

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

Dachverband Lehm e.V.



Muster-Umweltproduktdeklaration

nach DIN EN 15804:2022_03

Muster-UPD

Lehmplatten nach DIN 18948

Deklarationsinhaber	Dachverband Lehm e.V., Postfach 1172, 99409 Weimar
Herausgeber	Dachverband Lehm e.V., Postfach 1172, 99409 Weimar
Programmbetreiber	Dachverband Lehm e.V., Postfach 1172, 99409 Weimar
Deklarationsnummer	UPD_LP_DVL2023004_PKRÜ5-DE
Ausstellungsdatum	29.03.2023
Gültig bis	28.03.2028

Umwelt-Produktdeklaration – Allgemeine Angaben

Programmbetreiber

Dachverband Lehm e.V.
Postfach 1172, 99409 Weimar
Deutschland

Deklarationsnummer

UPD_LP_DVL2023004_PKRÜ5-DE

Deklarationsbasis

Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen Grundregeln für die Baustoffkategorie Lehmplatten (PKR LP)
Version Ü5_2022_04
(durch das unabhängige Prüfungsgremium nach DIN EN 14025 geprüft und zugelassen)

Ersteller der Ökobilanz

Dipl.-Ök. Manfred Lemke
Westerstrasse 40
26506 Norden
Deutschland

Ausstellungsdatum

29.03.2023

Gültigkeitsdauer

28.03.2028

Deklarationsinhaber

Dachverband Lehm e.V.
Postfach 1172, 99409 Weimar
Deutschland

Deklariertes Bauprodukt / Deklarierte Einheit

Die Muster-Umweltproduktdeklaration (MUPD) für Lehmplatten nach DIN 18948 wurde im Auftrag des Dachverbandes Lehm e.V. (DVL) und mit Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt erstellt. Als funktionale Einheit wurde ein Kilogramm Lehmplatten (1 kg) analog zu DIN 18948 Anhang A.3 festgelegt.

Gültigkeitsbereich

Die vorliegende MUPD bildet die Ökobilanz der Herstellung von Lehmplatten ab. Bezugsjahr ist das Jahr 2021. Die in der Ökobilanz abgebildeten Herstellungsverfahren sind typisch für die Herstellung von Lehmplatten in Deutschland. Hersteller von Lehmplatten können diese MUPD als Vorlage benutzen. Von der MUPD abweichende Verfahrenstechniken erfordern eine individualisierte UPD.

Eine Haftung des Dachverbandes Lehm e.V. in Bezug auf dieser Muster-UPD zugrunde liegende Herstellerinformationen ist ausgeschlossen.

Verifizierung

Die Europäische Norm DIN EN 15804 dient als Kern-PKR. Unabhängige Verifizierung der Deklaration nach DIN EN ISO 14025:2010 in Verbindung mit GEN ISO/TS 14071:2016

intern extern



Dipl.-Ing. Stephan Jörchel
Dachverband Lehm e.V. (Programmbetrieb)



Prof. Dr. Klaus Pistol
Prüfungsgremium



Dr.-Ing. Horst Schroeder
Verifizierer

Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmbaustoffe

Msterumweltproduktdeklaration für die Baustoffkategorie Lehmplatten (UPD LP) nach DIN EN 15804

Stand: Dezember 2023

INHALT

1	Allgemeines.....	5
1.1	Normative Grundlagen.....	5
1.2	Nachverfolgung der Versionen	5
1.3	Begriffe / Abkürzungen.....	6
2	Produktdefinition.....	6
2.1	Geltungsbereich.....	6
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
2.7.1	Mechanische / bauphysikalische Eigenschaften	8
2.7.2	Schallschutz.....	9
2.7.3	Luftdurchlässigkeit.....	9
2.8	Brandschutz.....	9
2.9	Sonstige Eigenschaften	9
3	Ausgangsstoffe.....	9
3.1	Auswahl / Eignung	9
3.2	Stoffeklärungen.....	9
3.3	Bereitstellung	11
3.4	Verfügbarkeit	11
4	Produktherstellung	12
4.1	Herstellungsprozess.....	12
4.1.1	Formgebungsverfahren „Streichen / bandgestrichen“	12
4.1.2	Formgebungsverfahren „Pressen / formgepresst“	13
4.1.3	Formgebungsverfahren „stranggepresst“	14
4.2	Gesundheits- und Arbeitsschutz Herstellung	14
4.3	Umweltschutz Herstellung	14
4.3.1	Abfall.....	14
4.3.2	Wasser / Boden.....	14
4.3.3	Lärm	14
4.3.4	Luft.....	14

5	Produktverarbeitung.....	15
5.1	Verarbeitungshinweise.....	15
5.2	Arbeitsschutz / Umweltschutz.....	16
5.3	Restmaterial.....	16
5.4	Verpackung.....	16
6	Nutzungszustand.....	17
6.1	Inhaltsstoffe.....	17
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 LP.....	18
9.2	Verwertung von Abfällen und Verpackungen.....	19
9.3	Entsorgung.....	19
10	Nachweise.....	19
10.1	Produkterstprüfung nach DIN 18942-100.....	19
10.2	VOC, TVOC.....	19
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.....		22
B.1	Ziel der Analyse.....	22
B.2	Zielgruppen der Analyse.....	22
B.3	Referenznutzungsdauer.....	22
B.4	Abschneidekriterium.....	22
B.5	Annahmen und Abschätzungen.....	23
B.6	Datenqualität.....	24
B.7	Allokation.....	25

B.8	Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (LCA).....	25
TEIL C INTERPRETATION DER ÖKOBILANZ		30
C.1	Primärenergieeinsatz (PEI)	30
C.2	Treibhausgaspotenzial (GWP)	31
C.3	Rückgewinnungsszenarien D	33
C.3.1	Szenario D1 (Demontage / Wiederverwendung)	33
C.3.2	Szenario D2 (Nassverfahren)	33
C.3.3	Szenario D3 (trocken / maschinelle Zerkleinerung)	34
C.4	Zusammenfassung.....	36
Zitierte Standards / Literaturhinweise.....		37

1 ALLGEMEINES

1.1 Normative Grundlagen

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

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

1.2 Nachverfolgung der Versionen

Version	Kommentar	Stand
Ü1	<i>Erster Entwurf ohne Datenerhebung</i>	<i>Sep 2020</i>
Ü2	<i>Datenerhebung und -auswertung</i>	<i>Juli 2021</i>
Ü3	<i>Berechnung und Bilanzierung</i>	<i>Okt 2021</i>
Ü4	<i>Interpretation und Überarbeitung der Darstellung</i>	<i>Jan 2022</i>
Ü5	<i>Überarbeitung UPD LP.03.1_HS05</i>	<i>Mai 2022</i>
Ü6	<i>Überarbeitung UPD LP.03.3_HS05.2</i>	<i>Juli 2022</i>
Ü7	<i>Verifizierung UPD LP.03.04_HS.ML06.2.1</i>	<i>Aug 2022</i>
Ü8	<i>Endredaktion</i>	<i>Jan 2023</i>
Ü9	<i>Überarbeitete Version nach Ü8</i>	<i>Dez 2023</i>

Version Ü9

Weimar, Dezember 2023

Kontakt:

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

© Dachverband Lehm e. V.

1.3 Begriffe / Abkürzungen

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

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

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

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

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

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

IM Informationsmodul

LP Lehmplatte

LPM Lehmputzmörtel

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

AVV Europäische Abfallverzeichnis-Verordnung [3]

2 PRODUKTDEFINITION

2.1 Geltungsbereich

Diese Umweltproduktdeklaration (UPD) ist eine Musterdeklaration des Dachverbandes Lehm e. V. (DVL) für Lehmplatten (LP). Die Quantifizierung der Ökobilanzdaten beruht auf stichprobenartig erhobenen Herstellerdaten aus dem DVL. Hersteller geben den Geltungsbereich ihrer spezifischen, nach dieser Muster-UPD deklarierten Produkte in *Tab. 2.1* an.

Tab. 2.1 Hersteller, Verfahrensart und Produktbezeichnung

Nr.	Hersteller	Werksanschrift	Verfahrensart n. Kap. 4.1	Produktbezeichnung
x	Xxxx	1234 XXXX	XXXX	XXXX

Diese Muster-UPD ist anwendbar auf im Werk hergestellte, ungebrannte „dünne“ ($t \leq 1/5$ der Plattenbreite b) LP nach DIN 18948 / 18942-1 zum Beplanken und Bekleiden von Bauteilen im Innen- und witterungsgeschützten Außenbereich. Sie gilt für normierte LP, die nach einem in *Kap. 4.1* deklarierten Verfahren hergestellt werden.

LP mit $t > 1/5$ der Plattenbreite b, die ohne Unterkonstruktion für tragende / nicht tragende Wände und Ausfachungen verarbeitet werden können, sowie Hohlkammerplatten, die eine Unterkonstruktion er-

fordern, sind nicht Gegenstand dieser Muster-UPD. Mit Lehmputzen und Lehmdünnlagenbeschichtungen (LDB) beschichtete Trägerplatten aus anderen Baustoffen fallen ebenfalls nicht in den Geltungsbereich dieser UPD.

Für die Anwendung gelten die DIN 18948, die LR DVL [2] sowie die PKR LP des DVL [4]. Wandbauteile aus Bausystemen unter Verwendung von LP müssen zusätzlich den Anforderungen der DIN 4103-1 entsprechen.

2.2 Produktbeschreibung

Die genannten Produkte sind ungebrannte, ebene Platten aus Lehmbaustoff mit ggf. Zusatzstoffen und Bewehrungen zum Beplanken und Bekleiden von Bauteilen im Innen- und witterungsgeschützten Außenbereich. Die Tonmineralien des Baulehms bilden i. d. R. das alleinige Bindemittel im Stoffgemisch.

LP können oberflächennah oder im Kern mit Gittern, Geweben oder Matten bewehrt sein. Als Sonderprodukte deklarierte LP enthalten werkseitig eingearbeitete Temperierungssysteme. Sie sind auch als „Leerplatten“ mit eingprägter Rillenstruktur zur nachträglichen Komplettierung mit dem Temperierungssystem beim Hersteller / auf der Baustelle verfügbar [5].

Für die Formgebung von LP nach DIN 18948 werden folgende Verfahren unterschieden:

- bandgestrichen,
- formgepresst,
- stranggepresst.

2.3 Einsatzzweck

LP werden für die Beplankung von Ständerkonstruktionen für Trennwände und Vorsatzschalen sowie zur Bekleidung von Wänden, Decken und Dachschrägen im Innen- und witterungsgeschützten Außenbereich eingesetzt. LP sind für eine Anwendung in Spritzwasserbereichen von Küchen und Bädern sowie in Räumen mit dauerhaft stark erhöhter Luftfeuchte (Schwimmbäder, gewerbliche Küchen) nicht geeignet.

Als Sonderprodukte deklarierte LP werden zur Temperierung von Innenräumen eingesetzt [5].

Entsprechend der Art der Anwendung unterscheidet man folgende Plattentypen, die gemäß *Tab. 2.2* zu deklarieren sind.

Tab. 2.2 Typen und Anwendungsbereiche von Lehmplatten

Nr.	Typ	Anwendungsbereich
1	A	Beplankung von Ständer-/ Abhängkonstruktionen im Bereich von Wänden, Decken und Dachschrägen
2	B	Bekleidung von Wänden, Decken und Dachschrägen (Trockenputzplatten)
3	S	Sonderprodukte, z. B. mit werkseitig eingearbeiteten Systemen zur Temperierung von Innenräumen

2.4 Produktnorm / Zulassung / Inverkehrbringen / Anwendungsregeln

- DIN 18942-1:2018-12, *Lehmbaustoffe und Lehmbauprodukte – Teil 1: Begriffe*,
- DIN 18942-100:2018-12, *Lehmbaustoffe und Lehmbauprodukte – Teil 100: Konformitätsnachweis*,
- DIN 18948:2018-12, *Lehmplatten – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*,

- Lehmbau Regeln des Dachverbandes Lehm e. V. (LR DVL): Weimar 2009, 3. Aufl. [2].

Weiterhin gelten die PKR Lehmplatten (LP) des DVL [4] und damit im Zusammenhang das Dokument „Teil 2“ mit den entsprechenden Begriffsbestimmungen und Abkürzungen [1] sowie das Technische Merkblatt TM 05 des DVL [6]. Darüber hinaus müssen die AVV [3], die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) [7] sowie die Arbeitsblätter der Hersteller beachtet werden.

2.5 Gütesicherung

Die Eigen- und Fremdüberwachung des Herstellungsprozesses von LP nach DIN 18948 erfolgt nach DIN 18942-100.

2.6 Lieferzustand

Lieferformate von LP werden in den Abmessungen Länge l x Breite w (i. d. R. Vielfaches von 125 mm) und Dicke t ($t \leq 1/5$ der Breite w) deklariert (Tab. 2.3). Zulässige Abweichungen vom Nennmaß (Rechtwinkligkeit, Nennlänge, Nennbreite, Nenndicke, Ebenheit) werden nach DIN 18948 in Maßhaltigkeitsklassen MHK angegeben. Die Längs- und Querkanten von LP müssen ein Rechteck bilden. Ihre Ränder können stumpf oder mit Nuten / Federn ausgebildet werden, die Seitenflächen l x w mit Oberflächenprofilierung versehen oder mit Geweben oberflächennah bewehrt sein. Bewehrungen aus Matten können auch als Kernbewehrung werkseitig in die LP eingearbeitet werden. LP können auch längs gelocht sein.

LP mit werkseitig eingearbeiteten, im Betriebszustand wassergefüllten Rohrschlangen dienen zur Temperierung von Innenräumen und sind als Sonderprodukte zu deklarieren.

Tab. 2.3 Lieferformate der analysierten LP

Nr.	max. Format l x w mm	Dicke t mm	Maßhaltigkeitsklasse MHK (I – III)	Art der Bewehrung	Lochung	Sonderprodukt
LP 1	1250 x 625	22	II	Jute	keine	nein
LP 2	1000 x 625	25	II	Glasfaser	keine	nein

Die bautechnischen Eigenschaften der deklarierten Produkte im Lieferzustand sind entsprechend den Vorgaben der zutreffenden Produktnorm anzugeben (z. B. deklarierte Werte, Klassen oder Kategorien, genormte Bezeichnungen etc.).

2.7 Bautechnische Eigenschaften

2.7.1 Mechanische / bauphysikalische Eigenschaften

Tab. 2.4 zeigt die Bandbreiten der mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften nach Angaben der für die Muster-UPD untersuchten LP.

