

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

Dachverband Lehm e.V.



Muster-Umweltproduktdeklaration

nach DIN EN 15804:2022_03

Muster-UPD

Lehmsteine nach DIN 18945

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_LS_DVL2023001_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_LS_DVL2023001_PKRÜ5-DE

Deklarationsbasis

Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen Grundregeln für die Baustoffkategorie Lehmsteine (PKR LS)
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 Lehmsteine nach DIN 18945 wurde im Auftrag des Dachverbandes Lehm e.V. (DVL) und mit Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt erstellt. Als funktionale Einheit wurde ein Kilogramm Lehmstein (1 kg) analog zu DIN 18945 Anhang A.3 festgelegt.

Gültigkeitsbereich

Die vorliegende MUPD bildet die Ökobilanz der Herstellung von Lehmsteinen ab. Bezugsjahr ist das Jahr 2021. Die in der Ökobilanz abgebildeten Herstellungsverfahren sind typisch für die Lehmsteinherstellung in Deutschland. Hersteller von Lehmsteinen 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 Lehmsteine (UPD LS) nach DIN EN 15804

Stand: Januar 2023

INHALT

1	Allgemeines.....	5
1.1	Normative Grundlagen.....	5
1.2	Nachverfolgung der Versionen.....	5
1.3	Begriffe / Abkürzungen.....	6
2	Produktdefinition.....	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
2.8	Brandschutz.....	9
2.9	Sonstige Eigenschaften.....	9
3	Ausgangsstoffe.....	10
3.1	Auswahl / Eignung.....	10
3.2	Stoffeklärerung.....	10
3.3	Bereitstellung.....	12
3.4	Verfügbarkeit.....	12
4	Produkt Herstellung.....	12
4.1	Herstellungsprozess.....	12
4.1.1	Formgebungsverfahren „formgeschlagen (f)“.....	13
4.1.2	Formgebungsverfahren „formgepresst (p)“.....	14
4.1.3	Formgebungsverfahren „stranggepresst (s)“.....	14
4.2	Gesundheits- und Arbeitsschutz Herstellung.....	14
4.3	Umweltschutz Herstellung.....	15
4.3.1	Abfall.....	15
4.3.2	Wasser / Boden.....	15
4.3.3	Lärm.....	15
4.3.4	Luft.....	15

5	Produktverarbeitung	15
5.1	Verarbeitungshinweise	15
5.2	Arbeitsschutz / Umweltschutz.....	15
5.3	Restmaterial.....	16
5.4	Verpackung	16
6	Nutzungszustand	16
6.1	Inhaltsstoffe	16
6.2	Wirkungsbeziehungen Umwelt / Gesundheit.....	16
6.3	Beständigkeit / Nutzungsdauer.....	16
7	Aussergewöhnliche Einwirkungen.....	17
7.1	Brand	17
7.2	Hochwasser	17
7.3	Havarie Wasserleitungen.....	17
8	Hinweise zur Nutzungsphase	17
9	Nachnutzungsphase.....	18
9.1	Recycling von Lehmsteinen	18
9.2	Verwertung von Abfällen und Verpackungen.....	18
9.3	Entsorgung.....	18
10	Nachweise	19
10.1	Produkterstprüfung nach DIN 18942-100	19
10.2	VOC, TVOC.....	19
10.3	Radioaktivität	19
TEIL A – SACHBILANZ		19
A.1	Funktionale Einheit	19
A.2	Betrachtungszeitraum	19
A.3	Ergebnisse	19
Teil B – ÖKOBILANZ.....		21
B.1	Ziel der Analyse	21
B.2	Zielgruppen der Analyse	21
B.3	Referenznutzungsdauer	21
B.4	Abschneidekriterium	22

B.5	Annahmen und Abschätzungen.....	22
B.6	Datenqualität	24
B.7	Allokation.....	24
B.8	Ergebnisse der Ökobilanzierung (LCA).....	25
TEIL C – INTERPRETATION DER ÖKOBILANZ		32
C.1	Primärenergieeinsatz (PEI).....	32
C.2	Treibhausgaspotenzial (GWP).....	34
C.3	Abbruch und Aufbereitung.....	35
C.4	Rückgewinnungspotenzial.....	37
C.5	Zusammenfassung	42
Zitierte Standards / Literaturhinweise		43

1 ALLGEMEINES

1.1 Normative Grundlagen

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

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

1.2 Nachverfolgung der Versionen

Version	Kommentar	Stand
Ü1	<i>Erster Entwurf ohne Datenerhebung</i>	<i>Juni 2020</i>
Ü2	<i>Überarbeiteter Entwurf mit Datenerhebung und -auswertung</i>	<i>Mai 2022</i>
Ü3	<i>Verifizierter Entwurf der Muster UPD LS</i>	<i>Aug 2022</i>
Ü4	<i>Endredaktion</i>	<i>Jan 2023</i>

Version Ü4

Weimar, Januar 2023

Kontakt:

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

© Dachverband Lehm e. V.

1.3 Begriffe / Abkürzungen

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

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

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

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

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

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

IM Informationsmodul

LS Lehmstein

LSM Lehmsteinmauerwerk

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 Lehmsteine (LS). Die orientierende Quantifizierung der Ökobilanzdaten beruht auf Marktanalysen, Produktdatenblättern und Literaturrecherchen. Zukünftige UPD von Herstellern enthalten spezifische Angaben zum Geltungsbereich (*Tab. 2.1*).

Tab. 2.1 Hersteller, Verfahrensart und Produktbezeichnung¹

Nr.	Hersteller	Werksanschrift	Verfahrensart	Produktbezeichnung
X	Xx	1234Xx	Xx	Xx
Y	Xx	1234Xx	Xx	Xx

¹Hersteller geben hier den Geltungsbereich der nach dieser Muster-UPD deklarierten Produkte an.

Diese Muster-UPD ist anwendbar auf im Werk hergestellte, ungebrannte LS nach DIN 18945 / 18942-1 mit Tonmineralien als alleinigem Bindemittel. Sie gilt für normierte LS, die nach einem in *Abs. 4.1* deklarierten Verfahren hergestellt werden.

Für die Anwendung gelten die DIN 18945, die LR DVL [2] sowie die PKR LS des DVL [4].

2.2 Produktbeschreibung

LS nach DIN 18945 sind ungebrannte, mineralische und i. d. R. quaderförmige Lehmbaumstoffe mit Tonmineralien des Baulehms als alleinigem Bindemittel sowie mineralischen und pflanzlichen Zusatzstoffen.

Für die Formgebung von LS nach DIN 18945 und DIN 18942-1 werden folgende Verfahren unterschieden:

- *formgeschlagen (f)*: händisches / mechanisiertes Einwerfen der (weichen) Arbeitsmasse („patzen“) in eine Form, Abstreichen ohne Nachverdichtung,
- *formgepresst (p)*: pressen / stampfen der (halbfesten) Arbeitsmasse in eine Form,
- *stranggepresst (s)*: von einem durch ein Mundstück gepressten (weichen – steifen) Lehmstrang abgeschnitten.

LS werden als Voll- oder Lochsteine hergestellt. *Lehmvollsteine* besitzen einen Querschnitt, der durch Lochung senkrecht zur Lagerfläche um bis zu 15 % der Lagerfläche gemindert sein darf, *Lehmlochsteine (g)* entsprechend > 15 %. LS mit einer Trockenrohddichte < 1.200 kg/m³ können als *Leichtlehmsteine* bezeichnet werden.

2.3 Einsatzzweck

LS nach DIN 18945 dienen als Baustoff zur Herstellung von tragendem und nichttragendem Lehmsteinmauerwerk LSM (Wände, Trennwände, Pfeiler, Ausfachungen) gemäß DIN 18940 und Lehmbau Regeln DVL (LR DVL) [2]. Entsprechend der möglichen Feuchteeinwirkung im Gebrauchszustand werden LS in Anwendungsklassen (AK) nach *Tab. 2.2* eingeteilt und deklariert.

Tab. 2.2 Anwendungsklassen von Lehmsteinen nach DIN 18945

Anwendungsklasse AK	Anwendungsbereich
Ia	Verputztes, der Witterung ausgesetztes Außenmauerwerk von Sichtfachwerkwänden ¹
Ib	Durchgängig verputztes, der Witterung ausgesetztes Außenmauerwerk ¹
II	Verkleidetes oder anderweitig konstruktiv witterungsgeschütztes Außenmauerwerk / Innenmauerwerk
III	Trockene Anwendungen (z. B. Deckenfüllungen, Stapelwände)

¹Beanspruchungsgruppe I nach DIN 4108-3 bzw. nach sorgfältiger Prüfung der örtlichen Schlagregenexposition

2.4 Produktnorm / Zulassung / Inverkehrbringen / Anwendungsregeln

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

- DIN 18940:2023-03, Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung,
- DIN 18942-1:2018-12, Lehmbaumstoffe und Lehmbaumprodukte – Teil 1: Begriffe,
- DIN 18942-100:2018-12, Lehmbaumstoffe und Lehmbaumprodukte – Teil 100: Konformitätsnachweis,
- DIN 18945:2018-12, Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung,
- Lehmbau Regeln des Dachverbandes Lehm e. V. (LR DVL): Weimar 2009, 3. Aufl. [2],

Weiterhin gelten die PKR Lehmsteine (PKR LS) 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 [5]. Darüber hinaus müssen die AVV [3], die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) [6] sowie die Arbeitsblätter der Hersteller beachtet werden.

2.5 Gütesicherung

Die Eigen- und Fremdüberwachung des Herstellungsprozesses von LS nach DIN 18945 erfolgt nach DIN 18942-100.

2.6 Lieferzustand

Die Formate der von den Herstellern gelieferten LS werden gemäß DIN 18945 (Tab. 4 und 5 für nichttragendes Mauerwerk, Tab. 2 und 3 für tragendes Mauerwerk) mit ihren Schwankungsbereichen in den Abmessungen in Tab. 2.3 deklariert. LS können bzgl. ihrer „inneren Geometrie“ (Tab. 2.4) als Vollsteine oder gelocht (g) sowie mit glatten oder profilierten Rändern (l x b) geliefert werden.

In dieser Muster-UDP wurden zwei Lehmvollsteine in Normalformat (LS NF) untersucht.

Tab. 2.3 Lieferformate

Nr.	Formatkurzzeichen	Nennmaß mm	Mindestmaß mm	Höchstmaß mm	Maßspanne mm	Ränder
LS 1	<i>NF</i>					
<i>l</i>		240				
<i>b</i>		115				
<i>h</i>		71				
LS 2	<i>NF</i>					
<i>l</i>		240				
<i>b</i>		115				
<i>h</i>		71				

Tab. 2.4 Innere Geometrie

Nr.	AK	Lochanteil der Lagerfläche %	Außenstege mm	Innenstege mm
1	<i>la</i>	ungelocht ²		
2	<i>lb</i>	(≤ 15) ¹	(≥ 30) ¹	(≥ 20) ¹
3	<i>ll</i>	(≤ 15) ¹	(≥ 20) ¹	(≥ 20) ¹
4	<i>lll</i>			

¹Bedingungen für tragendes LS-Mauerwerk

²abgesehen von zwei mittig angeordneten Grifföchern mit einer Gesamtfläche von ≤ 15 %

2.7 Bautechnische Eigenschaften

Tab. 2.5 zeigt Durchschnittswerte / Bandbreiten der bautechnischen Eigenschaften nach Angaben der von den Herstellern deklarierten LS.

Tab. 2.5 Mechanische und bauphysikalische Eigenschaften der deklarierten LS

Nr.	Eigenschaft / Prüfung n. DIN 18945 / Abs.	LS1	LS2	Klasse / Wert, Maßeinheit
1	Trockenrohdichte ρ_d / 9.2	1,2 (LLS)	1,8	
2	Druckfestigkeit f_{st} (Klassen 2 – 6) / 9.4			N/mm ²
3	Statischer E-Modul / 9.5			N/mm ²
4	Tragende / nichttragende Anwendung	nicht tragende	tragende	
5	Anwendungsklasse AK	1a	1b	
6	Wärmeleitfähigkeit λ_R / 6.11	0,47	0,78	W/mK
7	Wasserdampfdiffusionswiderstand μ / 9.7	5/10	5/10	–

LS1 mit einer Rohdichteklasse 1,2 kann als Leichtlehmstein LLS bezeichnet werden. LS für tragende Bauteile müssen die Druckfestigkeitsklasse ≥ 2 erfüllen und einen statischen E-Modul von ≥ 750 N/mm² aufweisen.

LS müssen im verarbeiteten Zustand den Anforderungen des Wärmeschutzes nach DIN 4108-3 entsprechen. Einwirkungen aus Feuchte und Frost können sie nur in begrenztem Maße widerstehen. Das Feuchte- und Frostverhalten wird in entsprechenden Prüfungen nach DIN 18945, Abs. 9.6.1-4 bestimmt. Entsprechend ihrer AK müssen LS die in DIN 18945, Tab. 8 definierten Kriterien (Masseverluste, Risse, Quellverformungen) erfüllen. Die Prüfergebnisse sind von den Herstellern nach Tab. 2.6 auszuweisen.

Tab. 2.6 Feuchte- und Frostverhalten nach DIN 18945

Nr.	Anwendungsklasse AK	Tauchprüfung Masseverlust % (Abs. 9.6.1)	Kontaktprüfung (Abs. 9.6.2)	Saugprüfung h (Abs. 9.6.3)	Frostprüfung Zyklen (Abs. 9.6.4)
LS 1	1a				
LS 2	1b				

2.8 Brandschutz

Die Baustoffverhaltensklasse von LS wird nach DIN 4102-1 bzw. DIN EN 13501-1 bestimmt (DIN 18945, Abs. 9.8). LS ohne bzw. mit einem Gehalt ≤ 1 M.-% an homogen verteilten organischen Zusatzstoffen können gemäß DIN 4102-4 ohne weitere Prüfung der Baustoffverhaltensklasse A1 (nicht brennbar) zugeordnet werden, LS mit einem entsprechenden Gehalt von > 1 M.-% der Baustoffverhaltensklasse B. Es gelten die Herstellerangaben.

2.9 Sonstige Eigenschaften

LS nach DIN 18945 können nach Trocknung durch Wässerung jederzeit replastifiziert und ggf. einer Wiederverwertung zugeführt werden.

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

Tab. 3.1 zeigt die nach DIN 18945 zulässigen Ausgangsstoffe für LS. Die Angaben zu den Ausgangsstoffen sind in der Sachbilanz (Teil A) ausgeführt.

Tab. 3.1 Zulässige Ausgangsstoffe für LS¹ nach DIN 18945

Nr.	Grund- u. Zusatzstoffe
1	Primärgrubenlehm
2	Sekundärgrubenlehm
3	Recyclinglehm (Primär~)
4	Trockenlehm / Tonmehl
5	Sand 0/2, ungetrocknet
6	Sand 0/4, getrocknet
7	Sand 0/4, ungetrocknet
8	Ziegelsplitt aus mörtelfreien Ziegeln
9	thermisch expandierte mineralische Produkte
10	Pflanzenteile / -fasern (hier: Strohfasern)
11	Tierhaar
12	Zerkleinertes, chemisch unbehandeltes Holz
13	anorganische Pigmente

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

Die Anteile der Ausgangsstoffe für die hier untersuchten LS1 und LS2 sind in Tab.A.1 dargestellt.

