

Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen

Msterumweltproduktdeklaration für die Baustoffkategorie Lehmputzmörtel (UPD LPM) nach DIN EN 15804

INHALT

1	Allgemeines.....	5
2	Produktdefinition.....	6
2.1	Geltungsbereich.....	6
2.2	Produktdefinition.....	6
2.3	Anwendung.....	6
2.4	Produktnorm / Zulassung / Inverkehrbringen / Anwendungsregeln	6
2.5	Gütesicherung.....	7
2.6	Lieferzustand	7
2.7	Bautechnische Eigenschaften	7
2.8	Brandschutz	8
2.9	Sonstige Eigenschaften.....	8
3	Grundstoffe.....	8
3.1	Grundstoffe / Vorprodukte	8
3.2	Stoffeläuterung.....	9
3.3	Rohstoffgewinnung und Stoffherkunft.....	10
3.4	Verfügbarkeit der Rohstoffe.....	10
4	Produktherstellung.....	10
4.1	Erdfeuchtverfahren	11
4.2	Trockenverfahren	12
4.2.1	Nachtrocknung	12
4.2.2	Vortrocknung.....	13
4.2.3	Passive Solartrocknung (Treibhaustrocknung).....	14
4.3	Gesundheits- und Arbeitsschutz Herstellung	14
4.4	Umweltschutz Herstellung	14
5	Produktverarbeitung	15
5.1	Verarbeitungsempfehlungen.....	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.....	17
7	Außergewöhnliche Einwirkungen.....	17
7.1	Brand.....	17
7.2	Hochwasser.....	18
8	Nachnutzungsphase.....	18
8.1	Wieder- und Weiterverwendung / Wieder- und Weiterverwertung.....	18
8.2	Entsorgung.....	18
9	Ökobilanz.....	18
9.1	Ziele der Analyse.....	19
9.2	Zielgruppen der Analyse.....	19
9.3	Systembeschreibung.....	19
9.3.1	Funktionelle Einheit.....	20
9.3.2	Betrachtungszeitraum.....	20
9.3.3	Referenznutzungsdauer.....	20
9.4	Systemgrenzen.....	20
9.5	Abschneidekriterium, Annahmen und Abschätzungen.....	21
9.6	Transporte.....	22
9.7	Hintergrunddaten.....	23
9.8	Datenqualität.....	23
9.9	Allokation.....	24
9.10	Verwertung von Abfällen und Verpackungen.....	24
10	Hinweise zur Nutzungsphase.....	24
11	Nachweise.....	24
11.1	Produkt-Erstprüfung nach DIN 18942-100.....	25
11.2	VOC, TVOC.....	25
11.3	Radioaktivität.....	25
Teil A	Sachbilanz.....	26
A.1	Darstellung der Bilanzen und Auswertung.....	26
A.1.1	Ressourceneinsatz.....	26
A.2	Umweltwirkungen.....	27
A.2.1	Gebundenes CO ₂ in Pflanzenanteilen.....	28
A.2.2	CO ₂ -Gutschriften für Verpackungen.....	28
A.3	Andere Umweltinformationen (Abfälle, Output-Stoffflüsse).....	28
A.4	Transporte.....	29

A.5	Aufbereitung und Wiederverwertungspotenzial.....	29
Teil B	Interpretation der Primärenergiebilanz und Wirkungsanalyse	31
B.1	Erdfeuchtverfahren und Nachtrocknungsverfahren	32
B.1.1	Ressourceneinsatz.....	32
B.1.2	Beitrag zur globalen Klimaerwärmung GWP	34
B.1.3	Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	35
B.1.4	Potenzial zur Verknappung von abiotischen Ressourcen ADPE und ADPF	36
B.1.5	Versauerungspotenzial (AP).....	38
B.1.6	Zusammenfassung Erdfeuchtverfahren und Nachtrocknung	38
B.2	Vortrocknungsverfahren.....	38
B.2.1	Ressourceneinsatz.....	38
B.2.2	Beitrag zur globalen Klimaerwärmung	39
B.2.3	Bildungspotenzial des troposphärischen Ozons (POCP)	40
B.2.4	Abiotisches Abbaupotenzial ADPE und ADPF	41
B.2.5	Versauerungspotenzial AP	42
B.2.6	Zusammenfassung: Vortrocknungsverfahren.....	42
B.3	Passive Solartrocknung (Treibhaustrocknung).....	42
B.3.1	Primärenergiebedarf	42
B.3.2	Beitrag zur globalen Klimaerwärmung GWP	43
B.3.3	Abbaupotenzial des troposphärischen Ozons POCP	44
B.3.4	Abiotisches Abbaupotenzial ADPE und ADPF	44
B.3.5	Versauerungspotenzial AP	46
B.3.6	Zusammenfassung: Passives Solartrocknungsverfahren.....	46
	Zitierte Standards / Literaturhinweise	47

1 ALLGEMEINES

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

Produktkategorieregeln (PKR) Lehmputzmörtel (LPM): 2018 des Programmbetreibers DVL e. V.

DIN EN 15804:2018, *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*

DIN EN ISO 14025:2011, *Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen, Grundsätze und Verfahren*

DIN EN ISO 14040:2009, *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*

DIN EN ISO 14044:2018, *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen.*

CEN ISO/TS 14071:2016, *Umweltmanagement – Ökobilanz – Prozesse der Kritischen Prüfung und Kompetenzen der Prüfer: Zusätzliche Anforderungen und Anleitungen zu ISO 14044:2006*

Version Ü6

Weimar, d. 23. Oktober 2018

Nachverfolgung der Versionen:

Version	Kommentar	Stand
Ü1	Erster Entwurf mit Datenerhebung	08.07.2018
Ü2	Überarbeiteter Entwurf mit Datenerhebung und -auswertung	19.07.2018
Ü3	Überarbeitung	24.07.2018
Ü4	Überarbeitung	26.07.2018
Ü5	Endfassung	21.09.2018
Ü6	Verifizierung	12.10.2018

2 PRODUKTDEFINITION

2.1 Geltungsbereich

Diese Umweltproduktdeklaration (UPD) ist eine Musterdeklaration des Dachverbandes Lehm e. V. (DVL) für Lehmputzmörtel (LPM), die auf den hinterlegten Ökobilanzdaten von drei beteiligten Verbandsherstellern beruht (*Tab. 2.1*):

Tab. 2.1: Hersteller, Verfahrensart und Produktbezeichnung ¹⁾

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

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

Deklarierte Produkte sind nicht stabilisierte, mineralische Lehmputzmörtel mit Tonmineralien als alleinigem Bindemittel nach DIN 18947:2013. Diese Muster-UPD gilt für normierte Lehmputzmörtel, die nach einem der deklarierten Verfahren hergestellt werden.

2.2 Produktdefinition

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

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

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

2.3 Anwendung

LPM nach DIN 18947 dienen zur ein- oder mehrlagigen Beschichtung von Wänden und Decken im Innenbereich als Unter- bzw. Oberputz, ggf. auch als Unterputz für Lehmdünnlagenbeschichtungen (LDB) sowie im witterungsgeschützten Außenbereich, hier ggf. auch als Unterputz für witterungsbeständigen Oberputz.

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

2.4 Produktnorm / Zulassung / Inverkehrbringen / Anwendungsregeln

- DIN 18942-1:2018-12, *Lehmstoffe – Teil 1: Begriffe*,
- DIN 18942-100:2018-12, *Lehmstoffe – Teil 100: Konformitätsnachweis*,
- DIN 18947:2018-12, *Lehmputzmörtel – Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren*,

- DIN 18550-2:2015-06, *Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- u. Außenputzen – Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2 für Innenputze in Verbindung mit DIN EN 13914-2:2016-09 für Lehmputzmörtel*,
- Lehmbau Regeln des Dachverbandes Lehm e. V. (LR DVL),
- TM 01 DVL Anforderungen an Lehmputz als Bauteil,
- Arbeitsblätter der Hersteller.

2.5 Gütesicherung

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

2.6 Lieferzustand

Die deklarierten LPM sind fertige Gemische der Ausgangsstoffe, denen bei der Aufbereitung auf der Baustelle nur noch Wasser zugesetzt wird, um eine verarbeitungsfähige Konsistenz zu erreichen. Alle LPM sollen in trockener Umgebung und frostfrei gelagert werden.

Erdfeuchte LPM (Erdfeuchtverfahren) werden in nicht luftdicht verschlossenen, wasserfesten Gewebesäcken verpackt, transportiert, gelagert und zu den Baustellen geliefert. Erdfeucht gelieferte LPM mit Pflanzenanteilen haben eine begrenzte Lagerungszeit von drei Monaten, rein mineralische erdfeucht gelieferte LPM sind bei sachgemäßer Lagerung unbegrenzt lagerfähig.

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

2.7 Bautechnische Eigenschaften

Tab. 2.2 zeigt Durchschnittswerte / Bandbreiten der bautechnischen Eigenschaften nach den Angaben der von den Herstellern deklarierten LPM.

Tab. 2.2: Bautechnische Eigenschaften der deklarierten Produkte ¹⁾

Nr.	Eigenschaft / Prüfung	Werte	Einheiten
1	Rohdichte nach DIN 18947, Tab. 2	1.800 – 2.000	kg/m ³
2	Festigkeiten n. DIN 18947 – Biegezugfestigkeit, Abs. 8.7 – Druckfestigkeit, Abs. 8.7 – Haftfestigkeit, Abs. 8.8	0,9 – 1,0 1,8 – 3,0 ≥ 0,1 – 0,2	N/mm ² N/mm ² N/mm ²
3	Wärmeleitfähigkeit λ_R / Rechenwerte LR Tab. 5-3	0,91 – 1,1	W/mK
4	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ / LR Tab. 5-5	5/10	–
5	lineares Trocknungsschwindmaß ($\leq 2\%$, faserbew. LPM $\leq 3\%$) / DIN 18947, Abs. 8.6	1,1 – 2,0	%
6	Mechanischer Abrieb / DIN 18947, Tab. 3	0,1 – 0,2	g
7	Aktivitätskonzentrationsindex natürlicher Radionuklide / DIN 18947, A3	I < 1	–
8	Wasserdampfadsorptionsklasse ²⁾ / DIN 18947, Tab. A1	II und III	g/m ²

¹⁾ Hersteller geben hier die spezifischen Werte der deklarierten Produkte an.

²⁾ optional

2.8 Brandschutz

Die Baustoffklasse von Lehmwerkmörteln wird durch Prüfung nach DIN 4102-1 bzw. DIN EN 13501-1 bestimmt.

LPM ohne bzw. mit einem Gehalt ≤ 1 M.-% an homogen verteilten organischen Zusatzstoffen erfüllen die Anforderungen der Baustoffklasse A1 (nicht brennbar) gemäß DIN 4102-4. LPM mit einem Gehalt von >1 M.-% an organischen Zusatzstoffen werden nach Prüfung der Baustoffklasse B gemäß DIN 4102-4 zugeordnet.

Es gelten die Herstellerangaben.