Tab. 2.4 Mechanische / bauphysikalische Eigenschaften der deklarierten LP

Nr.	Eigenschaft / Prüfung n. DIN 18948	LP1	LP2	Dimension
1	Trockenrohdichte ρ_d / 9.3	1.450	1.400	kg/m ³
2	Festigkeit / 9.4			
2.1	• Oberflächenhärte / 9.4.1	15	12	mm
2.2	• Oberflächenzugfestigkeit / 9.4.2	0,1	0,1	N/mm ²
2.3	• Biegezugfestigkeit (quer) / 9.4.3	1,2	1,35	N/mm ²

3	Wärmeleitfähigkeit λ_R / 9.5.2	0,35	0,59	W/mK
4	Wärmespeicherkapazität c / 9.5.3	1,1	1,0	kJ/kgK
5	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ / 9.5.1	5/10	5/10	-
6	Feuchtetoleranz MHK / 9.2	II - III	II - III	
6.1	• Ebenheit (Krümmung, Schüsselung) / 9.2.4	3	3	mm
6.2	• Rechtwinkligkeit / 9.2.1	3	3	mm
6.3	• Längenänderung (Länge, Breite, Dicke) / 9.2.2 / 9.2.3	+/-2	+/-2	mm
7	Wasserdampfsorptionsklasse ¹ WS / A.2.2	13 / < WS I	60 / WS III	g/m ²

¹ optional

2.7.2 Schallschutz

Falls erforderlich, ist die Luftschalldämmung eines Bausystems mit LP nach DIN EN ISO 717-1 zu bestimmen. Sollen LP zur Raumakustik beitragen, ist die Schalladsorption des Bausystems mit LP nach DIN EN ISO 354 zu ermitteln. Die Schalldämmwerte der untersuchten LP bei einfacher Beplanung unterschiedlicher Konstruktionen liegen zwischen 40 und 64 dB

2.7.3 Luftdurchlässigkeit

Konstruktionen aus LP mit vollflächigen Lehmputzen bzw. LDB mit ≥ 2 mm Dicke sind luftdicht.

2.8 Brandschutz

Die Baustoffklasse von LP wird nach DIN 4102-1 bzw. DIN EN 13501-1 bestimmt. LP müssen mindestens der Baustoffklasse B2 entsprechen ($\rho_d \geq 600$ kg/m³).

Die untersuchten LP sind der Baustoffklasse A1 bzw. A2 nach DIN EN 13501-1 zugeordnet.

2.9 Sonstige Eigenschaften

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

LP bestehen aus Baulehm mit unterschiedlichen mineralischen und pflanzlichen Zusätzen entsprechend der DIN 18948.

Zulässig nach DIN 18948 sind Pflanzenanteile aus Stroh, Hanf oder Miscanthus und unbehandelte Holzspäne aus Sägewerken mit Restfeuchte

Die Ausgangsmischung kann bis zu 1 M.-% stabilisierende Zusatzmittel (z. B. Stärke) enthalten, wenn deren stabilisierende Eigenschaften durch Wasserzugabe reversibel sind.

Zusätzlich können in die LP werkseitig Bewehrungsmatten und –gewebe sowie spezielle Vorrichtungen zur Temperierung eingearbeitet werden. Diese Produkte müssen im Falle einer Entsorgung (Kap. 9.3) nach AVV [3] / Deponierichtlinie EU zumindest als inerte Abfälle behandelt werden können.

Es gelten die Stoffverbote und -beschränkungen der DIN 18948 und natureplus VR 1006 [8].

3.2 Stofferläuterung

Baulehm gemäß LR DVL [2] ist zur Herstellung von Lehmbaumstoffen geeigneter Lehm, bestehend aus einem Gemisch aus schluffigen, sandigen bis kiesigen Gesteinskörnungen und bindekräftigen Tonmi-

neralien. Baulehm wird unterschieden nach Grubenlehm, Trockenlehm / Tonmehl und Recyclinglehm. Presselehm kann ebenfalls als Baulehm weiterverwertet werden [1].

Grubenlehm ist ein natürlicher Primärrohstoff mit unterschiedlicher granulometrischer sowie schwankender mineralogischer Zusammensetzung (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaCO_3). Dadurch können sich je nach Lehmvorkommen unterschiedliche plastische Eigenschaften während der Aufbereitung und Verarbeitung (mager / fett) sowie Farben des Endprodukts ausbilden.

Grubenlehm wird erdfeucht dem geologisch „gewachsenen“ Boden entnommen. 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 (nature-plus RL 5003 [9]). Je nach weiterer Verwendung wird unterschieden [1]:

Primärgrubenlehm wird zielgerichtet für die Herstellung von Lehmbaustoffen abgebaut.

Sekundärgrubenlehm fällt beim Ton-, Sand-, Kies- und Kalkabbau oder anderen Erdarbeiten für Baumaßnahmen als *Bodenaushub* an und kann als Sekundärstoff im Lehmbau weiterverwertet werden. Er verliert dann seine Abfalleigenschaft

Trockenlehm ist getrockneter, ggf. gemahlener Grubenlehm. Tonmehl ist natürlicher, getrockneter, ggf. gemahlener Ton, der zur Erhöhung der Bindekraft von mageren Baulehmen verwendet werden kann. Beide Produkte sowie getrocknete Sande enthalten „graue“ Wärmeenergie aus Vorprozessen, die nach Art und Menge im Rahmen der Ökobilanz erfasst werden.

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

Primärrecyclinglehm wird zielgerichtet als Lehmbaustoff wiederverwertet. Er verliert seine Abfalleigenschaft aus einem vorherigen Prozesszyklus als Ausgangsstoff für die Herstellung von LP im aktuellen System.

Sekundärrecyclinglehm wird für Anwendungen außerhalb des Lehmbaus weiterverwertet (z. B. Abtrennung der Sandkornfraktion für Betonherstellung / Downcycling / urban mining).

Presselehm ist ein bei der Kiesgewinnung anfallendes Abfallprodukt, das als Kies-Wasch-Schlamm zunächst in Silos oder Becken aufgefangen wird. 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 Siebbandpressen reduziert wird und dadurch die Masse des „Presselehms“ erheblich verringert. Tensidhaltige Schlämme sollen von einer Weiterverwertung als Baulehm ausgeschlossen werden.

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

Organische Zusatzstoffe / natürlich: landwirtschaftliche Nebenprodukte (hier: Stroh, Hanfschäben, Miscanthus) ohne relevante Rückstände aus Herbiziden, Tierhaar sowie zerkleinertes, chemisch unbe-

handeltes Holz / -späne (keine Holzwerkstoffe). Durch organische Zusatzstoffe können die bauphysikalischen Eigenschaften des Endprodukts beeinflusst werden. Faserartige Zusatzstoffe wirken einer Rissbildung der LP bei Austrocknung / Erhärtung entgegen.

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

Organische Zusatzstoffe, künstlich: (Methylzellulose(fasern) / Stärke): Stärke wird aus Getreidekorn oder Kartoffeln durch chemische Reaktion industriell extrahiert. Sie verleiht der Arbeitsmasse zur Herstellung von LP eine dickflüssige Konsistenz und verbessert dadurch den Formgebungsprozess. Nach DIN 18948 ist ein Stärkezusatz von ≤ 1 M.-% zulässig.

Werkseitig eingearbeitete **Bewehrungen** (industriell hergestellte Matten, Gitter, Gewebe) aus Jute oder Glasfasergewebe dienen der mechanischen Stabilität der LP bei Transport, Lagerung und Verarbeitung.

Glasfasergewebe / -gitter sind abrollbare Glasfaser-Gittergewebe, Kett- / Schussfäden ca. 16/16 Fäden pro 10 cm, lichte Maschenweiten ca. 6 x 6 mm zur Oberflächen- bzw. zur Fugenarmierung von LP und an Materialübergängen. Glasfasergarn ist mit Polymerappretierung ausgestattet, alkalibeständig, unverrottbar und nach Nutzung als Abfall stofflich oder thermisch zu verwerten.

Jutegewebe sind Spezialgewebe aus biologisch abbaubarem Jute-Naturgarn, Kett- / Schussfäden ca. 20 / 20 Fäden je 10 cm, lichte Maschenweite ca. 5 x 5 mm zur Oberflächen- bzw. zur Fugenarmierung von LP und an Materialübergängen. Jutegarn ist mit Stärkeappretierung ausgestattet und biologisch abbaubar.

Werkseitig eingearbeitete Wärmeübertragungssysteme bestehen aus industriell hergestellten Kunststoff-Metall-Verbundrohren, Ø 16 x 2 mm (PE-RT/Aluminium/PE-RT), ca. 0,11 kg/m, sowie Zahnschienen aus Aluminium zur Fixierung der Rohre in der LP. Nach Ende der Nutzung als inerter Abfall zu deponieren.

Wasser ist „Anmachwasser“ zum Erreichen der geeigneten Verarbeitungskonsistenz der Arbeitsmasse und für den Formgebungsprozess der LP grundsätzlich notwendig. Durch Verdunstung des Anmachwassers erhärten LP und erreichen ihre vorgesehenen Produkteigenschaften. Erhärtete LP können durch Wasserzugabe replastifiziert und für neue LP oder in anderen Prozessen baustofflich verwertet werden.

3.3 Bereitstellung

Die identifizierten Baulehmkategorien [1] sind Ausgangsstoffe für die Herstellung von Lehmbaumstoffen. Sekundärrecyclinglehm verlässt den Lehm-Stoffkreislauf und wird zum Ausgangsstoff in einem anderen Produktsystem oder als Abfall deponiert. Die Baulehmkategorien müssen vor einer Bilanzierung im IM A1 hinsichtlich der Art ihrer Bereitstellung klassifiziert werden. Dabei sind vertragsrechtliche Aspekte bzgl. Bereitstellung / Verwertung / Entsorgung zu beachten, um die weitere Verwertung rechtssicher regeln zu können [3].

3.4 Verfügbarkeit

Alle mineralischen Rohstoffe sind in ihrer Verfügbarkeit als „geologisch gewachsene“ Naturstoffe generell begrenzt. Neben der primären Entnahme aus Ton- bzw. Sandgruben soll deshalb bevorzugt bei Erdarbeiten anfallender, geeigneter Bodenaushub als Sekundärrohstoff verarbeitet werden.

Bodenaushub bildet mit 130,3 Mio. t/a den größten Teil (59,6 %) der 218,8 Mio. t mineralischer Bauabfälle in Deutschland [10]. Die Verwendung von lehmhaltigem Bodenaushub als *Sekundärgrubenlehm* für die Herstellung von Lehmbaumstoffen spart Deponieraum, ersetzt Primärrohstoffe und verlängert dadurch deren Verfügbarkeit [1].

Ein bisher kaum erschlossenes Rohstoffpotenzial für die Herstellung von Lehmbaumstoffen ist die Rückgewinnung von LP oder von mineralischen Komponenten in LP aus Abbruchbauteilen / Baumischabfall als Primär- bzw. Sekundärrecyclinglehm [13].

Aufgrund der besonderen hydraulischen Eigenschaften des Bindemittels Lehm ist eine Replastifizierung und Wiederverwertung von LP nach DIN 18948 jederzeit möglich. Eine Rohstoffknappheit besteht nicht. Alle Pflanzenteile und -fasern, Jutegewebe sowie Holzteile sind nachwachsende Rohstoffe.

Die Rohstoffe für die industrielle Herstellung von Stärke werden aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen.

Glasfasergewebe / -gitter: Rohstoffe für industrielle Herstellung ausreichend vorhanden.

Werkseitig eingearbeitete Wärmeübertragungssysteme: Rohstoffe für industrielle Herstellung ausreichend vorhanden.

4 PRODUKTHERSTELLUNG

4.1 Herstellungsprozess

Für die Herstellung von LP sind nach DIN 18948 die Formgebungsverfahren „Streichen“, „Stampfen“ und „Pressen“ definiert. Im Rahmen der für diese Muster-UPD durchgeführten Recherche konnten keine deutschen Hersteller ermittelt werden, die LP nach dem Verfahren „Stampfen“ herstellen. Für das Verfahren „Pressen“ wurden dagegen die Varianten „formgepresst“ (vier Hersteller) und „stranggepresst“ (ein Hersteller) nachgewiesen. Ein Hersteller fertigt LP nach dem „Streichverfahren“.

4.1.1 Formgebungsverfahren „Streichen / bandgestrichen“

Das Prinzip des *Streichverfahrens* besteht in der Pressung und Trocknung einer zu einem Endlosstrang geformten pastösen Vormischung aus Baulehm und armierenden Pflanzenfasern / -teilen, Tonmehl und Perliten [11]. Die pastöse Masse wird auf ein gespanntes Trägergewebe (z. B. Jute) schichtweise aufgebracht („gestrichen“). Diese Unterbahn ist Transportband und verbleibt als Armierungsgewebe auf der Unterseite der fertigen LP. In die pastöse Masse werden armierende Schilfrohrmatten eingebettet, die der Platte mechanische Stabilität verleihen und das Gewicht reduzieren. Die Schilfrohrmatten und der Zusatz von Pflanzenfasern ermöglichen relativ geringe Rohdichten von 700 kg/m³ mit entsprechend erweiterter Anwendbarkeit im Trockenbau.

Eine von einer Rolle abgerollte Oberbahn aus Jute wird mit leichtem Andruck in die pastöse Masse eingefügt. Die „Sandwich-ähnlich“ aufgebaute Rohplatte wird auf die beabsichtigte Dicke (25, 20 oder 16 mm) unter leichtem Walzendruck verdichtet, im Endlosstrang durch einen gasbefeuchten Trockentunnel geführt und nach Längenvorgabe abgeschnitten. Temperatur, Feuchtegehalt und Durchlaufgeschwindigkeit des Stranges im Trockentunnel sind die relevanten Stell- bzw. Kontrollgrößen des Verfahrens.

Nach einer automatisierten Kalibrierung werden die LP auf Holzpaletten gestapelt und mit einer Schutzfolie transportfertig verpackt bzw. gesichert.

Bandgestrichene LP werden in Deutschland hergestellt und sind im Baustoffhandel verfügbar. Sie werden von dieser Muster-UPD jedoch nicht erfasst, weil derzeit keine Herstellerangaben für eine Ökobilanzberechnung vorliegen.

4.1.2 Formgebungsverfahren „Pressen / formgepresst“

Beim *Pressverfahren* wird die Arbeitsmasse mit einer Restfeuchte von 10 – 15 M.-% in Formrahmen gefüllt, einzeln hydraulisch zu LP gepresst und anschließend getrocknet. Die angewandten Trocknungsverfahren sind unterschiedlich, ebenso die Trocknungszeiten und -temperaturen. Die Hersteller setzen vor allem Erdgas-betriebene, wärmegeführte Blockheizkraftwerke (BHKW) ein und nutzen den Stromüberschuss am Produktionsstandort. Einige untersuchte LP enthalten zur Verbesserung der Bindekraft Polysaccharide als Zusatzmittel, z. B. Stärke bis zu 1 M.-%.

Die LP enthalten keine armerenden Holzspäne, Pflanzenfasern oder -teile. Einige LP erhalten zusätzlich Glasgewebe- oder Jutematten als Bewehrung. Nach Fertigstellung werden die LP auf Holzpaletten gestapelt und mit Schrumpffolie transportfertig verpackt.

Nach diesem Verfahrensprinzip entstehen auch Sonderformen, insbesondere LP mit integrierten Heiz- / Kühlrohren. Andere LP haben vorgefertigte Vertiefungen zur Montage von Heiz- / Kühlschlangen.

