00E+00	4,59E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	5,55E-05	2,99E-04	5,28E-06	0,00E+00	9,41E-01	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

## TEIL C INTERPRETATION DER ÖKOBILANZ

IM *Teil C* werden ausgewählte Ergebnisse der Ökobilanz (*Tab. B.3.1 – B.3.3*) in Form von Balkendiagrammen für die Parameter *PEI* (*Abb. C.1*) u. *GWP* (*Abb. C.2*) jeweils für die vier Verfahrensarten „Herstellung LPM“, für IM C1 „Abbruch“ (*Abb. C.3.1*), IM C3 „Aufbereitung Abbruch“ (*Abb. C.3.2*) sowie die Rückgewinnungspotenziale D1 – D3 (*Tab. C.4.1 – C.4.3*) dargestellt und interpretiert. *Abb. C.4.1* zeigt die Klimaentlastungseffekte für die Rückgewinnungspotenziale D1 – D3 im Vergleich.

### C.1 Primärenergieeinsatz (PEI)

Die Durchschnittswerte zum PEI in der *Sachbilanz* (*Tab. A.1*) basieren auf der Jahresabrechnung der jeweiligen Energielieferanten, die Berechnungsgrundlagen für Vorprodukte und Verpackung auf generischen Daten. Die Berechnung der Energieeinträge für die Bereitstellung von Trockenlehm greift auf geprüfte Energiebilanzdaten eines Herstellers für dieses Vorprodukt zurück [23]. Die Herstellung der LPM erfolgt auf verschiedenen Dosier- und Mischanlagen, auf denen außer LPM auch andere Putzmörtel und Stampflehm produziert werden. Der jährliche Energieverbrauch wird auf den gesamten Produktionsoutput in kg auf derselben Anlage bezogen.

Erdfeuchte LPM1 und davon nachgetrocknete LPM2 bestehen aus einem mineralischen Rohstoffmix aus Baulehm (48 %) und Sand (52 %). Der Baulehm fällt bei der Kiesgewinnung als Abfall an und wird als Sekundärgrubenlehm ohne weitere Aufbereitung zur Herstellung von LPM weiterverwertet. Der Sand wird ungetrocknet zugemischt.

Technisch getrocknete LPM3 u. LPM4 enthalten 30 – 32 M.-% Baulehm und 67 – 69 M.-% Sand. Zur besseren Armierung setzten die Hersteller der Rezeptur dieser LPM jeweils 1 M.-% Pflanzenfasern (Stroh, Miscanthus) hinzu. LPM1, LPM2 u. LPM4 verwenden ungetrocknete Ausgangsstoffe, deren Bereitstellung zwischen 16 % (LPM1) und 52 % (LPM4) des gesamten PEI ausmachen. Der Unterschied erklärt sich aus dem höheren Aufwand für den Betrieb einer Lehmgrube zur Gewinnung von Primärgrubenlehm (LPM4). *Abb. C.1* zeigt eine Gesamtübersicht der Energieeinträge für die vier untersuchten Verfahrensarten zur Herstellung von LPM.



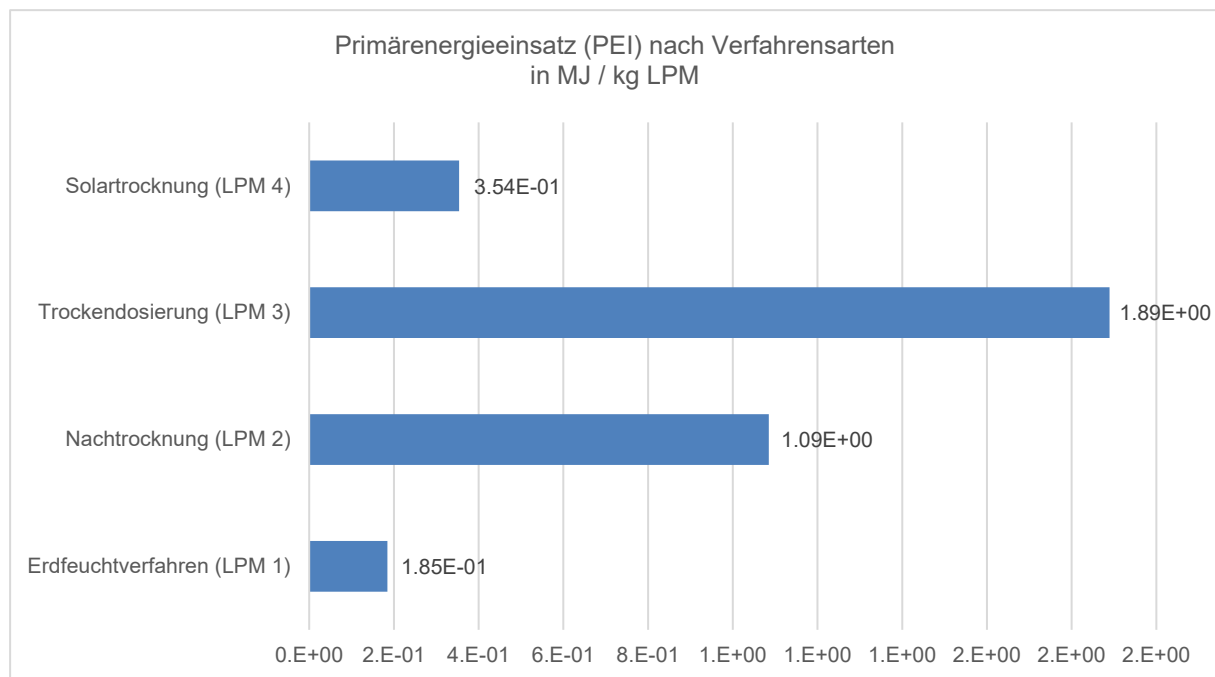


Abb. C.1 Primärenergieeinsatz PEI für LPM nach Verfahrensarten

Anders bei LPM3: Das Trockendosierverfahren verwendet vorgetrocknete Ausgangsstoffe, deren Bereitstellung mit 95 % des gesamten PEI signifikant höher ausfällt als bei den anderen untersuchten Verfahrensarten. Für die Herstellung der LPM (IM A3) errechnet sich der PEI nach den jeweils eingesetzten Energieträgern (z. B. deutscher Strommix, Strom aus Flusslaufkraftwerken, Flüssiggas, Diesel). Die Absackung in verschiedene Gebinde (Big Bag; Kraftpapiersäcke) und deren „graue“ Energie wurde ebenfalls dem IM A3 zugerechnet.

*Erdfeucht* hergestellte *LPM1* verbrauchen Ausgangsstoffe, Transporte ins Werk und Bereitstellung des Stroms Wasserkraft 0,111 MJ/kg LPM1. Das sind 60 % des gesamten PEI in Höhe von 0,185 MJ/kg LPM1 (Abb. C.1). Die Verpackung in Großgebinden von 1 t Fassungsvermögen trägt mit 0,074 MJ/kg LPM1 oder rund 40 % zum PEI im gesamten Lebenszyklus (IM A1 – A3) bei. Es handelt sich dabei um eine worst case-Betrachtung mit Annahmen zur Ökobilanz solcher Großgebinde, abgeleitet aus Werten für ähnliche Kunststoffgewebe, die in der ÖKOBAUDAT [17] gelistet sind (Abs. B.6). Der Anteil regenerativer Energieträger (PERT) beträgt 80 % des Gesamtenergieinput vom Ausgangsstoff bis zur Verpackung.