Unabhängig von der Bauproduktklassifizierung erwiesen sich LPM aus mineralischen Inhaltsstoffen als Beschichtung bzw. Abkapselung, z. B. auf Holz oder Strohdämmung, unter Brandtemperatureinwirkung als günstig auf das Brandverhalten des Bauteils [Liblik et al. 2018; Küppers et al. 2015].

2.9 Sonstige Eigenschaften

LPM nach DIN 18947 können nach Erhärtung durch Wässerung jederzeit replastifiziert und ggf. einer Wiederverwertung zugeführt werden.

Der Gesamtgehalt an bauschädlichen Salzen ist $< 0,12$ M.-%.

3 GRUNDSTOFFE

3.1 Grundstoffe / Vorprodukte

Tab. 3.1 zeigt die Anteile der Grund- und Zusatzstoffe der analysierten LPM.

Tab. 3.1: Anteile der Grund- und Zusatzstoffe von LPM dieser Muster UPD¹⁾

Nr.	Grund- und Zusatzstoffe [M.-%]	nach Verfahren			
		Erdfeucht- verfahren	Nach- trocknung	Vor- Trocknung	Passive Solartrocknung (Treibhaustrocknung)
1	Grubenlehm	–		–	30
2	Grubenlehm (als Sekundärrohstoff)	48	48	–	–
3	Trockenlehm	–		32	–
4	Sand 0/2, ungetrocknet	–		–	69,5
5	Sand 0/4; getrocknet	–		66,9	–
6	Sand 0/4; ungetrocknet	52	52	–	–
7	Pflanzenteile/-fasern	–		1,1	0,5

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

Abweichungen ergeben sich durch unterschiedliche Masseverhältnisse zwischen Lehm und mineralischen Zusatzstoffen (Sandkörnungen). In den untersuchten Trockenverfahren verwenden die Hersteller unterschiedliche Sandkörnungen, z. B. 0/2 oder 0/4. Die Abweichungen in den Masseverhältnissen und unterschiedliche Körnungen haben keine signifikante Auswirkung auf die Ökobilanz.

Die Pflanzenanteile in den bilanzierten Produkten sind Strohfasern.

3.2 Stoffeläuterung

Baulehm gemäß LR DVL ist zur Herstellung von Lehmbaustoffen geeigneter Lehm, bestehend aus einem Gemisch aus schluffigen, sandigen bis kiesigen Bestandteilen und bindekräftigen Tonmineralien. Baulehm wird unterschieden nach Grubenlehm, Trockenlehm / Tonmehl und Recyclinglehm.

Grubenlehm ist ein natürlicher, geologisch „gewachsener“ Primärrohstoff mit unterschiedlicher, schwankender mineralogischer Zusammensetzung (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaCO_3), wodurch je nach Lehmvorkommen unterschiedliche plastische Eigenschaften während der Aufbereitung und Verarbeitung (mager / fett) sowie Farben des Endprodukts entstehen können.

Grubenlehm als Sekundärrohstoff ist bei Erdarbeiten anfallender Bodenaushub und gehört in die Kategorie der mineralischen Bauabfälle. Als Sekundärrohstoff kann er als Grubenlehm weiterverwertet werden und verliert damit 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.

Recyclinglehm ist trocken zerkleinerter Lehmbaustoff, der sortenrein aus Abbruchbauteilen gewonnen wurde. Er kann durch Zugabe von Wasser replastifiziert und als Baulehm im Produktionsprozess weiterverwertet werden.

Durch **mineralische Zusatzstoffe** können die bauphysikalischen (Trockenrohdichte, Wärmeleitung, Trocknungsschwindmaß) und die baumechanischen (Festigkeit) Eigenschaften des Endprodukts, vor allem aber die plastischen Eigenschaften des Baulehms beeinflusst werden. Bei den deklarierten LPM werden unterschiedliche Sande als mineralische Leichtzuschläge verwendet.

Sande sind natürliche Gesteinskörnungen (DIN EN 12620 / DIN EN 13139) mit dem Hauptmineral Quarz sowie natürlichen Neben- und Spurenmineralien. Natürliche Sandkörnungen sind Bestandteile geologisch „gewachsener“ Strukturen und können problemlos in geogene Kreisläufe zurückgeführt werden.

Pflanzenteile und -fasern sind z. B. Hanf, Flachs, Strohhäcksel, Sisal ohne relevante Rückstände aus Herbiziden, sowie zerkleinertes, chemisch unbehandeltes Holz (keine Holzwerkstoffe). Die Pflanzenteile und -fasern werden mechanisch zerkleinert. Durch organische Zusatzstoffe können die bauphysikalischen Eigenschaften (Trockenrohdichte, Schwindmaß) des Endprodukts beeinflusst werden. Faserartige Zusatzstoffe wirken einer Rissbildung des LPM bei Austrocknung / Erhärtung entgegen. Natürliche organische Zusatzstoffe sind biologisch abbaubar / kompostierbar und können problemlos in biogene Kreisläufe zurückgeführt werden. Sie werden dabei durch Bakterien und Pilze unter Energiefreisetzung wieder vollständig zu Kohlenstoffdioxid und Wasser umgebaut.

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

3.3 Rohstoffgewinnung und Stoffherkunft

Der Grubenlehm stammt aus Tongruben. Der Abbau geschieht oberflächennah frei von Wurzeln und Humusanteilen mittels Schürfkübelraupe / Radlader nach DIN 18300. Beim Abbau von Grubenlehm und Sand werden Belange des Naturschutzes beachtet (natureplus RL 5003).

Grubenlehm als Sekundärrohstoff fällt beim Kalk-, Kies- und Sandabbau oder anderen Erdarbeiten als Bodenaushub an.

Trockenlehm, Tonmehl und getrocknete Sande enthalten Wärmeenergie, die nach Art und Menge im Rahmen der Ökobilanz erfasst werden. Zusätzlich wird eine natürliche solare Trocknung (Treibhaustrocknung) von erdfeuchtem Grubenlehm von Sandkörnungen erfasst und bewertet.

Die verwendeten pflanzlichen Zusatzstoffe sind landwirtschaftliche Nebenprodukte (hier: Stroh).

Für die Eignungsprüfung von Baulehm gelten die LR DVL sowie auf freiwilliger Basis das TM 05 DVL. Bei erheblichen Schwankungen der Qualität der Lehmbauprodukte kann durch die Zertifizierungsstelle für Lehmbauprodukte die Anwendung des TM 05 DVL angeordnet werden. Eine Untersuchung auf natürliche Radionuklide erfolgt entsprechend DIN 18947, Anhang A.3.

3.4 Verfügbarkeit der Rohstoffe

Alle mineralischen Rohstoffe sind in ihrer Verfügbarkeit als „geologisch gewachsene“ Naturstoffe generell begrenzt (Parameter „ADPE“ gem. DIN EN 15804 bei der Wirkungsabschätzung). Bei lokalen Erdarbeiten (z. B. Kies-, Sandgewinnung; Kalkabbau, Tiefbau) anfallender, geeigneter lehmhaltiger Bodenaushub wird als Sekundärrohstoff für einen überwiegenden Teil der in dieser Deklaration erfassten LPM verarbeitet.

Aufgrund der besonderen Eigenschaften des Bindemittels Lehm ist eine Replastifizierung und Wiederverwertung der LPM jederzeit möglich. Eine Rohstoffknappheit besteht nicht.

Bodenaushub bildet mit 128 Mio t/a den größten Teil (64 %) der gesamten mineralischen Bauabfälle in Deutschland (UBA 2013). Die Weiterverwertung von lehmhaltigem Bodenaushub als Sekundärrohstoff für LPM und andere Lehmbaustoffe spart Deponieraum und verlängert die Verfügbarkeit von Primärrohstoffen.

Alle Pflanzenteile und -fasern 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.

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

4.1 Erdfeuchtverfahren

LPM können aufgrund ihrer hydraulischen Eigenschaften im erdfeuchten Zustand gemischt, verpackt, gelagert, transportiert und verarbeitet sowie nach Erhärtung replastifiziert werden.

Das Erdfeuchtverfahren umfasst folgende Prozessschritte:

1. mechanische Zerkleinerung des Baulehms im Kollergang / Walzwerk. Der fertig aufbereitete Baulehm ist erdfeucht, besitzt eine krümelige Struktur und ist gut rieselfähig.
2. Aussiebung von groben Gesteinskörnungen (Überkorn) im Baulehm und im Zusatzstoff Sand,
3. Förderung des aufbereiteten Lehms und des gesiebten Sandes gemäß Rezeptur in den Mischer,
4. mechanische Zerkleinerung von pflanzlichen Zusatzstoffen und Förderung gemäß Rezeptur in den Mischer,
5. Mischvorgang (ohne Wasserzugabe),
6. Absackung des Fertigproduktes in feuchtestabile Transportverpackungen (PE-Big-Bags).

Bild 1 zeigt als Beispiel ein Produktionsschema für LPM nach dem Erdfeuchtverfahren (Stand: August 2018).

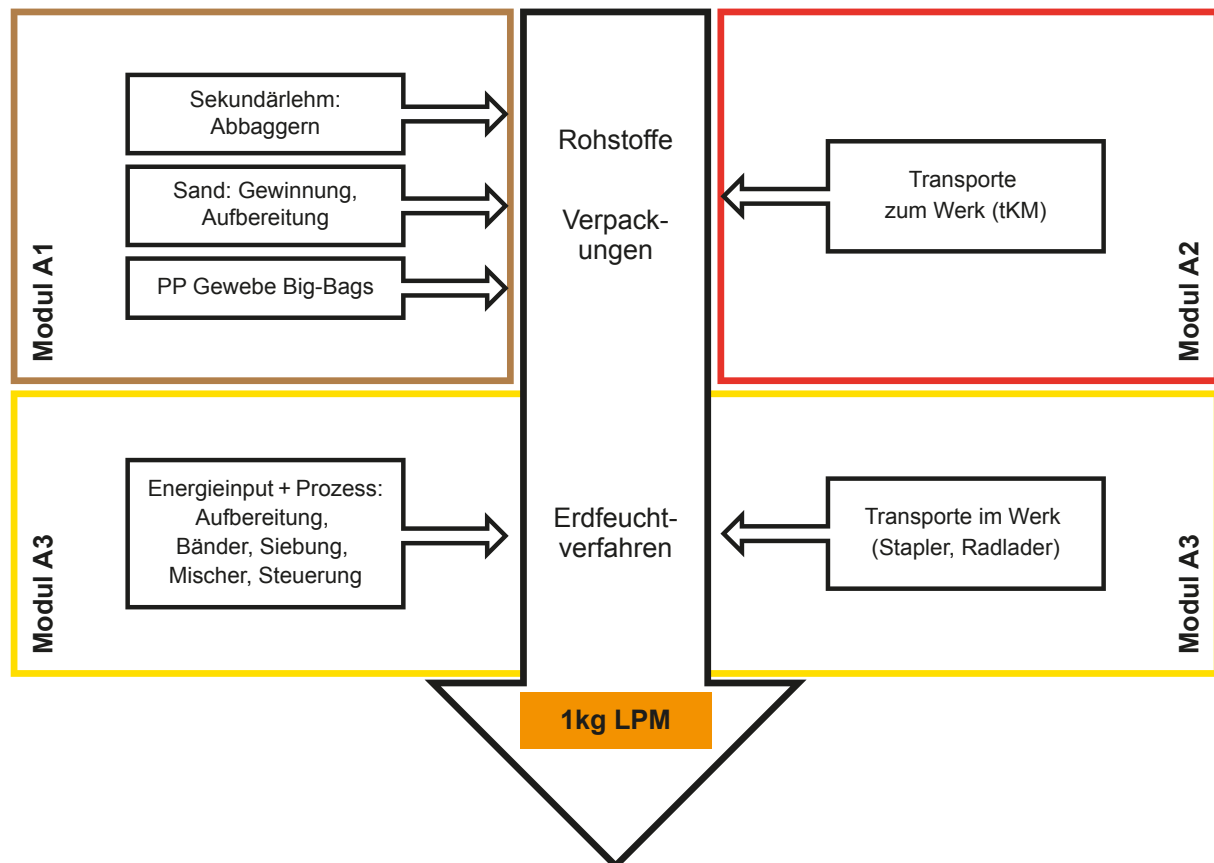


Bild 1: Produktionsschema LPM nach Erdfeuchtverfahren

4.2 Trockenverfahren

Nach dem Trockenverfahren hergestellte LPM nach DIN 18947 werden als getrocknete feinkörnige, rieselfähige Massen in geeigneten Gebinden (Papiersäcke, PE-Big-Bags, Silos) ausgeliefert.