Bild 4.1 zeigt das Produktsystem „Lehmplatte, Pressen / formgepresst“ mit den relevanten Prozessmodulen für den IM A3 „Herstellung“ ohne Transporte. Abweichungen ergeben sich durch unterschiedliche Rezepturen der jeweiligen Hersteller (*Abs. 3.1*). So werden Stärke und Ziegelmehl nicht bei allen bekannten LP zugeführt. Dagegen sind natürliche Faseranteile fester Bestandteil der meisten Rezepturen für LP. Das Produktsystem umfasst die nachfolgenden Prozesse:

- Aufbereiteter Baulehm wird über Transportbänder dem Intensivmischer gravimetrisch dosiert zugeführt.
- Zerkleinerte Pflanzenfasern aus Stroh, Hanf und Miscanthus oder Holzspäne werden aus einem Vorratsbehälter volumetrisch dosiert dem Intensivmischer zugeführt.
- Kartoffel- oder Maisstärke wird in Säcken trocken angeliefert. Die Stärke wird in einem Behälter mit Wasser aufgelöst und über Schlauchpumpen dem Mischprozess gravimetrisch dosiert zugeführt.
- Mineralische Zusätze entsprechend den Vorgaben der DIN 18948. Einige Hersteller nutzen aufgemahlene, ungebrannte Ziegeleiabfälle zur Abmagerung der Mischungen. Die Zuführung erfolgt gravimetrisch dosiert.
- Der Mischvorgang wird über die Drehgeschwindigkeit des Mixers und die Mischzeit geregelt.
- Aus einem Zwischenspeicher wird die Arbeitsmasse über die Füllstation in Formkästen gefüllt und hydraulisch gepresst. Überschüssige Masse geht zurück in den Vorratsbehälter. Die Pressung lässt sich über den regelbaren Anpressdruck steuern.
- Die Ausformung bezeichnet die Entnahme der Plattenrohlinge aus der Pressform. Es erfolgt eine Sichtkontrolle. Ausschuss wird in den Formgebungsprozess zurückgeführt.
- Die feuchten Rohlinge werden in Trockenkammern getrocknet. Die Trocknung kann durch Temperaturregelung und Trocknungsdauer reguliert werden.
- Nach Aufstapeln der getrockneten LP auf Mehrweg-Holzpaletten wird das Paket mit Folie verpackt und witterungsgeschützt gelagert.

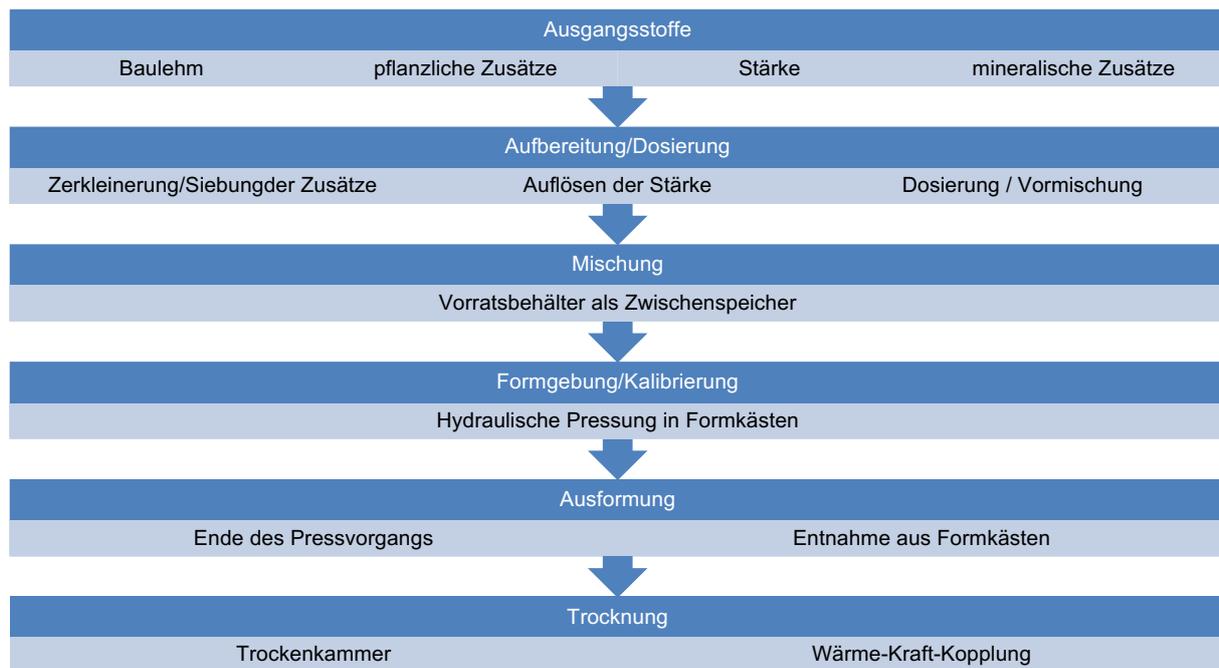


Bild 4.1 Herstellungsschema „Lehmplatten, formgepresst“

4.1.3 Formgebungsverfahren „stranggepresst“

Stranggepresste LP werden in Deutschland hergestellt und sind im Baustoffhandel verfügbar. Sie werden von dieser Muster-UPD jedoch nicht erfasst, weil derzeit keine Herstellerangaben für eine Ökobilanzberechnung vorliegen.

4.2 Gesundheits- und Arbeitsschutz Herstellung

Staubemissionen von pflanzlichen oder mineralischen Zusatzstoffen während des Produktionsprozesses werden durch Filter begrenzt. Ausgefilterte Zusatzstoffe werden wiederverwendet. Die Grenzwerte der TA Luft [12] werden eingehalten.

4.3 Umweltschutz Herstellung

4.3.1 Abfall

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

4.3.2 Wasser / Boden

Belastungen von Wasser / Boden entstehen nicht. Die erfassten und beschriebenen Herstellungsverfahren arbeiten abwasserfrei.

4.3.3 Lärm

Die geforderten Grenzwerte werden eingehalten.

4.3.4 Luft

Bei Lufttrocknung der LP entsteht ausschließlich unschädlicher Wasserdampf.

Bei künstlicher Trocknung der LP (Trockenkammern) entstehende Emissionen liegen unter den Grenzwerten der TA Luft [12]. Maßnahmen des Umweltschutzes sind ausgerichtet auf möglichst geringen Energieverbrauch und schadstoffarme Abluft.

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

5 PRODUKTVERARBEITUNG

5.1 Verarbeitungshinweise

Die Verarbeitung der LP erfolgt nach DIN 18948 und LR DVL [2].

LP des Typs A nach *Tab.2.2* werden, wenn vom Hersteller nicht anders angegeben, mit der Unterkonstruktion punktuell vernagelt, verschraubt oder geklammert (Beplankung). LP des Typs B werden, wenn vom Hersteller nicht anders angegeben, vollflächig mit Lehmkleber auf den Untergrund geklebt (Bekleidung).

LP zur Bekleidung / Beplankung von Bauteilen sind Teil eines Bausystems. Die Eigenschaften der Systemkomponenten müssen aufeinander abgestimmt und insgesamt zur Erstellung eines gebrauchstauglichen Bauteils geeignet sein. Die Systemkomponenten sind vom Systemanbieter zu benennen und zu beschreiben (DIN 18948, B.1, B.2). Für LP des Typs A (Beplankung) muss der erreichbare Einbaubereich EB gemäß DIN 4103-1 deklariert werden (EB1: Bereiche mit geringer Menschenansammlung, EB2: Bereiche mit großer Menschenansammlung).

Nichttragende innere Trennwände mit Beplankung aus LP müssen derart konstruiert sein, dass die unmittelbare Anbringung von *leichten Konsollasten* nach DIN 4103-1 möglich ist. Der Hersteller wählt und deklariert die geeignete Befestigungsart und entsprechende Befestigungsabstände. Dabei wird die Einhaltung folgender, am System ermittelter Grenzwerte empfohlen (DIN 18948, B.2.2):

- oberer Abstand zwischen Konsole und Beplankungsebene, verursacht durch den Auszug des Dübels: ≤ 2 mm,
- Biegung der Platte, gemessen auf der Rückseite der LP auf Höhe des Befestigungsmittels mittig zwischen den Ständern: $\leq 2,5$ mm,
- Senkung der Konsole am vorderen Ende: ≤ 5 mm.

Nichttragende innere Trennwände mit Beplankung aus LP müssen derart konstruiert sein, dass sie ausreichend widerstandsfähig gegen „*harten und weichen Stoß*“ nach DIN 4103-1 sind. Dies ist entsprechend nachzuweisen.

LP des Typs A, die zur Beplankung von Decken und Dachschrägen eingesetzt werden, müssen über eine ausreichende Formstabilität verfügen. Dabei dürfen im vom Hersteller angegebenen Unterkonstruktionsraster im System keine relevanten *Verformungen unter Dauerlast* eintreten (bei Eigenlasten und zusätzlichen Flächenlasten von $0,10 \text{ kN/m}^2 \leq 1$ mm). Bei einer zusätzlichen Eigenlast in Feldmitte von $0,06 \text{ kN}$ darf die Verformung der LP 2 mm nicht überschreiten. Die Notwendigkeit einer Prüfung ist vom Hersteller eigenverantwortlich festzulegen. Die Prüfdauer beträgt 10 Tage.

Bei der Beplankung von Holzständerkonstruktionen mit LP des Typs A sind die Herstellerangaben zur Wahl der Befestigungspunkte entsprechend des vorgegebenen Systemrasters der Unterkonstruktion einzuhalten. Vom Systemanbieter sind weiterhin geeignete Befestigungsmittel an die Unterkonstruktion sowie für Konsollasten zu benennen. Die Platten werden versetzt befestigt und auf den Ständern der Unterkonstruktion (entsprechend bei Decken und Dachschrägen) gestoßen.

Für die Verarbeitung von LP kommen i. d. R. übliche Geräte des Trockenbaus (z. B. Stichsäge, Handkreissäge, Trennscheibe) zum Einsatz. Für die weitere Verarbeitung sind die Herstellerangaben insbesondere zur Bewehrung der Plattenfugen, der Bewehrung von nachfolgenden Lehmputzbeschichtungen sowie bei LP mit integrierten Temperierungssystemen (*Bild 5.1*) zu beachten.

An die Baustelle gelieferte LP müssen trocken und witterungsgeschützt gelagert werden.

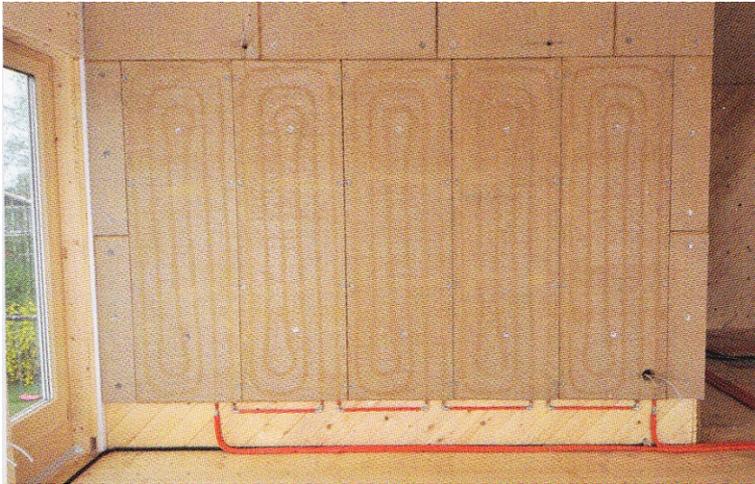


Bild 5.1 LP mit integriertem Temperierungssystem in montiertem Zustand (WEM Wandheizung)

5.2 Arbeitsschutz / Umweltschutz

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

Während der Verarbeitung von LP sind keine besonderen Maßnahmen zum Schutz der Umwelt zu treffen. Staubemissionen, z. B. bei Schneid- und Trennarbeiten, liegen unterhalb der geforderten Grenzwerte zur Staubfreisetzung der TA Luft [12]. Vorsorglich werden Atemschutzmasken verwendet.

Die Einzelgewichte der LP liegen im Rahmen der Empfehlungen der Bauberufsgenossenschaft von 25 kg. Die LP können deshalb von Hand nach den Regeln des Trockenbaus versetzt werden.

5.3 Restmaterial

Auf der Baustelle anfallende Verpackungen und Mehrwegpaletten aus Holz und LP-Reste werden getrennt gesammelt.

LP-Reste können von den Herstellerwerken zurückgenommen und dort ggf. in den Produktionsprozess zurückgeführt werden.

5.4 Verpackung

Mehrwegpaletten aus Holz werden vom Hersteller oder durch den Baustoffhandel zurückgenommen (Pfandsystem) und in den Produktionsprozess zurückgeführt.

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

Die Hersteller sind verantwortlich für den Nachweis des Entsorgungssystems und der Verwertung.

6 NUTZUNGSZUSTAND

6.1 Inhaltsstoffe

Bei der Produktion von LP werden die natürlichen Rohstoffe Baulehm und ggf. organische (pflanzliche Fasern und weitere Zusatzstoffe mit >1 M.-% nach *Abs. 3* verwendet. Diese Inhaltsstoffe sowie die ggf. eingesetzten Bewehrungsgewebe sind im Nutzungszustand durch die Tonminerale des Baulehms als feste Stoffe im Bauteil gebunden. Dieser Verbund ist wasserlöslich.

6.2 Wirkungsbeziehungen Umwelt / Gesundheit

LP der beteiligten Hersteller enthalten keine schädlichen Stoffe wie z. B. flüchtige organische Komponenten (VOC, TVOC), Formaldehyd, Isocyanate usw. [8]. Entsprechende schädigende Emissionen sind deshalb auch nicht zu erwarten. LP sind im verarbeiteten Zustand geruchsneutral.

Die Mikroporenstruktur der Tonminerale des Baulehms ermöglicht eine rasche, besonders hohe Adsorption / Desorption von überschüssigem Wasserdampf im Innenraum. Bauteile aus LP tragen deshalb zu einem ausgeglichenen Innenraumklima bei. LP der beteiligten Hersteller können den in *Tab. 2.4* ausgewiesenen Wasserdampfadsorptionsklassen WS II und WS III gemäß DIN 18948 zugeordnet werden.

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

Die natürliche ionisierende Strahlung der LP ist sehr gering und gesundheitlich unbedenklich. Die deklarierten LP weisen einen Aktivitätskonzentrationsindex $I < 1$ gemäß DIN 18948 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 LP ist deshalb auf den Bereich des deklarierten Plattentyps nach *Tab. 2.2* beschränkt. Bauteile mit Beplankungen / Bekleidungen aus LP sind über den gesamten Nutzungszeitraum vor stehendem und fließendem Wasser oder dauerhafter Durchfeuchtung zu schützen. LP sind darüber hinaus für eine Anwendung in Spritzwasserbereichen von Küchen und Bädern sowie in Räumen mit dauerhaft stark erhöhter Luftfeuchte (z. B. Schwimmbäder, gewerbliche Küchen) ungeeignet.

LP mit werkseitig eingearbeiteten Temperierungssystemen enthalten wassergefüllte Rohrschlangen. Um Beschädigungen der Rohrleitungen beim Anbringen von Befestigungsmitteln während der Nutzungsphase zu vermeiden, wird eine von Produktherstellern angebotene Temperaturfolie zur Identifizierung der Lage der Rohrleitungen in der Wand empfohlen.

Die deklarierten LP erfüllen die Anforderungen an die Maßhaltigkeit der auf die Baustelle gelieferten Produkte entsprechend *Tab. 2.2*.

Im Ergebnis der ermittelten Verformungen infolge Feuchteinwirkung erfüllen die deklarierten LP die Anforderungen an die Feuchtetoleranzklasse FTK III nach *Tab. 2.4* als Mindestanforderung.

7 AUSSERGEWÖHNLICHE EINWIRKUNGEN

7.1 Brand

LP 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. Eine der untersuchten LP ist der Baustoffklasse A1 zugeordnet, eine andere der Baustoffklasse B2.