3.2 Stoffeläuterung

Baulehm gemäß LR DVL [2] ist zur Herstellung von Lehmbaumstoffen geeigneter Lehm, bestehend aus einem Gemisch aus schluffigen, sandigen bis kiesigen Gesteinskörnungen und bindekräftigen Tonmineralien. 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 [7]). Je nach weiterer Verwendung wird unterschieden [1]:

Primärgrubenlehm wird zielgerichtet für die Herstellung von Lehmbaumstoffen 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 Lehmbaumstoff [2]. Er liegt i. d. R. als Bestandteil von Baumischabfall (Bauschutt / Baustellenabfälle) vor und muss durch geeignete Trennverfahren von anderen Abfällen separiert werden. Er kann trocken zerkleinert oder durch Zugabe von Wasser replastifiziert werden. Je nach Verwertung wird unterschieden [1]:

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

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

Presslehm ist ein bei der Kiesgewinnung anfallendes Abfallprodukt, das als Kies-Wasch-Schlamm zunächst in Silos oder Becken aufgefangen wird [1]. Der Schlamm enthält die bei der Kieswäsche anfallenden, für die Betonindustrie nicht nutzbaren Feinstkörnungen Schluff, Ton und Feinsand. Der nach Entwässerung zurückbleibende Filterkuchen besitzt noch einen hohen Wassergehalt, der durch Siebandpressen reduziert wird und dadurch die Masse des „Presslehms“ erheblich verringert. Tensidhaltige Schlämme sollen von einer Weiterverwertung als Baulehm ausgeschlossen werden.

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

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

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

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

3.3 Bereitstellung

Die nach Abs. 3.2 identifizierten Baulehmkategorien 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 [8]. 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 LS oder von mineralischen Komponenten in LS aus Abbruchbauteilen / Baumischabfall als Primär- bzw. Sekundärrecyclinglehm [9].

Aufgrund der besonderen hydraulischen Eigenschaften des Bindemittels Lehm ist eine Replastifizierung und Wiederverwertung von LS nach DIN 18945 jederzeit möglich. Eine Rohstoffknappheit besteht nicht. Alle Pflanzenteile und -fasern sowie Holzteile sind nachwachsende Rohstoffe.

4 PRODUKTHERSTELLUNG

Die verwendeten Rezepturen werden den jeweiligen Rohstoffeigenschaften angepasst und variieren innerhalb der in Tab. 3.1 angegebenen Bereiche. Weitere Stoffe sind nicht enthalten.

4.1 Herstellungsprozess

Für die Herstellung von LS sind nach DIN 18945 / DIN 18942-1 die Formgebungsverfahren „Schlagen“, „Pressen / Stampfen“ und „Strangpressen“ definiert. Die Herstellungsprozesse von LS nach DIN 18945 werden aufgrund signifikanter Abweichungen in der Energiebilanz bzw. der Wirkungsanalyse nach Verfahrensart gesondert bewertet.

Der Herstellungsprozess von LS umfasst allgemein folgende Prozessschritte mit ggf. dazwischen liegenden Transporten:

1. Bereitstellung der Ausgangsstoffe,
2. mechanische Zerkleinerung des Baulehms im Kollergang / Walzwerk und Aussiebung von groben Gesteinskörnungen. Der fertig aufbereitete Baulehm ist erdfeucht, besitzt eine krümelige Struktur und ist gut rieselfähig. Einfache Produktionen verzichten auf den Kollergang oder das Walzwerk und geben den Baulehm durch ein grobmaschiges Sieb direkt in einen Mischer.
3. Förderung des aufbereiteten Baulehms gemäß Rezeptur in den Mischer,

4. mechanische Zerkleinerung von pflanzlichen Zusatzstoffen und Förderung gemäß Rezeptur in den Mischer,
5. Mischvorgang, Wasserzugabe gemäß Rezeptur und des vorgesehenen Formgebungsverfahrens,
6. Formgebung (formgeschlagen (f), formgepresst (p), stranggepresst (s)),
7. Trocknung (Freiluft / technisch),
8. Lagerung / Verpackung (Holzpaletten mit Schrumpffolie).

4.1.1 Formgebungsverfahren „formgeschlagen (f)“

Die Herstellungsverfahren für formgeschlagene Leichtlehmsteine LLS unterscheiden sich hinsichtlich der Bearbeitungsschritte und des Trocknungsverfahrens. Die Hersteller nutzen manuelle und automatisierte Verfahren. *Bild 4.1* zeigt das Ablaufschema für die manuelle Herstellung formgeschlagener LLS (f) der Anwendungsklasse Ia nach DIN 18945.

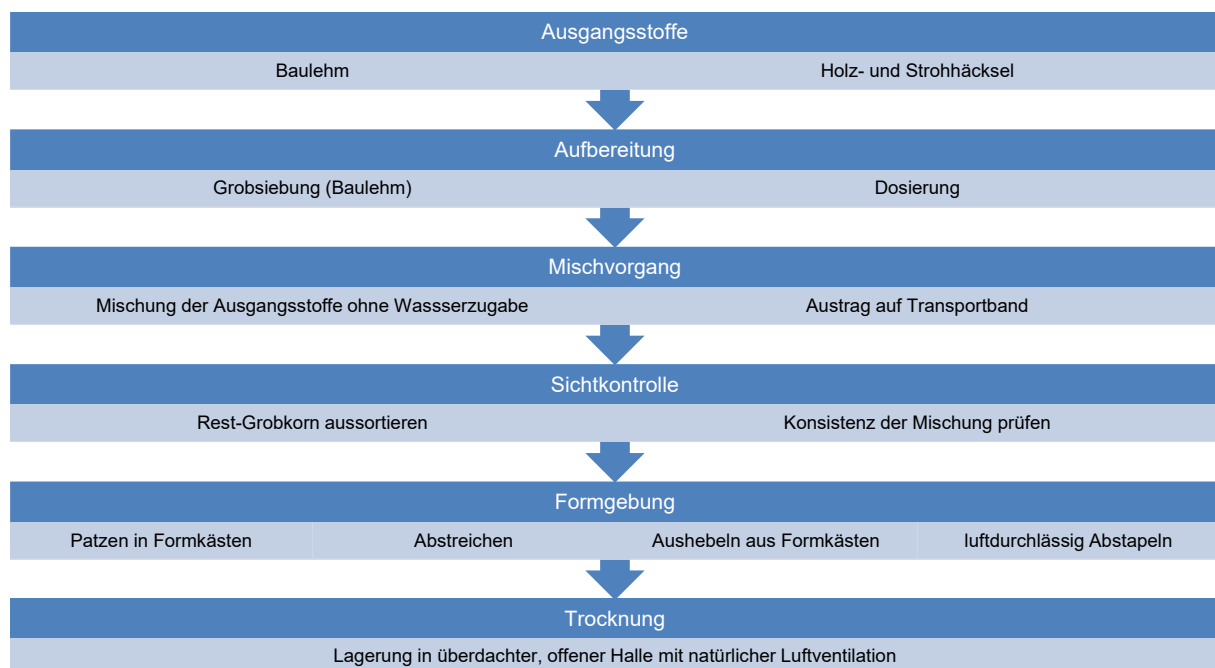


Bild 4.1: Ablaufschema für die Herstellung formgeschlagener Leichtlehmsteine LLS

Das überwiegend manuelle Formgebungsverfahren erfordert einen größeren Platzbedarf für die Freilufttrocknung in einer offenen, überdachten Stellage oder querbelüfteten Halle sowie eine entsprechende saisonale Produktionsplanung. Das Verfahren benötigt keine technische Trocknungsenergie, mit Ausnahme des Mischvorgangs.

Bild 4.2 zeigt das Ablaufschema für ein mechanisiertes Verfahren mit anschließender technischer Trocknung zur Herstellung formgeschlagener LS (f) der Anwendungsklasse Ib nach DIN 18945.

Anders als bei manuellen Verfahren wird die Aufbereitung und Mischung der Rohstoffe in einem vorgelagerten Prozess durchgeführt. Die Formgebung erfolgt weitgehend mechanisiert über Transportbänder mit umlaufenden Formkästen von der Befüllung über die Formgebung bis hin zur Zwischenlagerung auf übereinander gestapelten Trockenblechen in einem Wagengestell. Der Trockenvorgang wird mit entsprechenden Sensoren für Temperatur, Feuchte und Luftströmung überwacht und geregelt. Die Wärmeerzeugung kann entweder als direkte Befeuerung mit fossilen Brennstoffen oder durch Abwärmenutzung aus anderen Prozessen (z. B. Brennkammern in Ziegeleien) erfolgen.

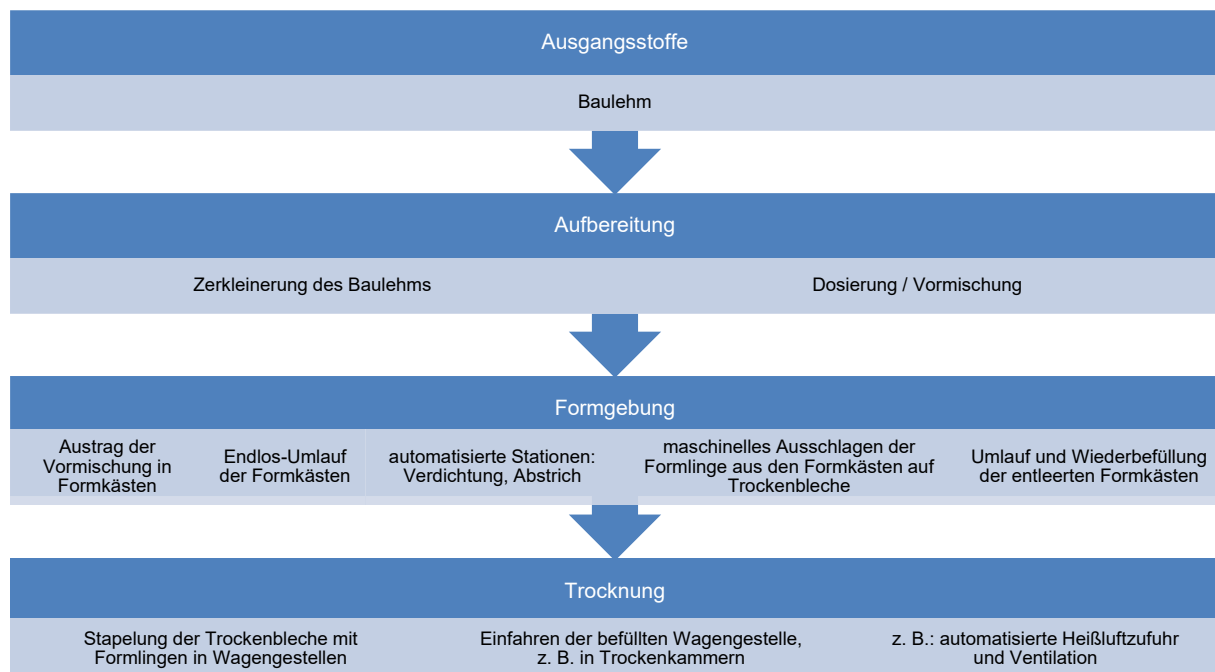


Bild 4.2: Ablaufschema für die mechanisierte Herstellung von technisch getrockneten, formgeschlagenen Lehmsteine der AK Ib

4.1.2 Formgebungsverfahren „formgepresst (p)“

LS mit $\rho_d > 1.500 \text{ kg/m}^3$ werden als „formgepresst (f)“ deklariert. Einige Hersteller beschreiben das Verfahren als „formgeschlagen und formgepresst“, obwohl die LS nach DIN 18945 mit „f“ für formgeschlagen deklariert werden.

4.1.3 Formgebungsverfahren „stranggepresst (s)“

Einige Hersteller bieten „schwere“ Lehmsteine an, teilweise unter der Alt-Bezeichnung „Grünlinge“. Schwere LS enthalten keinen Sand als Zusatzstoff, sondern nur Baulehm. Diese LS werden meist als stranggepresst „s“ nach DIN 18945 deklariert.

Im Rahmen eines vom Bundesinstitut f. Bau-, Stadt- u. Raumforschung (BBSR) geförderten Forschungsprojektes hat ein Ziegelproduzent stranggepresste, großformatige Lehm-Plansteine ($l=30,5$, $b=24,0$, $h=24,9 \text{ cm}$) für tragendes Lehmsteinmauerwerk LSM hergestellt und mit der Abwärme aus dem Ziegelbrand getrocknet [10]. Die getrockneten Lehmsteine werden plangeschliffen. Die Lehm-Plansteine zeigten ein sehr gutes Festigkeitsverhalten. Im Vergleich zu Ziegeln entfällt der erhebliche Energieaufwand für den Brennprozess.

4.2 Gesundheits- und Arbeitsschutz Herstellung

Staubemissionen von pflanzlichen oder mineralischen Zusatzstoffen während des Produktionsprozesses werden durch Filter begrenzt. Ausgefilterte Zusatzstoffe werden wieder verwendet. Die Grenzwerte der TA Luft [11] 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 Freilufttrocknung der LS ist kein Brennprozess erforderlich. Somit entstehen keine entsprechenden Schadstoffemissionen, der anfallende Wasserdampf ist unschädlich.

Bei technischer Trocknung (Abwärme Ziegelei, Trocknungsgerät) entstehende Emissionen liegen unter den Grenzwerten der TA Luft [11]. 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 LS erfolgt mit Lehmmauermörtel LMM nach DIN 18945, LR DVL [2] und DIN 18940 entsprechend den Regeln des Mauerwerksbaus. Für die i. d. R. manuelle Verarbeitung kommen übliche Geräte des Mauerwerksbaus zum Einsatz.

LS sind werkgerecht und vollfugig im Verband mit Stoß- und Lagerfugen in einer Stärke von ca. 1 cm zu vermauern bzw. in Dünnbettmörtel zu verlegen. Gestampfte / gepresste LS sollen so vermauert werden, dass die Auflast in Stampf- / Pressrichtung wirkt. Zur Trennung von LS können übliche Werkzeuge, z. B. Handkreissäge, Trennscheibe, Hammer eingesetzt werden.

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

5.2 Arbeitsschutz / Umweltschutz

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

Während der Verarbeitung von LS 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 [11]. Vorsorglich werden Atemschutzmasken verwendet.

Die Einzelgewichte der LS liegen unter den Empfehlungen der Bauberufsgenossenschaft von 25 kg. Die LS können deshalb von Hand nach den Regeln des Mauerwerksbaus versetzt werden.

5.3 Restmaterial

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

LS-Reste können von den Herstellerwerken zurückgenommen und dort in den Produktionsprozess zurückgeführt werden. Sie können auch vor Ort unter Wasserzugabe replastifiziert und (ggf. unter Sandzugabe) für Reparaturzwecke an LS-Mauerwerk verwendet werden.

Während der Verarbeitung der LS herabgefallener, erhärteter LMM wird von einem Mörtelfangbrett sauber aufgenommen und zusammen mit Frischmörtel in den Verarbeitungsprozess zurückgeführt. Nicht verarbeiteter Lehmestmörtel kann durch Wasserzugabe ohne zusätzlichen Energieaufwand wieder in die entsprechende Verarbeitungskonsistenz überführt und weiter verarbeitet werden. Reste von LMM dürfen nicht über die Kanalisation entsorgt werden (Verstopfung).

5.4 Verpackung

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

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

Die Hersteller sind verantwortlich für den Nachweis des Entsorgungssystems.

6 NUTZUNGSZUSTAND

6.1 Inhaltsstoffe

Bei der Produktion von LS werden ausschließlich die natürlichen Ausgangsstoffe Baulehm, Sand, mineralische (Leicht-) und organische (pflanzliche Faser-) Zusatzstoffe nach *Abs. 3* verwendet. Diese Inhaltsstoffe sind im Nutzungszustand durch die Tonmineralien des Baulehms als feste Stoffe im Bauteil gebunden. Dieser Verbund ist wasserlöslich.

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

6.2 Wirkungsbeziehungen Umwelt / Gesundheit

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

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

Die natürliche ionisierende Strahlung der geprüften LS ist gering und gesundheitlich unbedenklich. LS der beteiligten Hersteller besitzen einen Aktivitätskonzentrationsindex $I < 1$ gemäß DIN 18945.

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 LS ist deshalb auf den Bereich der in *Tab.*

2.2 deklarierten AK beschränkt. Bauteile aus LS sind über den gesamten Nutzungszeitraum vor stehendem und fließendem Wasser oder dauerhafter Durchfeuchtung zu schützen.

LS sind nicht feuchte- und frostbeständig. Die entsprechenden Anforderungen nach DIN 18945 werden von den deklarierten LS erfüllt und sind in *Tab. 2.5* und *2.6* ausgewiesen.