Hinsichtlich der eingesetzten Energieträger zur Wärmeerzeugung wenden die Hersteller unterschiedliche Verfahren an. Die deklarierten getrockneten LPM unterscheiden sich nach der Art der Zufuhr der Trocknungsenergie:

- Trocknung der nach dem Erdfeuchtverfahren hergestellten LPM-Fertigmischungen (Nachtrocknung),
- Dosierung und Mischung vorgetrockneter Grund- und Zusatzstoffe (Vortrocknung),
- Passive, solar unterstützte Lufttrocknung (Treibhaustrocknung).

4.2.1 Nachtrocknung

Im Anschluss an das Erdfeuchtverfahren (Abs. 4.1) wird die fertige Mischung getrocknet. Die Trocknung erfolgt in Trommeltrocknern für Schüttgüter mit unterschiedlichen Energieträgern, z. B. Biogas, Erdgas oder Flüssiggas.

Bild 2 zeigt als Beispiel das Schema der Nachtrocknung von zuvor erdfeucht hergestellten LPM (Stand: August 2018).

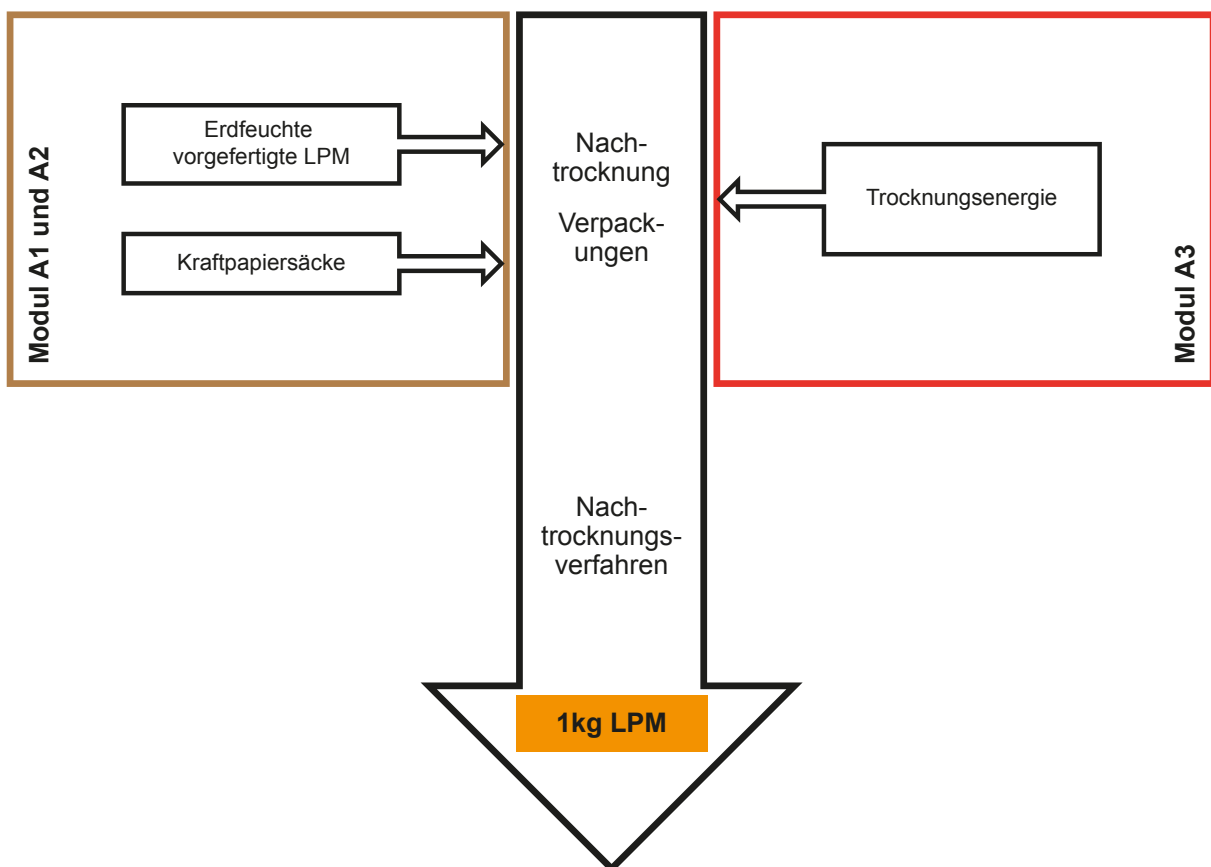
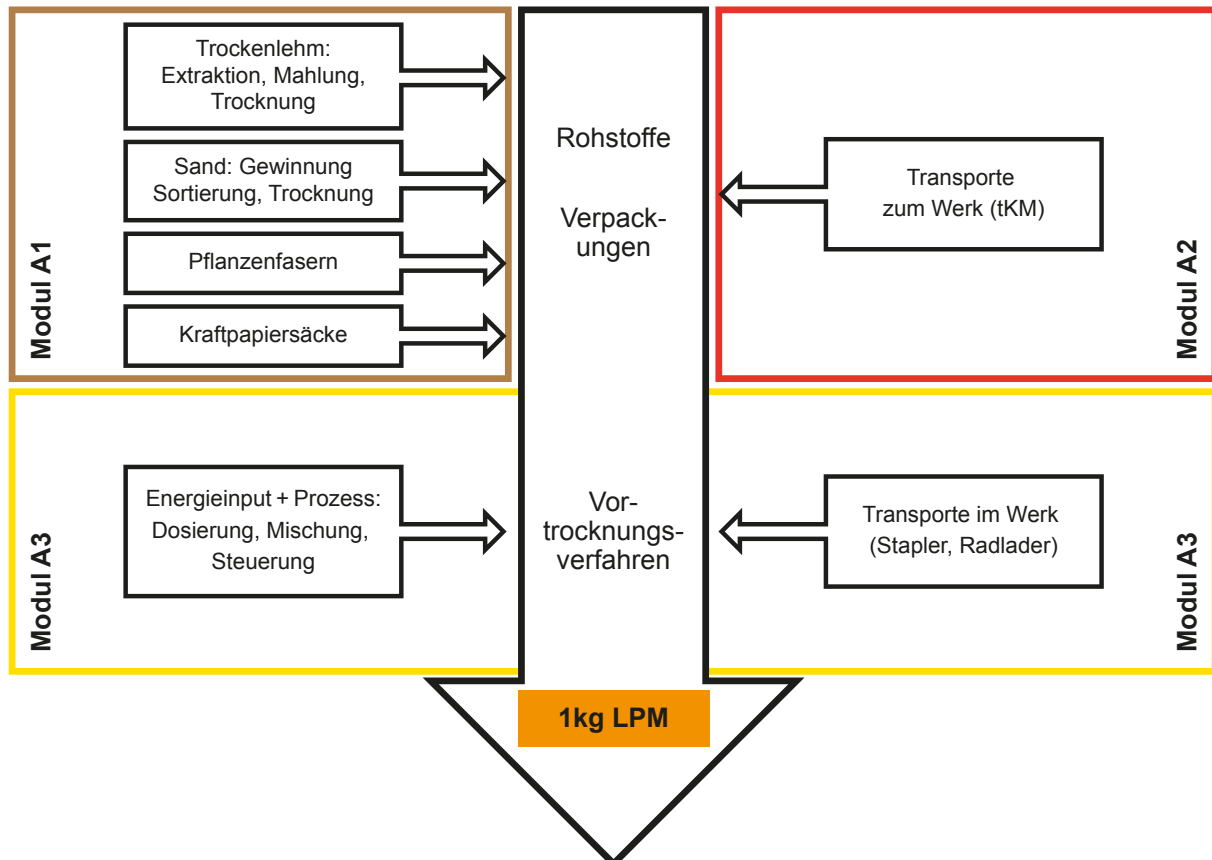


Bild 2: Herstellung von LPM mit dem Nachtrocknungsverfahren

4.2.2 Vortrocknung

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

Bild 3 zeigt als Beispiel ein Schema für die Herstellung von LPM unter Verwendung vorgetrockneter



Rohstoffe (Stand: August 2018).