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

Zur Brandbekämpfung eingesetztes Löschwasser kann Schäden an Bauteilen aus LP erzeugen. Abgeschwemmtes Material von LP im Löschwasser erzeugt keine Umweltrisiken.

7.2 Hochwasser

Unter Wassereinwirkung (z. B. Hochwasser) können LP replastifiziert und ausgewaschen werden. Dabei werden keine wassergefährdenden Stoffe freigesetzt. Aufgeweichte Bereiche müssen ggf. auf ihre Stabilität untersucht werden.

7.3 Havarie Wasserleitungen

Infolge von Schäden an Wasserleitungen kann im Gebäude Wasser austreten und verarbeitete LP aufweichen. Aufgeweichte Bereiche müssen ggf. auf ihre Stabilität untersucht werden.

8 HINWEISE ZUR NUTZUNGSPHASE

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

Die dynamische Luftfeuchtesorption von LP in der Nutzungsphase hat Auswirkungen auf das Raumklima und trägt damit zur energetischen Optimierung notwendiger Luftwechselraten bei. Entsprechende Nachweise nach DIN 18948, A.2 sind in *Abs. 6.2* dokumentiert.

Die Lebensdauer von verarbeiteten LP 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 LP

Der Haltbarkeitszeitraum von LP liegt i. a. über dem Nutzungszeitraum der errichteten Gebäude. Bauteile, in denen LP verarbeitet wurden, können i. d. R. in einfacher, manueller Weise zurückgebaut werden. Nach Entfernung anhaftender mitverarbeiteter Baustoffe (z. B. Fugenbewehrungen) können LP bei zielgerichteter Demontage für den gleichen Zweck wiederverwendet werden.

Bei einer Wiederverwendung dürfen die zurückgebauten LP keine Spuren aus chemischen / biologischen Einwirkungen aus der zurückliegenden Nutzung enthalten (bauschädigende Salze, Moose / Algen, Hausschwamm, Schimmelpilze usw.). Gleiches gilt für die Weiterverwertung von gelösten mineralischen Komponenten aus den LP als Ausgangsstoffe für andere Baustoffe (Sekundärrecyclinglehm).

Durch Demontage (Abschrauben) oder bei Gebäudeabriss sortenrein und frei von Reststoffen (z. B. Altanstriche) gewonnene LP ohne synthetische / pflanzliche Bewehrungsgewebe können durch Wasserzugabe ohne zusätzlichen Energieaufwand replastifiziert und als Primärrecyclinglehm einem erneuten Formgebungsprozess zugeführt und wiederverwertet werden. Ihre ursprüngliche Zusammensetzung entspricht nach praktischen Erfahrungen den für eine Wiederverwertung als LP geforderten Eigenschaften. Ggf. ist eine Abmagerung durch Sand oder Ergänzung von pflanzlichen Zusätzen erforderlich [13].

Alternativ lassen sich demontierte LP ohne Bewehrungsgewebe maschinell zerkleinern und als getrocknetes Recyclingmaterial, vorwiegend Baulehm, als Ausgangsstoff für neue, andere Lehmbauprodukte wiederverwerten.

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

Sofern die o. g. Möglichkeiten der Wiederverwertung nicht praktikabel sind, können sortenrein aus Gebäudeabriss gewonnene LP ohne synthetische / pflanzliche Bewehrungsgewebe mit natürlichen mineralischen Zusatzstoffen und einem homogen verteilten Gehalt an natürlichen organischen Zusatzstoffen ≤ 1 M.-% nach Aufbereitung zu rezyklierter Körnung wie Bodenaushub weiterverwertet werden, z. B. im Landschaftsbau, zur Rekultivierung, zur Trassierung von Verkehrswegen oder in der Land- und Forstwirtschaft. Dabei sind die Zuordnungswerte Z der Landesarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) zu beachten [14].

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 LP entstehen keine Produktionsabfälle.

9.3 Entsorgung

Bei Gebäudeabriss zurückgebaute, nicht sortenrein gewinnbare LP, die für eine Weiterverwertung ungeeignet sind, können auf Grund ihres chemisch neutralen und inerten Verhaltens auf Deponien der Deponiekategorie A eingelagert werden (AVV Abfallschlüssel 17 09 04 [3]). Sie stellen keine außergewöhnlichen Belastungen für die Umwelt dar und können in *Tab. A.4* als Siedlungsabfall (NHWD) deklariert werden.

10 NACHWEISE

10.1 Produkterstprüfung nach DIN 18942-100

Liegt dem Programmbetreiber vor.

10.2 VOC, TVOC

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

Tab. 10.1 Mustertabelle für VOC u. TVOC von LP

Prüfparameter	Konzentration nach 3 Tagen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Grenzwert
VOC (inkl. VVOC u. TVOC)		
TVOC (Summe flüchtige organische Verbindungen incl. SVOC)		
VOC	<i>flüchtige organische Verbindungen</i>	
VVOC	<i>leicht flüchtige organische Verbindungen</i>	
SVOC	<i>schwerflüchtige organische Verbindungen</i>	
TVOC	<i>Summe flüchtiger organischer Verbindungen</i>	

10.3 Radioaktivität

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

TEIL A SACHBILANZ

A.1 Funktionale Einheit

Die funktionale Einheit für die Herstellung von LP ist in DIN 18948, A.3 sowie in der entsprechenden PKR [4] geregelt und wird volumenbezogen mit einem Kubikmeter (1 m^3) festgelegt.

A.2 Betrachtungszeitraum

Die eingesetzten Mengen an Rohstoffen, Energien sowie Verpackungen sind als Mittelwert von zwölf Monaten in den betrachteten Werken berücksichtigt. Diese Daten wurden für das **Jahr 2021** mit einem strukturierten Fragebogen erhoben.

A.3 Ergebnisse der Sachbilanz

Die Sachbilanz nach DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044 bzw. DIN EN 15804 dient der Quantifizierung der In- und Outputströme des Produktsystems LP auf Basis der Datenerhebung bei beteiligten Herstellern.

Alle Daten beziehen sich auf hydraulische Pressverfahren (*Abs. 4.1*). Diese Verfahrensart ist branchen- und produkttypisch. Die untersuchten Pressverfahren wenden unterschiedliche Trocknungstechniken an. Betrachtet werden zwei vergleichbare Herstellungsverfahren mit gasbetriebenen Blockheizkraftwerken (BHKW) zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK).

Tab. A.1 bildet die Sachbilanz für LP mit der Bandbreite der unterschiedlichen Rezepturen ab. Der Hauptausgangsstoff ist Baulehm mit unterschiedlichen mineralischen und natürlichen Zusatzstoffen. Als Hauptenergieinput wurde Erdgas für die Trocknung und geringfügiger Zusatzstrom zur Kraft-Wärme-Kopplung angenommen. Weitere Inputfaktoren sind die Verbräuche von Diesel im Werk und Frischwasser sowie Verpackungsmaterial. Outputfaktoren sind Abfälle aus Vorprodukten und exportierte elektrische Energie aus der Kraft-Wärme-Kopplung der eingesetzten BHKW.

Die untersuchten LP bestehen zu 48 – 87 % aus Baulehm. Der Baulehm stammt je nach Hersteller zu 16 % bzw. 100% als Sekundärgrubenlehm aus der Kiesgewinnung oder anderen Erdaushüben. Die Anteile des Sekundärgrubenlehms variieren je nach Rohstoffquelle der befragten Hersteller.

Die in Tab. A.1 aufgelisteten mineralischen und pflanzlichen Zusatzstoffe sowie Stärke als Vorprodukt entsprechen den Vorgaben der DIN 18948. Die Hersteller verwenden spezifische Rezepturen, z. B. bis zu 12 M.-% Holzspäne oder < 5 M.-% Pflanzenmischung aus Hanf, Miscanthus und Stroh als pflanzliche Armierungszusätze. Maisstärke < 1 M.-% wird bei einem der analysierten Prozesse als Zusatzstoff genutzt.

Zur Trocknung der gepressten Lehmmischungen setzen die betrachteten Herstellungsverfahren wärmegeführte, mit Erdgas betriebene BHKW ein. Der Erdgas-Input zur Trocknung schwankt nach Herstellerangaben zwischen 3.017 und 4.410 MJ/m³ LP. Bezogen auf das gesamte erfasste Produktionsvolumen von 2.277 m³ beträgt der durchschnittliche Erdgas-Input 2.808 MJ/m³ LP. Die aus der KWK resultierenden Netto-Stromüberschüsse nach Eigenverbrauch für die LP-Produktion haben eine Bandbreite von 911 bis 2.160 MJ/m³ LP je nach Produktionsvolumen. Bezogen auf das gesamte erfasste Produktionsvolumen beträgt der durchschnittliche Netto-Stromüberschuss 2.059 MJ/m³ LP.

Die Annahmen zum Energieinput für die technische Trocknung skizzieren ein worst-case-Szenario ohne Szenarien zu Prozessoptimierungen durch Effizienzmaßnahmen oder den Einsatz nicht-fossiler Energieträger. Beispiele für mögliche Verbesserungen der Energieeffizienz wären Wärmerückgewinnungssysteme, kombinierter Einsatz von Wärmepumpen oder sensorgesteuerte Luftstromführung. Die Muster-UPD berechnet einen Durchschnittswert auf Basis zusammengefasster Herstellerangaben, produkt- und herstellerspezifische UPD können signifikant abweichen.

Tab. A.1 Sachbilanz der untersuchten LP

Produkte	Daten			Erläuterungen
Lehmplatte 20mm/33kg/m²	m ³			$\rho_d = 1.400 - 1.450 \text{ kg/m}^3$
Volumen	2.100 m ³	177 m ³		erfasstes Gesamtvolumen: 2.277 m ³
INPUT	LP 1	LP 2	Einheit	Bemerkungen
Ausgangsstoffe				
Baulehm	1.262	645	kg/m ³	
Gesteinskörnung 0/2	0	698	kg/m ³	nach Rezeptur unterschiedlich
Holzspäne, unbehandelt	174	0	kg/m ³	nach Rezeptur unterschiedlich
Pflanzenteile (Hanf, Miscanthus, Stroh)	0	57	kg/m ³	nach Rezeptur unterschiedlich
Stärke	14	0	kg/m ³	nach Rezeptur unterschiedlich
Bewehrungsgewebe	0	6	kg/m ³	nach Rezeptur unterschiedlich
Strom (zusätzlich)	0	36	MJ/m ³	nach Prozess variierend
Brennstoff (BHKW)				
Erdgas	4.410	3.017	MJ/m ³	Gasverbräuche für BHKW nach Leistungsdaten
Betriebsmittel				
Diesel	3,8	0	kg/m ³	nicht bei allen Herstellern
Frischwasser	0,02	0,14	m ³ /m ³	mit Vorprodukten
Holzpaletten			kg/m ³	teilweise Mehrweg
PE Folie			kg/m ³	t= 0,017 mm

Output				
Abfälle	1,9	2,7	kg/m ³	mit Vorketten
exportierte elektrische Energie EEE	2.160	911	MJ/m ³	Nach Hersteller unterschiedliche Stromüberschüsse WKK aus Gas-BHKW

TEIL B ÖKOBILANZ

Die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO14044 zur Erstellung einer Typ III UPD nach DIN EN 15804 beruht auf einer Lebenszyklusanalyse (LCA) von LP der beteiligten Hersteller, bei der für jede deklarierte Zyklusstufe die Ressourcenverbräuche und entsprechende potenzielle Umweltwirkungen abgeleitet werden. Die Bilanzdaten sind Durchschnittswerte bezogen auf das angegebene Gesamtvolumen von 2.277 m³.

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 / Konstruktionen mit LP. Ein weiteres Ziel bezieht sich auf die Optimierung von Produktionsprozessen und Verfahrenstechniken durch das Aufzeigen ökologischer Schwachstellen, durch deren Beseitigung Umweltbelastungen reduziert werden können. Ein drittes Ziel ist die Beantwortung der Frage, ob sich aus Gebäudeabbruch oder Demontage zurückgewonnene LP mit „ökologischem Gewinn“ wiederverwenden bzw. wiederverwerten lassen.

B.2 Zielgruppen der Analyse

Zielgruppen der Analyse sind Hersteller, Anwender von LP, Planer und Entscheidungsträger, die die Ergebnisse zur ökologischen Optimierung eines Bauteils oder Bauwerks verwenden können.

B.3 Referenznutzungsdauer

Die Referenznutzungsdauer (RSL – Reference Service Life) ist die Nutzungsdauer, die unter der Annahme bestimmter Nutzungsbedingungen (z. B. Standardnutzungsbedingungen) für ein Bauprodukt zu erwarten ist. Mit Bezug auf den Nutzungsdauerkatalog der Bau-EPD GmbH, Version 2014 [16] wird eine RSL für LP von 50 Jahren zugrunde gelegt.

B.4 Abschneidekriterium

Entsprechend DIN 18948, A.3 werden alle Stoffflüsse berücksichtigt, die in das Produktionssystem fließen (Inputs) und mehr als 1 % der Gesamtmasse der Stoffflüsse oder mehr als 1 % des Primärenergieverbrauchs betragen.

Abweichend davon werden auch alle Stoffflüsse erfasst, die das System verlassen (Emissionen) und deren Umweltauswirkungen > 1 % der gesamten Auswirkungen einer in der Bilanz berücksichtigten Wirkungskategorie darstellen. Das trifft insbesondere auf Pflanzenanteile in LP zu.

Innerhalb dieses Systems werden LP entsprechend ihres Formgebungsverfahrens „formgepresst“ analysiert. Die zur Herstellung benötigten Maschinen, Anlagen und Infrastruktur wurden nicht bilanziert.

B.5 Annahmen und Abschätzungen

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

Grubenlehm (Abs. 3.2): Die Angaben der Hersteller zur Bereitstellung des Ausgangsstoffes Grubenlehm (Erdaushub) werden getrennt nach Primär- und Sekundärgrubenlehm erfasst:

Bei *Primärgrubenlehm* wird der gesamte Abbauprozess mit Rekultivierungsmaßnahmen bewertet. Der Ressourceneinsatz und die Umweltwirkungen der Prozesse des Grubenbetriebes entfallen auf die Lehmbaumprodukte.

Sekundärgrubenlehm wie auch Recyclinglehm entstammen Vorprozessen, die ursprünglich mineralische Abfallstoffe außerhalb der Systemgrenze waren und sich beim Eintritt in das System LP zu Ausgangsstoffen für deren Herstellung verwandeln. Diese Vorprozesse außerhalb des Systems werden in der Bilanz nicht berücksichtigt.

Für den Abbau von Primärgrubenlehm sowie den bereitgestellten Sekundärgrubenlehm wurden folgende Annahmen getroffen: erdfeucht, mittelbindig, steife Konsistenz, Gewinnungsklasse GK 3 – 4 nach DIN 18300:2012-09, Feuchtrohdichte $\rho = 2.000 \text{ kg/m}^3$.

Verpackungen: *Holzpaletten* lassen sich dem System nicht zuordnen, weil sie 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.

PE-Folien schützen die pallettierten LP. Die Folie umschließt eine Palette mit 40 LP ($t = 20 \text{ mm}$). Der Masseanteil der Folie und deren anteilige Primärenergiegehalte liegen unterhalb des Abschneidekriteriums und werden nicht berücksichtigt.

Pflanzenanteile: Für *Hanf*-, *Miscanthus*- und *Strohfasern* fand die UPD Baustroh [17] Anwendung. Die darin enthaltenen energetischen Rückgewinnungspotenziale blieben unberücksichtigt, nicht jedoch das gebundene CO_2 in Höhe von 1,27 kg/ kg Stroh.