7 AUSSERGEWÖHNLICHE EINWIRKUNGEN

7.1 Brand

LS 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.

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

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

7.2 Hochwasser

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

7.3 Havarie Wasserleitungen

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

8 HINWEISE ZUR NUTZUNGSPHASE

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

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

Die Lebensdauer von verarbeiteten LS 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.

Mauerwerk aus LS ist reparaturfreundlich. LS sind gut mit anderen Baustoffen kombinierbar.

9 NACHNUTZUNGSPHASE

9.1 Recycling von Lehmsteinen

Der Haltbarkeitszeitraum von LS liegt i. a. über dem Nutzungszeitraum der daraus errichteten Gebäude. Aus LS hergestellte Bauteile können i. d. R. in einfacher Weise zurückgebaut werden. Nach Entfernung anhaftender, mitverarbeiteter Baustoffe (Mörtel, Putze etc.) können LS bei zielgerichtetem Rückbau von Gebäuden für den gleichen Verwendungszweck wiederverwendet werden. Sie können ebenso als Deckenauflagen oder im Lehmofenbau weiterverwendet werden.

Bei einer Wiederverwendung dürfen die zurückgebauten LS keine Spuren aus chemischen und biologischen Einwirkungen aus der zurückliegenden Nutzung enthalten (bauschädigende Salze, Moose / Algen, Hausschwamm, Schimmelpilze usw.). LS, die in Landwirtschaftsbauten eingesetzt wurden, sind aus hygienischen Gründen für eine Wiederverwendung ungeeignet.

Bei Gebäudeabriss sortenrein und frei von Reststoffen (Altanstriche, alte Ausbesserungen mit Gips, Zement- und Kalkmörtel) gewonnene LS / LS-Bruch können zu Lehm-Rezyklat aufbereitet und 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 LS geforderten Eigenschaften. Ggf. ist eine Abmagerung durch Sand erforderlich. Für Produktionsbruch wird dieses Verfahren bereits praktiziert.

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

Sofern die o. g. Möglichkeiten der Wiederverwertung nicht praktikabel sind, können sortenrein aus Gebäudeabriss gewonnene LS 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.

9.2 Verwertung von Abfällen und Verpackungen

Die Verwertung von Holz- und Kunststoffverpackungen wird bei individuellen UPD durch einen zertifizierten Entsorger gemäß Abfallwirtschaftsgesetz (KrW-/AbfG) [12] von den jeweiligen Herstellern nachgewiesen. Bei der Herstellung von LS entstehen keine Produktionsabfälle.

9.3 Entsorgung

Bei Gebäudeabriss zurückgebaute, nicht sortenrein gewinnbare LS, sowie LS aus Landwirtschaftsbauten, die für eine Weiterverwertung ungeeignet sind, können auf Grund ihres chemisch neutralen und inerten Verhaltens auf Deponien der Deponieklasse A eingelagert werden (AVV Abfallschlüssel 17 09 04 [3]). Sie stellen keine außergewöhnlichen Belastungen für die Umwelt dar. Sie 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

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

Tab. 10.1 Mustertabelle für VOC u. TVOC von LS

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>leichtflüchtige 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 LS nach DIN 18945, A.3 ergibt einen Aktivitätskonzentrationsindex von $I < 1$.

TEIL A – SACHBILANZ

A.1 Funktionale Einheit

Die funktionale Einheit für die Herstellung von LS ist in DIN 18945, A.3 sowie in der entsprechenden PKR [4] geregelt und wird massebezogen mit einem Kilogramm (1 kg) festgelegt.

A.2 Betrachtungszeitraum

Die Mengen an Ausgangsstoffen, Energieträgern sowie für Transporte sind Mittelwerte für einen Zeitraum von zwölf Monaten.

A.3 Ergebnisse

Die Sachbilanz nach DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044 bzw. DIN EN 15804 dient der Quantifizierung der Input- und Outputströme des Produktsystems auf Basis von generischen Daten und Erfahrungswerten ähnlicher Lehmprodukte. Dabei umfassen die Inputfaktoren die benannten Ressourcen (z. B. Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Energieträger, Strom), die Outputfaktoren die entsprechenden Emissionen des Systems in Luft, Wasser und Boden sowie Abfälle.

Die Daten zur Trocknung beziehen sich auf zwei Verfahren nach *Abs. 4.1*, die Freilufttrocknung zur Herstellung von LS1 (LLS) und die künstliche Trocknung durch primäre Wärmezufuhr für LS2. Die Produktbezeichnungen LS1 bzw. LS2 beziehen sich auf *Tab. 2.5* (bautechnische Eigenschaften).

Tab. A.1 bildet die Sachbilanz für beide LS ab. Der Hauptrohstoff ist Baulehm. Hauptinputfaktoren sind Energieträger für Strom und Wärme. Weitere Inputfaktoren sind die Transporte ins Werk. Outputfaktoren sind Abfälle aus Vorprodukten.

Tab. A.1 Sachbilanz der untersuchten LS

Input / Output	Lehmsteine LS		Einheit	Erläuterungen
	LS2 / AK Ib (1.800 kg/m ³)	LS1 / AK Ia (1.200 kg/m ³)		
INPUT				
Ausgangsstoffe				
Baulehm	1,0	0,9	kg/kg LS	Primärgrubenlehm
Holzspäne, unbehandelt	-	0,1	kg/kg LS	nach Rezeptur unterschiedlich
ENERGIE / ET				
Strom	0,0085	0,0085	kWh/kg LS	Strom aus Wasserkraft; Dosieren, Mischen, Transportbänder
Erdgas (technische Trocknung)	0,22	-	kWh/kg LS	berechnet nach Verdampfungsenthalpie des Wassergehaltes bei Formgebung
FW / VERPACKUNGEN				
Frischwasser	0,01	0,007	l/kg LS	IM A1 - A3
Holzpaletten	0,02	0,02	kg/kg LS	Mehrweg
PE Folie	0,0002	0,0002	kg/kg LS	t > 20 µm; 2 m ² pro Palette mit 1 m ³ LS
OUTPUT				
Abfälle	0,0006	0,0001	kg/kg LS	aus Vorketten

Der Baulehm der untersuchten LS besteht zu 90 – 100 % aus Primärgrubenlehm der häufig direkt am Standort der Ziegeleien ansteht. Die Stoffzusammensetzung der LS entspricht den Datenblättern mehrerer Hersteller bzw. Händler von LS.

Die in *Tab. A.1* aufgelisteten mineralischen und pflanzlichen Zusätze entsprechen der DIN 18945. Die Hersteller haben spezifische Rezepturen mit abweichenden Anteilen der einzelnen Komponenten. Als pflanzlichen Zusatzstoff nutzen die Hersteller für LS1 unbehandelte Holzspäne (hier: rund 10 M.-%).

Die Herkunfts- und Verbrauchsangaben zum Strom basieren auf Rechnungsangaben der Energielieferanten für vergleichbare Dosier- und Mischverfahren, z. B. LMM. Der Wärmebedarf errechnet sich theoretisch nach der Verdampfungsenthalpie für einen Wassergehalt von 20 M.-% bei Formgebung (bildsam). Als Energieträger wurde Erdgas angenommen.

TEIL B – ÖKOBILANZ

Die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO 14044 zur Erstellung einer Typ III UPD nach DIN EN 15804 beruht auf einer Lebenszyklusanalyse (LCA) von marktgängigen LS, bei der für jede deklarierte Zyklusstufe die Ressourcenverbräuche und entsprechende potenzielle Umweltwirkungen abgeleitet werden (massebezogene Allokation).

Die Nichtbetrachtung einzelner Module wird wie folgt begründet:

A4 (Transport zur Baustelle): Entsprechend der PKR des Programmbetreibers dem Gebäude zuzurechnen.

A5 (Bau / Einbau): Hinweise zur Anwendung sind im allgemeinen Teil der Deklaration enthalten.

B1 (Nutzung) wird durch die in den Abs. 2 und 6 beschriebenen bautechnischen Eigenschaften und raumklimatischen Wirkungen dargelegt.

B2 (Instandhaltung) und B3 (Reparatur): Ausbesserungen sind mit zusätzlichem Material leicht möglich.

Die Module *B4 (Ersatz)* und *B5 (Umbau)* sind gleichbedeutend mit dem Produktlebensende. Bei der Entnahme des Produkts fallen keine Stoff- und Energieflüsse an, und es gelten die bautechnischen Eigenschaften zur Wiederverwertbarkeit im allgemeinen Teil der Deklaration.

Die Module *B6 (Energieeinsatz)* und *B7 (Wassereinsatz)* sind während der Nutzung der LS im Bauteil nicht anwendbar.

C2 (Transport) liegt außerhalb der Systemgrenze nach PKR LS [4] und sind dem Gebäude zuzurechnen. Die Transporte sind zusätzlich abhängig vom Verwertungsverfahren (stationär oder in situ). Aus Gebäudeabbruch sortenrein zurückgewonnene LS können als Recyclinglehm in einem neuen Prozesszyklus wieder- / weiterverwendet werden. Sie verlieren dann ihre Abfalleigenschaft und werden in Tab. A.4 durch die Indikatoren MFR bzw. CRU erfasst.

C4 (Entsorgung): Nicht sortenrein rückgewinnbare LS können als nicht gefährlicher Siedlungsabfall (Parameter NHWD, Tab. A.4) deklariert werden.

B.1 Ziel der Analyse

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

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

B.2 Zielgruppen der Analyse

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

B.3 Referenznutzungsdauer

Die Referenznutzungsdauer (RSL – Reference Service Life) ist die Nutzungsdauer, die unter der Annahme bestimmter Nutzungsbedingungen (z. B. Standardnutzungsbedingungen) für ein Bauprodukt

zu erwarten ist. Mit Bezug auf den Nutzungsdauerkatalog der Bau-EPD GmbH, Version 2014 [13] wird eine RSL für LMM von 100 Jahren zugrunde gelegt.

B.4 Abschneidekriterium

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

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

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

B.5 Annahmen und Abschätzungen

Annahmen und Abschätzungen betreffen Grubenlehm als Primär- bzw. Sekundärrohstoff, Verpackungen, Pflanzenanteile, die Abfallaufbereitung (IM C1 u. C3) und das Rückgewinnungspotenzial (IM D1 bis D3).

Grubenlehm (Abs. 3.2): Die meisten Hersteller von LS sind Ziegeleien, die neben gebrannten Ziegeln als zweite Produktlinie auch LS produzieren. Die Ziegeleien verfügen traditionell über eigene Lehmgruben auf dem Ziegeleigelände oder in unmittelbarer Nähe. Deshalb geht *Primärgrubenlehm* mit den Umweltwirkungen des gesamten Grubenbetriebes in die Berechnung der Ökobilanz ein.

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

Holzspäne: Holzspäne sind ein Kuppelprodukt der Schnittholzproduktion. Die Bilanzdaten für Holzspäne basieren auf der massebezogenen Allokation der Inputfaktoren und Umweltwirkungen der Schnittholzproduktion [14].

CO₂-Speicherung in Holzspänen: Die Umrechnung der Holzmasse in CO₂ erfolgt über die im Holz enthaltene Kohlenstoffmenge und das Verhältnis der Molmassen von CO₂ zu C (44/12). Der Kohlenstoffgehalt im Holz wird für alle Holzarten mit 50 % der absolut trockenen Holzmasse angenommen. Somit entspricht 1 kg absolut trockene Holzmasse etwa 1,832 kg CO₂. Die verwendeten Holzspäne sind nicht absolut trocken. Angenommen werden eine Restfeuchte von 30 % und die gespeicherte CO₂-Masse proportional zu 100 % trockenem Holz auf etwa 1 kg CO₂ reduziert.

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

Trocknung: Für die *Freilufttrocknung* ist kein Energieinput erforderlich. *Technische Trocknung* erfolgt mit Wärme, die mit unterschiedlichen Energieträgern erzeugt wird. Die Verfahrenstechniken zur Wärmeübertragung sind herstellerepezifisch und werden in dieser Muster-UPD nicht einbezogen.

Für die technische Trocknung von LS wird der Wärmebedarf rechnerisch ermittelt. Als worst case Szenario wird die zur Verdampfung des Anmachwassers bei der Formgebung der LS aufgewendete Wärmeenergie zugrunde gelegt und Erdgas als Energieträger angenommen. Für die Formgebung der LS ist ein bildsamer Zustand der Lehm Masse erforderlich (DIN EN 17892-11), das entspricht der

Konsistenzform I_c „weich-steif“ mit einem Wassergehalt von 15 – 25 M.-% in der Mischung. Für die weitere Berechnung des Wärmebedarfs wird ein Wassergehalt von 20 M.-% angenommen. Die nach Trocknung verbleibende absolute Restfeuchte der LS fungiert als zweite Variable zur Bestimmung der nötigen Trocknungsenergie. Ausschlaggebend ist dabei der Porenwassergehalt in den Tonmineralien des verwendeten Grubenlehms. Die Schwankungsbreite des Porenwassergehalts geht von 2 M.-% bei Zweischicht-Tonmineralien (z. B. Kaolin) bis 6 M.-% bei Dreischicht-Tonmineralien (z. B. Montmorillonit). Für die Berechnung des Wärmebedarfs wird ein Mittelwert von 5 M.-% angenommen.

Diese Grundannahmen sind die Variablen für eine vereinfachte Berechnung der Verdampfungsenthalpie [15]. Die Verdampfung des Wassers erfordert einen Energieinput von 2.308 kJ/kg Wasser bei ca. 80 °C und Normaldruck (1.013 bar). Das entspricht einem Energiebedarf von 0,22 kWh/ kg LS. Im Vergleich dazu wird in [10] die Trocknungsenergie für Ziegelsteine vor dem Brennen auf 0,3 kWh/ kg geschätzt und auf die Berechnung der Ökobilanz von Lehm-Plansteinen übertragen.

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

PE Folie dient als Transportverpackung und schützt die palettierten LS. Die 150 cm breite Folie umschließt eine Palette mit marktüblichen Einheiten zu 416 St. LS pro Palette. Für PE-Folie findet das Abschneidekriterium nach *Abs. B.4* Anwendung.

Abbruch/Abriss (C1): Für die nachfolgende Modellrechnung zum Abbruch von LSM wird auf die Leistungsdaten eines branchentypischen Abrissbaggers der Fa. Liebherr mit einem Dieselverbrauch von 0,16 l / Betriebsstunde bei einer Abrissleistung von 30 m³/h zurückgegriffen.

Abfallaufbereitung (C3): Die Annahmen im IM C3 basieren auf Untersuchungen der FH Potsdam [9] zur Aufbereitung von LS-Abbruch durch Zermahlen in entsprechenden Mühlen oder Replastifizierung (Einsumpfen). Für die nachfolgende Modellrechnung werden die Verbrauchs- und Leistungsdaten einer branchentypischen Prallbrecheranlage (SBM Remax 200; mobil / stationär einsetzbar) für mineralische Baustoffe unterstellt. Diese Prallmühle benötigt 0,23 l Diesel / t Abbruchmaterial, einschließlich des Betriebs eines integrierten Stromgenerators.

Rückgewinnungspotenzial (D): Die Darstellung eines Rückgewinnungspotenzials für LS ist abhängig von der Entwicklung betriebswirtschaftlich sinnvoller, praxistauglicher Trenn- und Aufbereitungsverfahren. Abbruchversuche an der FH Potsdam [9] ergaben einen Anteil von 25 % unversehrter LS zur sortenreinen Wiederverwendung. Die homogene Zusammensetzung von LS (und anhaftender LMM) überwiegend aus Baulehm erwies sich als vorteilhaft für eine Wiederverwertung für neue LS und andere Lehmbaumprodukte.

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

IM D1 unterstellt eine Wiederverwendung sortenrein rückgewonnener LS nach Abbruch einer Lehmsteinwand für neue Lehmsteinwände. Die dann mögliche Einsparung des gesamten Herstellungsprozess in den IM A1 – A3 ergibt das Rückgewinnungspotenzial dieses Szenarios.