Bild 3: Herstellung von LPM unter Verwendung vorgetrockneter Rohstoffe

4.2.3 Passive Solartrocknung (Treibhaustrocknung)

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

Bild 4 zeigt ein Schema für die Herstellung von LPM unter Verwendung solar getrockneter Rohstoffe (Stand: August 2018)

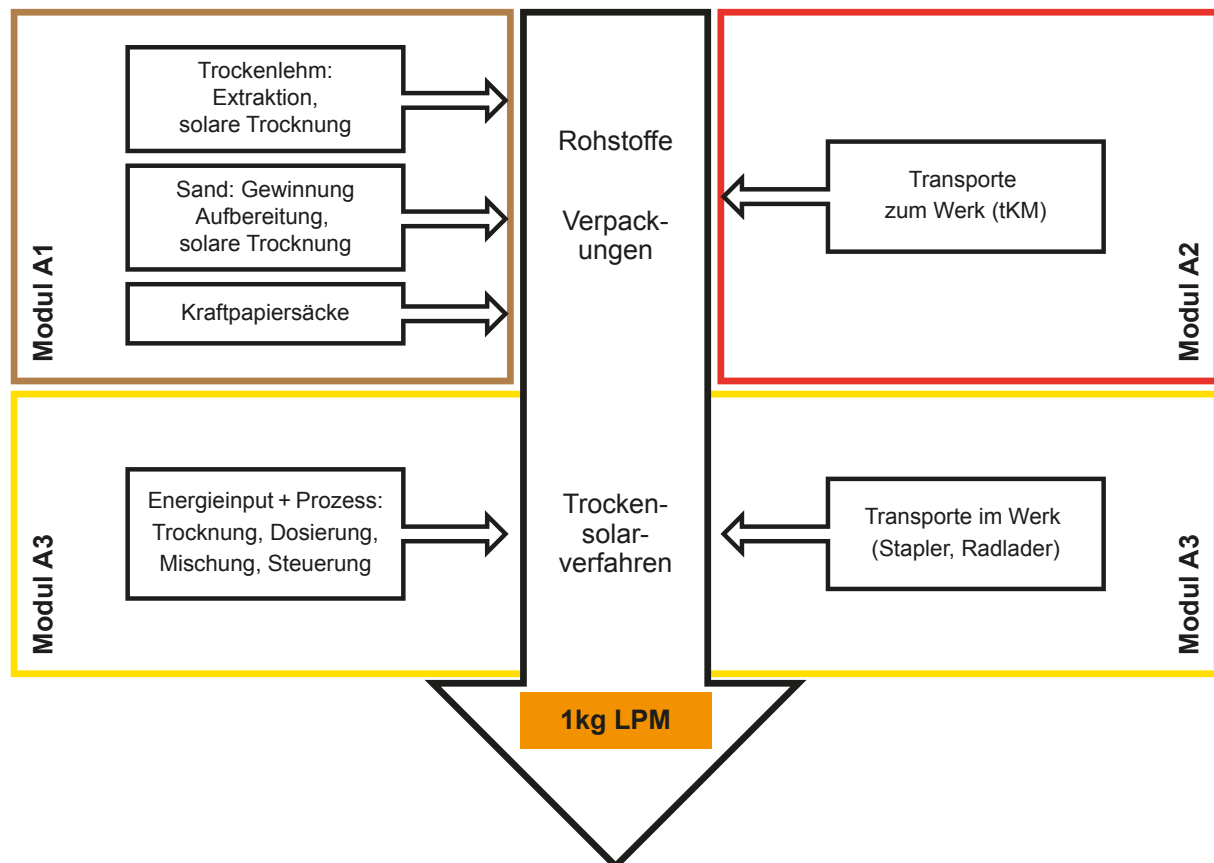


Bild 4: Schema für die Herstellung von LPM unter Verwendung solar getrockneter Rohstoffe

4.3 Gesundheits- und Arbeitsschutz Herstellung

Staubemissionen von pflanzlichen oder mineralischen Zusatzstoffen während des Produktionsprozesses werden durch Filter begrenzt. Ausgefilterte Zusatzstoffe werden wieder verwendet. Die Grenzwerte werden eingehalten.

4.4 Umweltschutz Herstellung

Abfall

Stand der Technik ist die vollständige Wiederverwendung aller mineralischen Abfälle während des Produktionsprozesses. Wiederverwendbare Abfälle sind beispielsweise abgeseibtes Überkorn und Reste bei Produktwechseln auf derselben Anlage.

Wasser / Boden

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

Lärm

Die geforderten Grenzwerte werden eingehalten.

Luft

Ausgefilterte Stäube von pflanzlichen und trockenen mineralischen Zusatzstoffen werden erneut dem Herstellungsprozess 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 Verarbeitungsempfehlungen

LPM sind trocken oder erdfeucht gelieferte Lehmwerkmörtel für Putze, die verarbeitungsfertig sind und auf der Baustelle nur mit Wasser angemacht werden.

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

LPM werden nach DIN 18947 bzw. Lehmbauregeln des DVL aufbereitet und verarbeitet. Sie sollen nach der Aufbereitung noch eine gewisse Zeit ruhen, damit die Bindekraft der Tonminerale sich voll entfaltet. Unmittelbar vor der Verarbeitung werden sie nochmals durchgemischt.

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

LPM müssen nach dem Auftrag möglichst rasch austrocknen können, bevorzugt durch natürliche Lüftung. In ungünstigen Fällen (z. B. hohe Luftfeuchtigkeit im Außenbereich) ist eine künstliche Trocknung sinnvoll. Eine Überwachung mittels Trocknungsprotokoll nach TM 01 DVL [TM 01 DVL] oder Herstellerangaben wird empfohlen.

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

5.2 Arbeitsschutz / Umweltschutz

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

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

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

5.3 Restmaterial

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

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

5.4 Verpackung

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

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

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

6 NUTZUNGSZUSTAND

6.1 Inhaltsstoffe

Bei der Produktion von LPM werden ausschließlich die natürlichen Rohstoffe 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 bleibt nach Erhärtung an der Luft wasserlöslich.

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

6.2 Wirkungsbeziehungen Umwelt / Gesundheit

LPM der Verbandshersteller enthalten keine schädlichen Stoffe in gesundheitsschädigenden Konzentrationen wie z. B. flüchtige organische Komponenten (VOC), Formaldehyd, Isocyanate usw. Entsprechende schädigende Emissionen sind deshalb auch nicht zu erwarten. LPM sind im verarbeiteten Zustand geruchsneutral.

Die Mikroporenstruktur der Tonmineralien des Baulehms ermöglicht eine rasche, besonders hohe Adsorption / Desorption von überschüssigem Wasserdampf im Innenraum. LPM auf inneren Bauteiloberflächen tragen deshalb zu einem ausgeglichenen Innenraumklima bei. LPM der beteiligten Verbands-hersteller können der Wasserdampfadsorptionsklasse WS II und WS III gemäß DIN 18947, Abs. A.1, Tab. A.1 zugeordnet werden.

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

Die natürliche ionisierende Strahlung der LPM ist gering und gesundheitlich unbedenklich [Ziegert 2014]. Die deklarierten LPM weisen einen Aktivitätskonzentrationsindex $I < 1$ gemäß DIN 18947 auf.

6.3 Beständigkeit / Nutzungsdauer

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

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

LPM können im Nutzungszeitraum bei mechanischer Beanspruchung einen Abrieb aus Sandkörnungen aufweisen. Die Prüfung der Abriebfestigkeit durch Bestimmung der Abriebmenge wird nach DIN 18947, Abs. 8.9 vorgenommen. Die Klassifizierung der Abriebmenge erfolgt nach der Festigkeitsklasse LPM, Tab. 3. Die deklarierten LPM sind der Festigkeitsklasse S II zugeordnet.

LPM nach DIN 18947 sollen ein lineares Trocknungsschwindmaß $\leq 2 \%$ aufweisen, bei Faserbewehrung entsprechend $3,0 \%$. Der LPM der Muster-UPD weisen ein lineares Trocknungsschwindmaß zwischen $1,5$ und $2,0 \%$ auf.

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

7 AUSSERGEWÖHNLICHE EINWIRKUNGEN

7.1 Brand

LPM mit einem pflanzlichen Faseranteil $< 1 \text{ M.-%}$ sind der Baustoffklasse A1 nach DIN 4102-1 zugeordnet. Eine bessere Einordnung ist vorbehaltlich brandschutztechnischer Belegprüfungen möglich. Zwei der untersuchten Lehmunterputze sind der Baustoffklasse A1 zugeordnet, einer der Baustoffklasse B2.

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

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

7.2 Hochwasser

Unter Wassereinwirkung (z. B. Hochwasser) können LPM nach DIN 18947 replastifiziert und ausgewaschen werden. Dabei werden keine wassergefährdenden Stoffe freigesetzt.

8 NACHNUTZUNGSPHASE

8.1 Wieder- und Weiterverwendung / Wieder- und Weiterverwertung

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

LPM als Bauteil können i. d. R. in einfacher Weise zurückgebaut werden. Bewehrungsgewebe sind manuell leicht abziehbar und erleichtern den Rückbau des LPM.

Bei einer Wiederverwertung dürfen die zurückgebauten LPM keine relevanten Spuren aus chemischen und biologischen Einwirkungen aus der zurückliegenden Nutzung enthalten (bauschädigende Salze, Moose / Algen, Hausschwamm, Schimmelpilze usw.).

Bei Gebäudeabriss sortenrein und frei von Reststoffen (Altanstriche, alte Ausbesserungen mit Gips, Zement- und Kalkmörtel) gewonnene LPM können aufgrund der hydraulischen Eigenschaften der Tonminerale durch Wasserzugabe ohne zusätzlichen Energieaufwand replastifiziert und wiederverwertet werden. Ihre ursprüngliche Zusammensetzung entspricht den für eine Wiederverwertung als LPM gemäß 18947 geforderten Eigenschaften. Durch die Wiederaufbereitung des zurückgewonnenen LPM kann sich dessen Plastizität (und dadurch die Gefahr der Rissbildung beim Austrocknen) vergrößern und eine Abmagerung durch Sand erforderlich werden.

Sofern die o. g. Möglichkeiten der Wiederverwertung nicht praktikabel sind, können sortenrein gewonnene LPM aus Gebäudeabriss mit natürlichen mineralischen Zusatzstoffen und einem homogen verteilten Gehalt an natürlichen organischen Zusatzstoffen ≤ 1 M.-% nach Aufbereitung zu rezyklierter Körnung wie Bodenaushub weiterverwertet werden, z. B. im Landschaftsbau, zur Rekultivierung, zur Trassierung von Verkehrswegen oder in der Land- und Forstwirtschaft.

8.2 Entsorgung

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

9 ÖKOBILANZ

Die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 zur Erstellung einer Typ III Umweltproduktdeklaration nach DIN EN 15804 beruht auf einer Lebenszyklusanalyse (LCA) von LPM

der beteiligten Verbandshersteller, bei der für jede deklarierte Zyklusstufe die Ressourcenverbräuche und potenzielle Umweltwirkungen abgeleitet werden.

9.1 Ziele der Analyse

Ein Ziel der Analyse ist die Erstellung einer Typ III Umweltproduktdeklaration nach DIN EN ISO 14025 als Umweltinformation für die Planung und Ausführung von Bauteilkonstruktionen mit LPM. Ein weiteres Ziel der Analyse bezieht sich auf die Optimierung von Produktionsprozessen und Verfahrenstechniken durch das Aufzeigen ökologischer Schwachstellen.

9.2 Zielgruppen der Analyse

Zielgruppen der Analyse sind Hersteller von LPM und Entscheidungsträger, die die Ergebnisse der Studie zur Optimierung eines Bauteils oder Bauwerks verwenden können.

9.3 Systembeschreibung

Das Produktsystem ordnet sich ein in den Lebenszyklus von Bauwerken mit Lehmbaustoffen. In *Bild 5* beginnt das System mit der Gewinnung des Baulehms und dessen Aufbereitung durch mechanische Behandlung oder Trocknung je nach Verfahren für die Herstellung der LPM. Die Fertigung von Lehmbaustoffen umfasst die Dosierung von Ausgangsstoffen, den Mischvorgang sowie Abpackung und Lagerung. Die Verarbeitung von LPM erfolgt manuell oder mit Hilfe von Mischpumpen. Während der Nutzung im Gebäude können Reparaturen und Instandhaltungen durchgeführt werden. Nach Abriss der Lehmbaustoffe oder des Gebäudes gibt es zwei End-of-life Optionen: die Entsorgung als Bauschutt oder die Wiederverwendung der Lehmbaustoffe. Letzteres wird in der vorliegenden Ökobilanz analysiert.