Holzspäne: Die Umrechnung der Holzmasse in CO_2 erfolgt über die im Holz enthaltene Kohlenstoffmenge und das Verhältnis der Molmassen von CO_2 zu Kohlenstoff C (44/12). Der C-Gehalt im Holz wird für alle Holzarten mit 50 % der absolut trockenen Holzmasse angenommen. Somit entspricht 1 kg absolut trockene Holzmasse etwa 1,832 kg CO_2 [18]. Die verwendeten Holzspäne sind nicht absolut trocken, sie entstehen bei der Verarbeitung von unterschiedlichen Hölzern mit nicht definierten Restfeuchten. Die angelieferten Holzspäne werden im Werk nicht weiter getrocknet, zumal sie zusammen mit Baulehm und Wasser vermischt werden. Angenommen wird ein Sicherheitsabschlag auf die CO_2 -Speicherung einer absolut trockenen Holzmasse von -30 % durch die in den Holzspänen enthaltene Restfeuchte von bis zu $w = 30 \%$ (fasergesättigt).

Während des Baumwachstums wird der Atmosphäre durch die Photosynthese CO_2 entzogen und in Form von C in das Holz einlagert. Am Ende des Lebenszyklus eines Holzproduktes wird dieser C nur bei energetischer Verwertung wieder in die Atmosphäre entlassen. LP werden am Lebensende nicht energetisch, sondern ausschließlich stofflich verwertet. Somit verbleibt das gebundene CO_2 im System.

Demontage (C1): LP finden ausschließlich Anwendung im Trockenbau als Decken- und Wandbekleidung. Die LP werden entsprechend der Herstellerangaben auf einem Ständerwerk verschraubt oder

verklammert (*Abs. 5.1*). Die LP lassen sich weitgehend zerstörungsfrei und einfach manuell demontieren, etwa bei Umbauten in Gebäuden. Ein Gebäudeabriss ist nicht erforderlich. Einige Hersteller des DVL bieten die Rücknahme demontierter LP an. Auf eine Quantifizierung des Demontageaufwandes wurde verzichtet, da es sich überwiegend um manuelle Arbeit handelt.

Abfallaufbereitung (C3): Die Annahmen zum IM C3 basieren auf Untersuchungen der FH Potsdam zur Aufbereitung von LP durch Auflösung in Wasser (Einsumpfen / Nassverfahren) und trockenes Zermahlen (Trockenverfahren) [13]. Dabei wurde eine im Baustoffrecycling übliche Schreddertechnik mit einem Prallbrecher unterstellt. Dazu wurde die Stoffzusammensetzung hinsichtlich der Möglichkeit der Wiederverwertung für neue LP oder zur Weiterverwertung für andere Lehmbaustoffe labor-technisch analysiert.

Rückgewinnungspotenzial (D): Eine direkte Wiederverwendung demontierter LP ersetzt den gesamten Produktionsdurchlauf und verschafft rückgebauten LP einen weiteren Lebenszyklus (IM D1).

Die Realisierung der Szenarien zu den Rückgewinnungspotenzialen (IM D2 – D3) für LP ist abhängig von der Entwicklung betriebswirtschaftlich sinnvoller, praxistauglicher Rückbautechniken und Aufbereitungsverfahren für sortenrein zurückgewonnene LP. Die nach dem Nassverfahren rückgewinnbaren Inhaltsstoffe ermöglichen die Substitution der Ausgangsstoffe zur Wiederverwertung für neue LP (IM D2). Die nach dem Trockenverfahren rückgewinnbaren trockenen mineralischen Inhaltsstoffe ermöglichen die Substitution originär hergestellter Vorprodukte / Komponenten (Trockenlehm / Tonmehl, Sand) zur Wiederverwertung für andere trocken hergestellte Lehmbaustoffe (IM D3).

B.6 Datenqualität

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

Die Datenerfassung für die untersuchten Produkte und Verfahren erfolgte durch Befragung von zwei der insgesamt fünf LP-Hersteller im DVL mittels eines strukturierten Erhebungsbogens. Alle Daten und Berechnungen sind beim Programmbetreiber DVL hinterlegt. Die untersuchten, nach dem in *Abs. 4.1.2* beschriebenen Verfahren hergestellten LP sind typisch für die am Markt befindlichen Produkte in Deutschland.

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

Tab. B.1 Übersicht Datengrundlagen¹

Nr.	Daten	Hintergrunddatensätze
1	Primärgrubenlehm	Ecoinvent 3.9, Nov. 2015 [19]; UBA ProBas Abbau Tonabbau 2020; UBA ProBas 2000 Bereitstellung Grubenlehm
2	Sekundärgrubenlehm	Bodenabfall aus der Kiesgewinnung (ohne Aufbereitung) außerhalb der Systemgrenze
3	Trockenlehm	UPD LPM DVL [20]; EMAS Herstellerdaten; UBA proBAS Gesteinsmehl 2004
4	Stroh, Hanf, Miscanthus	FASBA EPD Baustroh [17]
5	Holzspäne	Forschungszentrum Karlsruhe/ BFH [19]
6	Elf. Energie regenerativ (z. B. Wasserkraft)	ÖKOBAUDAT [21]; GEMIS 5.0 [22]
7	Elf. Energie DE Strommix 2015	ÖKOBAUDAT 09.02.05, Juni '21 [21]; UBA ProBas 2020, Studie Climate Change 13/2020

8	Erdgas	GEMIS 5.0 [22]; UBA ProBas 2010; ÖKOBAUDAT [21] 09.02.01
9	Transport zum Werk (35-40 t, EURO 5, 27 t Nutzlast, 85 % Auslastung)	ÖKOBAUDAT 9.3.01 Juni 21[21]
10	Transport im Werk (Diesel, Gas, Strom)	ÖKOBAUDAT 09.02.03, Juni '21 [21]
11	Abfallaufbereitung	FH Potsdam [13]; Herstellerdaten REMAX SMA 200 [25]
12	Rückgewinnungspotenzial	FH Potsdam [13]; UPD LPM DVL [20]

¹ Bei Vorliegen mehrerer Datenquellen wurde die worst-case Variante übernommen. Zusätzlich zu Datenbanken und originären Daten wurden Normen und Fachliteratur herangezogen (s. Literaturnachweis).

B.7 Allokation

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

Grubenlehm als Sekundärrohstoff wird als bei der Kiesgewinnung abfallender Bodenaushub bereitgestellt und für LP stofflich wiederverwertet. Der Hauptanteil der Belastungen wird entsprechend der nach DIN EN ISO 14044:2018, Abs. 4.3.2 zugrunde gelegten physikalischen Allokation der Kiesgewinnung als Hauptprodukt zugewiesen.

Wird Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genutzt, entstehen Wärme und Strom gleichzeitig am selben Produktionsstandort. Zur Trocknung der LP sind die BHKW wärmegeführt. Der Stromüberschuss nach Eigenverbrauch für die Herstellung von LP wird in anderen Prozessen am Produktionsstandort eingespeist. Die Sachbilanz weist die überschüssige Strommenge als exportierte elektrische Energie in MJ/m³ LP aus (EEE, Tab. B.5). Die Allokation von Wärme und Strom aus gekoppelten Prozessen wird nach verschiedenen Methoden berechnet [27] und das worst case Szenario zugrunde gelegt.

B.8 Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (LCA)

Für das Produkt „Gebäude“ sind alle IM A – D nach Tab. B.3 – B.5 zu berücksichtigen. In der Produktebene „Baustoff“ entstehen in der Errichtungs- und Nutzungsphase mit LP i. d. R. keine Ressourcenverbräuche mit entsprechenden Umweltauswirkungen. Nach DIN EN 15804 ist die Deklaration der IM A1 – A3, C 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 LCA-Analyse der von den Herstellern bereitgestellten Daten zugrunde gelegt. Die Daten sind Durchschnittswerte vergleichbarer Prozesse der beteiligten Hersteller, die LP hydraulisch pressen und mit der Abwärme gasbetriebener Blockheizkraftwerk (BHKW) trocknen.

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 ²	IRP	kBq U235-Äq.	Potenzielle Wirkung durch Exposition des Menschen mit U235 (IRP: Ionizing Radiation Potential)
3	Ökotoxizität (Süßwasser) ¹	ETP-fw	CTUe	Potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für Ökosysteme (CTUe: Comparative Toxic Unit for ecosystems; ETP: Ecological Toxic Potential)

4	Humantoxizität kanzerogene Wirkungen ¹	HTP-c	CTUh	Potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen (CTUh: Comparative Toxic Unit for humans; HTP-c: Human Toxic Potential-carcinogenic)
5	Humantoxizität nicht kanzerogene Wirkungen ¹	HTP-nc	CTUh	Potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen (HTP-nc: Human Toxic Potential-non carcinogenic)
6	Mit der Landnutzung verbundene Wirkungen / Bodenqualität ¹	SQP	-	Potenzieller Bodenqualitätsindex (SQP: Soil Quality Index)

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

Tab. B.3 Ökobilanz für 1 m³ Lehmplatte – Inputfaktoren

Deklaration der Umweltwirkungsfaktoren, abgeleitet aus der LCA											
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA											
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM											
Lehmplatten 20mm nach DIN 18948 - Durchschnittswerte nach Erhebung 2021											
Funktionale Einheit m ³	Parameter	PERE	PERM	PERT	PENRE	PENRM	PENRT	SM	RSF	NRSF	FW
1.425 kg/m ³	IM/Einheit	MJ H _u	kg	MJ H _u	MJ H _u	m ³					
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	1,67E+01	5,72E+01	7,39E+01	6,26E+02	1,70E-01	6,26E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,59E-02
	Transport	A2	1,75E+00	0,00E+00	1,75E+00	2,60E+01	0,00E+00	2,60E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,02E-03
	Herstellung	A3	1,25E+01	0,00E+00	1,25E+01	4,86E+03	0,00E+00	4,86E+03	0,00E+00	0,00E+00	1,62E-02
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	3,10E+01	5,72E+01	8,82E+01	5,51E+03	1,70E-01	5,51E+03	0,00E+00	0,00E+00	3,41E-02
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung	C3	6,03E-05	0,00E+00	6,03E-05	1,65E-02	0,00E+00	1,65E-02	1,00E+00	0,00E+00	8,00E-08
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwendung LP	D1	-2,79E+01	-5,15E+01	-7,94E+01	-4,96E+03	-1,53E-01	-4,96E+03	9,00E-01	0,00E+00	-3,07E-02
	Wiederverwertung neue LP	D2	-1,17E+01	-1,88E+01	-3,05E+01	-5,88E+02	-1,70E-01	-5,88E+02	9,00E-01	0,00E+00	-7,94E-03
	Wiederverwertung Komponenten	D3	-3,39E+01	0,00E+00	-3,39E+01	-6,60E+02	0,00E+00	-6,60E+02	9,00E-01	0,00E+00	0,00E+00

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 ausgenommen nicht erneuerbare Energieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

PENRM = Nutzung nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

PENRT = Gesamtnutzung nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen (Primärenergie und Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden)

SM = Nutzung von Sekundärstoffen

RSF = Nutzung erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

NRSF = Nutzung nicht erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

FW = Nettonutzung von Frischwasser

MB = Modul beschrieben

MND = Modul nicht deklariert

MNR = Modul nicht relevant

Tab. B.4 Ökobilanz für 1 m³ Lehmplatte – Umweltwirkungsfaktoren

Deklaration der Umweltwirkungsfaktoren, abgeleitet aus der LCA															
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA															
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM															
Lehmplatten 20mm nach DIN 18948 - Durchschnittswerte nach Erhebung 2021															
Funktionale Einheit m ³	Parameter	GWP (total)	GWP (biogen)	GWP (Luftug)	GWP (fossil)	ODP	POCP	AP	EP (terrestrial)	EP (freshwater)	EP (marine)	WDP	ADPE	ADPF	
1.425 kg/m ³	IM/ Einheiten	kg CO ₂ äquiv	kg CFC-11 äquiv	kg C ₂ H ₄ äquiv	kg SO ₂ äquiv	Mole of N äquiv.	kg P äquiv.	kg N äquiv.	m ³ world äquiv.	kg Sb äquiv	MI H ₂ äquiv				
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	-1,48E+02	-1,76E+02	3,14E+00	2,49E+01	2,50E-06	3,35E-02	8,49E-02	4,98E-04	1,48E-02	8,31E-02	6,98E-03	7,66E-05	7,68E+01
	Transport zum Werk	A2	1,91E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,91E+00	3,78E-10	1,26E-03	4,40E-03	5,36E-02	1,03E-03	4,78E-03	1,58E-02	2,04E-04	2,59E+01
	Herstellung	A3	2,83E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,83E+02	7,48E-10	2,20E-02	1,52E-01	8,47E-01	2,50E-02	7,65E-02	2,34E-01	1,70E-02	4,85E+03
	Summe (cradle to gate)	A1 - A3	1,37E+02	-1,76E+02	3,14E+00	3,10E+02	2,51E-06	5,68E-02	2,41E-01	9,01E-01	4,09E-02	1,64E-01	2,57E-01	1,72E-02	4,95E+03
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung	C3	1,76E+02	1,76E+02	0,00E+00	1,47E-04	6,81E-14	9,25E-08	5,43E-07	1,07E-07	3,64E-08	9,80E-09	1,46E-07	4,11E-08	1,64E-02
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwendung LP	D1	-1,23E+02	0,00E+00	-2,83E+00	-1,21E+02	-2,25E-06	-5,11E-02	-2,17E-01	-8,11E-01	-3,68E-02	-1,48E-01	-2,31E-01	-1,55E-02	-4,46E+03
	Wiederverwertung neue LP	D2	-2,67E+01	-1,41E+01	0,00E+00	-1,26E+01	-6,24E-08	-4,26E-03	-5,95E-02	-4,73E-04	-1,41E-02	-7,90E-02	-6,63E-03	-6,78E-04	-5,76E+01
	Wiederverwertung Komponenten	D3	-8,71E+01	0,00E+00	0,00E+00	-8,71E+01	-1,25E+01	-1,26E+01	-1,26E+01	-2,87E-01	-1,25E+01	-2,58E-02	-4,43E-01	-1,25E+01	-6,63E+02

GWP = Globales Erwärmungspotenzial

ODP = Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht

AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser

EP = Eutrophierungspotenzial

POCP = Potenzial hinsichtlich der Bildung von troposphärischem Ozon

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

ADPF = Potenzial für den abiotischen Ressourcenabbau - fossile Brennstoffe

MB = Modul beschrieben

MND = Modul nicht deklariert

MNR = Modul nicht relevant

Tab. B.5: Ökobilanz für 1 m³ Lehmplatte – Outputfaktoren

Deklaration der Umweltwirkungsfaktoren, abgeleitet aus der LCA										
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM										
Lehmplatten 20mm nach DIN 18948 - Durchschnittswerte nach Erhebung 2021										
Funktionale Einheit m ³		Parameter	HWD	NHWD	RWD	CRU	MFR	MER	EEE	EET
1.425 kg/m ³		MI/ Einheiten	kg	kg	kg	kg	kg	kg	MJ	MJ
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	2,97E-02	1,12E-01	9,63E-04	5,16E+01	9,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,14E-04
	Transport	A2	1,63E-03	1,99E-03	3,94E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	1,95E-03	1,14E+00	6,56E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,06E+03	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	3,33E-02	1,25E+00	6,57E-01	5,16E+01	9,02E+02	0,00E+00	2,06E+03	1,14E-04
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungs-stadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungs-stadium	Rückbau, Abriss	C1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung	C3	1,43E-07	1,47E-08	0,00E+00	9,00E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Rückgewinnungs-potenziale	Wiederverwendung LP	D1	-2,99E-02	-1,13E+00	-5,91E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung neue LP	D2	-2,97E-02	-4,36E-02	-8,19E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung Komponenten	D3	-5,24E-02	-6,86E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

HWD = Gefährlicher Abfall zur Deponie

NHWD = Entsorgter nicht gefährlicher Abfall

RWD = Entsorgter radioaktiver Abfall

CRU = Komponenten für die Wiederverwendung

MFR = Stoffe zum Recycling

MER = Stoffe für die Energierückgewinnung

EEE = Exportierte Energie elektrisch

EET = Exportierte Energie thermisch

MB = Modul beschrieben

MND = Modul nicht deklariert

MNR = Modul nicht relevant

TEIL C INTERPRETATION DER ÖKOBILANZ

Im *Teil C* werden ausgewählte Ergebnisse der Ökobilanz (*Tab. B.3 – B.5*) in Form von Balkendiagrammen für die Parameter PEI, GWP sowie für die Rückgewinnungsszenarien D1 – D3 dargestellt und interpretiert (*Abb. C.1 – C.3.4*).