Die *nachträglich getrockneten LPM2* benötigen zusätzlich zu den PEI des Erdfeuchtverfahrens 0,018 1 Flüssiggas / kg LPM2. Diese getrockneten LPM2 werden in Kraftpapiersäcke ohne Kunststoffinlet verpackt. Ein Kraftpapiersack wiegt 90 g und fasst 25 kg LPM2. Der Verpackungsaufwand sinkt dadurch gegenüber LPM1 um > 99 %. Die Summe des PEI für den Herstellungsprozess bleibt mit 1,0 MJ/kg LPM2 um den Faktor 2 oder 97 % höher als bei LPM1. Der gesamte Energieeinsatz für LPM2 beträgt 1,08 MJ/kg LPM2 (Abb. C.1).

Der Hauptenergieeintrag (95 %) für die im *Trockendosierverfahren* hergestellten *LPM3* entsteht durch die vorgetrockneten mineralischen Ausgangsstoffe (Abb. C.1). Die Mischung, Dosierung und Absackung in Kraftpapiersäcke hat mit 0,021 MJ/kg LPM3 nur einen geringen Anteil an dem gesamten PEI der IM A1 – A3 in Höhe von 1,89 MJ/kg LPM3.

Die *passive Solartrocknung* von Primärgrubenlehm und Gesteinskörnung für *LPM4* begrenzt den Energieeinsatz für die Herstellung im Modul A3 auf 0,15 MJ/kg LPM 4 (Abb. C.1). Darin enthalten

sind auch die Dieselvebräuche für Baufahrzeuge bzw. –maschinen im Werk. Die Hersteller der anderen untersuchten LPM1 – 3 haben die Fahrzeuge im Werk auf Elektroantrieb umgestellt. Bei der passiven Solartrocknung der Ausgangsstoffe verbleibt eine Restfeuchte in der kapillaren Struktur der Tonmineralien mit geschätzt zwischen 5 – 10 M.-%. Der Trocknungsgrad ist ausreichend, um die LPM4 in Kraftpapiersäcke abfüllen, lagern und transportieren zu können. Nach Herstellerangaben werden jedoch nur 15 % der Produktionsmenge in Kraftpapiersäcke und 85 % in PE/PP Großgebände (Big bags) abgefüllt. Daraus folgt ein durchschnittlicher Energieeintrag für Verpackung in Höhe von 0,06 MJ/kg LPM4 (Abb. C.1) oder 42 % der gesamten Herstellungsenergie nach IM A3.

Die Energieeinträge durch LKW-Transporte der Ausgangsstoffe und Verpackungen in die betrachteten Werke bewegen sich zwischen 0,02 – 0,08 MJ/kg LPM oder 2,8 – 5,8 % des gesamten Energiebedarfs (A1 – A3). Das verweist auf werksnahe Rohstoffvorkommen, insbesondere Baulehm.

## C.2 Treibhausgaspotenzial (GWP)

Die Treibhausgaspotenziale als CO<sub>2</sub> equiv. werden als GWP 100 in ihrer Klimawirkung über 100 Jahre betrachtet. Untersucht wurde das GWP für vier Verfahrensarten zur Herstellung von LPM. Die in den Rezepturen der LPM3 und LPM4 verwendeten Pflanzenteile (Stroh, Miscanthus) enthalten gebundenes CO<sub>2</sub>, das in die Berechnung einbezogen wurde.

Erdfeuchte LPM1 enthalten keine pflanzlichen Zusätze. Das Treibhausgaspotential (GWP 100) beträgt, über die IM A1 – A3 aufsummiert, 0,0077 kg CO<sub>2</sub> equiv./kg LPM1 (Abb. C.2).

Durch die anschließende Nachtrocknung erdfeucht hergestellter LPM zu LPM2 erhöht sich das Treibhausgaspotenzial auf insgesamt 0,017 kg CO<sub>2</sub> equiv./kg LPM2, also um 120 % gegenüber ungetrockneten LPM1.

Die vorgetrockneten Ausgangsstoffe für LPM3 tragen wesentlich dazu bei, dass dieses Verfahren mit 0,039 kg CO<sub>2</sub> equiv./kg LPM3 den höchsten GWP 100-Wert der untersuchten Herstellungsverfahren aufweist.

Die LPM4 mit passiver Solartrocknung kommen rechnerisch durch das in den Pflanzenteilen der Rezeptur gebundene CO<sub>2</sub> auf einen insgesamt negativen Wert von -0,0028 kg CO<sub>2</sub> equiv./kg LPM4. Das pflanzliche CO<sub>2</sub> bleibt im LPM auch am Ende des Lebenszyklus gebunden, wenn eine Wiederverwertung der LPM nach IM D1 – D3 folgt. Ohne diese Gutschrift entstünde ein Treibhausgaspotenzial in Höhe von 0,0099 kg CO<sub>2</sub> equiv./kg LPM4 (Abb. C.2).