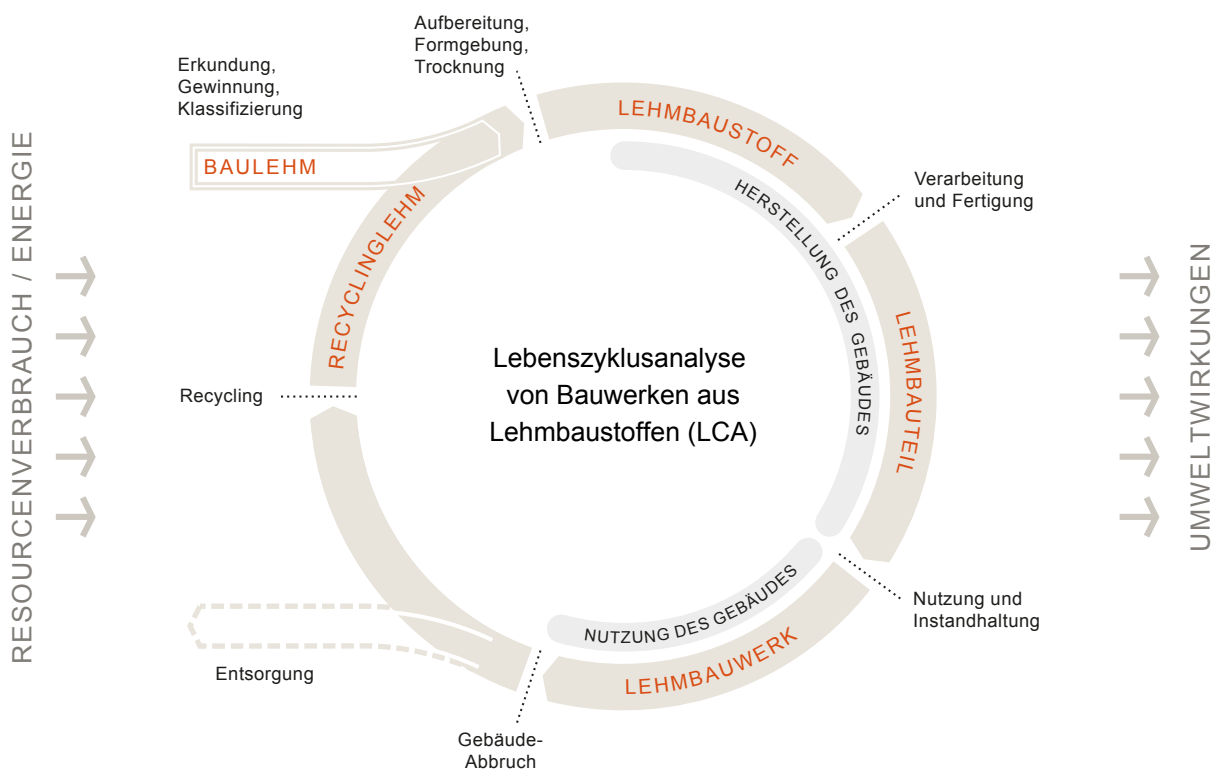


Bild 5: Schematische Darstellung des Lebenszyklus von Bauwerken aus Lehmbaustoffen [DVL Lehmbau Verbraucherinformation]

Innerhalb dieses Systems werden folgende Lehmwerkmörteln analysiert:

- Lehmputzmörtel (LPM) nach Erdfeuchtverfahren,
- Lehmputzmörtel (LPM) nach Nachtrocknungsverfahren,
- Lehmputzmörtel (LPM) nach Vortrocknungsverfahren,
- Lehmputzmörtel (LPM) nach passivem Solartrocknungsverfahren.

9.3.1 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit für LPM ist in DIN 18947, A.2 sowie in der entsprechenden PKR geregelt. Die funktionelle Einheit für die Herstellung von LPM ist ein Kilogramm (1 kg).

9.3.2 Betrachtungszeitraum

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

9.3.3 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 zum Nutzungsdauerkatalog der Bau-EPD GmbH, Version 2014 wird eine RSL für LPM von 100 Jahren zugrunde gelegt.

9.4 Systemgrenzen

Für die Erstellung einer Ökobilanz nach DIN EN 15804, Abs. 6 werden die Lebensphasen A1 – A3 von der Wiege bis zum Werkstor mit den Optionen C3 und D betrachtet (*Tab. 9.1*).

Tab. 9.1: Lebenszyklusphasen und Module nach DIN EN 15804

Herstellungsphase			Errichtungsphase		Nutzungsphase							Entsorgungsphase				Gutschriften und Lasten
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	
Rohstoffbereitstellung	Transport ins Werk	Herstellung	Transport zur Baustelle	Bau / Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Umbau, Erneuerung	betrieblicher Energieeinsatz	betrieblicher Wassereinsatz	Abbruch	Transport	Abfallbewirtschaftung	Entsorgung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recyclingpotenzial
X	X	X	MNR	MB	MB	MB	MB	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	MNR	X	MB	X

X	betrachtete und quantifizierte Module
MNR	Modul nicht relevant nach PKR
MND	Modul nicht deklariert
MB	Modul beschrieben aber nicht quantifiziert

Die Nichtbetrachtung einzelner Module des Lebenszyklus wird nachfolgend begründet:

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

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

B1 – B7 (Nutzungsphase)

Das Modul *B1 (Nutzung)* wird durch die in den Abschnitten 2 und 6 beschriebenen physikalischen Eigenschaften und raumklimatischen Wirkungen dargelegt.

Für die Module *B2 (Instandhaltung)* und *B3 (Reparatur)* sind die beschriebene Wasserlöslichkeit und Replastifizierbarkeit der LPM vorteilhaft, Ausbesserungen sind bei kleinen Schäden mit einem nassen Schwamm oder bei größeren Schäden mit zusätzlichem Material leicht möglich.

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

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

Die Module *C1 (Abbruch)* und *C2 (Transport)* liegen außerhalb der Systemgrenze nach PKR, sie sind dem Gebäude anzulasten. Die Transporte sind zusätzlich abhängig vom Verwertungsverfahren (stationär oder in situ).

Modul *C4 (Entsorgungsphase):* Es gelten die qualitativen Aussagen im Teil 2 der Deklaration. Die hydraulischen Eigenschaften der Tonminerale ermöglichen eine jederzeitige Replastifizierung und damit Wiederverwertung erhärteter LPM.

9.5 Abschneidekriterium, Annahmen und Abschätzungen

Das Abschneidekriterium entspricht DIN 18947 Abs. A.2: Alle Stoffflüsse, die in das Produktionssystem fließen (Inputs) und mehr als 1 % der Gesamtmasse der Stoffflüsse oder mehr als 1 % des Primärenergieverbrauchs betragen, werden berücksichtigt.

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

Es wurden Daten aus der Betriebsdatenerhebung der beteiligten Hersteller ausgewertet, d. h. die Gewinnung aller nach Rezeptur eingesetzten Ausgangsstoffe, der Energieeinsatz für die Produktions- bzw. Trocknungsprozesse, die eingesetzte thermische Energie, der interne Kraftstoffverbrauch für Transporte im Werk und alle Transporte zum Werk sowie Verpackungen. Für die Energieherkunft wurden die an den Produktionsstandorten genutzten Energieträger und Energiequellen berücksichtigt. Die zur Herstellung benötigten Maschinen, Anlagen und Infrastruktur wurden vernachlässigt.

Annahmen und Abschätzungen betreffen Grubenlehm als Sekundärrohstoff, Verpackungen, Pflanzenteile, die Abfallaufbereitung und das Wiederverwertungspotenzial.

Grubenlehm als Sekundärrohstoff: ist ein Abfallprodukt der Sand- / Kiesgewinnung. Als Annäherung wurde die Umweltwirkung des Abbaggers nach ÖKOBAUDAT (Juni 2018) herangezogen. Alle

anderen Prozesse des Grubenbetriebes entfallen auf die Primärrohstoffe Sand bzw. Kies. Für den Lehmabbau (erdfeucht, mittelbindig, steife Konsistenz, Gewinnungsklasse GK 3 – 4 nach DIN 18300:2012-09) wurde eine Feuchtrohdichte des Lehms von $\rho = 2.000 \text{ kg/m}^3$ angenommen.

Verpackungen: Großgebinde aus PP Gewebe und Kraftpapiersäcke (ohne PE Inlet) werden in der UPD Werkmörtel (Deklarationsnummer DIBU-IWM-20408-D, S. 13) mit einem PEI von 0,01 MJ / kg Mörtel bewertet. Diese Bewertung wurde in die UPD für LPM übernommen. Die Wirkungskategorien bei der Verpackungsart konnten aus einer LCA-Studie zu LPM im Rahmen des Forschungsprojektes ECO-SEE (ECO-SEE BRE 2017) und aus der dort verwendeten Sima-Pro-Software abgeleitet werden.

Pflanzenteile: Anwendung fand die UPD Baustroh (EPD-FASBA-2014-1-ECOINVENT). Die darin enthaltenen Rückgewinnungspotenziale blieben unberücksichtigt, nicht jedoch das gebundene CO₂.

Abfallaufbereitung (C3): Zur Abschätzung der zu erwartenden Umweltwirkungen wurden zwei Szenarien unterstellt. Das *Nassverfahren* zur Auswaschung der in LPM enthaltenen mineralischen Bestandteile Sand, Schluff und Ton ist mit der Kiesgewinnung vergleichbar. Der dabei anfallende Rückstand wird bisher deponiert und als „Presslehm“ bezeichnet [Schroeder, 2018]. Als Datengrundlage wurde die Kiesgewinnung nach ÖKOBAUDAT (Juni 2018) unterstellt.

Das Szenario für ein *Trockenverfahren* zur Rückgewinnung nimmt eine Zerkleinerung der Alt-LPM mittels Prallmühle an. Die Mühlen werden üblicherweise für das Baustoffrecycling eingesetzt, aber auch für die Zerkleinerung von festen Lehmklumpen in der Produktion von LPM. Der notwendige Energieeinsatz (kWh/kg) wurde aus Herstellerangaben ermittelt und nach deutschem Strommix 2015 (ÖKOBAUDAT, Juni 2018) bewertet.

Ein drittes bekanntes Rückgewinnungsverfahren ist vor allem im Bereich des Um- und Ausbaus von Altbauten (in Eigenleistung) übliche Praxis: das Einsumpfen (soaking) sortenrein zurückgewonnener LPM [Schroeder, 2018]. Nach angemessener Ruhezeit, ggf. Sandzugabe als Magerungsmittel, und Einsatz von Rührgerät ist der Alt-LPM erneut gebrauchsfertig. Die durch die hydraulischen Eigenschaften der Tonminerale begründete Replastifizierbarkeit von Alt-LPM ist ein „Alleinstellungsmerkmal“ nicht stabilisierter Lehmbaustoffe. Zu diesem Verfahren gibt es bislang keine Daten, weil dabei keine signifikanten Energie- und Stoffströme entstehen.