C.1 Primärenergieeinsatz (PEI)

Die Durchschnittswerte für den Primärenergieeinsatz in *Tab. B.3* basieren auf Verbrauchsangaben von Herstellern mit einem vergleichbaren Herstellungsverfahren. Die Hersteller *pressen* die Arbeitsmasse hydraulisch in Formkästen (*Abs. 4.1.2*). Die anschließende Trocknung nutzt die Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) der Erdgas-betriebenen BHKW. Der Trocknungsprozess stellt die entscheidende Einflussgröße für den Primärenergieverbrauch dar. Nach dem WKK-Prinzip entsteht dabei elektrische Energie, die bei den untersuchten wärmegesteuerten BHKW zu einem Stromüberschuss führt. Die Verteilung der Wärme- / Stromenergie wurde anhand der Leistungsdaten einer in Betrieb befindlichen Gasturbine überprüft und berechnet. Der Wirkungsgrad bezogen auf die Verstromung wird nach Herstellerdaten mit einem Drittel des Energieeinsatzes angegeben.

Erdgas ist der Energieträger für die BHKW und trägt mit einer Schwankungsbreite von 3.018 – 4.822 MJ/m³ (einschließlich Vorketten bis Bereitstellung des Erdgases) mit bis zu 86 % wesentlich zum durchschnittlichen Gesamtenergieeinsatz von 5.600 MJ/m³ LP bei. Dementsprechend überwiegt nicht regenerative Primärenergie (PENRT) mit rund 98 % in der Energiebilanz (*Abb. C.1.1*).

Bei diesen Prozessen entfällt ein geringer Anteil des Gesamtenergieeintrages (PET=PENRT+PERT) auf den Ausgangsstoff Baulehm, einschließlich der Transporte zum Werk. Die werkseitige Bereitstellung des Baulehms verbraucht nur ca. 9 % der gesamten Primärenergieeinsätze (*Abb. C.1*, Ausgangsstoffe, Transporte). Der restliche Energieinput entfällt auf die Vorketten zur Gewinnung von Sand, Pflanzenfasern, Holzspänen, Stärke und Armierungsgewebe. Dabei fiel auf, dass ein zur Bewehrung verwendetes Glasgewebe (ca. 160 g/m²) allein schon 18 % des genannten Primärenergieeinsatzes für Ausgangsstoffe dieses einzelnen Herstellers ausmacht. Ohne Glasfasergewebe würde sich der durchschnittliche Primärenergieeinsatz für Ausgangsstoffe in der Muster UPD insgesamt von 728 MJ/m³ auf ca. 660 MJ/m³ vermindern.

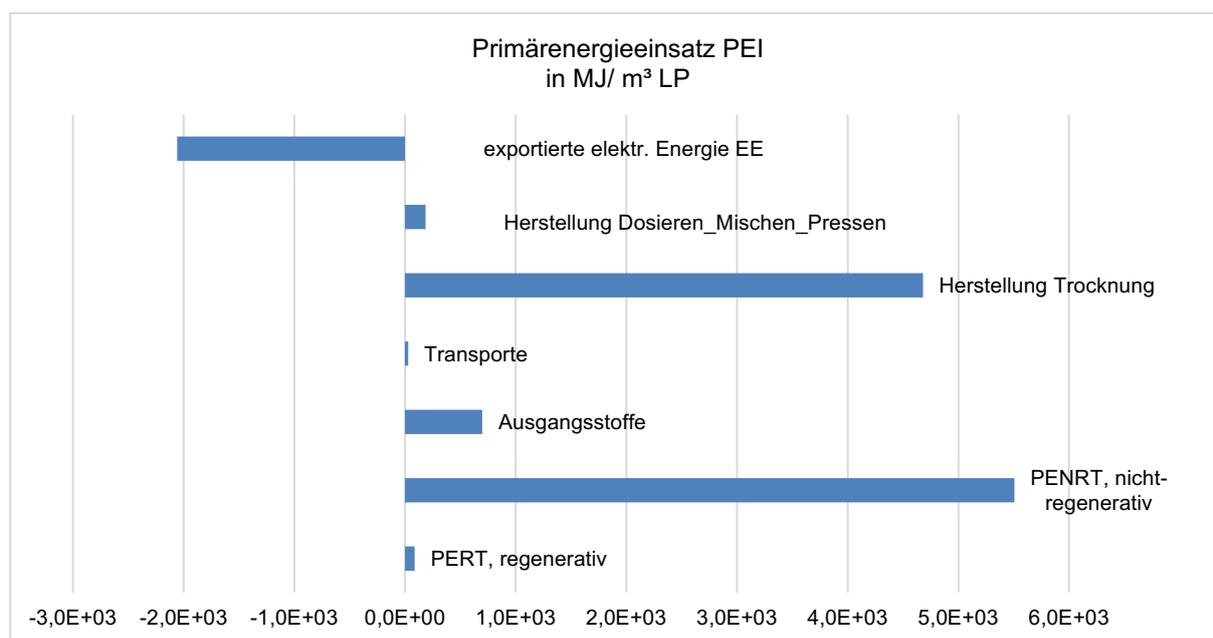


Abb. C.1 Primärenergieeinsatz PEI für LP

Dem Primärenergieinput von insgesamt 5.600 MJ/m³ LP steht die exportierte elektrische Energie (EEE) in Höhe von durchschnittlich 2.060 MJ/m³ LP aus der KWK der BHKW gegenüber. Der Eigenverbrauch für den Pressvorgang und weitere Prozesse ist dabei bereits heraus gerechnet, die EEE ist der Netto-Stromüberschuss. Ausgehend vom durchschnittlichen Wärmebedarf für die Trocknung in Höhe von 4.681 MJ/m³ LP (*Abb. C.1*) und dem dafür notwendigen bekannten Gasverbrauch von 60,6 m³/h des Muster-BHKW errechnet sich die daran gekoppelte Netto-Strommenge mit durchschnittlich 2.060 MJ/m³ LP. Der unterstellte elektrische Wirkungsgrad beträgt 33 % bei einem Umwandlungsverlust von ca. 13 %.

Die Trocknung verursacht im nach Produktionsvolumina ermittelten Durchschnitt 83,5 % des gesamten Primärenergieeinsatzes. *Abb. C.1* veranschaulicht, dass Optimierungsbedarf hinsichtlich alternativer Trocknungsverfahren besteht.

C.2 Treibhausgaspotenzial (GWP)

Die Treibhausgaspotenziale als CO₂ equiv. werden als GWP 100 in ihrer Klimawirkung über 100 Jahre betrachtet. Die für LP verwendeten pflanzlichen Rohstoffe enthalten gebundenes CO₂, das in die Berechnung einbezogen wurde.

Demnach ergibt sich ein durchschnittliches Treibhausgaspotenzial (GWP 100) für die IM A1 – A3 in Höhe von 137 kg CO₂ equiv./m³ LP. Der Wert basiert auf einer worst case Berechnung der Allokation von Strom und Wärme aus einem mit Erdgas betriebenen Blockheizkraftwerk (BHKW.)

Die untersuchten LP haben eine Dicke von 20 mm und wiegen 32 – 34 kg/m². Andere Trockenbauplatten, z. B. aus Gips, sind mit 12,5 mm dünner und haben ein Gewicht von 10 kg/m². Zur besseren Vergleichbarkeit empfiehlt sich eine Umrechnung des GWP 100 von LP auf CO₂/kg. Bei einer Rohdichte der LP von im Mittel 1.425 kg/m³ ergibt das ein massenbezogenes GWP von 0,096 kg CO₂ equiv./kg LP.

Hauptenergieträger des Herstellungsprozesses für LP ist Erdgas zum Betrieb wärmegeführter BHKW. Je nach Berechnungsansatz [27] zur Allokation der Energieströme aus der Kraft-Wärme-Kopplung entfallen durchschnittlich 248 – 281 kg CO₂ equiv./m³ LP auf die Wärmeerzeugung und ca. 11 kg CO₂equiv./m³ LP auf den Eigenstrombedarf.

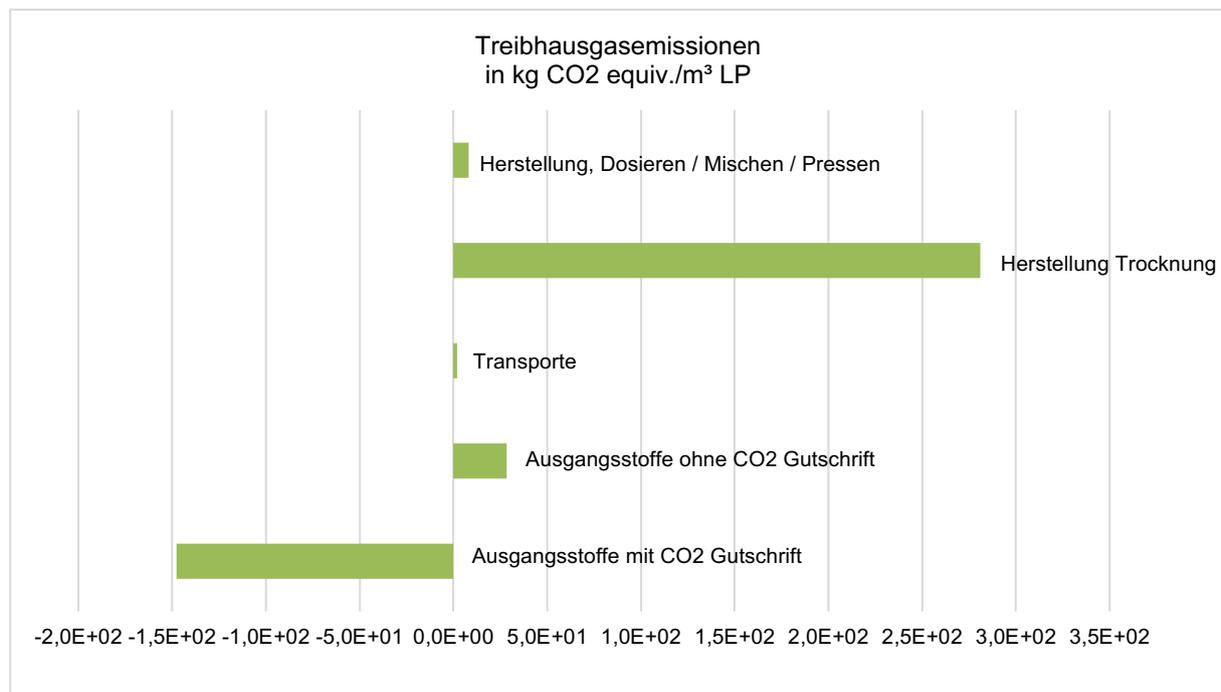


Abb. C.2 Treibhausgaspotenziale LP (GWP 100)

In Abb. C.2 (*Herstellung, Trocknung*) werden 281 kg CO₂equiv./m³ LP für die Trocknung angenommen. Die anderen Prozessschritte in der Fertigung speisen ihren Strombedarf überwiegend aus der KWK des BHKW (Abb. C.2, *Herstellung dosieren / mischen / pressen*). Der Zusatzstrom und die Dieserverbräuche im Werk summieren sich auf durchschnittlich 8 kg CO₂equiv./m³ LP für diese mechanischen Fertigungsschritte.

Transporte zum Werk tragen mit 2 kg CO₂equiv./m³ LP zu den Treibhausgaspotenzialen bei. Die Hersteller verfügen über Lehmgruben im Werk oder haben Zulieferer in einem Umkreis unter 20 km.

Im Mix der Ausgangsstoffe trägt Baulehm mit 3 kg oder 2,2 % kaum zum GWP bei. Pflanzliche Komponenten wie Stroh, Hanf, Miscanthus oder Holzspäne sind in einem Bereich von 4 – 12 M.-% / m³ LP enthalten. Die Umrechnung der in Holzspänen enthaltenen Kohlenstoffmenge unter Annahme einer Holz-Restfeuchte von 30 % erfolgt nach Abs. B.5.

Zur Bewertung des gebundenen CO₂ in Pflanzenteilen wurde die Umweltbilanz von Baustroh herangezogen [17]. Darin wird die Speichermasse mit 1,27 kg CO₂/kg Stroh ausgewiesen. Im Vergleich zu allen anderen Ausgangsstoffen der LP, einschließlich Glasfasergewebe, ist der in den pflanzlichen Rohstoffen gebundene CO₂-Gehalt am größten. Am Ende des Lebenszyklus werden LP stofflich verwertet. Deshalb verbleibt das gebundene CO₂ technisch im Stoffkreislauf. Aber nach EN DIN 15804+A2, Abschnitt C.2.4 müssen Emissionen von biogenem CO₂ aus Biomasse und Übergänge von Biomasse in nachfolgende Produktsysteme als +1 kg CO₂-Äq/kg CO₂ des biogenen Kohlenstoffs charakterisiert werden. Die CO₂ Gutschrift wird entsprechend der normativen Vorgabe in IM C3 bilanziell wieder aufgelöst.

Ohne diese CO₂-Gutschriften erhöht sich das GWP 100 für Ausgangsstoffe IM A1 von -148 auf +28,4 CO₂equiv./m³ LP (Abb. C.2.1, *Ausgangsstoffe ohne CO₂-Gutschrift*). Das gesamte Treibhausgaspotenzial würde sich von 137 auf 319 kg CO₂equiv. pro m³ LP mehr als verdoppeln. Auch bei dieser Bewertung bleiben die Klimawirkungen des Energieträgers Erdgas zur Trocknung der LP mit dann 88 % Hauptursache der Treibhausgasemissionen.

C.3 Rückgewinnungsszenarien D

Nachfolgend werden drei Rückgewinnungsszenarien D1 – D3 für LP betrachtet:

D1: zerstörungsfreie Demontage von LP vor Gebäudeabriss zur Wiederverwendung (*Abb. C.3.1*),

D2: Replastifizierung von LP-Bruch („Einsumpfen“) zur Wiederverwertung (*Abb. C.3.2*),

D3: Schreddern von LP-Bruch zu Lehm-Rezyklat als Ersatz von Trockenlehm (*Abb. C.3.4*),

Für das Schreddern relevanten Umweltkennzahlen PEI u. GWP werden in *Abb. C.3.3* angegeben.