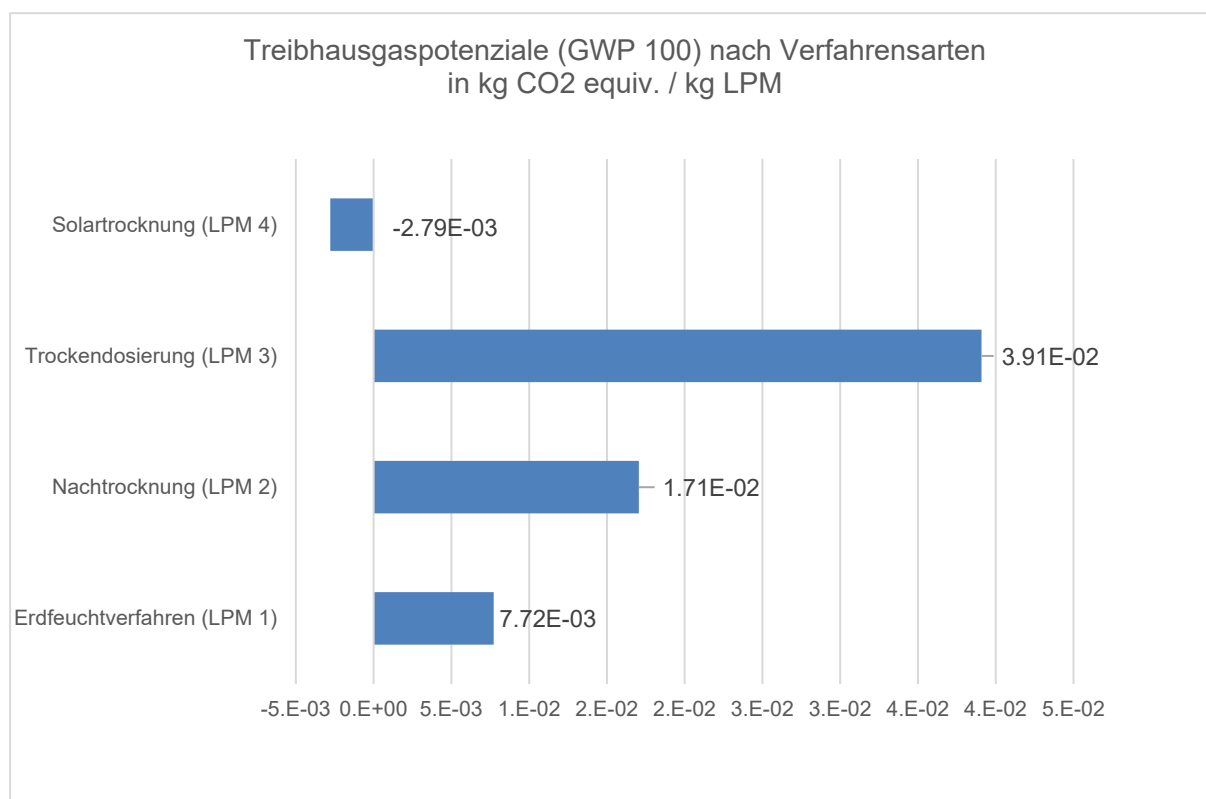


Abb. C.2 Treibhausgaspotenziale (GWP 100) LPM nach Verfahrensarten

Die Ausgangsstoffe der LPM1 und LPM2 sind Baulehm und Sand (Tab. 3.1). Sand ist der einzige Ausgangsstoff dieser Rezeptur (52 M.-%), der mit 14,8 % zu den Treibhausgaspotenzialen von insgesamt 0,00772 kg CO<sub>2</sub> equiv./kg LPM1 beiträgt (Abb. C.2). Die Verwendung von Sekundärgrubenlehm (48 M.-%) verursacht Treibhausgasemissionen beim Abbaggern, die jedoch außerhalb der Systemgrenze entstehen und der Kiesgewinnung zuzurechnen sind. Baulehm und Sand sind Komponenten zum Recycling (IMDI – D3) und als solche mit einem Verlust von 5 % in die Ökobilanz einbeziehen (Tab. B.3.3).

Die LPM3 und LPM4 verstärken die Mischungen mit 1 M.-% Pflanzenteil aus Stroh / Miscanthus. Dabei greift das massenbezogene Abschneidekriterium (Abs. B.4) nicht, weil das in der Wachstumsphase der Pflanzen gebundene CO<sub>2</sub> signifikante Auswirkungen (> 3 %) auf die Treibhausgaspotenziale hat. Das führt dazu, dass sich für LPM4 bei den Ausgangsstoffen insgesamt ein Klimaentlastungseffekt mit einem negativen Wert von -2,79 E-03 kg CO<sub>2</sub> equiv./kg LPM4 errechnet (Abb. C.2). Ohne diese CO<sub>2</sub> Gutschrift ergeben sich 0,00993 oder 9,93E-03 kg CO<sub>2</sub> equiv./kg LPM4.

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 zwischen 0,00141kg CO<sub>2</sub> equiv. (LPM4) und 0,00508 kg CO<sub>2</sub> equiv. (LPM3). Die durchschnittliche Transportentfernung beträgt 45 km.

Der Dosier- und Mischprozess für LPM1, LPM2 und LPM3 erfolgt mit 100 % Wasserkraft aus Flusskraftwerken. Dieser regenerative Energieträger und der sparsame Verbrauch in Höhe von im Durchschnitt 8,5 kWh/t (30,6 MJ/t) LPM tragen mit 2,38E-05 kg CO<sub>2</sub> equiv./kg LPM3 bzw. 3,51E-05 kg CO<sub>2</sub> equiv./kg LPM1/LPM2 oder < 1 % zu den Treibhausgasemissionen bei (in Abb. C.2 kaum darstellbar).

Für die Absackung des LPM1 und LPM4 werden offene Großgebilde aus PE/PP (Big Bags) mit bis zu 1 t LPM Fassungsvermögen genutzt. Mangels originärer UPD für diese Großgebilde wurde ein vergleichbares Produkt PE/PP Vliese (ÖKOBAUDAT Nr. 06.6.04 [17]) bilanziert. Wie beim PEI (*Abb. C1*) stellen diese Großgebilde mit 55 % der Treibhausgasemissionen den größten Emissionsfaktor dar (*Abb. C.2*). Sie sind jedoch mehrwegfähig. Einige Hersteller haben ein eigenes Pfandsystem eingerichtet. Die meisten Hersteller schließen sich einem Entsorgungssystem nach KrW-/AbfG [14] 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 enthalten (worst case-Szenario), können aber in individuellen Hersteller-UPD nachgewiesen werden.

Kraftpapiersäcke für LPM2 und LPM3 tragen mit 0,0029 kg CO<sub>2</sub> equiv. zum GWP von getrockneten LPM bei (*Abb. C.2*). Eine Gutschrift für stoffliche oder energetische Verwertung der Papiersäcke ist in dieser Muster-UPD nicht enthalten.

Bei einer differenzierten Betrachtung des Herstellungsverfahrens für LPM2 und LPM3 überwiegt der Trocknungsprozess für die fertige Mischung nach LPM2 und die Trockendosierung nach LPM3. Die technische Trocknung mit Flüssiggas für LPM2 verursacht mit 0,0107 kg CO<sub>2</sub>equiv./kg LPM2 63 % der Treibhausgasemissionen des gesamten Herstellungsprozesses von der Mischung bis zur Absackung in Kraftpapiersäcke. Die Dosierung vorgetrockneter Ausgangsstoffe enthält 0,0311 kg CO<sub>2</sub>equiv./kg LPM3 aus dem vorgelagerten Prozess der technischen Trocknung von Baulehm und Sand. Das entspricht ca. 80 % der gesamten Treibhausgaspotenziale des LPM3.

### **C.3 Abbruch (IM C1) und Aufbereitung (IM C3)**

Auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen an der FH Potsdam [13][19] wurde der Begriff „Abbruchmaterial“ je nach Rückbauverfahren definiert als „abgerissener“ LPM bzw. LSM-Abbruch mit Lehmmörtelresten (*Abs. B.5: IM C3 u. D*). Der manuelle „Abriss“ auf Putzgeweben haftender LPM lässt sich in einer Ökobilanz nicht sinnvoll quantifizieren. Deshalb wurde in der Ökobilanz der mechanische Aufwand für einen Gebäudeabbruch zur Rückgewinnung von LPM abgebildet und auf „Abbruchmaterial“ bezogen. Eine weitere Differenzierung nach Rückbauverfahren erfolgt nicht.