Rückgewinnungspotenzial (D): Das spezifische Rückgewinnungspotenzial der LPM ist physikalisch begründet und im allgemeinen Teil beschrieben. Bewertet wird die Gutschrift rechnerisch als Einsparpotenzial der mineralischen Bestandteile Grubenlehm und ungetrockneter Sand (Verknappung abiotischer Rohstoffe ADPE, Tab. A.2) entsprechend der Daten aus der in A1 erfassten Rohstoffbereitstellung. Die Bewertung erfolgt mit einem kalkulatorischen Materialverlust von 5 M.-% für beide Szenarien.

9.6 Transporte

Sämtliche Transporte der eingesetzten Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe zu den Werken wurden in der Bilanz unter Berücksichtigung ihrer Entfernungen und des Auslastungsgrades berücksichtigt. Die Transportentfernungen wurden durch Erhebungen bei den beteiligten Herstellern ermittelt. Die Umweltbewertung erfolgte auf Basis generischer Daten nach ÖKOBAUDAT (Juni 2018).

Zusätzlich wurden die Primärenergieeinsätze für Transporte im Werk (Gabelstapler, Radlader) erfasst und bewertet.

Die Transporte der Fertigprodukte zur Baustelle liegen außerhalb der Systemgrenzen und gehen in die Umweltbilanz des jeweiligen Gebäudes ein.

9.7 Hintergrunddaten

Zur Modellierung der Umweltwirkungen wurden folgende Hintergrunddatensätze zu Vergleichszwecken herangezogen (Tab. 9.2):

- ÖKOBAUDAT, Juni 2018,
- Ecoinvent 3.2, November 2015,
- UPD Baustroh / FASBA: Oktober 2014,
- ECO-SEE BRE, Januar 2017,
- UPD Werkmörtel / DIBU IWM, April 2008.

Tab. 9.2: Übersicht Datengrundlagen

Nr.	Daten	Erdfeucht	Trocken	Hintergrunddatensatz
1	Grubenlehm		X	Ecoinvent 3.2
2	Grubenlehm als Sekundärrohstoff	X		ÖKOBAUDAT 09.01.01
3	Trockenlehm		X	ÖKOBAUDAT 1.1.04
4	Sand 0/2 bis 0/4 ungetrocknet	X	X	Ecoinvent 3.2
5	Sand 0/2 bis 0/4 getrocknet		X	ÖKOBAUDAT 1.2.04
6	Stroh		X	EPD FASBA
7	Elt. Energie Dt. Wasserkraft; Flusswasser	X	X	Ecoinvent 3.2
8	Elt. Energie DE Strommix 2015		X	ÖKOBAUDAT 9.2.05
9	Verpackung PE Gewebe Big-Bag (1,6 kg / 1.200 kg LPM)	X		DIBU IWM und ECO-SEE BRE
10	Verpackung Kraftpapiersack (90g/25kg LPM)		X	DIBU IWM und ECO-SEE BRE
11	Transport zum Werk (35-40 t, EURO 5, 27 t Nutzlast, 85 % Auslastung)	X	X	ÖKOBAUDAT 9.3.01
12	Transport im Werk (Diesel)	X	X	ÖKOBAUDAT 9.2.03
13	Abfallaufbereitung	X	X	Ecoinvent 3.2
14	Wiederverwertungspotenzial	X	X	Ecoinvent 3.2

9.8 Datenqualität

Die Daten für die Herstellung der untersuchten LPM beziehen sich auf das Jahr 2017. Die Ökobilanzen wurden für den Bezugsraum Deutschland erstellt. Die untersuchten vier Verfahren bilden das bekannte Spektrum der in Deutschland eingesetzten Produktionstechniken für LPM ab.

Die Datenerfassung für die untersuchten Produkte und Verfahren erfolgte durch Befragung der Hersteller mittels eines strukturierten Erfassungsbogen. Alle Daten und Berechnungen sind beim Programmbetreiber hinterlegt worden. Die untersuchten erdfeucht und trocken hergestellten LPM sind typisch für die am Markt befindlichen LPM in Deutschland. Die untersuchten LPM der beteiligten Hersteller umfassen 2.365 t, davon entfielen auf das Erdfeuchtverfahren 1.533 t und die Trockenverfahren insgesamt 832 t. Die produzierte Gesamtmenge an den drei Standorten der Werke betrug 20.328 t.

9.9 Allokation

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

Grubenlehm als Sekundärrohstoff wird als Bodenaushub bereitgestellt und in anderen Prozessen ohne Veränderung stofflich wiederverwertet. Der Großteil der Belastungen wird entsprechend der nach DIN EN ISO 14044:2006, Abs. 4.3.2 zugrunde gelegten physikalischen Allokation der Kiesgewinnung als Hauptprodukt zugewiesen.

Dieselben Produktions- und Trocknungsanlagen für die untersuchten LPM werden auch für andere, hier nicht erfasste LPM (z. B. Lehmdünnlagenbeschichtungen LDB) genutzt. Der erfasste Energieeinsatz für innerbetriebliche Transporte bezieht sich auf alle Produkte an den Standorten der beteiligten Verbandshersteller. Die Energie- und Stoffinputs für die Produktion und für innerbetriebliche Transportwege der deklarierten Produkte wurden entsprechend ihrer Jahresproduktionsmenge anteilmäßig zur Jahresgesamttonnage auf den Produktionsanlagen an den Standorten berechnet.

Kraftpapiersäcke enthalten eine Gutschrift für die thermische Verwertung des Papieranteils.

Pflanzenteile enthalten eine Gutschrift für die CO₂-Bindung während der Wachstumsphase des Getreides.

9.10 Verwertung von Abfällen und Verpackungen

Die stoffliche Verwertung von Holz, Papier- und Kunststoffverpackungen wurde durch einen zertifizierten Entsorger gem. Abfallwirtschaftsgesetz von allen Herstellern nachgewiesen.

Für LPM gilt Pkt. 8 dieser UPD.

10 HINWEISE ZUR NUTZUNGSPHASE

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

Die dynamische Luftfeuchtesorption von LPM in der Nutzungsphase hat Auswirkungen auf das Raumklima und trägt damit zur energetischen Optimierung notwendiger Luftwechselraten bei. Entsprechende Nachweise nach DIN 18947, A.1 sind in Abs. 2.7, Tab.2.2 dokumentiert.

LPM zeichnen sich wegen der Möglichkeit der Replastifizierung des Festmörtels, analog zu der in Abs. 9.5 beschriebenen Aufbereitungstechnik des „Einsumpfens“, durch besondere Reparaturfreundlichkeit aus.

LPM sind gut mit anderen Baustoffen kombinierbar.

11 NACHWEISE

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

11.1 Produkt-Erstprüfung nach DIN 18942-100

Liegt dem Programmbetreiber vor.

11.2 VOC, TVOC

LPM werden nach DIN EN 16516 und Prüfkammerbedingungen nach DIN ISO 16000-9 geprüft. Die Mustertabelle *Tab. 11.1* beschreibt verschiedene zu prüfende organische Verbindungen als Emissionen aus LPM.

Tab. 11.1: Mustertabelle für VOC und TVOC von LPM ¹⁾

Prüfparameter	Konzentration nach 3 Tagen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Grenzwert
VOC (inkl. VVOC und TVOC)		
TVOC (Summe flüchtige organische Verbindungen inklusive SVOC)		
VOC	Flüchtige organische Verbindungen	
VVOC	leichtflüchtige organische Verbindungen	
SVOC	schwerflüchtige organische Verbindungen	
TVOC	Summe flüchtiger organischer Verbindungen	

¹⁾ Hersteller fügen individuelle Daten in die Mustertabelle ein.

11.3 Radioaktivität

Die Messung des Radionuklidgehaltes [Bq/kg] für Ra-226, Th-232, K-40. nach DIN 18947, Abs. A.3. von LPM ergibt einen Aktivitätskonzentrationsindex $I < 1$.

TEIL A – SACHBILANZ

A.1 Darstellung der Bilanzen und Auswertung

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

A.1.1 Ressourceneinsatz

Der Primärenergieeinsatz PET (erneuerbar und nicht erneuerbar) und die damit verbundenen Outputfaktoren setzen sich zusammen aus den Daten der(s) Hersteller(s) zur Stoffzusammensetzung, der Energiemenge und -art, den Transporten zum Werk bzw. im Werk und zur Verpackung entsprechend der in Abs. 9.8 erläuterten Datenqualität. In *Tab. A.1* sind die Indikatoren zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes für die Herstellung von LPM dargestellt, unterteilt nach Verfahrensart in Erdfeuchtverfahren, Nachtrocknung (nach Erdfeuchtproduktion), Vortrocknung (Mischung trockener Komponenten) und passive Solarnutzung (belüftetes Treibhaus).

Aufgrund der grauen Energie in den Vorprodukten Lehmpulver und getrocknete Sandkörnung erhöht sich der PET für das *Vortrocknungsverfahren* mit insgesamt 1,07 MJ/kg LPM signifikant im Vergleich mit dem *Erdfeuchtverfahren* (0,15 MJ/kg LPM) und der passiven Solartrocknung (0,23 MJ/kg LPM). Die enthaltene graue Energie für Lehmpulver mit anteilig 0,472 MJ/kg oder 44 % ist aus der ÖKOBAUDAT (07.2018) entnommen. Die generischen Daten zu Lehmpulver in der ÖKOBAUDAT beziehen sich auf die Homepage eines Berliner Handwerksbetriebes (www.lehmbauwerk.de) aus dem Jahre 2008 und sind nicht mehr nachvollziehbar. In Ermangelung geeigneter anderer Datenquellen und mangels originärer Datengrundlagen wurden die LCA-Daten der ÖKOBAUDAT für die Bilanzierung des Vortrocknungsverfahrens trotz Bedenken verwendet.

Beim *Nachtrocknungsverfahren* ergibt der Einsatz von Flüssiggas für die Trommeltrocknung einen deutlich erhöhten Gesamtenergieeinsatz von 1,13 MJ/kg LPM. Der Gesamtenergieeinsatz summiert sich mit dem dazugehörigen vorgelagerten Erdfeuchtverfahren auf insgesamt 1,28 MJ/kg LPM.

Beim *solaren Trocknungsverfahren* im Treibhaus verursachen hauptsächlich Diesel- und Stromverbräuche die Energiemenge von 0,22 MJ/kg LPM.

Alle Produktionsprozesse für LPM benötigen keine Wasserzufuhr. Die Mischungen erfolgen erdfeucht mit einem natürlichen Feuchtegehalt $w = 4 - 13$ % oder trocken. Die Vorketten in der Lebenszyklusphase A1 – A3 summieren sich je nach Verfahren auf Wasserverbräuche in Höhe von 0,0000812 l/m³ LPM (Vortrocknungsverfahren) bis 0,001 l/m³ LPM (passive Solartrocknung). Auch hier gelten die Einschränkungen hinsichtlich des Wassergehalts im Rohstoff „Grubenlehm“, wie sie in einschlägigen Datensystemen unterstellt werden.

Der Energieverbrauch der erfassten Verpackungen wird aus der UPD Werkmörtel für gleichwertige Verpackungsarten übernommen und mit 0,01 MJ/kg LPM bewertet.