IM D2 unterstellt eine Wiederverwertung des rückgewonnenen Abbruchmaterials einer Lehmsteinwand als Sekundärstoff für *neue LS*. Im Szenario D2 ersetzen die

Sekundärstoffe aus Abbruchmaterial sonst erforderliche primäre Ausgangsstoffe (IM A1 und A2). Das Herstellungsverfahren nach IM A3 kann nicht ersetzt werden, denn die Sekundärstoffe durchlaufen den gesamten Dosier-, Formgebungs- bzw. Trocknungsprozess nochmals.

IM D3 unterstellt eine Wiederverwertung des trocken zurückgewonnenen Abbruchmaterials einer Lehmsteinwand als Sekundärstoff *für andere Lehmbaustoffe*, die im *Trockendosierverfahren* hergestellt werden, z. B. neue LPM. Bei diesem Verwertungsszenario ersetzt das Abbruchmaterial einer Lehmsteinwand den technischen Trocknungsprozess für primär hergestellten Trockenlehm.

Transporte: Sämtliche Transporte der eingesetzten Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe zu den Werken wurden in der Bilanz unter Berücksichtigung ihrer Entfernung und des Auslastungsgrades berücksichtigt. Zusätzlich wurden die Primärenergieeinsätze für Transporte im Werk (Gabelstapler, Radlader) bewertet. Die Transporte der Fertigprodukte zur Baustelle liegen außerhalb der Systemgrenzen und gehen in die Umweltbilanz des jeweiligen Gebäudes ein.

B.6 Datenqualität

Die Berechnungsgrundlagen für die Ausgangsstoffe von LS und LLS basieren auf Datenblättern von Herstellern aus dem DVL. Die Prozessschritte zur Herstellung (Dosieren/Mischen/Formen/Trocknen) sind typisch für die Herstellung von LS. Die Daten zum Strombedarf sind aus Ist-Angaben zu vergleichbaren Prozessen bei anderen Lehmbaustoffen [16] abgeleitet. Die Annahmen zum Energieinput bei technischer Trocknung wurden in *Teil B.5* erläutert.

Die untersuchten, nach den beschriebenen Verfahren hergestellten LS sind typisch für die am Markt befindlichen Produkte in Deutschland.

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

Tab. B.1 Übersicht Datengrundlagen

Nr.	Daten	Hintergrunddatensätze
1	Primärgrubenlehm	Ecoinvent 3.9, Nov. 2015 [17]
2	Holzspäne	Forschungszentrum Karlsruhe/ BFH [14]
3	Elt. Energie regenerativ (z. B. Wasserkraft)	ÖKOBAUDAT 9.2.05 (2021-06) [18]; zum Vergleich: GEMIS 5.0
4	Erdgas	ÖKOBAUDAT 9.2.02 (2021-06) [18]
5	Transport zum Werk (35-40 t, EURO 5, 27 t Nutzlast, 85 % Auslastung)	ÖKOBAUDAT 9.3.01 (2021-06) [18]
6	Abbruch/Abriss	Herstellerdaten LIEBHERR; Abrissbagger [19]
7	Abfallaufbereitung	FH Potsdam [9]; Herstellerdaten REMAX 20, Prallbrecher [23]
8	Wiederverwendungspotenzial	FH Potsdam [9]; UPD LPM [16]

B.7 Allokation

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

B.8 Ergebnisse der Ökobilanzierung (LCA)

Für das Produkt „Gebäude“ sind alle IM A – D nach *Tab. B.2.1 – B.4.2* zu berücksichtigen. In der Produktebene „Baustoff“ entstehen für LS in der Errichtungs- und Nutzungsphase i. d. R. keine Ressourcenverbräuche mit entsprechenden Umweltauswirkungen. Nach DIN EN 15804 ist die Deklaration der IM A1 – A3, C1 – C4 und D für alle zu untersuchenden Bauprodukte verpflichtend. Die Muster-UPD betrachtet den Lebenszyklus der LS „von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen“. Neben den IM A1 – A3 umfasst die Ökobilanz auch die IM C1 und C3 sowie das IM D. Das Rückgewinnungspotenzial IM D wird nach drei Szenarien differenziert in IM D1 bis D3 in Teil C.4 erörtert.

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)

Die Indikatoren 1 – 6 werden nicht deklariert.

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.3.1 Ökobilanz für 1 kg LLS, AK Ia, Freilufttrocknung; Inputfaktoren

LLS AK Ia nach DIN 18945, Freilufttrocknung												
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA												
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM												
Funktionale Einheit kg		Parameter	PERE	PERM	PERT	PENRE	PENRM	PENRT	SM	RSF	NRSF	FW
		IM/Einheit	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	kg	MJ H _u	MJ H _u
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	4,86E-03	0,00E+00	4,86E-03	3,72E-01	0,00E+00	3,72E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,56E-06
	Transport	A2	4,65E-06	0,00E+00	4,65E-06	6,92E-05	0,00E+00	6,92E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,37E-09
	Herstellung	A3	3,22E-02	7,64E-11	3,22E-02	4,03E-04	0,00E+00	4,03E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,47E-07
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	3,71E-02	7,64E-11	3,71E-02	3,73E-01	0,00E+00	3,73E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,12E-06
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Rückbau, Abriss	C1	1,56E-05	0,00E+00	1,56E-05	4,26E-03	0,00E+00	4,26E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,07E-08	5,07E-10
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	6,03E-05	0,00E+00	6,03E-05	1,65E-02	0,00E+00	1,65E-02	0,00E+00	0,00E+00	8,00E-08	1,96E-09
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwendung LS	D1	-3,71E-02	-7,64E-11	-3,71E-02	-3,73E-01	0,00E+00	-3,73E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,12E-06
	Wiederverwertung LS	D2	-4,86E-03	0,00E+00	-4,86E-03	-3,72E-01	0,00E+00	-3,72E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D3	-3,14E-02	0,00E+00	-3,14E-02	-8,56E-01	0,00E+00	-8,56E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-6,83E-03

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

PERM Nutzung erneuerbarer Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

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

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

PENRM Nutzung nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

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

SM Nutzung von Sekundärstoffen

RSF Nutzung erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

NRSF Nutzung nicht erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

FW Nettonutzung von Frischwasser

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

Tab. B.3.2 Ökobilanz für 1 kg LS AK Ib, technische Trocknung, Inputfaktoren

LS AK Ib nach DIN 18945, technische Trocknung,												
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA												
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM												
Funktionale Einheit kg		Parameter	PERE	PERM	PERT	PENRE	PENRM	PENRT	SM	RSF	NRSF	FW
		IM/Einheit	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	kg	MJ H _u	MJ H _u
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	2,50E-04	0,00E+00	2,50E-04	4,16E-02	0,00E+00	4,16E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,29E-06
	Transport	A2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	3,39E-02	0,00E+00	3,39E-02	8,70E-01	0,00E+00	8,70E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,07E-06
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	3,41E-02	0,00E+00	3,41E-02	9,11E-01	0,00E+00	9,11E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,04E-05
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Rückbau, Abriss	C1	1,56E-05	0,00E+00	1,56E-05	4,26E-03	0,00E+00	4,26E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,07E-08	5,07E-10
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	6,03E-05	0,00E+00	6,03E-05	1,65E-02	0,00E+00	1,65E-02	0,00E+00	0,00E+00	8,00E-08	1,96E-09
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwendung LS	D1	-3,41E-02	0,00E+00	-3,41E-02	-9,11E-01	0,00E+00	-9,11E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,04E-05
	Wiederverwertung LS neu	D2	-2,50E-04	0,00E+00	-2,50E-04	-4,16E-02	0,00E+00	-4,16E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D3	-2,97E-02	0,00E+00	-2,97E-02	-5,79E-01	0,00E+00	-5,79E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,59E-03

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

PERM Nutzung erneuerbarer Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

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

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

PENRM Nutzung nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

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

SM Nutzung von Sekundärstoffen

RSF Nutzung erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

NRSF Nutzung nicht erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

FW Nettonutzung von Frischwasser

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

Tab. B.4.1 Ökobilanz für 1 kg LLS AK Ia, Freilufttrocknung, Umweltwirkungsfaktoren

LLS AK Ia nach DIN 18945, Freilufttrocknung												
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										Ergänzende Parameter		
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM												
Funktionale Einheit kg		Parameter	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	GWP Prozess (fossil)	GWP (biogen)	GWP LuL
		IM/Einheit	kg CO ₂ äquiv	kg CFC-11 äquiv	kg SO ₂ äquiv	kg PO ₄ ³⁻ äquiv	kg C ₂ H ₄ äquiv	kg Sb äquiv	MI H _u äquiv	kg CO ₂ äquiv	kg CO ₂ äquiv	kg CO ₂ äquiv
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	-1,10E-01	1,69E-09	3,86E-05	7,55E-06	5,69E-06	9,04E-10	3,80E-02	1,11E-02	-1,21E-01	1,20E-04
	Transport zum Werk	A2	6,40E-06	1,01E-15	1,17E-08	2,73E-09	3,36E-09	5,43E-10	6,89E-05	6,40E-06	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	3,67E-05	2,88E-12	6,28E-08	2,52E-08	1,56E-07	1,76E-10	3,81E-04	3,67E-05	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	Gesamt	-1,10E-01	1,70E-09	3,86E-05	7,58E-06	5,85E-06	1,62E-09	3,85E-02	1,11E-02	-1,21E-01	1,20E-04
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	Wi	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	3,81E-05	1,76E-14	1,40E-07	9,41E-09	2,39E-08	1,06E-08	4,25E-03	3,81E-05	0	0
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	1,47E-04	6,81E-14	5,43E-07	3,64E-08	9,25E-08	4,11E-08	1,64E-02	1,47E-04	0,00E+00	0,00E+00
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwendung LS alt	D1	-1,15E-02	-1,70E-09	-3,86E-05	-7,58E-06	-5,85E-06	-1,62E-09	-3,85E-02	-1,14E-02	0,00E+00	-1,20E-04
	Wiederverwertung LS neu	D2	-1,12E-02	-1,69E-09	-3,86E-05	-7,55E-06	-5,69E-06	-9,04E-10	-3,80E-02	-2,88E-02	0,00E+00	1,76E-02
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D3	-7,73E-02	-9,90E-03	-9,95E-03	-9,91E-03	-9,94E-03	-9,90E-03	-5,24E-01	-7,72E-02	0,00E+00	-1,20E-04

GWP Globales Erwärmungspotenzial

ODP Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht

AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser

EP Eutrophierungspotenzial

POCP Potenzial hinsichtlich der Bildung von troposphärischem Ozon

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

ADPF Potenzial für den abiotischen Ressourcenabbau - fossile Brennstoffe

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

Tab. B.4.2 Ökobilanz für 1 kg LS AK Ib, technische Trocknung, Umweltwirkungsfaktoren

LS AK Ib nach DIN 18945, technische Trocknung												
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										Ergänzende Parameter		
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM												
Funktionale Einheit kg		Parameter	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	GWP Prozess (fossil)	GWP (biogen)	GWP LuL
		IM/Einheit	kg CO ₂ äquiv	kg CFC-11 äquiv	kg SO ₂ äquiv	kg PO ₄ ³⁻ äquiv	kg C ₂ H ₄ äquiv	kg Sb äquiv	MI H _u äquiv	kg CO ₂ äquiv	kg CO ₂ äquiv	kg CO ₂ äquiv
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	2,93E-03	5,38E-10	2,24E-05	5,58E-06	3,85E-06	1,00E-09	4,22E-02	2,93E-04	0,00E+00	2,64E-03
	Transport zum Werk	A2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	5,23E-02	2,88E-12	2,71E-05	4,59E-06	4,05E-06	3,07E-06	8,69E-01	5,23E-02	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	Gesamt	5,52E-02	5,41E-10	4,95E-05	1,02E-05	7,90E-06	3,08E-06	9,11E-01	5,26E-02	0,00E+00	2,64E-03
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	Wi	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	3,81E-05	1,76E-14	1,40E-07	9,41E-09	2,39E-08	1,06E-08	4,25E-03	3,81E-05	0	0
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	1,47E-04	6,81E-14	5,43E-07	3,64E-08	9,25E-08	4,11E-08	1,64E-02	1,47E-04	0,00E+00	0,00E+00
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwendung LS alt	D1	-5,52E-02	-5,41E-10	-4,95E-05	-1,02E-05	-7,90E-06	-3,08E-06	-9,11E-01	-5,26E-02	0,00E+00	-2,64E-03
	Wiederverwertung LS neu	D2	-2,93E-03	-5,38E-10	-2,24E-05	-5,58E-06	-3,85E-06	-1,00E-09	-4,22E-02	-2,93E-04	0,00E+00	-2,64E-03
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D3	-7,64E-02	-1,10E-02	-1,10E-02	-1,10E-02	-7,64E-02	-1,10E-02	-5,82E-01	-7,64E-02	0,00E+00	0,00E+00

GWP Globales Erwärmungspotenzial

ODP Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht

AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser

EP Eutrophierungspotenzial

POCP Potenzial hinsichtlich der Bildung von troposphärischem Ozon

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

ADPF Potenzial für den abiotischen Ressourcenabbau - fossile Brennstoffe

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

Tab. B.5.1 Ökobilanz für 1 kg LLS AK Ia, Freilufttrocknung, Outputfaktoren

LLS AK Ia nach DIN 18945, Freilufttrocknung										
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM										
Funktionale Einheit kg		Parameter	HWD	NHWD	RWD	CRU	MFR	MER	EEE	EET
		IM/Einheit	kg	kg	kg	kg	kg	kg	MJ	MJ
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	2,40E-05	1,87E-05	2,74E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	A2	4,34E-09	5,31E-09	1,05E-10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	3,56E-06	7,07E-05	1,64E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	2,76E-05	8,93E-05	2,75E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	3,70E-08	3,79E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	8,55E-08	8,78E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwendung LS, luftgetrocknet	D1	-2,76E-05	-8,93E-05	-2,75E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung LS neu	D2	-2,40E-05	-1,87E-05	-2,74E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D3	-4,14E-05	-5,42E-06	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

Tab. B.5.2 Ökobilanz für 1 kg LS AK Ib, technische Trocknung, Outputfaktoren

LS AK Ib nach DIN 18945, technische Trocknung										
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM										
Funktionale Einheit kg		Parameter	HWD	NHWD	RWD	CRU	MFR	MER	EEE	EET
		IM/Einheit	kg	kg	kg	kg	kg	kg	MJ	MJ
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	2,67E-05	2,07E-05	3,04E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	A2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	3,92E-06	2,81E-04	2,81E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	3,06E-05	3,02E-04	2,82E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	3,70E-08	3,79E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung, trocken	C3	8,55E-08	8,78E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwendung LS	D1	-3,06E-05	-3,02E-04	-2,82E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung LS neu	D2	-2,67E-05	-2,07E-05	-3,04E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung Trockendosierverfahren	D3	-2,08E-09	-4,60E-05	-6,02E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

HWD Gefährlicher Abfall zur Deponie

NHWD Entsorgter nicht gefährlicher Abfall

RWD Entsorgter radioaktiver Abfall

CRU Komponenten für die Wiederverwendung

MFR Stoffe zum Recycling

MER Stoffe für die Energierückgewinnung

EEE Exportierte Energie elektrisch

EET Exportierte Energie thermisch

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

TEIL C – INTERPRETATION DER ÖKOBILANZ

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

C.1 Primärenergieeinsatz (PEI)

Die Durchschnittswerte zum Primärenergieeinsatz in der Sachbilanz (*Tab. A.1*) basieren auf Datenblättern für LS und unterschiedlichen Annahmen. Die Prozessschritte in IM A3 zum Dosieren / Mischen / Formen sind mit den Prozessschritten zur Herstellung von LMM und LPM technisch vergleichbar. Es werden ähnliche Maschinen und Anlagen eingesetzt. Der Stromverbrauch von 8,5 kWh/t (30,6 MJ / t) in der Sachbilanz (*Tab. A.1*) entspricht der Ist-Jahresabrechnung für diese Prozessschritte in der Muster-UPD LMM. Bezogen auf eine funktionale Einheit sind das 0,03 MJ/kg LS.