Für die Quantifizierung des *IM C1* wurden die Leistungsdaten eines branchentypischen Abrissbaggers angenommen und auf Mauerwerk (aus Lehm oder anderen Mauerwerksprodukten) mit Anhaftungen von LPM bezogen: Nach Herstellerangaben von Liebherr verbraucht ein Abbruchbagger 7,65 kg Diesel/h bei einer geschätzten Abrissleistung von 50 m<sup>3</sup> Mauerwerk/h [20]. Dieser Dieselverbrauch und diese Abbruchleistung wurden in der Umweltbilanz des IM C1 „Abbruch LSM“ unterstellt. *Abb. C.3.1* veranschaulicht die Kerngrößen der Umweltwirkungen in IM C1.

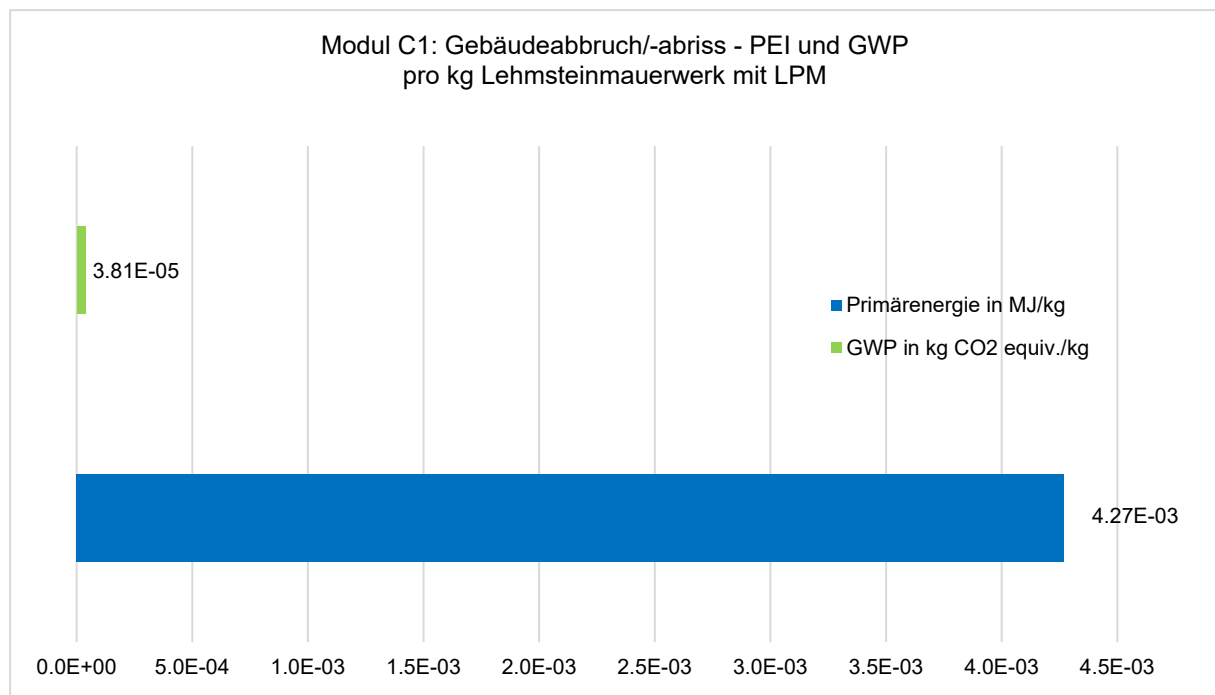


Abb. C.3.1 IM C1: PEI u. GWP für Gebäudeabbriss pro kg Abbruchmaterial

Der Energieaufwand (MJ/kg Abbruch) und die resultierenden Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub> equiv./kg Abbruch) der *IM C1* und *C3* werden in Beziehung zu den Rückgewinnungspotenzialen gesetzt und geben annähernd Auskunft über den Netto-Effekt der Rückgewinnung, der in jedem Fall positiv sein sollte.

Die Aufbereitung des rückgewonnenen Abbruchmaterials wird nach zwei Verfahren analysiert:

Ein *erstes* Verfahren ist das Wässern / „Einsumpfen“ des trocken rückgewonnenen Abbruchmaterials (*Nassverfahren*). Sie erfolgt durch Aufbereitung von Lehmputzresten aus einem Wandabbruch als Teil des Prozesses zur Wiederverwertung im Werk.

Ein *zweites* Verfahren ist die mechanische, maschinelle Zerkleinerung des Abbruchmaterials (*Trockenverfahren*) zu Lehm-Rezyklat. Für die umweltbilanzielle Quantifizierung der Verfahren eignen sich die Leistungsdaten für das Baustoffrecycling typischer Brecheranlagen.

Ausgewählt wurde ein für das Baustoffrecycling typischer Prallbrecher (Modell: SBM Remax 200) mit geschätzten 0,23 l/t Dieserverbrauch einschl. 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 Lehm-Abbruchmaterial tendenziell zu hoch angesetzt sein, wird aber als worst case Annahme beibehalten. *Abb. C.3.2* zeigt die Umweltkennzahlen zum PEI und zum Treibhausgaspotenzial GWP der beschriebenen Aufbereitungstechnik in *IM C3*. Der betrachtete Prallbrecher mit integriertem Stromgenerator erfordert ca. 0,001 MJ/kg Abbruchmaterial. Die Treibhausgasemissionen ergeben sich daraus mit 8,8E-05 kg CO<sub>2</sub>equiv./kg Abbruchmaterial.

Die Aufbereitung des Abbruchmaterials erfolgte für beide Verfahren unter Laborbedingungen in der FH Potsdam [13][19]. Damit wurde die prinzipielle Realisierbarkeit der Aufbereitung nach beiden Verfahren erstmals nachgewiesen. Ein Nachweis unter realen, vor allem betriebswirtschaftlichen Bedingungen der Abfallwirtschaft muss noch folgen.

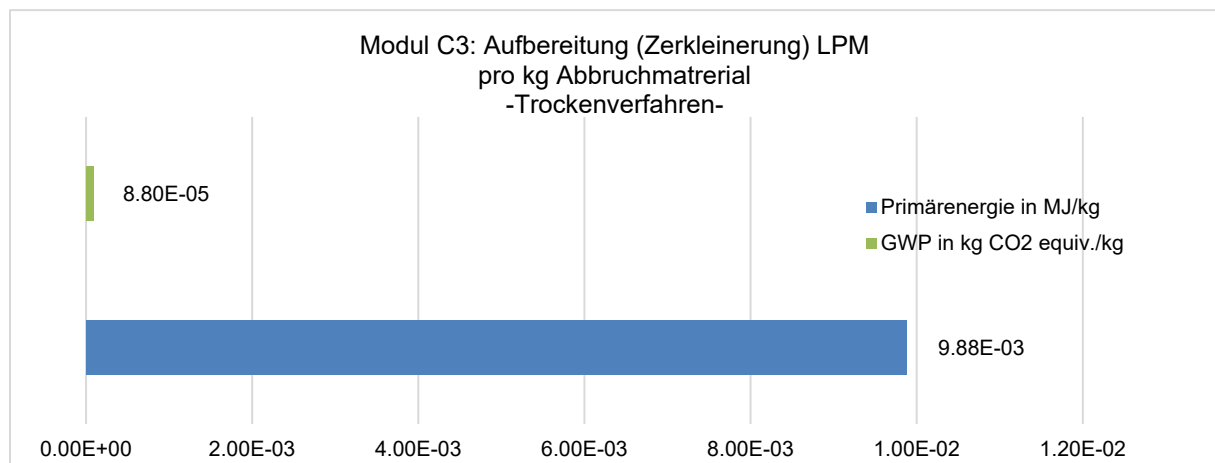


Abb. C.3.2 IM C3: PEI u. GWP für Aufbereitung von LPM-Abbruchmaterial

#### C.4 Rückgewinnungsszenarien

Der rückgewonnene LPM ermöglichen drei Szenarien der Wiederverwertung in *IM D1 – D3*:

1. Wiederverwertung des rückgewonnenen Abbruchmaterials für *neue ungetrocknete LPM1* durch Einsumpfen und Mauken. Die Substitution von primären Ausgangsstoffen bildet das Rückgewinnungspotenzial dieses Szenarios (*IM D1*).
2. Wiederverwertung des rückgewonnenen Abbruchmaterials für *neue trockene LPM2*. In diesem Szenario ersetzen die trocken rückgewonnenen Sekundärstoffe nicht nur die primären Ausgangsstoffe (wie in *IM D1*), sondern insbesondere die Energie für die sonst erforderliche Nachtrocknung erdfeuchter LPM (*IM D 2*).
3. Wiederverwertung des trocken rückgewonnenen Abbruchmaterials als Sekundärstoff für *andere Lehmbauprodukte*, die im Trockendosierverfahren hergestellt werden. Das können auch neue LPM sein. Bei diesem Verwertungsszenario ersetzen die Bestandteile des Abbruchmaterials (überwiegend Trockenlehm und Trockensand) ansonsten technisch getrockneten Baulehm und Sand (*IM D3*).

Für die Berechnung der Szenarien D1 – D3 werden Durchschnittswerte für die Massenanteile von Baulehm (40 M.-%) und Sand (60 M.-%) nach LPM1 – LPM4 angenommen. Wie in *Tab. A.1* angegeben, unterstellen die Szenarien einen Masseverlust bei Abbruch von 5 % für beide Komponenten.

##### C.4.1 Szenario D1

Die Wiederverwertung als LPM1 erfordert keine Trocknung. Für diesen Verwertungsweg kommt die Aufbereitung des Lehmsteinbruchs im Nassverfahren durch „Einsumpfen“ im Werk in Frage. Eine mechanische Zerkleinerung des Lehmsteinbruchs ist dafür nicht zwingend erforderlich.

Bei der Wiederverwertung von LPM-Abbruchmaterial für neue LPM 1 erdfeucht (*Tab. C.4.1*) substituiert der im ursprünglichen LPM enthaltene Baulehm und Sand die Ausgangsstoffe für neuen LPM1 entsprechend der Anteile in der Rezeptur mit 48 M.-% Baulehm und 52 M.-% Sand nach *Tab. A.1*. Je nach Analyse des Rezyklats müssen die Masseverhältnisse im neuen Herstellungsprozess der gewünschten Rezeptur angepasst werden.

<b>LPM nach DIN 18947 - Modul D1 Wiederverwertung als LPM 1 (erdfeucht)</b>						
<b>Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA</b>						
<b>Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM</b>						
Funktionale Einheit kg		Parameter	PERT	PENRT	PEI = PERT + PENRT	GWP (Gesamt)
		IM/Einheit	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	kg CO <sub>2</sub> äquiv.
Entsorgungs- stadium	Rückbau, Abriss	<b>C1</b>	1,56E-05	4,26E-03	<b>4,27E-03</b>	<b>3,81E-05</b>
	Abfallaufbereitung, einumpfen/mauken	<b>C3</b>	0,00E+00	0,00E+00	<b>0,00E+00</b>	<b>0,00E+00</b>
Rückgewinnungs- potenziale	Wiederverwertung LPM 1, erdfeucht	<b>D1</b>	-3,39E-03	-4,44E-02	<b>-4,78E-02</b>	<b>-2,37E-03</b>
Netto- Rückgewinnungs- potenzial	Wiederverwertung LPM 1, erdfeucht	<b>D1 +C1+C3</b>	-3,38E-03	-4,01E-02	<b>-4,35E-02</b>	<b>-2,33E-03</b>

Tab. C.4.1 Modul D1: Wiederverwertung von Abbruchmaterial für LPM 1 (erdfeucht)

Das Herstellungsverfahren und die Verpackung für LPM 1 bleiben bei Wiederverwertung des Rezyklats gleich. Die Substitution primärer Ausgangsstoffe durch rückgewonnenes Abbruchmaterial erspart bei Wiederverwertung für „neue“ LPM1 bis zu 0,0478 MJ/kg LPM1 Primärenergie und vermeidet 0,00237 kg CO<sub>2</sub>äquiv./kg LPM1. Wird der Aufwand für den maschinellen Abriss einberechnet vermindert sich das Netto-Rückgewinnungspotenzial geringfügig um 0,0043 MJ/kg bzw. 0,00004 kg CO<sub>2</sub>äquiv. Das ergibt Spielräume für Logistikkonzepte von Gebäudeabriss zum Werk (IM C2). Für dieses Szenario IM D1 wurden die Umweltparameter für den primären Abbau von Grubenlehm und die Bereitstellung von Gesteinskörnung (ungetrocknet) unterstellt.

#### C.4.2 Szenario D2

Im Szenario D2 zur Wiederverwertung von rückgebauten LPM nach trockener Aufbereitung für neue, trockene LPM2 ergibt sich ein anderer Substitutionseffekt (Tab. C.4.2): Das trockene LPM-Rezyklat ersetzt nicht nur Primärstoffe wie in Szenario D1, sondern auch das Nachtrocknungsverfahren für neue LPM2 und die damit verbundenen Energieeinträge.