Demontierte LP können grundsätzlich ohne erneute Produktionsschritte wiederverwendet werden. Wie alle Lehmbaustoffe lassen sich auch LP mit geeigneten LPM reparieren. Abbruchkanten, die bei Demontage entstehen können, ließen sich damit wieder auffüllen und glätten. Anhaftende LPM aus vorangegangener Nutzung werden mit Gewebeflächen aufgebracht. Der alte LPM kann mit dem Gewebe manuell abgelöst werden [13]. Diese Anwendungspraxis vorausgesetzt, wird das Rückgewinnungspotenzial der Wiederverwendung in IM D1 mit einem angenommenen Demontageverlust von 10 M.-% berechnet.

C.3.1 Szenario D1 (Demontage / Wiederverwendung)

Abb. C.3.1 veranschaulicht die Rückgewinnungspotenziale im IM D1 unter der Annahme, dass bei einer Demontage von LP ein Verlust von 10 M.-% entsteht, der durch nachträgliche Reparatur ersetzt werden muss. Unter dieser Voraussetzung kann die Wiederverwendung einen großen Teil des sonst erforderlichen Energieinput in Höhe von rund 5.000 MJ/m³ LP einsparen. Ohne den Trocknungsprozess und neue Ausgangsstoffe vermeidet die Wiederverwendung 123 kg CO₂ equiv. / m³ LP.

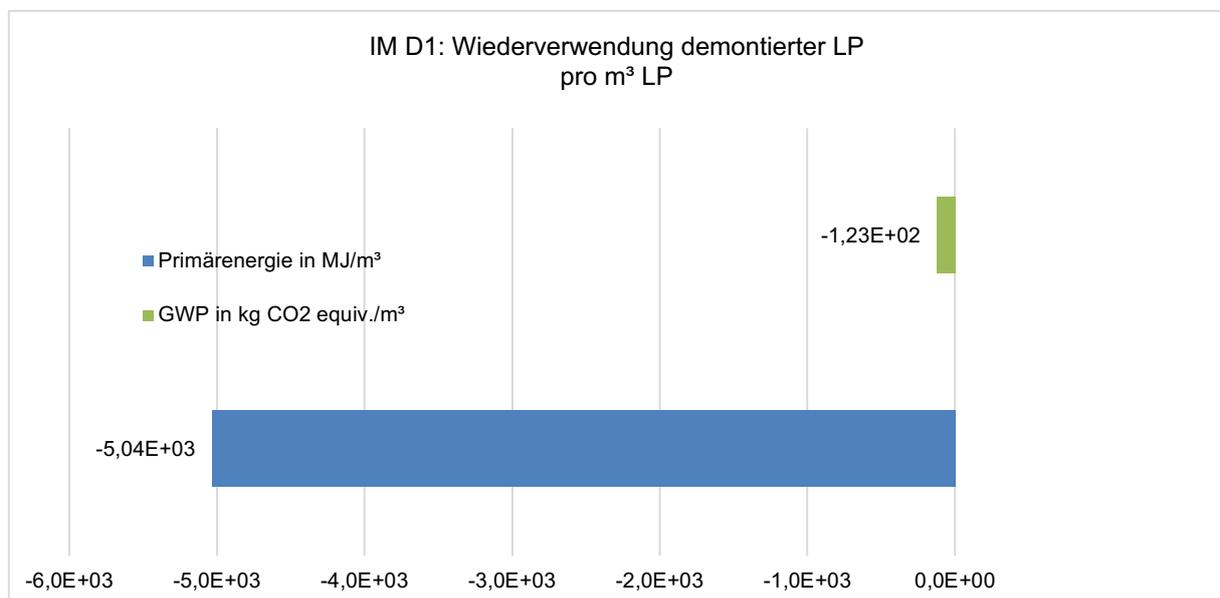


Abb. C.3.1 Rückgewinnungspotenziale IM D1 – Wiederverwendung demontierter LP , PEI u. GWP

C.3.2 Szenario D2 (Nassverfahren)

Die Rückgewinnungspotenziale des Nassverfahrens zur Wiederverwertung für neue LP in IM D2 ergeben sich aus der Substitution der originären Ausgangsstoffe durch rückgewonnene Ausgangsstoffe. Das Pressverfahren setzt eine plastisch formbare Masse mit einer entsprechenden Mindestfeuchte voraus. Deshalb bietet sich hier das Nassverfahren zur Replastifizierung der trockenen LP an. Die dadurch eingesparten Prozessschritte zur Bereitstellung der Ausgangsstoffe (ohne Transporte) reduzie-

ren den Primärenergieeinsatz um $618 \text{ MJ} / \text{m}^3 \text{ LP}$. Bezogen auf die in *Abb. C.3.2* dargestellte Wirkungskategorie GWP werden $26,7 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv.} / \text{m}^3 \text{ LP}$ vermieden. Gegenüber dem ursprünglichen Herstellungsprozess in den IM A1 – A3 erbringt die Rückgewinnung eine Energieeinsparung von 11 %, die Treibhausgasemissionen sinken um 19 % bei Wiederverwertung der Ausgangsstoffe demontierter LP für neue LP.

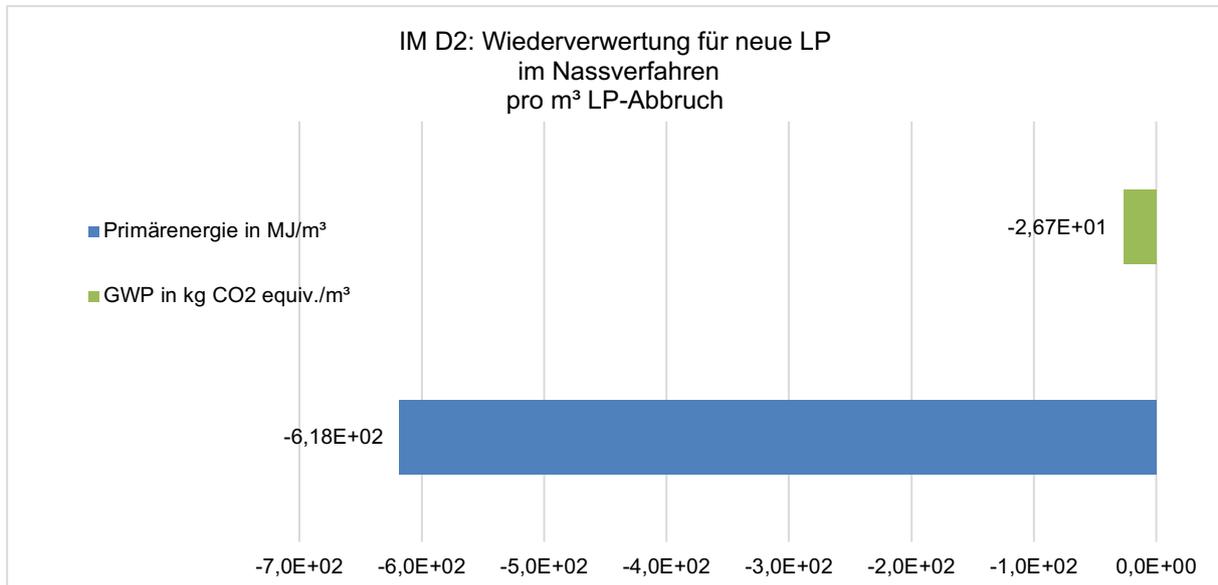


Abb. C.3.2 Rückgewinnungspotenziale IM D2, Wiederverwertung für neue LP (Nassverfahren), PEI u. GWP

C.3.3 Szenario D3 (trocken / maschinelle Zerkleinerung)

Trockene-Aufbereitungstechniken sind maschinelle Zerkleinerungsprozesse mit stationär oder mobil einsetzbaren Maschinen, deren Leistungsdaten für eine Bilanzierung in IM C3 genutzt werden können. Diese Aufbereitungstechnik eröffnet zusätzliche Rückgewinnungspotenziale zur Wiederverwertung für andere Lehmbaumstoffe als LP und Weiterverwertung außerhalb des Systems Lehm. Zur Bewertung des Nettoeffektes dieses Rückgewinnungsverfahrens werden der Primärenergieeinsatz sowie die Umweltwirkung der Aufbereitungstechnik ermittelt, um diese dem Einsparpotenzial bei einer Wiederverwertung für andere Lehmbaumstoffe gegenüberzustellen (*Abb. C.3.3*).

Ausgewählt wurde eine für das Baustoffrecycling typische Prallmühle mit $0,23 \text{ l/t}$ Dieserverbrauch einschließlich Stromgenerator. Solche Prallmühlen zerkleinern v. a. härtere Materialien als Lehm, z. B. Beton. Deshalb dürfte der hier zur Bilanzierung angenommene Verbrauch für LP tendenziell zu hoch angesetzt sein, wird aber beibehalten. Ein zusätzlicher Windsichter mit 30 kW Leistung bei 80 t/h Durchsatz sorgt für die Trennung leichter Pflanzen- und Holzbestandteile von schwereren mineralischen Komponenten. Eine kombinierte trockene Aufbereitungstechnik bestehend aus Schredder und Windsichter verbraucht $0,27 \text{ l}$ Diesel pro t Materialdurchsatz.

Die betrachtete Schredderanlage verbraucht $13,6 \text{ MJ/m}^3 \text{ LP}$ zur Wiederverwertung. Die Treibhausgasemissionen bei einem Betrieb mit dem angegebenen Dieserverbrauch betragen $1,5 \text{ g CO}_2 \text{ equiv./m}^3 \text{ LP}$. In Tab.

Abb. C.3.3 zeigt zwei Kenngrößen der Bilanzierung des IM C3. Zum einen beträgt der Primärenergieeinsatz bei einem Diesetrieb der unterstellten Aufbereitungstechnik $1,65 \text{E-}02 \text{ MJ/m}^3 \text{ LP}$. Zum anderen entstehen Treibhausgasemissionen als GWP 100 mit $1,47 \text{E-}04 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv./m}^3 \text{ LP}$.

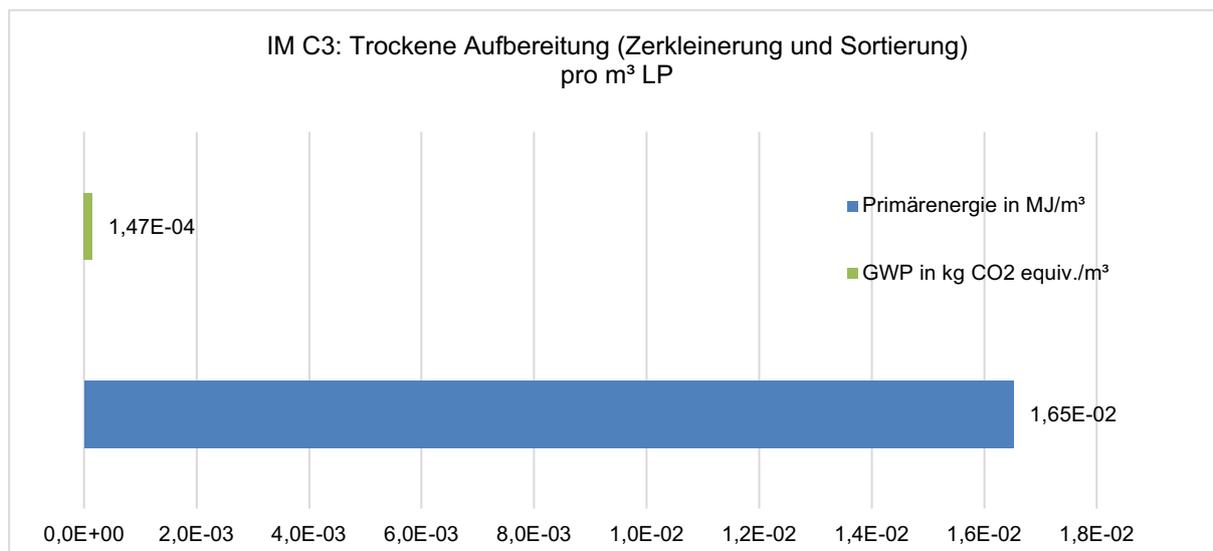


Abb. C.3.3 Aufbereitung IM C3: Schreddern von Lehmplatten - Trockenverfahren

Die untersuchten LP bestehen zu 87 % aus Baulehm bzw. einem Gemisch aus 42 % Baulehm und 54 % Sand. Der Rest sind Pflanzenteile und Holzspäne. Die Entfernung etwaiger Armierungsgewebe ist Teil der manuellen Demontage und wird hier nicht weiter betrachtet oder quantifiziert. Die trockene Lehmfraktion der zerkleinerten LP hat das Potenzial, im Trockendosierverfahren nach Muster UPD-LPM [20] ansonsten künstlich zu trocknenden Baulehm oder Baulehm/Sandgemische zu substituieren (Wiederverwertung im Lehmbau). Im Trockendosierverfahren entstehen z. B. LPM und farbige LPM. Sofern diese nicht vollständig durch trockene Separationstechniken (z. B. Windsichter) aussortiert wurden, ist die Beimengung von Pflanzenteilen und Holzspänen bei diesen LPM häufig Teil der Rezeptur und ein zulässiger Zusatz (DIN 18947). Die Wiederverwertung in einem anderen Herstellungsprozess bedingt entsprechende Eingangskontrollen und kann Anpassungen für spezifische Rezepturen der Trockendosierung von neuen Lehmbaustoffen erfordern.

Abb. C.3.4 zeigt die Umweltkennzahlen zum Primärenergieeinsatz und zur Wirkung auf das Treibhausgaspotenzial GWP bei einer Wiederverwertung des in einer LP enthaltenen Baulehms als Substitut für Trockenlehm im IM D3.