Die Berechnungsgrundlagen für Ausgangsstoffe, Energieträger und Transporte basieren auf generischen Daten aus verschiedenen Datenbanken und fachspezifischen Literaturquellen (*Teil B.6*).

Der Primärenergieinput für die Herstellung von LLS, AK Ia mit Freilufttrocknung beträgt in den IM A1 – A3, einschließlich der Vorkette zur Bereitstellung des Grubenlehms und der elektrischen Energie 0,41 MJ/kg LLS (*Abb. C.1.1*).

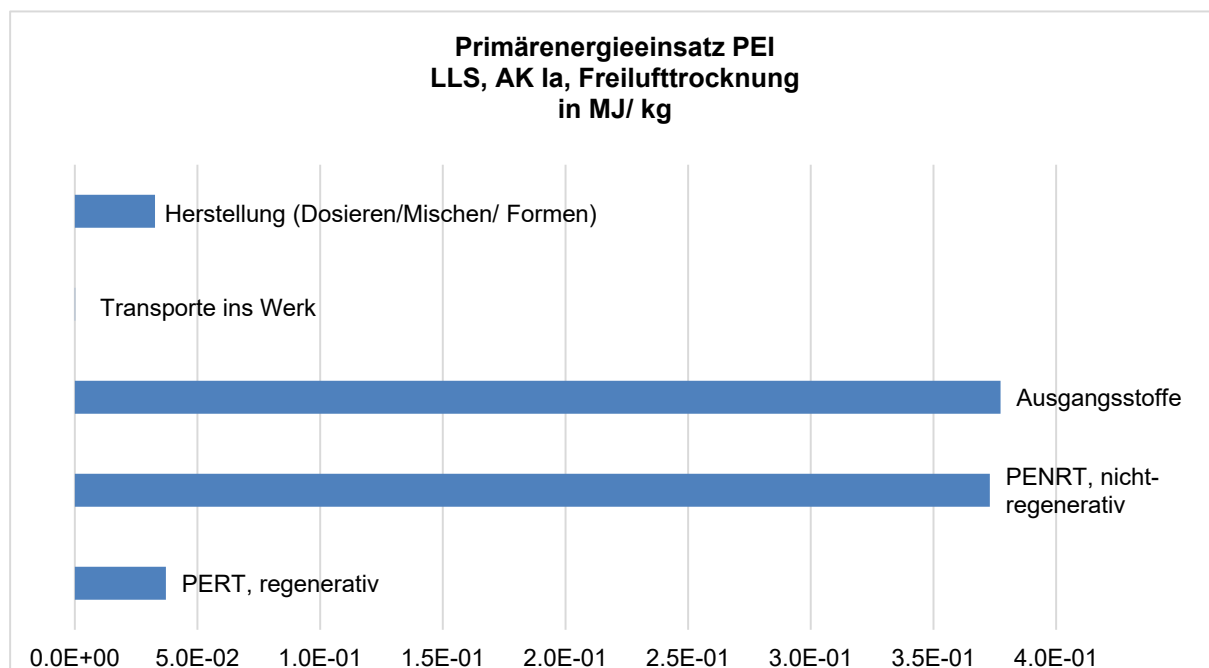


Abb. C.1.1 Primärenergieeinsatz PEI für LLS, AK Ia, Freilufttrocknung

Der größte Anteil am gesamten Primärenergieinput entfällt mit 0,377 MJ / kg LS oder 92 % auf die beiden Ausgangsstoffe Primärgrubenlehm (90 M.-%) und Holzspäne (10 M.-%). Dabei trägt der Betrieb einer Lehmgrube zur Bereitstellung des Primärgrubenlehms für die LS nur mit 0,042 MJ/kg LS oder 11 % zum Energieeintrag bei. Der Hauptanteil (89 %) ergibt sich aus der Bewertung der Holzspäne nach massebezogener Allokation aus der Schnittholzproduktion. Der Gewichtsanteil des Kuppelproduktes „Holzspäne“ wird auf den Gesamtenergieinput der Schnittholzproduktion bezogen. Der Energiebedarf für die Prozessschritte zu mechanisierten Herstellung beträgt mit 3,3E-02 MJ/kg LS, AK Ia knapp 8 % des gesamten Primärenergieinput (*Abb. C.1.1*). Die Transporte ins Werk (1,38E-

04 MJ/kg LS, AK Ia) entstehen durch die Bereitstellung von Holzspänen aus Sägewerken im angenommenen Umkreis von 50 km. Primärgrubenlehm stammt aus einer Lehmgrube auf dem Werksgelände (z. B. Ziegelei) ohne Transportaufwand.

Abb. C.1.2 zeigt die Verteilung des gesamten Primärenergieeinsatzes in Höhe von 9,45E-01 MJ/kg LS für technisch getrocknete LS der AK Ib. Die LS, AK Ib bestehen zu 100 % aus Baulehm. Dieser stammt aus Gruben der unmittelbaren Umgebung der Ziegeleien, die LS als weiteren Produktionszweig neben Ziegeln herstellen. Transporte von Ausgangsstoffen ins Werk (IM A2) entfallen.

Der Berechnung des Wärmeenergiebedarfs zur technischen Trocknung von LS, AK Ib liegt das in Teil B.5 beschriebene Rechenmodell nach folgender vereinfachten Formel zugrunde:

$$Q = m_{tr} * (x_{ein} - x_{aus}) * h_v$$

Q = zur Verdampfung aufgewendete Wärmeenergie in kJ

m_{tr} = trockene Produktmasse in kg (2,3 kg)

x_{ein} = Anfangs- oder Eintrittsfeuchte (20 M.-%)

x_{aus} = End- oder Austrittsfeuchte (5 M.-%)

h_v = Verdampfungsenthalpie in kJ / kg Flüssigkeit: um 1 kg Wasser (entspricht 55,56 mol) bei 80 °C, 1.013 mbar zu verdampfen, müssen 2.308 kJ (41.585 J/mol) aufgewendet werden [15].

In Abb. C.1.2 wird deutlich, dass der im Vergleich zur Freilufttrocknung doppelte Energieinput zu 92% (8,7 MJ/ kg LS) auf die Annahmen zur technischen Trocknung zurückgeht (Teil B.5). Die spezifische Verdampfungsenthalpie von 2.038 kJ/kg Wasser bei 20 M.-% Wassergehalt in der Mischung (und der Restfeuchtegehalt nach Trocknung von 5 M.-% ergeben den physikalisch hergeleiteten Wärmebedarf zur Trocknung von 0,22 kWh / kg LS. Als worst case Szenario geht die Primärenergie zur Bereitstellung des Energieträgers „Erdgas“ mit 4 MJ /kWh Erdgas in die Berechnung ein. Dementsprechend überwiegt der Anteil nicht-regenerativer Primärenergie (PENRT) mit 96 % und regenerative Primärenergie, z. B. Strom aus Wasserkraft, hat nur einen Anteil von 4 %. Mögliche Energieeinsparpotenziale durch Optimierung der Trocknungsverfahren (z. B. Strömungsführung, Abluftnutzung) bleiben herstellerspezifischen UPD vorbehalten.

Dosierung, Mischung und Formgebung der Lehm Masse benötigen 3,3E-02 MJ/kg LS elektrische Energie, hauptsächlich für Transportbänder und Mischer. Der Anteil am gesamten Primärenergiebedarf beträgt 3,45 %.

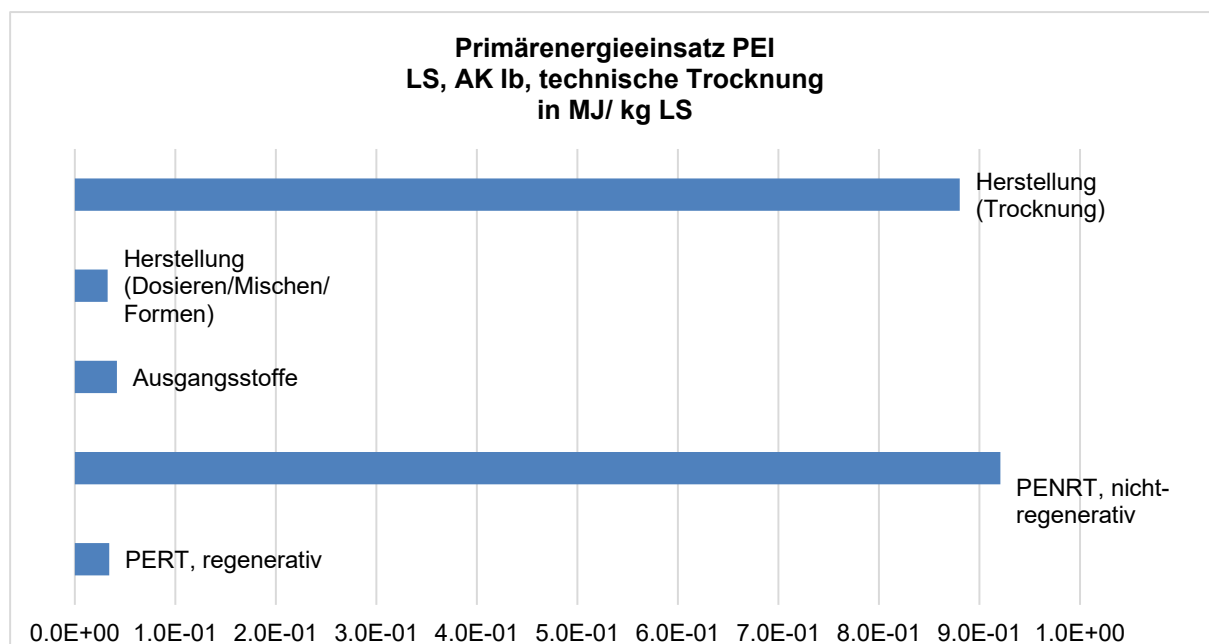


Abb. C.1.2 Primärenergieeinsatz PEI für LS, AK Ib, technische Trocknung

C.2 Treibhausgaspotenzial (GWP)

Die Treibhausgaspotenziale als CO_2 equiv. werden als GWP 100 in ihrer Klimawirkung über 100 Jahre betrachtet. Untersucht wurde das GWP für beide LS. Die unbehandelten Holzspäne (10 M.-%) in der LLS-Rezeptur, Freilufttrocknung enthalten gebundenes CO_2 , das in die Berechnung einbezogen wurde (*Teil B.5: CO_2 Speicherung in Holzspänen*).

Bei LLS, AK Ia ergibt sich über die IM A1 – A3 summiert ein negatives Treibhausgaspotential (GWP 100) von $-1,10\text{E-}01 \text{ kg CO}_2$ equiv. / kg LS (*Tab. B.3.1*). In *Abb. C.2.1* werden die Beiträge der einzelnen Module dargestellt und nachfolgend interpretiert.

Ursächlich für die Senkung der Treibhausgaspotenziale ist der in den Holzspänen (10 M.-% der Mischung) gespeicherte Kohlenstoff mit $0,12 \text{ kg / kg Holzspäne}$ (*Teil B.5*). Dagegen stehen die Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Lehmgrube mit $2,93\text{E-}03 \text{ kg CO}_2$ equiv. / kg Primärgrubenlehm und die Bereitstellung der Holzspäne selbst mit $8,55\text{E-}03 \text{ kg CO}_2$ equiv. / kg Holzspäne. Der Transport der Holzspäne über 50 km mit LKW (EURO 5) mit 34 – 40 t zulässigem Gesamtgewicht und 27 t Nutzlast im Speditionsverkehr bei 85 % Auslastung verursacht $6,4\text{E-}06 \text{ kg CO}_2$ equiv./ kg Holzspäne. Der Herstellungsprozess mit 8,5 kWh /t Strom aus Wasserkraft ergibt ein Treibhausgaspotential von $3,67\text{E-}05 \text{ kg CO}_2$ equiv./kg LLS, AK Ia. Insgesamt bleiben die Transporte und der Herstellungsprozess mit zusammen 0,04 % des GWP unterhalb des Abschneidekriteriums. Ohne die CO_2 -Gutschrift für Holzspäne würde das Treibhausgaspotenzial aus den IM A1 –A3 zusammen auf $1,12\text{E-}02 \text{ kg CO}_2$ equiv. / kg LLS, AK Ia, Freilufttrocknung ansteigen.

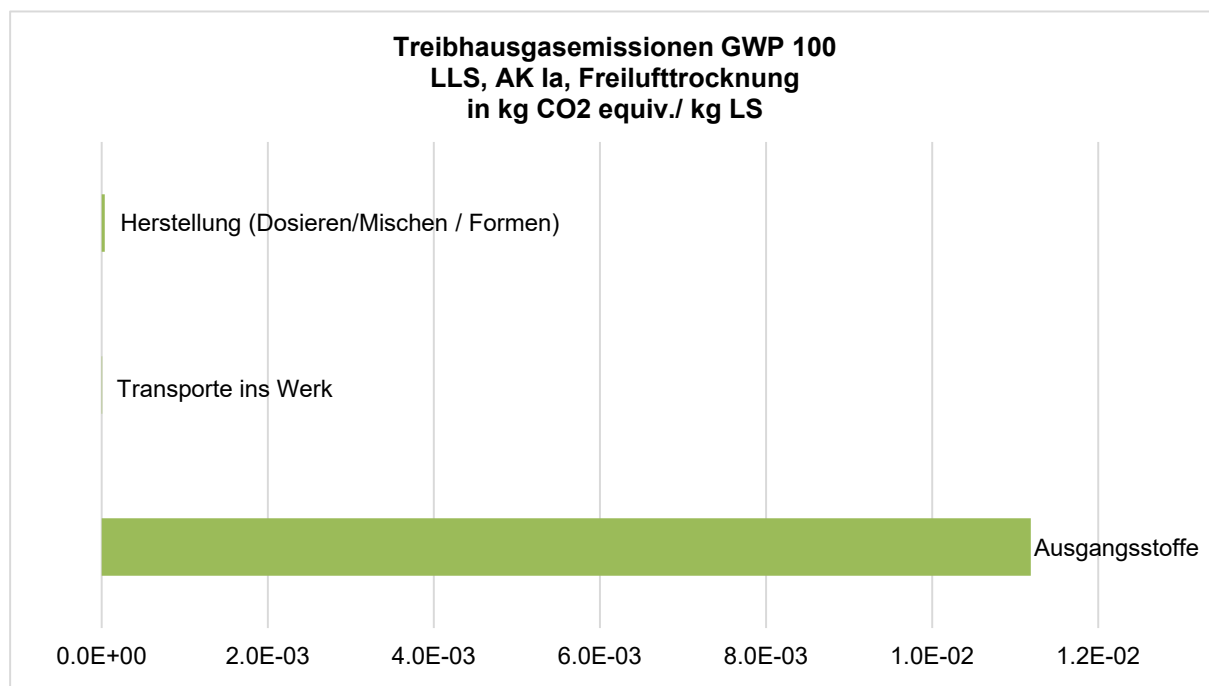


Abb. C.2.1 Treibhausgaspotenziale (GWP 100) LLS, AK Ia, Freilufttrocknung

Die technische Trocknung von LS der AK Ib führt zu einem anderen Bild der Treibhausgasemissionen. Mit Erdgas als Energieträger für den Wärmebedarf zur Trocknung ergibt eine Bilanz des GWP in IM A1 – A3 insgesamt $5,52\text{E-}02 \text{ kg CO}_2$ equiv. / kg LS, AK Ib (*Abb. C.2.2*).

Die Rezeptur enthält 100 M.-% Baulehm als Primärgrubenlehm auf dem Werksgelände (z. B. Ziegelei). Daher entfallen Transport von Ausgangsstoffen ins Werk (IM A2). Der Betrieb der Lehmgrube trägt mit $2,93\text{E-}03 \text{ kg CO}_2$ equiv./kg LS (knapp 5 %) zum GWP bei. Anders als bei LLS, AK Ia gibt es keine CO_2 -Gutschriften aus der Beimengung von Holzspänen. Knapp 95 % der

Treibhausgaspotenziale entfallen auf den Trocknungsprozess, die Vorbereitung der LS (Dosieren / Mischen / Formen) trägt marginal mit 0,07 % zu den Treibhausgasemissionen bei.