LPM nach DIN 18947 - Modul D2 Rückgewinnungspotenziale als LPM 2 (Nachtrocknung)						
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA						
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM						
Funktionale Einheit kg		Parameter	PERT	PENRT	PEI = PERT + PENRT	GWP (Gesamt)
		IM/Einheit	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	kg CO <sub>2</sub> äquiv
Entsorgungs- stadium	Rückbau, Abriss	<b>C1</b>	1,56E-05	4,26E-03	<b>4,27E-03</b>	<b>3,81E-05</b>
	Abfallaufbereitung, trocken	<b>C3</b>	3,61E-05	9,84E-03	<b>9,88E-03</b>	<b>8,80E-05</b>
Rückgewinnungs- potenziale	Wiederverwertung LPM 2 (Nachtrocknung)	<b>D2</b>	-7,48E-03	-1,01E+00	<b>-1,02E+00</b>	<b>-1,31E-02</b>
Netto- Rückgewinnungs- potenziale	Wiederverwertung LPM 2 (Nachtrocknung)	<b>D1 +C1+C3</b>	-7,43E-03	-1,00E+00	<b>-1,01E+00</b>	<b>-1,29E-02</b>

Tab. C.4.2 Modul D2: Wiederverwertung von Abbruchmaterial für LPM 2 (Nachtrocknung)

In Szenario D2 entfällt die zusätzliche Trocknung mit Flüssiggas durch Verwendung des ohnehin trockenen LPM-Rezyklats. In der Praxis dürfte eine Anpassung der Masseverhältnisse der Ausgangsstoffe des Rezyklats an die gewünschte Rezeptur erforderlich sein. In Szenario D2 führen die Substitution von Ausgangsstoffen und der Verzicht auf deren Nachtrocknung zu höheren Rückgewinnungspotenzialen bei der Wiederverwertung für neue LPM (Tab. C.4.2).

Der Gesamtenergieeinsatz (PEI) vermindert sich durch die trockenen Sekundärstoffe auf 1,02 MJ/ kg LPM2. Die Treibhausgasemissionen sinken um 0,0131 kg CO<sub>2</sub>equiv./kg LPM 2. Das ist signifikant mehr als im Szenario D1. Ursächlich dafür ist der mögliche Verzicht auf eine Nachtrocknung ansonsten erdfeuchter Vorprodukte mit Flüssiggas (-0,0107 kg CO<sub>2</sub>equiv./kg LPM2).

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 Tab. C.4.2 betrachteten Nettoeffekte der Substitution in Szenario D2 um 1,5 % für die Energieeinsparung (MJ/kg Abbruchmaterial) und 0,1 % für Treibhausgasemissionen (kg CO<sub>2</sub>equiv./kg Abbruchmaterial). Der Netto-Effekt der Wiederverwertung nach IM D2 bleibt deutlich positiv und eröffnet weitere Spielräume für die hier nicht betrachtete Logistik vom Abbruch zum Werk.

### C.4.3 Szenario D3

In Szenario D3 werden die Energieeinsparung und die Vermeidung von Treibhausgaspotenzial bei einer Wiederverwertung von Lehm-Rezyklat als Alternative zur Trocknung erdfeuchter Ausgangsstoffe für Lehm-Produkte berechnet, die im Trockendosierverfahren hergestellt werden (Tab. C.4.3). Die Trocknung und Aufbereitung von Baulehm zu pulverförmiger Form, geeignet für gravimetrische Trockendosierverfahren, erfordert im vorgelagerten Herstellungsprozess einen Energieinput mit Erdgas und Strom in Höhe von zusammen 4,03 MJ/kg Trockenlehm [23]. Das Treibhausgaspotenzial beträgt 0,0657 kg CO<sub>2</sub>equiv./kg Trockenlehm. Hinzu kommt der „ökologische Rucksack“ für die Trocknung von Sand mit 0,549 MJ/kg und 0,0340 kg CO<sub>2</sub>equiv./kg Lehm-Rezyklat.



<b>LPM nach DIN 18947 - Modul D1 Rückgewinnungspotenziale als LPM 3 (Trockendosierverfahren)</b>						
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA						
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM						
Funktionale Einheit kg		Parameter	PERT	PENRT	PEI = PERT + PENRT	GWP (Gesamt)
		IM/Einheit	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	MJ H <sub>u</sub>	kg CO <sub>2</sub> äquiv
Entsorgungs- stadium	Rückbau, Abriss	<b>C1</b>	1,56E-05	4,26E-03	<b>4,27E-03</b>	<b>3,81E-05</b>
	Abfallaufbereitung, trocken	<b>C3</b>	3,61E-05	9,84E-03	<b>9,88E-03</b>	<b>8,80E-05</b>
Rückgewinnungs- potenziale	Wiederverwertung LPM 3 (Trockendosierverfahren)	<b>D3</b>	-6,57E-02	-1,78E+00	<b>-1,85E+00</b>	<b>-4,43E-02</b>
Netto- Rückgewinnungs- potenziale	Wiederverwertung LPM 3 (Trockendosierverfahren)	<b>D1 +C1+C3</b>	-6,56E-02	-1,77E+00	<b>-1,83E+00</b>	<b>-4,42E-02</b>

Abb. C.4.3 Modul D3: Wiederverwertung von Lehm-Rezyklat für LPM 3 (Trockendosierverfahren)

Bei der unterstellten Zusammensetzung des Lehm-Rezyklats reduziert sich der PEI für Trockenlehm und getrockneten Sand um 1,85 MJ/kg Rezyklat. Die Treibhausgasemissionen sinken um 4,43 kg CO<sub>2</sub><sub>equiv</sub>/kg Lehm-Rezyklat (Tab. C.4.3). Wird der Aufwand für den Abbruch von LSM mit LPM-Anhaftungen (Abb. C.3.1) und die trockene Aufbereitung durch Zerkleinerungsmühlen (Abb. C.3.2) gegengerechnet, reduziert sich der Nettoeffekt der Substitution in Szenario D3 für den Energieinput und für das Treibhausgaspotenzial marginal um jeweils < 1 %.

### C.5 Interpretation des Rückgewinnungspotenzials

Die Szenarien 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.

Die untersuchten Rückgewinnungspotenziale bilden Orientierungswerte für die Praxis des Baustoffrecyclings und für Hersteller von Lehmbaustoffen. Die Einbeziehung von Lehm-Rezyklat aus LSM-Abbruch LPM-Anhaftungen trägt in allen hier untersuchten Verwertungsszenarien signifikant zu Energieeinsparung und Treibhausgasreduktion bei. Die ermittelten Schwankungsbreiten ergeben sich zum einen aus den unterschiedlichen Mischungsverhältnissen in den Rezepturen, zum anderen aus dem Einsatz fossiler Energieträger bei direkter Trocknung für LPM2 und indirekter Trocknung der Vorprodukte für LPM3.

Die Möglichkeit der Replastifizierung des „Bindemittels“ Baulehm in den Rezepturen der LPM nach DIN 18947 ermöglicht die Rückgewinnung allein durch Einsumpfen und Mauken. In experimentellen Untersuchungen im Baustofflabor der FH Potsdam erwies sich auch eine Trennung und Rückgewinnung der Gesteinskörnungen im LPM als mögliche Weiterverwertungsoption für Bauprodukte außerhalb des Systems Lehm. Damit leisten Lehmbauprodukte wie LPM einen wesentlichen Beitrag zu einer zirkulären Bauwirtschaft.

Die nachfolgenden Abbildungen stellen die Energieeinsparpotenziale (*Abb. C.5.1*) und die Klimaentlastungseffekte (*Abb. C.5.2*) der drei Verwertungsszenarien gegenüber.

*Abb. C.5.1* staffelt die potenzielle Energieeinsparung der Verwertungsszenarien.