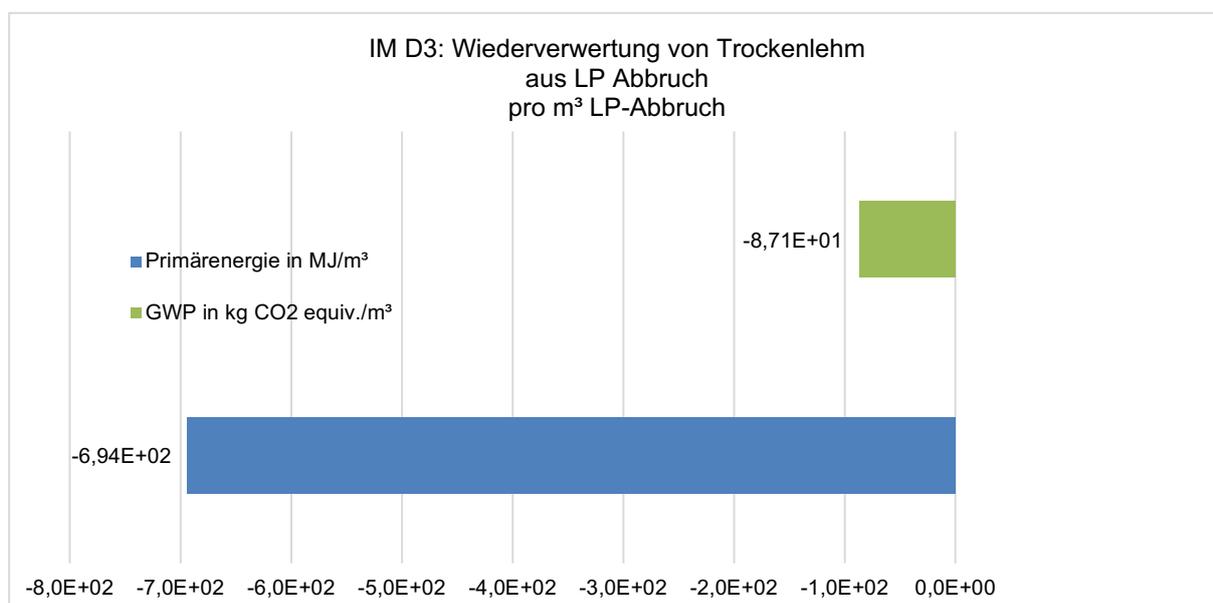


Abb. C.3.4 Rückgewinnungspotenziale IM D3: Substitution von Trockenlehm durch LP-Abbruch, PEI u. GWP

Pflanzliche Zusatzstoffe und Zusatzmittel < 1 M.-% werden nicht einbezogen. Zur Berechnung der Rückgewinnungspotenziale wurde der durchschnittliche Anteil von Baulehm in der Mischung der untersuchten LP angenommen. Eine durchschnittliche LP dieser Ökobilanz enthält nach Zerkleinerung 80 M.-% Baulehm. Diese Stoffzusammensetzung wurde durch Untersuchungen der FH Potsdam mit LP dieser Ökobilanz nachgewiesen [13].

Die pulvrigen Massen der trocken rückgewonnenen mineralischen Bestandteile einer LP eignen sich für gravimetrische Dosierverfahren, wie sie z. B. für LPM [20] angewendet werden. In *Abb. C.3.4* sind zwei Kerngrößen zur Quantifizierung der Rückgewinnungspotenziale dargestellt: der Primärenergieeinsatz und die Treibhausgasemissionen (GWP 100). Die Substitution des Trockenlehms als Ausgangsstoffe für trockene Lehmbaumstoffe, insbesondere LPM, durch wiederverwertete LP spart Primärenergieinput in Höhe von $6,94E+02$ MJ/ m³ Alt-LP. Grund dafür ist die Vermeidung der originären Bereitstellung und notwendigen Trocknungsenergie für Baulehm ($8,67E+02$ MJ/m³ Trockenlehm). Verglichen mit dem dafür angenommenen Energieaufwand zur Aufbereitung demontierter Alt-LP (*Abb. C.3.3*) bleibt eine Netto-Energieeinsparung von $6,93E+02$ MJ/ m³ Alt-LP >99% des in *Abb. C.3.4* dargestellten Substitutionseffektes.

Der Substitutionseffekt nach IM D3 vermeidet $87,1$ kg CO_{2equiv.}/m³ LP Treibhausgasemissionen (*Abb. C.3.4*). Ursächlich dafür sind die Vermeidung von Treibhausgasemissionen für originär bereitgestellten, künstlich getrockneten Baulehm (109 kg CO_{2equiv.} pro m³Trockenlehm). Unter Berücksichtigung der Aufbereitung (*Abb. C.3.3*) mit $0,00015$ kg CO_{2equiv.} pro m³ LP reduziert sich der Netto-Einspareffekt von Treibhausgasemissionen nur marginal < 1%.

Im Vergleich zum Primärprodukt fällt auf, dass die Vermeidung von GWP mit $87,1$ kg CO_{2equiv.}/m³ LP die Summe der Emissionen einer neu hergestellten LP in den IM A1 – A3 mit bis zu 63,6 % kompensiert.

C.4 Zusammenfassung

Die Trocknungsenergie für die 20 mm dicken und 33 kg/m² schweren LP ist der bestimmende Inputfaktor der IM A1 – A3 dieser Ökobilanz. Dabei kommt es auf den Energieträger an. Die untersuchten Verfahren nutzen Erdgas als Energieträger zur Wärme-Kraft-Kopplung mit BHKW. Für den Wärmebedarf zur Trocknung werden für das untersuchte Produktionsvolumen von 2.277 m³ durchschnittlich 4.680 MJ/m³ LP eingesetzt, um ausreichende Abwärme zu erzeugen. Dabei entsteht nach Abzug des Eigenbedarfs für die Herstellung der LP als überschüssiges Kuppelprodukt 2.060 MJ/m³ LP elektrische Energie, die für andere Prozesse exportiert wird. Der Netto-Energieinput für einen m³ LP beträgt demnach 2.620 MJ/m³. Durch Umstellung auf andere Energieträger, vorzugsweise nicht-fossil und ergänzende Effizienzmaßnahmen zur Senkung der Energieverbräuche ergeben sich vielfältige Optimierungsansätze, die dazu beitragen diese energetische Benchmark der Muster-UPD zu unterschreiten.

Die resultierenden Treibhausgasemissionen (GWP 100) der Trocknungsenergie in den IM A1 – A3 werden durch gebundene biogene Kohlenstoffe der Ausgangsstoffe Pflanzenteile und Holz um 43 % auf durchschnittlich 137 kg CO_{2equiv.} /m³ LP vermindert. Die Beimischung von Pflanzenteilen und Holz variiert je nach Rezeptur der Hersteller, ist aber ein Basiszusatz für die meisten LP. Am Ende des Lebenszyklus werden LP nicht energetisch, sondern stofflich verwertet. Damit verbleiben die gespeicherten Kohlenstoffe in der stofflichen Wertungskette gebunden und werden nicht wieder durch energetische bzw. thermische Verwertungsprozesse freigesetzt.

Das Rückgewinnungspotenzial wird durch die homogene Struktur der Materialmischung von LP begünstigt. Die enthaltenen Komponenten sind kompatibel mit den Vorgaben über zulässige Ausgangsstoffe der jeweiligen DIN für LPM, LS, LMM und LP (DIN 18945-18948).

Die Wiederverwendung von LP nach IM D1 ersetzt den gesamten Produktionsdurchlauf in den IM A1-A3 und vermeidet bei einem Demontageverlust von 10 M.-% rechnerisch auch 90 % des Primärenergieeinsatzes und der Umweltwirkungen. Dieses Szenario setzt eine effiziente Baustellenlogistik voraus, um die LP möglichst verlustarm zurückzubauen. Die Entfernung von Anhaftungen, z. B. LPM, ist möglich, erfordert aber zusätzlichen manuellen oder mechanischen Aufwand, der hier nicht quantifiziert wurde.

Untersucht wurden zwei mögliche Aufbereitungsverfahren zur Rückgewinnung von demontierten LP. Einfaches „Einsumpfen“ der LP in Wasser löst die Bindung der Inhaltsstoffe durch die Tonbestandteile des Lehms. Dabei wird die lehmspezifische Eigenschaft der Replastifizierbarkeit ausgenutzt [23]. Das *Nassverfahren* zeigt den Herstellern einen Weg auf, wie alte LP zurückgenommen und zu neuen LP wiederverwertet werden können. Damit lassen sich alle Ausgangsstoffe, außer dem Armierungsgerüst, durch Recycling der LP substituieren. Die Energieersparnis beträgt 618 MJ/m³ LP oder 11 % gegenüber des Energieeinsatzes in den Modulen A1 – A3. Es lassen sich 26,7 kg CO₂equiv. / m³ LP vermeiden, das entspricht 19 % aller Treibhausgasemissionen der IM A1 – A3 (das Nassverfahren und der gesamte Prozess der Wiederverwertung von der Aufbereitung im Nassverfahren über die Herstellung neuer LP aus rückgewonnenen Ausgangsstoffen einschließlich Trocknung). Die Materialprüfung der wiederverwerteten LP nach DIN 18948 ist Gegenstand der Untersuchungen der FH Potsdam [26][13].

Das *Trockenverfahren* zur Aufbereitung demontierter LP eignet sich gut zur Wiederverwertung für andere Lehmbaumstoffe und stellt eine Alternative zum Nassverfahren dar. Der in geschredderten LP enthaltene trockene Grubenlehm eignet sich als Substitut für Produkte bzw. Verfahren, die künstlich getrockneten Grubenlehm verwenden. Allein der Trocknungsprozess von Ton und Lehm erfordert nach Herstellerangaben [24] einen Energieinput aus Erdgas von bis zu 918 MJ (255 kWh)/t. Der Anteil des trockenen Baulehms aus einer zerkleinerten LP substituiert diesen Energieaufwand bei minimalem Aufbereitungsaufwand von 1,65E-02 MJ/t fast vollständig. Der Einsatz von trockenem Recyclinglehm aus wiederverwerteten LP vermeidet Treibhausgasemissionen aus der sonst erforderlichen technischen Lehm-trocknung in einer Größenordnung von 109 kg CO₂equiv./m³ Alt-LP.

Die Rückgewinnungspotenziale der Wiederverwendung von demontierten LP in IM D1 sind in allen Input- und Wirkungskategorien am höchsten (*Tab. B.2 u. B.3*). Trockenverfahren und Wiederverwertung der mineralischen Bestandteile als trockene Recyclingkomponenten sind höher als beim Nassverfahren zur Wiederverwertung der Ausgangsstoffe für neue LP. Die Energieersparnis im beschriebenen Nassverfahren beträgt 618 MJ/m³ weiterverwerteter LP, im Trockenverfahren 694 MJ/m³ weiterverwerteter LP. Die Reduktion von Treibhausgasemissionen im Nassverfahren beträgt 26,7 kg CO₂equiv./m³ LP, im Trockenverfahren sind es 87,8 kg CO₂equiv./m³ LP.

Unabhängig vom Aufbereitungsverfahren und der Verwertungskette bieten LP (wie auch andere Lehmbaumprodukte) aufgrund der Reversibilität und Replastifizierbarkeit der bindigen Ausgangsstoffe ideale Voraussetzungen für die Rückgewinnung in Form einer Wiederverwendung bzw. Weiterverwertung im System Lehm-bau.

ZITIERTE STANDARDS / LITERATURHINWEISE

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

DIN 4103-1:2015-06: Nichttragende innere Trennwände – Teil 1: Anforderungen und Nachweise

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

- DIN 18942-1:2018-12: Lehmbaumstoffe und Lehmbaumprodukte – Teil 1: Begriffe
- DIN 18942-100:2018-12: Lehmbaumstoffe und Lehmbaumprodukte – Teil 100: Konformitätsnachweis
- DIN 18948:2018-12: Lehmplatten – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung
- DIN EN 12620:2008-07: Gesteinskörnungen für Beton
- DIN EN 13139 (E):2015-07: Gesteinskörnungen für Mörtel
- 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 v. Bauprodukten
- DIN EN 15804:2022-03: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte
- DIN EN 15942:2022-04: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Kommunikationsformate zwischen Unternehmen
- DIN EN ISO 354:2003-12: Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen
- DIN EN ISO 717-1:2021-05: Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung
- DIN EN ISO 14025:2011-10: Umweltkennzeichnungen u. -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen; Grundsätze u. Verfahren
- DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze u. Rahmenbedingungen
- DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen
- DIN EN ISO 16000-9:2008-04: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 9: Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen – Emissionskammer-Prüfverfahren
- 1 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Allgemeine Hinweise für die Erstellung von Ökobilanzen und Projektberichten (Teil 2)*. Weimar: 2022-06
 - 2 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Lehmbau Regeln – Begriffe, Baumstoffe, Bauteile*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage, 3., überarbeitete Aufl., 2009
 - 3 Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung AVV) v. 10.12.2001 (BGbl. I, S. 3379), letzte Fassung v. 30.06.2020 (BGbl. I, S.1533)
 - 4 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmbaumstoffe – Grundregeln für die Produktkategorie Lehmplatten (LP)*. Weimar: 2022-04
 - 5 Bundesverband Flächenheizungen und Flächenkühlungen (BVF) e. V. (Hrsg.): *Kühlen und Heizen mit Deckensystemen: Lehmdeckensysteme*. Richtlinie 15.12. BVF, Dortmund: 2021
 - 6 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Qualitätsüberwachung von Baulehm als Ausgangsstoff für industriell hergestellte Lehmbaumstoffe – Richtlinie*. Technische Merkblätter Lehmbau, TM 05, Weimar: 2011
 - 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.: *Vergaberichtlinie 1006 zur Vergabe des Qualitätszeichens, Lehmplatten*. Neckargemünd: 2015-06
 - 9 Natureplus e. V.: *Vergaberichtlinie 5003 zur Vergabe des Qualitätszeichens, Naturschutz beim Abbau mineralischer Rohstoffe*. Neckargemünd: 2015-04
 - 10 Bundesverband Baumstoffe – Steine und Erden e. V. (Hrsg.): *Kreislaufwirtschaft Bau - Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018, Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018*. Berlin 2021
 - 11 Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Projektkennblatt 05468. *Entwicklung und Erstellung einer Experimentalanlage zur industriellen Herstellung von Universalbauplatten aus Lehm u. nachwachsenden Rohstoffen*. Projekt Klinkerwerke Muhr / Lehmbau Breidenbach 1995-98. Osnabrück 1995
 - 12 Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft - v. 24.07.2002 (GMBI. S.511), BM f. Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Berlin:2002, Entwurf Neufassung v. 17.12.2020

- 13 Report „Rückbau Bauteile mit LP“, FH Potsdam 2022 (unveröffentlichte Diplomarbeit)
- 14 Landesarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (Hrsg.): *Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen*. Berlin: LAGA Mitteilung, Heft 20, 2004, 5. Aufl.
- 15 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und zur Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG), BGBl. I, 06.10.1994, S. 2705, letzte Neufassung BGBl. I, S.1324 – 1346 v. 22.05.2013)
- 16 Bau-EPD (Hrsg.): *Nutzungsdauerkatalog der Bau-EPD für die Erstellung von UPDs*. Bau-EPD GmbH, Wien 2014
- 17 Fachverband Strohballenbau Deutschland e. V. (FASBA) (Hrsg.): *Umweltproduktdeklaration für Baustroh nach DIN EN ISO 14025 u. DIN EN 15804*. Wien 2014
- 18 Diederichs, S.; Rüter, S.: *Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz*. Institut für Holz-technologie und Holzbiologie Nr. 2012/1
- 19 <https://www.ecoinvent.org>
- 20 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmbaumstoffe – Musterumweltproduktdeklaration für die Baustoffkategorie Lehmputzmörtel (Muster-UPD LPM)*. Weimar 2018-10
- 21 www.oekobaudat.de
- 22 www.gemis.de
- 23 Schroeder, H.: *Lehmbau – Mit Lehm ökologisch planen und bauen*. Springer Vieweg: Wiesbaden 2019, 3. akt. Aufl.
- 24 Sommerfeld, M.: *Umweltproduktdeklaration von Lehmbaumstoffen – Ermittlung des Rückgewinnungspotenzials*. Unveröff. Diplomarbeit, FB Bauingenieurwesen, FH Potsdam 2019
- 25 <https://www.sbm-mp.at/de/roducte/aufbereitungsanlagen-mobil/mobile-prallbrecher/remax-200.html>
- 26 FH Potsdam: Symposium Baustoffrecycling & Lehmbaumstoffe – Perspektiven für eine Kreislaufwirtschaft im Bauwesen, Potsdam August 2022
- 27 Mauch, M.; Corradini, R.; Wiesemeyer, K.; Schwentzek, M.: Allokationsmethoden für spezifische CO₂-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 55(2010), Heft 9