Der Anteil der Trocknung mit $5,23E-02 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv./kg LS}$, AK Ib ergibt sich rechnerisch aus einem theoretischen Ansatz, abgeleitet aus der spezifischen Verdampfungsenthalpie des Wassergehaltes bei Formgebung der LS. Im Sinne eines worst case_Szenarios wurde Erdgas als Energieträger unterstellt, aus dem sich der spezifische Wärmebedarf für die Verdampfung des Anmachwassers der LS ergibt. Der Wärmebedarf von $0,22 \text{ kWh/kg LS}$, gedeckt aus Erdgas, verursacht ein Treibhausgaspotential von $5,23E-02 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv./kg LS}$, AK Ib.

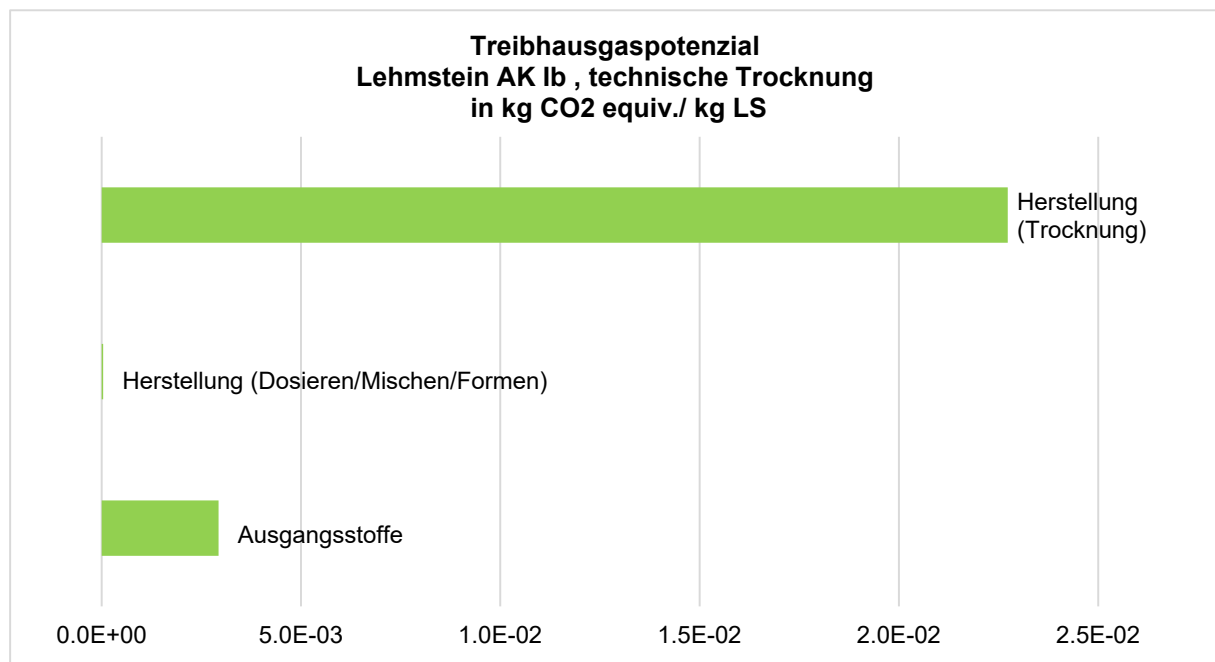


Abb. C.2.2 Treibhausgaspotenziale (GWP 100) LS AK Ib, technische Trocknung mit Erdgas

Wäre der angenommene Energieträger nicht Erdgas sondern Biogas, entstünde ein ähnlicher Effekt wie bei LLS, AK Ia mit Holzspänen. In der Ökobilanz von Biogas [18, 9.02.08] ist eine CO₂ Gutschrift enthalten, die bezogen auf den spezifischen Wärmebedarf zu einem insgesamt negativen Treibhausgaspotenzial von $-4,36E+01 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv./kg LS}$, AK Ib führen würde. Selbst ohne die CO₂ Gutschrift vermindert sich das Treibhausgaspotenzial gegenüber einer Erdgas-Trocknung mit Biogas auf insgesamt $1,29 E-02 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv./kg LS}$, AK Ib oder um 76 %. Dieses Szenario verdeutlicht, dass der Einsatz anderer, nicht fossiler Energieträger zu einer signifikanten Reduktion von Treibhausgasemissionen bei der technischen Trocknung von LS der AK Ib führen kann, mit und ohne CO₂ Gutschrift.

C.3 Abbruch und Aufbereitung

Baustoffe mit dem Bindemittel Lehm sind replastifizierbar [21]. Bei diesem Prozess lösen sich die Komponenten einer Materialmischung vom Bindemittel Ton und werden wiederverwertbar.

Die Rückgewinnung von verarbeiteten LS erfolgt aus teilweisem / vollständigem Gebäudeab**bruch**. Dabei lassen sich LS i. d. R. nur im Verbund mit LMM [22] als Lehmsteinmauerbruch zurückgewinnen (Tab. C.3.1).

Tab. C.3.1 Homogene Stoffzusammensetzung LMM und LS

LMM / LS, Zusammensetzung	LMM, erdfeucht (1.800 kg/m³)	LMM, getrocknet (1.400 kg/m³)	LS AK Ib (1.800 kg/m³)	LLS AK Ia (1.200 kg/m³)
Ausgangsstoffe	kg pro kg LMM	kg pro kg LMM	kg pro kg LS	kg pro kg LS
Baulehm	0,6	0,7	1,0	0,9
Holzspäne, unbehandelt	0	0,1	0	0,1

LMM und LS bestehen überwiegend aus Baulehm (60 M.-% bis 100 M.-%). Je nach Produkt gibt es für LMM Zusätze von Sand bis zu 40 M.-% und Holzspänen von 10 M.-%. Die homogene Stoffzusammensetzung des rückgebauten Lehmsteinmauerwerks LSM erlaubt mehrere technisch und wirtschaftlich mögliche Verwertungswege für Lehmsteinbruch, die als Rückgewinnungsszenarien in den IM C1, C3 und D1 – D3 dargestellt werden.

Für die Quantifizierung des *IM C1* wurden die Leistungsdaten eines branchentypischen Abrißbaggers angenommen und auf ein LSM mit Lehmsteinen und Anhaftungen von LMM bezogen. Nach Herstellerangaben verbraucht ein Abbruchbagger 7,65 kg Diesel / h bei einer geschätzten Abrißleistung von 50 m³ Mauerwerk/h [19]. Diese Angaben wurden für LSM in der Umweltbilanz für IM C1 „Abbruch / Abriß“ unterstellt (*Abb. C.3.1*).

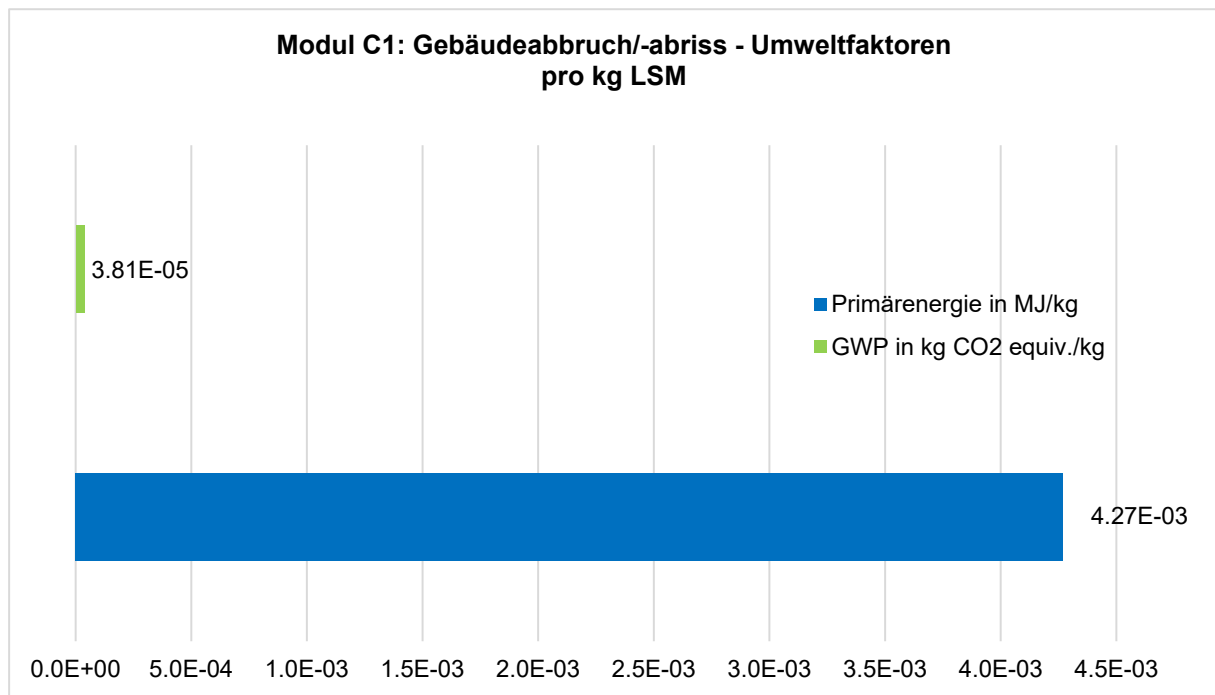


Abb. C.3.1 IM C1: Energieinput und GWP für Gebäudeabbruch pro kg LSM

Der Energieaufwand (MJ/kg LSM) und die resultierenden Treibhausgasemissionen (CO₂ equiv. / kg LSM) der IM C1 und C3 werden in Beziehung zu den Rückgewinnungspotenzialen gesetzt und geben Auskunft über den Netto-Effekt der Rückgewinnung (*Teil C.4*).

In IM C3 wird die Replastifizierung („Einsumpfen“) des Lehmsteinbruchs im Nassverfahren als Teil des Prozesses zur Wiederverwertung im Werk untersucht. Dieses Verfahren erfordert keine mechanisierte Aufbereitung oder automatisierte Recyclinganlagen. Daher kann nicht auf typische Leistungsdaten für die eingesetzte Technik für eine Quantifizierung der Umweltfaktoren

zurückgegriffen werden. Es handelt sich vielmehr um ein einfaches, manuelles Aufbereiten, das üblicherweise auf den Baustellen stattfindet.

Bei „trockener“ Aufbereitung wird der Lehmsteinbruch durch geeignete Anlagen mechanisch zerkleinert. Die entsprechenden Verfahren sind durch verfügbare Leistungsdaten der Hersteller bilanzierbar. Für diese Muster-UPD wurde ein für das Baustoffrecycling typischer Prallbrecher (Modell: SBM Remax 200) mit 0,23 l/t Dieselverbrauch ausgewählt [20]. LLS AK Ia enthalten 10 M.-% Holzspäne. Zur trockenen Trennung von vegetabilen und mineralischen Komponenten im Recyclingprozess eignen sich Windsichter, die mit Prallbrechern und ähnlichen Zerkleinerungsanlagen kombiniert werden können. Dadurch steigt der Dieselverbrauch um 0,04 l/t auf insgesamt 0,27 l/t.

Prallbrecher zerkleinern i. d. R. härtere Materialien als Lehm (Beton, Ziegel) mit einem Durchsatz von 250 t/h. Deshalb erscheint der hier zur Bilanzierung angenommene Dieselverbrauch pro t Lehmsteinbruch tendenziell zu hoch angesetzt, wird aber als worst case Annahme beibehalten. *Abb. C.3.2* zeigt die Umweltkennzahlen zum Primärenergieeinsatz und zur Wirkung auf das Treibhausgaspotenzials GWP der beschriebenen Aufbereitungstechnik in IM C3. Der betrachtete Prallbrecher mit integriertem Stromgenerator und angeschlossenem Windsichter erfordert für die Bereitstellung des Dieseltreibstoffes $1,65E-02$ MJ pro kg Lehmsteinbruch. Die Verbrennung von Diesel für die Aufbereitung verursacht $1,47E-04$ kg CO₂equiv./ kg Lehmsteinbruch (*Abb. C.3.2*).

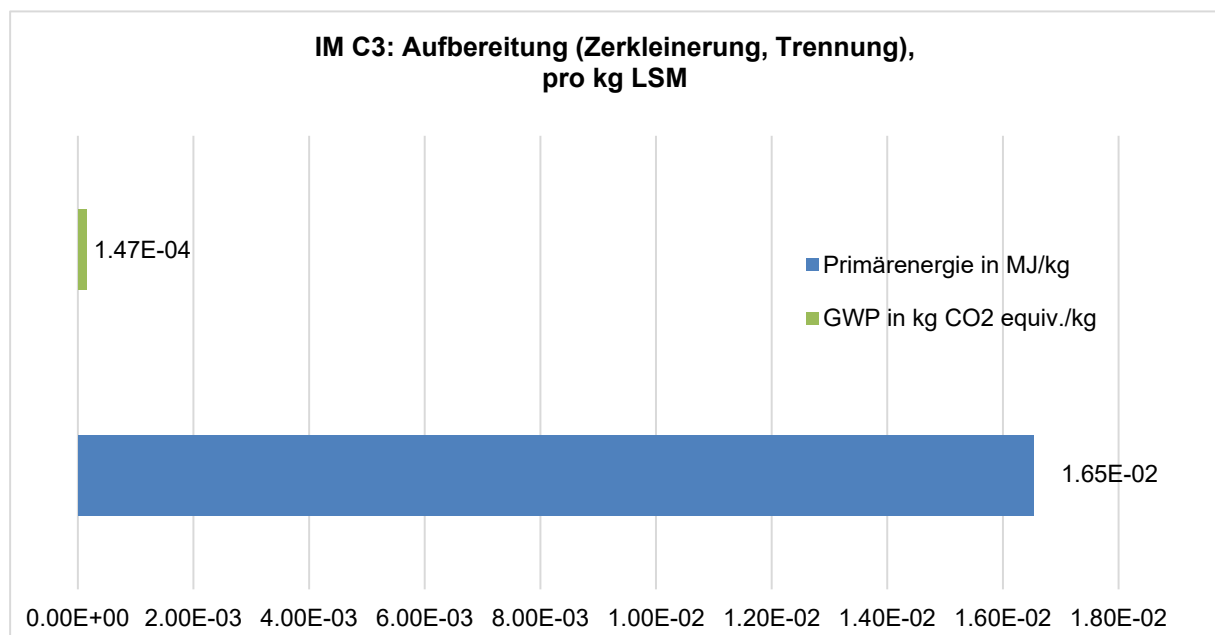


Abb. C.3.2: IM C3 technische Aufbereitung von Lehmsteinbruch, PEI und GWP

C.4 Rückgewinnungspotenzial

Der nach IM C3 aufbereitete Lehmsteinbruch ermöglicht drei Szenarien der Rückgewinnung in *IM D*:

- *IM D1* bewertet die direkte Wiederverwendung von sortenrein zurückgewonnen, unbeschädigten LS für neues LSM,
- *IM D2* bewertet die Wiederverwertung von nach IM C3 aufbereitetem Lehmsteinbruch zu Lehm-Rezyklat für die Herstellung neuer LS der gleichen Kategorie (AK Ia bzw. AK Ib),
- *IM D3* bewertet die Wiederverwertung von nach IM C3 aufbereitetem Lehmsteinbruch für andere Lehmbaumstoffe, die mit getrocknetem Baulehm (Trockenlehm) hergestellt werden (z. B. LPM im Trockendosierverfahren).

Die nachfolgenden *Abb. C.4.1 – C.4.6* zeigen je zwei Kenngrößen zur Umweltwirkung, PEI und GWP bzw. deren Einspareffekte durch Verwendung des Lehm-Rezyklats.