Tab. A.1: Indikatoren Ressourceneinsatz für die Herstellung von LPM (A1 – A3) nach Verfahrensarten

Nr.	Indikator (jährl. Durchschnitt, Bezugsgröße 1 kg Masse)	Richtung	Einheit	Verfahrensart			
				Erdfeucht	Nach-trocknung	Vor-trocknung	Solar-trock-nung (passiv)
1	Erneuerbare PE als ET (PERE)	Input	MJ	3,58E-02	4,00E-02	8,13E-02	2,73E-02
2	Erneuerbare PE zur stofflichen Nutzung (PERM)	Input	MJ	7,23E-09	7,23E-09	1,27E-01	6,34E-02
3	Summe erneuerbarer PE (PERT)	Input	MJ	3,58E-02	4,00E-02	2,08E-01	9,08E-02
4	Nicht erneuerbare PE als ET(PENRE)	Input	MJ	1,14E-01	1,09E+00	8,62E-01	1,35E-01
5	Nicht erneuerbare PE zur stofflichen Nutzung (PENRM)	Input	MJ	0	0	3,78E-04	1,89E-04
6	Summe nicht erneuerbarer PE (PENRT)	Input	MJ	1,14E-01	1,09E+00	8,62E-01	1,35E-01
7	Summe PERT und PENRT	Input	MJ	1,50E-01	1,13E+00	1,07E+00	2,26 E-01
8	Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	Input	kg	0	0	0	0
9	Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	Input	MJ	0	0	0	0
10	Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	Input	MJ	0	0	0	0
11	Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	Input	m ³	7,41E-04	7,47E-04	8,12E-05	1,00E-03

A.2 Umweltwirkungen

Gemäß Teil 2 wurden folgende Indikatoren zur Beschreibung der Umweltwirkungen quantifiziert und in *Tab. A.2* dargestellt:

GWP – Globales Erwärmungspotenzial als CO₂ Äquivalentkennwert (Bezug Bilanzjahr),

ODP – Abbaupotenzial für die stratosphärische Ozonschicht als kg R11 (Kältemittel) Äquivalent,

POCP – photochemische Ozonbildung (Sommersmogpotenzial) als kg Ethylen Äquivalent,

AP – Versauerungspotenzial für Böden und Wasser als kg Schwefel SO₂ Äquivalent,

EP – Eutrophierungspotenzial für Böden als kg Phosphat PO₄ Äquivalent,

ADP E – Abbaupotenzial für nicht fossile Elemente als kg Antimon Sb Äquivalent,

ADP F – Abbaupotenzial für fossile Elemente (Brennstoffe) als MJ unterer Heizwert.

Alle Indikatorgrößen wurden nationalen und internationalen Datenbanken entnommen.

Tab. A.2: Indikatoren Umweltwirkungen bei der Herstellung von LPM (A1-A3) nach Verfahrensarten (jährl. Durchschnitt, Bezugsgröße 1 kg Masse)

Nr.	Indikator	Einheiten	Verfahrensarten			
			Erdfeucht	Nachrocknung	Vortrocknung	Solartrocknung (passiv)
1	GWP	kg CO ₂ Äq.	6,92E-03	1,52E-02	1,24E-01	-1,78E-03
2	ODP	kg R11 Äq.	2,68E-10	2,73E-10	8,52E-11	5,54E-10
3	POCP	kg Ethylen Äq.	3,58E-06	1,21E-05	1,64E-05	6,72E-06
4	AP	kg SO ₂ Äq.	1,70E-05	7,91E-05	1,80E-04	5,08E-05
5	EP	kg PO ₄ Äq.	4,85E-06	8,70E-06	3,11E-05	1,26E-05

6	ADPE	kg Sb Äq.	3,59E-07	2,89E-06	8,99E-06	2,19E-06
7	ADPF	MJ	1,35E-01	1,16E+00	8,84E-01	1,56E-01

Im Vergleich wird deutlich, dass mit einer Nachtrocknung der Rohstoffe das GWP gegenüber dem Erdfeuchtverfahren ansteigt. Dabei sind ökologische Optimierungspotentiale auszumachen, wie das Beispiel der Treibhaustrocknung zeigt. Aufgrund der energieeffizient hergestellten Vorprodukte aus dem Erdfeuchtverfahren bleibt das GWP der Nachtrocknung relativ niedrig (0,0152 kg CO₂ Äq. pro kg LPM) trotz höherem Energieeinsatz (ADPF: 1,16E+00 MJ).

Die Vortrocknung und Dosierung der Rohstoffe führt zu einem höheren GWP mit 0,124 kg CO₂ Äq. Darin sind bereits enthalten eine Gutschrift für den Strohanteil (1,1%) mit -0,014 kg CO₂ Äq. und die Kraftpapierverpackung (90 g) mit -0,00245 kg CO₂ Äq.

Die passive Solartrocknung nach dem Treibhausprinzip kommt auf ein rechnerisch negatives GWP mit -0,00178 kg CO₂ Äq. An diesem Beispiel wird die ökologische Relevanz des geringen Pflanzenanteils (0,5 M.-%) deutlich. Enthalten sind Gutschriften für den Pflanzenanteil in Höhe von -6,36E-03 oder 0,00636 kg CO₂ Äq. Ohne diese Gutschrift steigt der GWP Wert um 360 % auf 4,58E-03 kg CO₂ Äq. Das Beispiel verdeutlicht die ökologische Bedeutung des Pflanzenanteils in den betrachteten LPM. Deshalb wurden Anteile unter 1 M.-% in die Bilanz einbezogen. LPM nach Erdfeuchtverfahren und Nachtrocknungsverfahren enthalten keine Pflanzenanteile.

A.2.1 Gebundenes CO₂ in Pflanzenanteilen

Die Gutschrift für in Pflanzen gebundenes CO₂ bewertet die UPD Baustroh des FASBA mit einem GWP-Anteil von -124,1 kg CO₂ Äq. pro 100 kg Stroh.

A.2.2 CO₂-Gutschriften für Verpackungen

Getrocknete LPM werden in ungebleichte Kraftpapiersäcke abgefüllt, transportiert und gelagert. Die Hersteller sind einem Verwertungssystem angeschlossen, das die Papiersäcke energetisch verwertet. Die ersparten fossilen Energien führen zu einer CO₂ Gutschrift (ECO-SEE BRE). Die Gutschrift für Kraftpapiersäcke in den Trockenverfahren beträgt 0,00245 kg CO₂ Äq.

A.3 Andere Umweltinformationen (Abfälle, Output-Stoffflüsse)

Tab. A.3 fasst die Indikatoren zur Beschreibung von Abfallkategorien und sonstiger Umweltinformationen für die Herstellung von LPM (A1 – A3) nach Verfahrensarten zusammen.

Bei der Herstellung von LPM aus Grubenlehm als Sekundärrohstoff mit 480 g/kg LPM entstehen Abfälle aus den Vorketten, Energie und Verpackung, in Höhe von 2,4 g/kg LPM. Damit ergibt sich ein insgesamt negatives Abfallaufkommen, bei dem mehr verwertet (Reduktion von Bodenabfällen) als neu erzeugt wird.

Prozessbedingte mineralische Abfälle werden unverändert in den Prozess zurückgeführt oder für andere Produktkategorien am selben Standort verwertet. Dies sind insbesondere Gesteinskörnungen und Lehmklumpen.

Verpackungsabfälle fallen nur in geringen Mengen an und werden stofflich verwertet. Darin enthalten sind beschädigte Verpackungen als Rückläufer aus herstellereigenen Pfandsystemen für Kunststoffgroßgebäude. Nach Herstellerangaben sind dies durchschnittlich 5,83E-04 kg/kg LPM.

Nicht prozessbedingte Abfälle entstehen am Standort in vernachlässigbaren Größenordnungen, z. B. Toilettenpapier, Putzlappen. Sie haben keinen messbaren Einfluss auf die Sachbilanz.

Tab. A.3: Indikatoren Abfallkategorien und sonstige Umweltinformationen für die Herstellung von LPM (A1 – A3) nach Verfahrensarten

Nr.	Indikator (jährl. Durchschnitt, Bezugsgröße 1 kg Masse)	Richtung	Einheit	Verfahrensart			
				Erdfeucht	Nach-trocknung	Vor-trocknung	Solar-trocknung (passiv)
1	Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	Output	kg	7,50E-06	3,97E-05	7,50E-06	5,59E-05
2	Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	Output	kg	1,71E-02	2,38E-04	1,71E-02	3,12E-04
3	Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)	Output	kg	8,85E-06	1,33E-06	8,85E-06	4,25E-06
4	Komponenten f. die Wiederverwendung (CRU)	Output	kg	9,50E-01	9,50E-01	9,40E-01	9,40E-01
5	Stoffe zum Recycling (MFR)	Output	kg	1,78E-03	8,00E-01	8,00E-01	8,00E-01
6	Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	Output	kg	0	0	0	0
7	Exportierte elektr. Energie (EEE)	Output	MJ	0	0	0	0
8	Exportierte thermische Energie (EET)	Output	MJ	0	0	0	0

A.4 Transporte

Transporte von Grundstoffen, Zusatzstoffen und Verpackungsmaterial zu den Werken erfolgen hauptsächlich per LKW. Der Anteil der Transportenergie für die Anlieferung von Rohstoffen am Gesamtprimärenergieeinsatz beträgt zwischen 7 und maximal 17 %.

Weitere Transporte beziehen sich mit bis zu 46 % am Gesamtprimärenergieeinsatz PET auf die Abläufe am Produktionsstandort selbst. Das sind Umlagerungen und die Zufuhr von Materialien durch Gabelstapler und Radlader zur Produktionsanlage im Werk. Hier wurden die Dieselverbräuche im Werk anteilig zur Gesamtproduktionstonnage den deklarierten LPM zugeordnet. Für das Vortrocknungsverfahren liegen keine Werte vor. Das erdfeucht hergestellte Vorprodukt für das anschließende Nachtrochnungsverfahren enthält bereits alle innerbetrieblichen Transportenergien. Das Solarverfahren setzt 8 % des PET für diese Betriebsabläufe ein.

A.5 Aufbereitung und Wiederverwertungspotenzial

LPM lassen sich im Rahmen einer Trennung von Bauabfällen sortenrein zurückgewinnen, durch Wasserzufuhr replastifizieren und in ihre Bestandteile auflösen und wiederverwerten. Der Aufwand für den Abriss und die Trennung wird gemäß PKR LPM nicht betrachtet. Die nachfolgenden Tabellen A.4 und A.5 stellen Ergebnisse von Berechnungen dar, die von verschiedenen Szenarien für die Abfallaufbereitung in Modul C3 und die daraus resultierenden Wiederverwertungspotenziale (Modul D) ausgehen.

Im Modul C3 werden ein Nass- und ein Trockenszenario untersucht. Das Nassverfahren ist eine *Rohstoffrückgewinnung*, das Trockenverfahren eine *Produktstückrückgewinnung*.