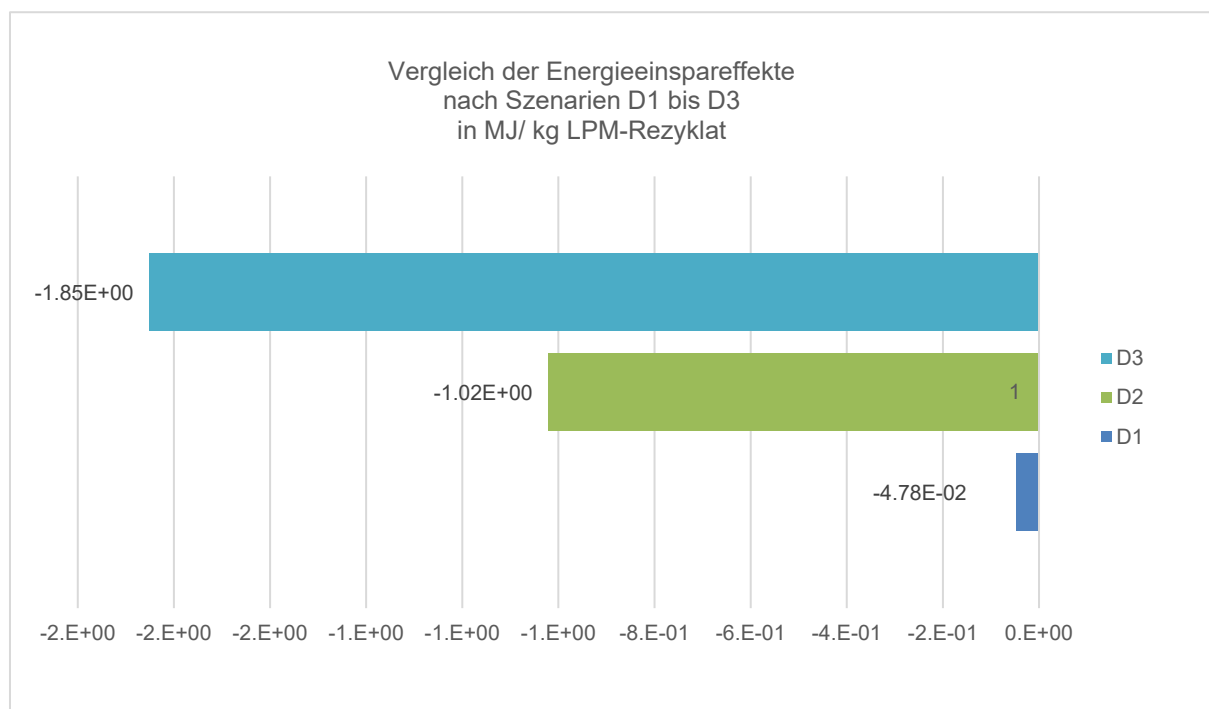


Abb. C.5.1 Vergleich der Energiespareffekte durch Lehm-Rezyklat

Szenario D1 ersetzt die Ausgangsstoffe für LPM für die Herstellung neuer LPM, der Herstellungsprozess bleibt gleich. Daraus folgt die Einsparung „grauen Energie“ in den rückgewonnenen und wiederverwertbaren Ausgangsstoffen mit 0,0478 MJ/kg. In Szenario D2 werden nicht nur die Ausgangsstoffe sondern auch der Nachtrocknungsprozess für neue LPM durch trocken zurückgewonnenes Abbruchmaterial substituiert. Der mögliche Verzicht auf energieintensive Trocknung in D2 führt zu einem um zwei Faktoren höheren Einspareffekt von 1,02 MJ/kg. Szenario D3 geht über die Wiederverwendung für neue LPM hinaus und ersetzt technisch getrockneten Lehm und technisch getrockneten Sand für andere Lehmbaustoffe, die im Trockendosierverfahren hergestellt werden. Die potenzielle Energieersparnis durch den Verzicht auf technische Trocknungsprozesse für diese Ausgangsstoffe ergeben den höchsten Wert mit 1,85 MJ/kg Abbruchmaterial.

*Abb. C.5* verdeutlicht die möglichen Entlastungseffekte klimaschädlicher Emissionen durch die drei Szenarien zur Wiederverwertung rückgebauten LSM-Abbruchmaterials als Ersatz für „neuen“ LPM (D1 u. D2) oder als Ausgangsstoff in Trockendosierverfahren für andere Lehmbauprodukte (D3).

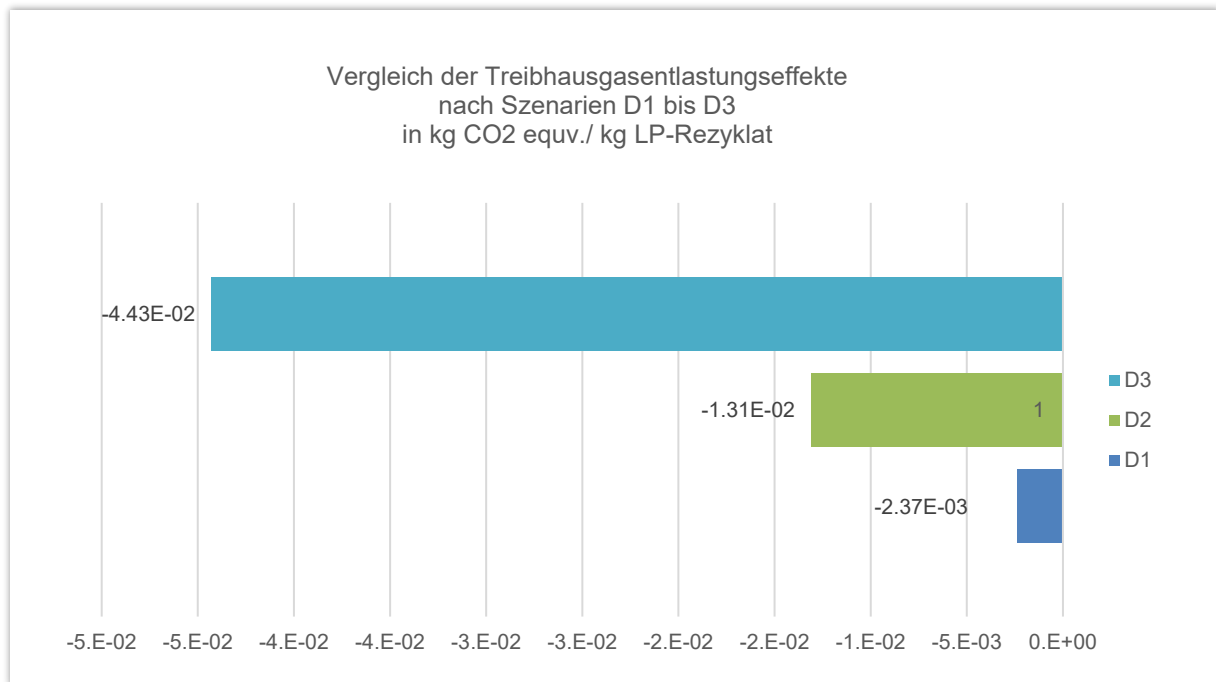


Abb. C.5 Vergleich der Klimaentlastungseffekte durch Lehm-Rezyklat als Ersatz für „neuen“ LPM