Sortenrein und unbeschädigt zurückgewonnene LLS AK Ia lassen sich in gleicher Anwendung wiederverwenden. In IM D1 wird der Einspareffekt durch Verzicht auf neu produzierte LLS AK Ia in Bezug auf den Primärenergieeinsatz und das Treibhausgaspotenzial quantifiziert. Durch Verzicht auf die Neuproduktion entfällt der Energieinput in den Modulen A1 – A3 für diese LS. Die dadurch verursachten Umweltwirkungen werden vollständig vermieden. Die Wiederverwendung von LS aus Lehmsteinabbruch spart $4,10E-01$ MJ/kg LS Primärenergie und vermeidet $1,15E-02$ kg CO₂ equiv./kg LS. Transporte vom Gebäudeabriss zum Ort der Wiederverwendung an einem anderen Gebäude wurden nicht berücksichtigt, sie liegen außerhalb des Systems (*Abb. C.4.1*).

Bei sortenrein und brauchbar zurückgewonnenen LS AK Ib ergeben sich andere Umweltkennzahlen als bei LLS AK Ia (*Abb. C.4.2*). Die Bemessung der Einspareffekte durch Wiederverwendung bezieht sich auf einen anderen Produktionsprozess für neue LS dieser Kategorie. Die Wiederverwendung von LS AK Ib aus Lehmsteinbruch spart $9,45E-01$ MJ/kg LS Primärenergie und vermeidet $5,52E-02$ kg CO₂ equiv./kg LS. Die Einspareffekte für Primärenergie und die Vermeidung von Treibhausgasen liegt um ein mehrfaches höher als bei LLS AK Ia mit Freilufttrocknung. Bei Wiederverwendung dieser LS werden die Energieeinträge und Emissionen durch die technische Trocknung in IM A3 vermieden.

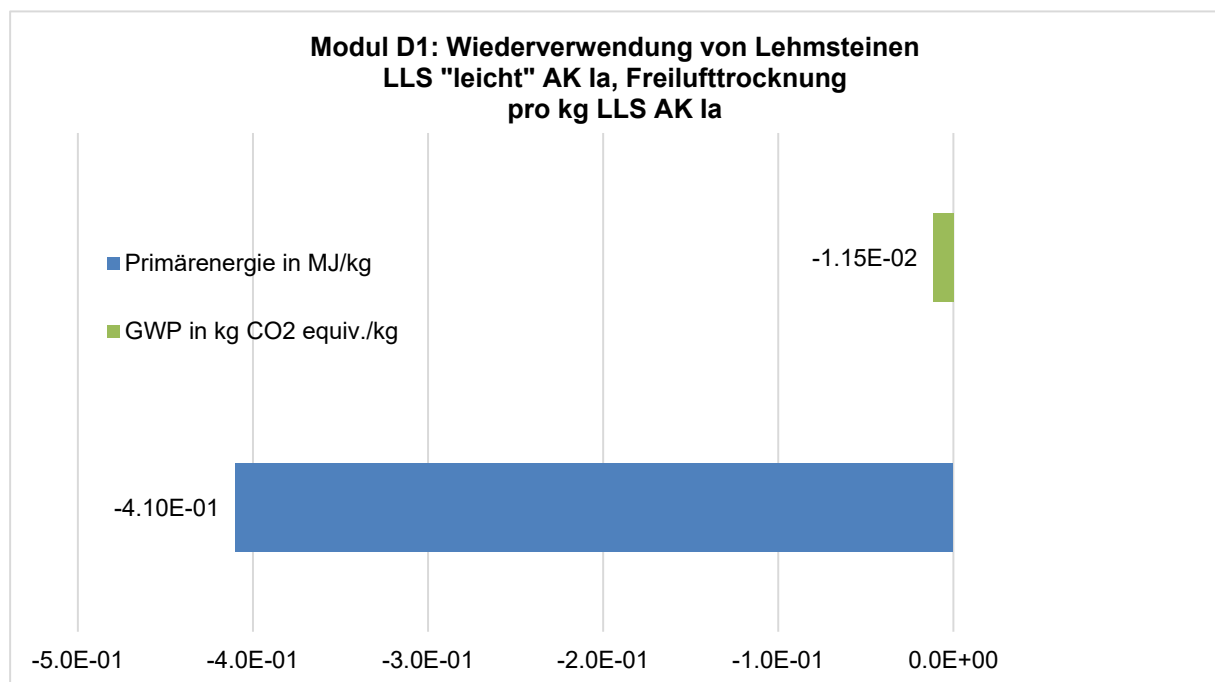


Abb. C. 4.1 Modul D1: Wiederverwendung von LLS aus Lehmsteinbruch als LLS AK Ia, PEI u. GWP

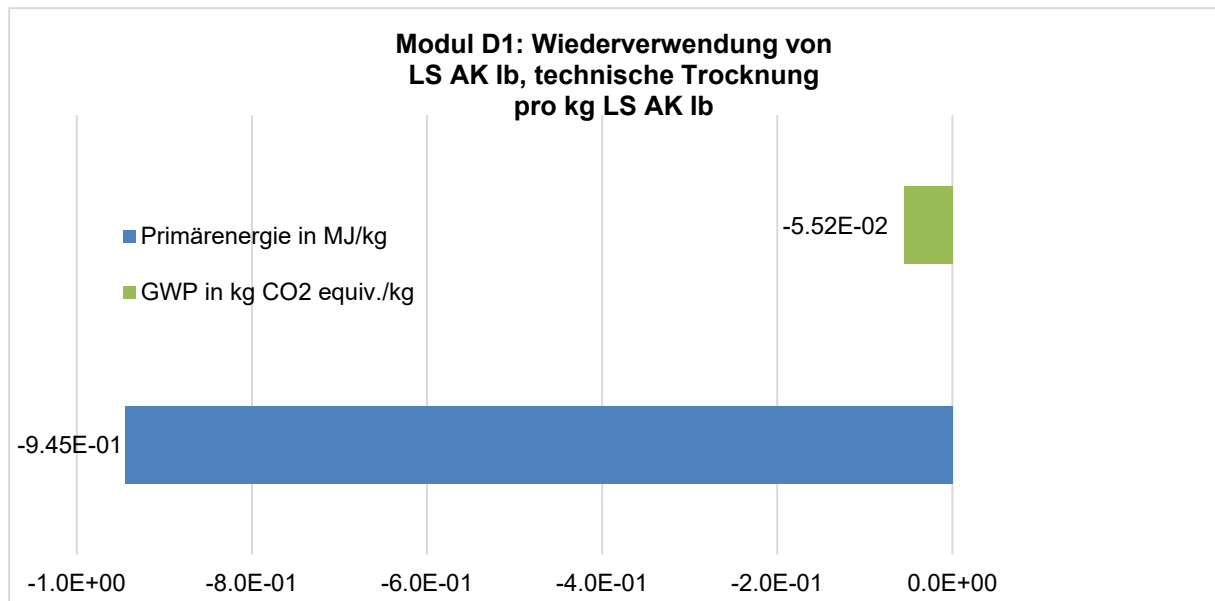


Abb. C.4.2 Modul D1: Wiederverwendung von LS aus Lehmsteinbruch als LS AK Ib, PEI u. GWP

Bei Wiederverwertung von Lehmsteinbruch aus Lehmsteinmauerwerk (LSM) für neue LLS AK Ia mit Freilufttrocknung nach IM D2 erfolgt die Aufbereitung des Lehmsteinbruches durch „Einsumpfen“ im Werk (Abb. C.4.3). Eine mechanische Zerkleinerung ist nicht zwingend erforderlich.

Die Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für neue LLS AK Ia substituiert primäre Ausgangsstoffe. Der Primärenergieeinsatz und die Umweltwirkungen aus der Bereitstellung der Ausgangsstoffe Grubenlehm (90 M.-%) und Holzspäne (10 M.-%) in IM A1 können eingespart werden. Der Substitutionseffekt für die eingesparte Primärenergie errechnet sich mit -3,77 MJ/ kg LLS AK Ia entsprechend. Die vermeidbaren Treibhausgasemissionen belaufen sich auf -3,49E-03 kg/ kg LLS AK Ia.

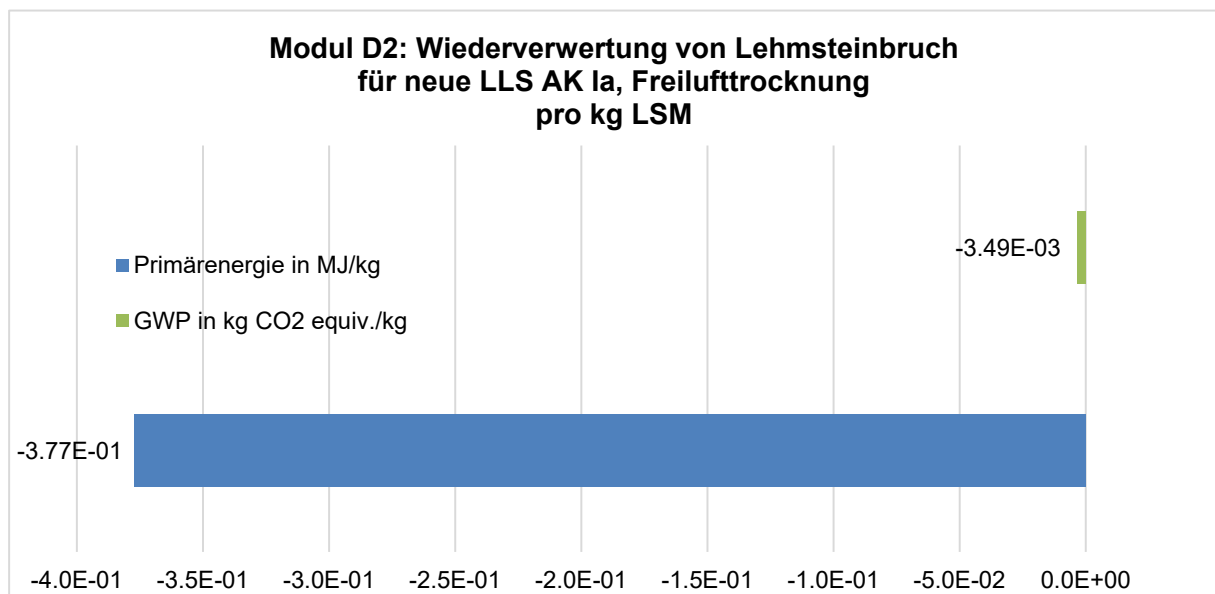


Abb. C.4.3 Modul D2: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für neue LLS AK Ia, Freilufttrocknung

Auch bei Wiederverwertung von Lehmsteinbruch mit LS AK Ib für neue LS gleicher AK lassen sich die Energieeinträge und Umweltwirkungen aus der Bereitstellung von Ausgangsstoffen (IM A1) vermeiden. Ebenso ist eine Aufbereitung des Lehmsteinbruches durch Einsumpfen im Werk möglich.

Eine mechanische Aufbereitung ist nicht zwingend. Rückgewonnene LS AK Ib durchlaufen alle Prozessschritte (IM A3) erneut, so dass keine weiteren Rückgewinnungspotenziale in IM D2 entstehen (Abb. C.4.4).

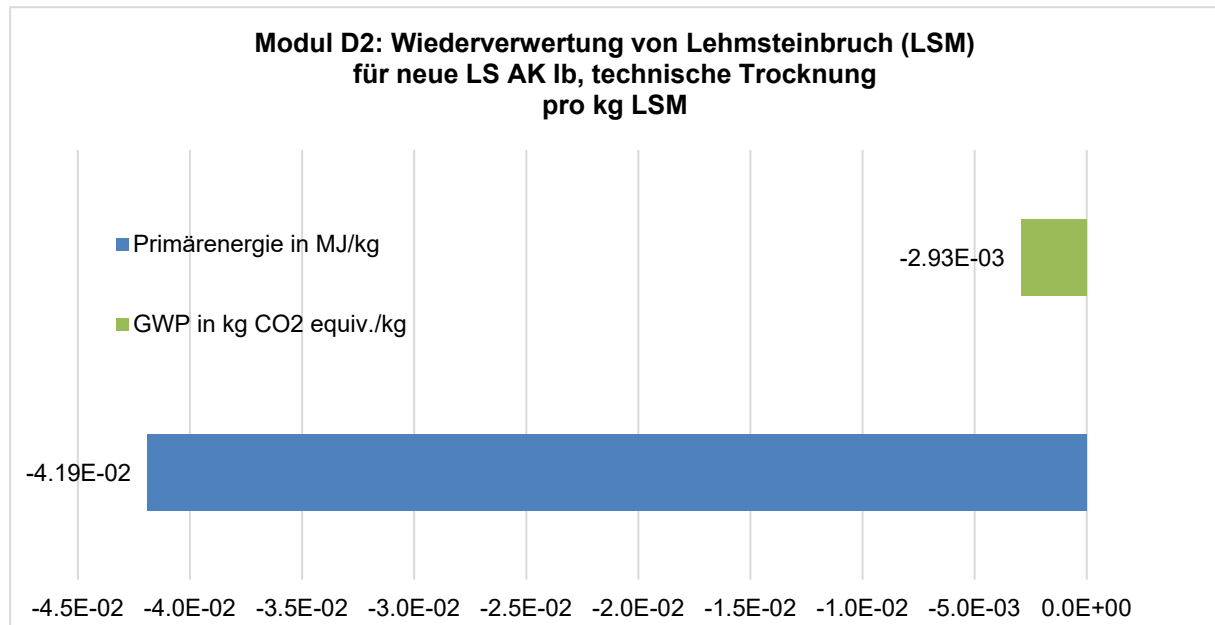


Abb. C.4.4 Modul D2: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für neue LS AK Ib, technische Trocknung, PEI u. GWP

Abb. C.4.5 und C.4.6 zeigen die Umweltkennzahlen zum Primärenergieeinsatz und zur Wirkung auf das Treibhausgaspotenzial (GWP) bei einer Wiederverwertung von Lehmsteinbruch als Alternative zur Trocknung erdfeuchter Ausgangsstoffe für andere Lehmbaustoffe (IM D3).

Zu pulverförmigem Lehm-Rezyklat aufbereiteter Lehmsteinbruch eignet sich für Trockendosierverfahren. Der Lehmsteinmauerbruch substituiert vorgelagerte Herstellungsprozesse für Trockenlehm. Nach vorliegender Umwelterklärung eines Zulieferers [20] benötigt die Herstellung von Trockenlehm einen Energieinput mit Erdgas, Diesel und Strom in Höhe von zusammen 0,32 kWh/kg Trockenlehm. Generische Daten in der ÖKOBAUDAT [18] gehen von 356 kWh/kg Trockenlehm aus. Der Unterschied erklärt sich dadurch, dass die generischen Daten von einer reinen Ölbefuerung der Trocknung ausgehen und verfahrenstechnische Beschreibungen nicht ausweisen. Tatsächlich erfolgt die Trocknung mit Erdgas in einem Trommeltrockner mit optimierter Materialführung im Wärmestrom. In dieser Muster-UPD wird der nachgewiesene signifikant niedrigere Wert des Herstellers angenommen, um die Rückgewinnungspotenziale zu berechnen, die mit dem niedrigeren Wert auch niedriger ausfallen (worst case Ansatz). Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen geht die ÖKOBAUDAT [18] von generisch ermittelten 0,348 kg CO₂ equiv./kg Trockenlehm aus. Nach Herstellerangaben beträgt die Treibhausgasemission 0,078 kg CO₂ equiv./kg Trockenlehm. Nach dem worst case Ansatz zur Berechnung von Rückgewinnungspotenzialen wird der niedrigere originäre Wert für die Treibhausgasemissionen angenommen.

Abb. C.4.5 veranschaulicht Umweltkennzahlen zur Wiederverwertung der im trockenen Zustand rückgewonnen, zerkleinerten Ausgangsstoffe des LLS AK Ia als sekundäre Ausgangsstoffe für Trockendosierverfahren zur Herstellung von anderen Lehmbaustoffen, z.B. LPM oder LMM. Der Substitutionseffekt bemisst sich nach dem eingesparten Primärenergieeinsatz und den vermiedenen Umweltwirkungen für primär hergestellten Trockenlehm und bereitgestellte Holzspäne. Danach reduziert sich der Einsatz von Primärenergie durch das Lehm-Rezyklat gegenüber der

Primärproduktion um 8,87 MJ/kg Lehmsteinbruch LLS AK Ia. Der im Lehmsteinbruch enthaltene Anteil von Baulehm (90M.-%) trägt mit insgesamt 6,09E-02 MJ/kg den Hauptteil dazu bei.