Grundsätzlich gilt, dass die Entlastungseffekte vom jeweils substituierten Prozess abhängen. Im Szenario *D1* substituiert das Rezyklat lediglich die primären Ausgangsstoffe des betrachteten LPM1, während *D2* zusätzlich den energieintensiven Prozessschritt der Nachtrocknung überspringt und durch trockene Rezyklate ersetzt. Dadurch erhöht sich der Klimaentlastungseffekt um einen Faktor von E-03 auf E-02 (Abb. C.5). Das Szenario *D3* bezieht sich auf vorgelagerte, energieintensive Prozesse zur Trocknung der Ausgangsstoffe Trockenlehm und Trockensand. Die Szenarien *D1* und *D2* unterstellen ungetrocknete Ausgangsstoffe, deren Bereitstellung geringere Treibhausgasemissionen verursacht. Im Szenario *D3* substituiert trocken rückgebauter, aufbereiteter Recyclinglehm den primären Trockenlehm. Zusammen mit den im Recyclinglehm enthaltenen trockenen Sandanteilen ergibt sich mit 0,0443 kg CO<sub>2</sub> equiv./kg LPM (Abb. C.5) ein um 238 % höherer Klimaentlastungseffekt als im Szenario *D2*. Je energieintensiver der originäre Prozess, desto höher kann der Klimaentlastungseffekt durch Verwendung von Abbruchmaterial mit Lehmprodukten sein.

Die Ermittlung der Nettoeffekte der Rückgewinnung zeigt, dass der zirkuläre Ansatz sich auch nach wirtschaftlichen Effizienzkriterien rechnen kann. Nach Abzug der CO<sub>2</sub> equiv.-Werte 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 Rückbau-Aufwandes effektive Optionen für eine Kreislaufführung von LPM, 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 und Bauteile und Sonderbauteile*
- DIN 18300:2012-09: *VOB/C (ATV) – Erdarbeiten*
- DIN 18550-2:2018-01: *Planung, Zubereitung u. Ausführung von Innen- u. Außenputzen – Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2 für Innenputze in Verbindung mit DIN EN 13914-2:2016-09 für Lehmputzmörtel*
- DIN 18942-1:2018-12: *Lehmbaustoffe und Lehmbauprodukte – Teil 1: Begriffe*
- DIN 18942-100:2018-12: *Lehmbaustoffe und Lehmbauprodukte – Teil 100: Konformitätsnachweis*
- DIN 18945:2018-12: *Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*
- DIN 18947:2018-12: *Lehmputzmörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*
- DIN EN 12620(E):2015-07: *Gesteinskörnungen für Beton (zurückgezogen)*
- DIN EN 12878:2014-07: *Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen – Anforderungen und Prüfverfahren*
- DIN EN 13139 (E):2015-07: *Gesteinskörnungen für Mörtel (zurückgezogen)*
- DIN EN 13501-1:2010-01: *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*
- DIN EN 13501-2:2016-12: *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*
- DIN EN 13914-2:2016-09: *Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen – Teil 2: Innenputz*
- 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 16516:2018-01: *Bauprodukte – Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen – Bestimmung von Emissionen in die Innenraumluft*
- 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 für Lehmbaustoffe – Allgemeine Regeln für die Erstellung von Typ III Umweltproduktdeklarationen (Teil 2)*. Weimar: 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), zuletzt geändert 30.06.2020 (BGBl. I, S.1533)
  - 4 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmbaustoffe – Grundregeln für die Baustoffkategorie Lehmmauermörtel (PKR LPM) nach DIN EN 15804*. Weimar: 2022\_04

- 5 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Qualitätsüberwachung von Baulehm als Ausgangsstoff für industriell hergestellte Lehmbaustoffe – Richtlinie*. Technische Merkblätter Lehm bau, TM 05. Weimar:2011-06
- 6 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Anforderungen an Lehmputz als Bauteil*. Technische Merkblätter Lehm bau, TM 01. Weimar:2014-06, 2. Aufl.
- 7 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)
- 8 Natureplus e. V. (Hrsg.): *Vergaberichtlinie 0803 zur Vergabe des Qualitätszeichens. Lehmputzmörtel*. Ausgabe April 2015, Neckargemünd: 2015
- 9 Natureplus e. V. (Hrsg.). *Vergaberichtlinie 5003 zur Vergabe des Qualitätszeichens. Naturschutz beim Abbau mineralischer Rohstoffe*. Neckargemünd 2015-04
- 10 Krakow, L.: *Waschschlamm als Deponiebaustoff – Ein intelligenter Beitrag zur Rohstoffeffizienz und Ressourcenschonung*. Aggregates International 03/2008, S.29 – 37
- 11 Bundesverband Baustoffe–Steine und Erden e. V. (BBSE) (Hrsg.): *Kreislaufwirtschaft Bau - Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018, Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018*. Berlin 2021
- 12 Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz - Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft – v. 24.07.2002 (GBl. I, S. 511) BM f. Umwelt, Naturschutz u. Reaktorsicherheit, Berlin:2002
- 13 Sommerfeld, M.: *Umweltproduktdeklaration von Lehmbaustoffen – Ermittlung des Rückgewinnungspotenzials*. Unveröff. Diplomarbeit, FB Bauingenieurwesen, FH Potsdam 2019
- 14 Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV) v. 09.07.2021 BGBl. I S.2598 (Nr. 43), Geltung ab 01.08.2023
- 15 Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002) (BGBl. I, Nr. 102/2002, Fassung v. 20.03.2017)
- 16 Bau-EPD (Hrsg.): *Nutzungsdauerkatalog der Bau-EPD für die Erstellung von UPDs*. Bau-EPD GmbH, Wien 2014
- 17 Bundesinstitut f. Bau-, Stadt- u. Raumforschung (BBSR) (Hrsg.): *ÖKOBAUDAT – Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung*. SR Zukunft Bauen | Forschung für die Praxis | Band 09, Bonn 2017
- 18 Fachverband Strohballenbau Deutschland e. V. (FASBA) (Hrsg.): *Umweltproduktdeklaration UPD für Baustroh nach DIN EN ISO 14025 u. DIN EN 15804*. Wien 2014
- 19 <https://www.fh-potsdam.de/aktuelles-medien/news/symposium-baustoffrecycling-und-lehmbaustoffe>
- 20 <https://www.liebherr.com/de/deu/specials/spritsparrechner/tool/kalkulator.html#page=3&catid=7&id=R-950-D&v1=&v2=&v3=&ca=1&cu=EUR>
- 21 <https://www.sbm-mp.at/de/roducte/aufbereitungsanlagen-mobil/mobile-prallbrecher/remax-200.html>
- 22 <https://www.ecoinvent.org>
- 23 EMAS D-146-00004: 2. *Aktualisierte Umwelterklärung der Stephan Schmidt KG, 2008*