Die Treibhausgasemissionen GWP reduzieren sich um insgesamt 7,73E-02 kg CO₂equiv./kg Lehmsteinbruch aus LLS AK Ia im Vergleich zur Primärproduktion der Ausgangsstoffe Baulehm und Holzspäne der LS gleicher AK. Jede t Lehmsteinbruch mit LLS AK Ia würde auf diesem Verwertungsweg (IM D3) 245 kWh einsparen und die Treibhausgasemissionen um 77 kg reduzieren.

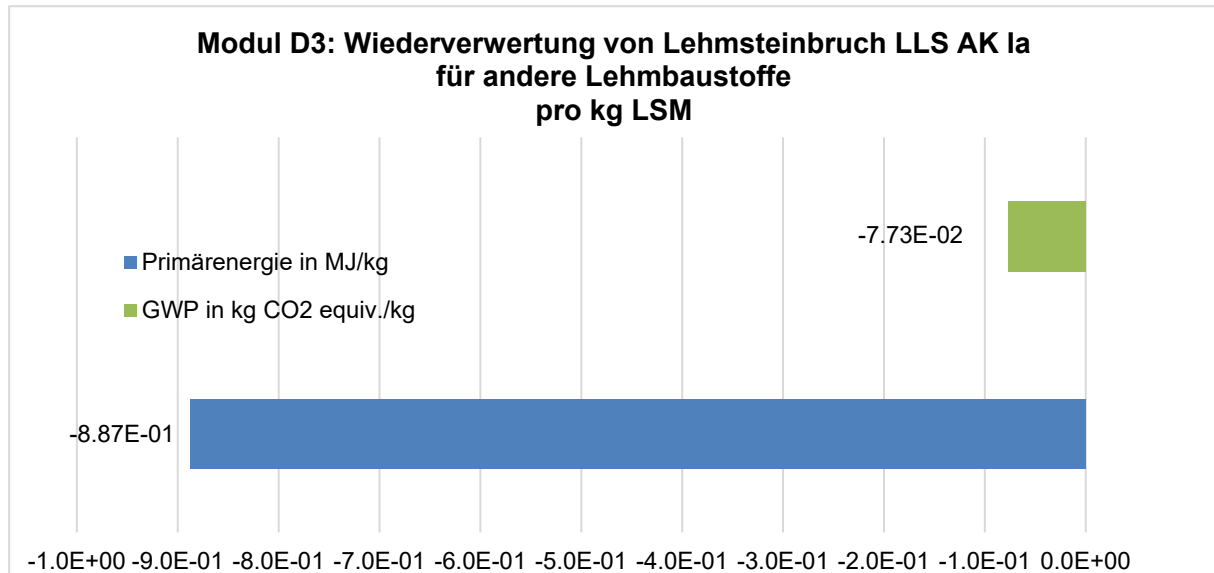


Abb. C.4.5 Modul D3: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch mit LLS AK Ia als Trockenlehm für andere Lehmbaustoffe, PEI u. GWP

Abb. C.4.6 zeigt Umweltkennzahlen zur Wiederverwertung des im trockenen Zustand rückgewonnen, zerkleinerten Ausgangsstoffes Baulehm (100 M.-%) aus LS AK Ib als Recyclinglehm (Trockenlehm) für Trockendosierverfahren zur Herstellung von anderen Lehmbaustoffen, z. B. LPM oder LMM.

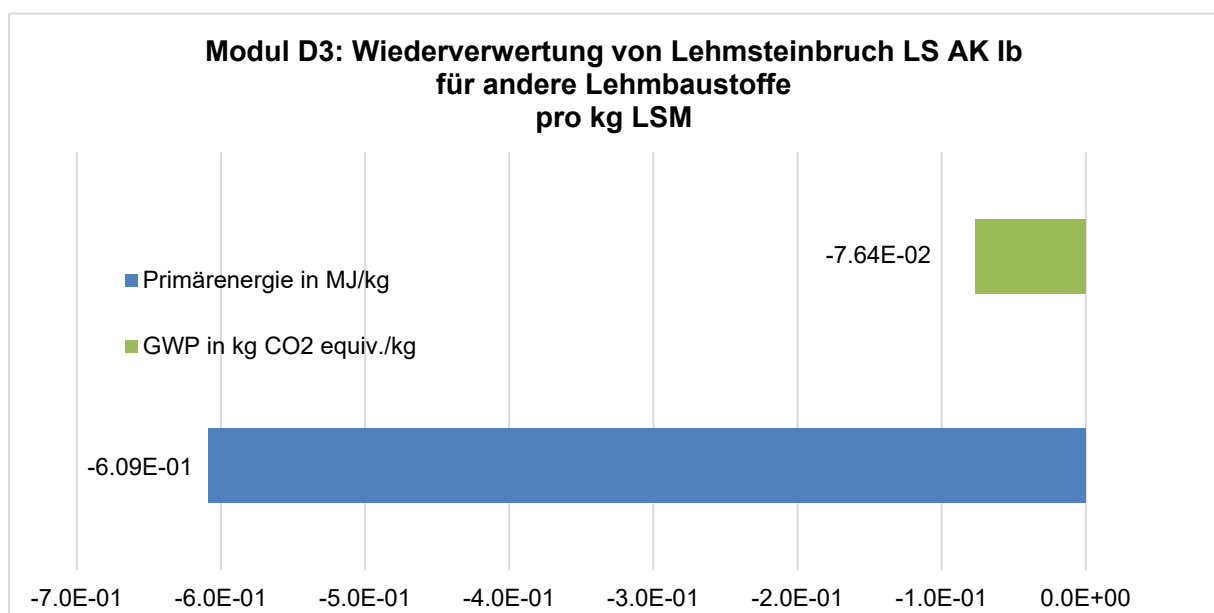


Abb. C.4.6 Modul D3: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch mit LS AK Ib als Trockenlehm für andere Lehmbaustoffe, PEI u. GWP

Der Substitutionseffekt bemisst sich nach dem eingesparten Primärenergieeinsatz und den vermiedenen Umweltwirkungen für primär hergestellten Trockenlehm. Danach reduziert sich der Einsatz von Primärenergie durch das Lehm-Rezyklat gegenüber der Produktion von Trockenlehm um 6,09 MJ/kg Lehmsteinbruch LS AK Ib. Der Unterschied zu *Abb. C.4.5* für LLS AK Ia entsteht aus unterschiedlichen Stoffzusammensetzungen, insbesondere durch den Rückgewinnungsbeitrag der Holzspäne.

Die Treibhausgasemissionen (GWP) reduzieren sich um insgesamt $7,64E-02$ kg CO₂equiv/kg Lehmsteinbruch aus LS „schwer“ AK Ib im Vergleich zur Primärproduktion von Trockenlehm [20]. Jede t Lehmsteinbruch aus LS AK Ib würde auf diesem Verwertungsweg (*IM D3*) 169 kWh einsparen und die Treibhausgasemissionen um 76 kg reduzieren.

Wird der Aufwand für den Abbruch von LSM (*Abb. C.3.1*) und die Aufbereitung durch Prallbrecher (*Abb. C.3.2*) gegengerechnet, reduziert sich der Nettoeffekt der Substitution von primären Ausgangsstoffen für andere Lehmbaumstoffe (*IM D3* für beide LS) für den Energieinput um 2,4 – 3,4 % (MJ/kg) und für die Treibhausgasemissionen um 0,2 % (kg CO₂ equiv./kg).

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

C.5 Zusammenfassung

Die Umweltbilanz für LS hängt von den angewandten Trocknungsverfahren ab.

Die Ausgangsstoffe Baulehm, i. d. R. aus Primärgruben am oder im Werk, und Holzspäne als Kuppelprodukt aus Sägewerken sind mit über 90 % die bestimmenden Größen für den Energieeinsatz und die Treibhausgasemissionen für LLS AK Ia. Im Gegensatz dazu entfallen bei technischer Trocknung auf die Ausgangsstoffe nur 4,5 % der Energieeinträge und 5,3 % der Treibhausgasemissionen.

Die Freilufttrocknung ist international weit verbreitet [21], insbesondere in klimatisch günstigen Regionen, aber auch in Deutschland oder Polen. Die Freilufttrocknung erfolgt in hiesigen Klimazonen geschützt unter Dach in luftdurchlässigen offenen Trockengestellen oder Hallen.

Die technische Trocknung erfordert Wärmeenergie und entsprechende Energieträger. In dieser Muster-UPD wird auf theoretisch abgeleitete physikalische Werte zur Verdampfungsenthalpie des Wassergehalts zur Formgebung zurückgegriffen. In herstellerepezifischen UPD kann der tatsächliche Energiebedarf zur Wärmeerzeugung signifikant niedriger ausfallen, wenn die Trocknungsverfahren näher betrachtet werden. Es gibt unterschiedliche Trocknungsverfahren, z. B. Abwärmenutzung, Trockenkammern mit Luftstromoptimierung, Adsorptionstrocknung etc.

Einen weiteren Ansatz zur Optimierung des Wärmebedarfs bietet die Wahl des Energieträgers. In der Muster-UPD wird Erdgas als Bewertungsgrundlage für Umweltwirkungen angenommen. Als beispielhaft für die Optimierung des Energieträgers wurde die signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen bei Verwendung von Biogas (auch ohne CO₂ Gutschrift) dargestellt.

Rückgewonnene LS aus Gebäudeabriss, auch mit anhaftenden LMM, lassen sich mit geringem Aufwand wiederverwerten. Einsumpfen des Lehmsteinbruchs in Wasser replastifiziert die festen Mauerwerkbruchstücke zu formbaren Ausgangsstoffen für einen neuen Produktionsdurchlauf, entweder mit Freilufttrocknung oder technischer Trocknung. Die Ausgangsstoffe von Verbänden aus

LMM und LS sind derart homogen zusammengesetzt, dass eine mechanische Aufbereitung und Separierung für neue LS nicht erforderlich ist.

Der Nettoeffekt der Rückgewinnung der Ausgangsstoffe für neue LS ergibt sich aus der Differenz des IM D2 - (IM C1 + IM C3). Für beide LS Sorten ergibt sich nach IM D2 ein positives Rückgewinnungspotenzial nach Abzug des Aufwandes in IM C1.

IM D3 berechnet die Bereitstellung von zerkleinertem, trockenem Baulehm aus Lehmsteinbruch für andere Lehmbaumstoffe, hergestellt in Trockendosierverfahren. Die Substitution von ansonsten energetisch aufwändig getrocknetem Primärgrubenlehm entlastet die Ökobilanz neuer, anderer Lehmbaumstoffe. Der Primärenergieeinsatz reduziert sich um 0,61 – 0,88 MJ/kg Lehmsteinbruch je nach Baulehmanteil. Treibhausgasemissionen in Höhe von 0,076 – 0,077 kg CO₂ equiv. / kg werden vermieden. Auch der Nettoeffekt nach Abriss (IM C1) und die Berücksichtigung der hier notwendigen technischen Aufbereitung (IM C3) bleiben bei rund 98 % der ermittelten Rückgewinnungspotenziale.

ZITIERTE STANDARDS / LITERATURHINWEISE

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

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

DIN 4108-3: 2014-11: Wärmeschutz u. Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren u. Hinweise für Planung u. Ausführung

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

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

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

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

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

DIN EN 12620:2008-07: Gesteinskörnungen für Beton

DIN EN 12878:2014-07: Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen – Anforderungen und Prüfverfahren

E DIN EN 13139:2015-07: 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 von Bauprodukten

DIN EN 13501-2:2010-02: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen

DIN EN 15804:2020-03: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte

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

DIN EN 16516:2018-01: Bauprodukte – Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen – Bestimmung von Emissionen in die Innenraumluft

DIN EN ISO 17892-12: 2020-07: Geotechnische Erkundungen u. Untersuchungen – Laborversuche an Bodenproben – Teil 12: Bestimmung der Fließ- u. Ausrollgrenze

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

DIN EN ISO 14040:2009-11: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen

DIN EN ISO 14044:2018-05: 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, Baustoffe, Bauteile*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage, 3., überarbeitete Aufl., 2009
- 3 Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung AVV) v. 10.12.2001 (BGBl. I, S. 3379), letzte Fassg. v. 30.06.2020 (BGBl. I, S.1533)
- 4 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmbaumstoffe – Grundregeln für die Produktkategorie Lehmsteine (LS)*. Weimar: 2022-04
- 5 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Qualitätsüberwachung von Baulehm als Ausgangsstoff für industriell hergestellte Lehmbaumstoffe – Richtlinie*. Technische Merkblätter Lehmbau, TM 05, Weimar, 2011
- 6 Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV) v. 18.04.2017 (BGBl.I, S.896), letzte Fassung v. 09.07.2021 (BGBl. I, S.2598)
- 7 Natureplus e. V. (Hrsg.). Vergaberichtlinie 5003 zur Vergabe des Qualitätszeichens. *Naturschutz beim Abbau mineralischer Rohstoffe*. Neckargemünd 2015-04
- 8 Umweltbundesamt (Hrsg.) / Weimann, K. u. a.: *Optimierung des Rückbaus / Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung*. Texte 05/2013, Dessau-Roßlau 2013
- 9 FH Potsdam: Symposium Baustoffrecycling & Lehmbaumstoffe – Perspektiven für eine Kreislaufwirtschaft im Bauwesen, Potsdam August 2022
- 10 Jäger, W.; Hartmann, R.: *Lehmmauerwerk: Entwurfs- und Konstruktionsgrundsätze für eine Breitenanwendung im Wohnbau unter Berücksichtigung klimatischer Bedingungen gemäßigter Zonen am Beispielstandort Deutschland*. Abschlussbericht Forschungsarbeit Bundesinstitut f. Bau-, Stadt- u. Raumforschung (BBSR) im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart: 2019
- 11 Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft - v. 24.07.2002 (BGBl. I, S.511), BM f. Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Berlin:2002, Entwurf Neufassung v. 17.12.2020
- 12 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)

- 13 Bau-EPD (Hrsg.): *Nutzungsdauerkatalog der Bau-EPD für die Erstellung von UPDs*. Bau-EPD GmbH, Wien 2014
- 14 Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (Hrsg.): Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Grunddatensätze für Holz und Holzwerkstoffe im Netzwerk Lebenszyklusdaten - Projektbericht im Rahmen des Forschungsvorhabens FKZ 01 RN 0401 im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Karlsruhe 2007
- 15 <https://de.wikipedia.org/wiki/Verdampfungsenthalpie>
- 16 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmbaumstoffe – Muster-UPD für die Baustoffkategorie Lehmputzmörtel (UPD LPM) nach DIN EN 15804*. Weimar: 2018-10
- 17 <https://www.ecoinvent.org>
- 18 Bundesinstitut f. Bau-, Stadt- u. Raumforschung (BBSR) (Hrsg.): *ÖKOBAUDAT – Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung*. SR Zukunft Bauen | Forschung für die Praxis | Band 09, Bonn 2017, <https://www.oekobaudat.de>
- 19 <https://www.liebherr.com/de/deu/specials/spritsparrechner/tool/kalkulator.html#page=3&catid=7&id=R-950-D&v1=&v2=&v3=&ca=1&cu=EUR>
- 20 EMAS D-146-00004: 2. Aktualisierte Umwelterklärung der Stephan Schmidt KG, 2008
- 21 Schroeder, H.: *Lehmbau – Mit Lehm ökologisch planen und bauen*. Springer Vieweg: Wiesbaden 2019, 3. Aufl.
- 22 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmbaumstoffe – Muster-UPD für die Baustoffkategorie Lehmmauermörtel (UPD LMM) nach DIN EN 15804*. Weimar: 2022-yy
- 23 <https://www.sbm-mp.at/de/produkte/aufbereitungsanlagen-mobil/mobile-prallbrecher/remax-200.html>