Das *Nassverfahren* unterstellt eine Separierung der mineralischen Fraktionen eines sortenrein zurückgewonnenen LPM mittels Auswaschung wie beim Kiesgewinnungsprozess. Daten zu diesem Prozess liegen vor. Das in Abs. 9.2.2 beschriebene Verfahren des „Einsumpfens“ ist ebenfalls dem Nassverfahren zuzuordnen, wird aber mangels relevanter Daten nicht weiter in die Szenarien einbezogen. Das *Trockenverfahren* unterstellt die vollständige Aufbereitung des sortenrein zurückgewonnenen LPM durch Zerkleinerung in einer Prallmühle, wie sie auch für andere Bauschuttfraktionen eingesetzt wird.

In Modul D wird für das *Nassverfahren* unterstellt, dass durchschnittlich 15% Ton- bzw. Schluffanteile und 85% Sandanteile, jedoch keine Pflanzenanteile zurückgewonnen werden. Ein Verlust von 5 M.-% wird angenommen.

Im Modul D wird für das *Trockenverfahren* eine vollständige Rückführung in den Produktionsprozess unterstellt. Im nachfolgenden Produktionsprozess können Lehm-, Sand- und Pflanzenanteile je nach Zusammensetzung des sortenrein zurückgewonnenen LPM ergänzt werden. Diese Ergänzungen sind Teil des neuen Produktionszyklus.

Tab. A.4 beschreibt die Indikatoren Ressourceneinsatz und Rückgewinnung / sonstige Umweltinfos für beide Verfahren. Bei einer Gegenüberstellung des Primärenergieaufwandes mit dem Rückgewinnungspotenzial ergibt sich für beide Verfahren ein ökologischer Gewinn in einer Größenordnung von $-2,22\text{E-}02$ MJ/kg bis $-1,45\text{E-}02$ MJ/kg als Verwertungspotenzial (PET Aufbereitung – Rückgewinnung). Allerdings sind die Transporte zur Aufbereitung nicht berücksichtigt, aber die Szenarien quantifizieren mögliche „ökologische Spielräume“ für die Logistik einer Aufbereitung von LPM. Transporte von der Aufbereitung zum Werkstor würden wiederum in den Modulen A1 bzw. A2 als Rohstofftransporte eines neuen Produktionszyklus Eingang finden.

Tab. A.4: Indikatoren Verwertungspotenzial u. sonstige Umweltinfos

Nr.	Indikator (jährl. Durchschnitt, Bezugsgröße 1 kg Masse)	Einheit	Szenarien			
			Nassverfahren		Trockenverfahren	
			Modul C3 (Aufbereitung)	Modul D (Rückgewinnung)	Modul C3 (Aufbereitung)	Modul D (Rückgewinnung)
1	Erneuerbare PE (PERE)	MJ	1,07E-02	-4,71E-03	1,18E-02	-3,39E-03
2	Erneuerbare PE zur stofflichen Nutzung (PERM)	MJ	0,00E+00	1,11E-08	0,00E+00	-7,84E-09
3	Summe erneuerbarer PE (PERT)	MJ	1,07E-02	-4,71E-03	1,18E-02	-3,39E-03
4	Nicht-erneuerbare PE als ET(PENRE)	MJ	3,82E-02	-4,64E-02	2,15E-02	-4,44E-02
5	Nicht-erneuerbare PE zur stofflichen Nutzung (PENRM)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
6	Summe nicht-erneuerbarer PE (PENRT)	MJ	3,82E-02	-4,64E-02	2,15E-02	-4,44E-02
7	PERT + PENRT = PET	MJ	4,89E-02	-5,11E-02	3,33E-02	-4,78E-02
8	Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	Kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
9	Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10	Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
11	Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	m ³	7,12E-06	-1,15E-03	6,22E-06	-8,12E-04
12	Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	Kg	1,08E-06	-5,80E-05	1,48E-08	-4,84E-05
13	Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	Kg	2,29E-02	-2,48E-04	2,13E-05	-1,81E-04

14	Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)	Kg	1,55E-06	-4,29E-07	2,05E-06	-3,88E-07
15	Komponenten f. die Wiederverwendung (CRU)	Kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
16	Stoffe zum Recycling (MFR)	Kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
17	Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	Kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
18	Exportierte elektr. Energie (EEE)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
19	Exportierte thermische Energie (EET)	MJ	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Das Verhältnis von Aufbereitungsaufwand zum Rückgewinnungspotenzial hängt ab von den gewählten Aufbereitungstechniken und den Annahmen zur Rückgewinnungsquote. Im *Nassverfahren* sind 5 M.-% Verluste eingerechnet und eine Separierung der Rohstoffe nach typischer Siebanalyse, d. h. geschätzte 15 M.-% Ton- und Schluffanteile sowie 85 M.-% Gesteinskörnungen. Beim *Trockenverfahren* wird der sortenrein zurückgewonnenen LPM aus Abriss ohne weitere Trennung bzw. Auswaschung nur zerkleinert und wiederverwertet. Die betrachteten Prallmühlen arbeiten mit durchschnittlich 0,003 MJ/kg elektrischer Energie. *Tab. A.5* beschreibt die Indikatoren der Umweltwirkungen für beide Verfahren.

Tab. A.5: Indikatoren Umweltwirkung für die Aufbereitung und Wiederverwertung

Nr.	Indikator (jährl. Durchschnitt, Bezugsgröße 1 kg Masse)	Einheit	Szenarien			
			Nassverfahren		Trockenverfahren	
			Modul C3 (Aufbereitung)	Modul D (Rückgewinnung)	Modul C3 (Aufbereitung)	Modul D (Rückgewinnung)
1	Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	2,89E-03	-2,19E-03	1,63E-03	-2,37E-03
2	Abbaupotenzial der stratosphär. Ozonschicht (ODP)	kg R11-Äq.	5,39E-12	-4,88E-10	6,83E-12	-4,95E-10
3	Bildungspotenzial für troposphär. Ozon (POCP)	kg Ethen-Äq.	2,44E-06	-2,44E-06	1,76E-07	-2,80E-06
4	Versauerungspotenzial von Boden u. Wasser (AP)	kg SO ₂ -Äq.	7,21E-06	-1,48E-05	2,49E-06	-1,67E-05
5	Eutrophierungspotenzial (EP)	kg Phosphat-Äq.	1,34E-06	-4,53E-06	4,04E-07	-4,76E-06
6	Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE)	kg Sb-Äq.	1,26E-06	-1,49E-08	1,05E-06	-1,08E-08
7	Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF)	MJ	3,43E-02	-3,11E-02	1,64E-02	-3,37E-02

Diese Szenarien geben Anlass für weitere Analysen technischer Möglichkeiten zur Nutzung des Wiederverwertungspotenzials von LPM.

TEIL B – INTERPRETATION DER PRIMÄRENERGIEBILANZ & WIRKUNGSANALYSE

Die Interpretation der Ergebnisse der Ökobilanz zu Primärenergieeinsatz und Wirkungsanalyse bezieht sich auf die unterschiedlichen Herstellungsverfahren. Zur Vereinfachung wird das Erdfeucht- mit dem Nachtrocknungsverfahren zusammen in einem Abschnitt interpretiert, zumal diese Prozesse unmittelbar zusammenhängen.

Das Vortrocknungsverfahren und die passive Solartrocknung folgen in gesonderten Abschnitten.

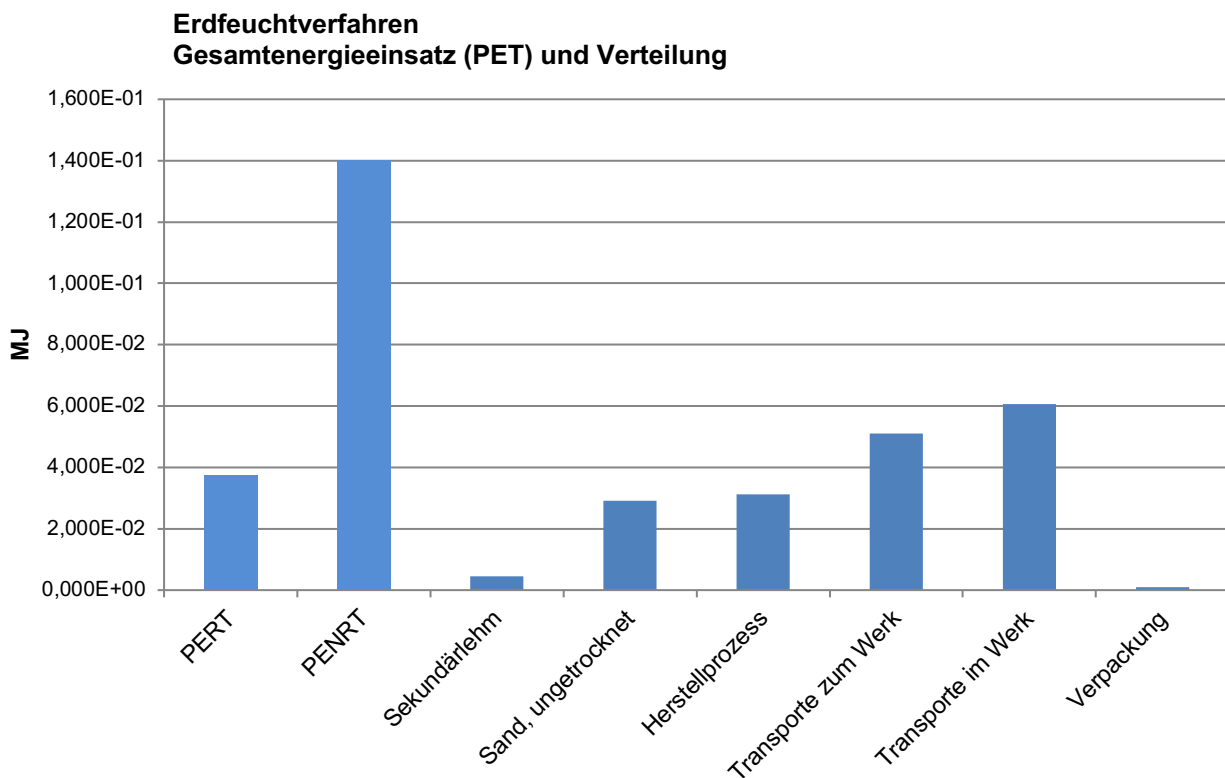
B.1 Erdfeuchtverfahren und Nachrocknungsverfahren

B.1.1 Ressourceneinsatz

Der Gesamtenergieeinsatz (PET) für LPM, die im Erdfeuchtverfahren hergestellt wurden, beläuft sich auf 0,15 MJ/kg (Abb. B.1). Dieser Energieeinsatz setzt sich aus regenerativen (PERT) und nicht regenerativen (PENRT) Anteilen zusammen.

Die beteiligten Hersteller sind dazu übergegangen, vermehrt Ökostrom für die Produktion und Fahrzeuge im Werk einzusetzen. Dies wird dadurch erleichtert, dass sich der Strombedarf im Niedrig- bzw. Mittelspannungsbereich bewegt. 24 % des PET kommen bereits aus regenerativen Energiequellen. Der Ökostrom der Stromlieferanten stammt aus Flusswasserkraftwerken und ist entsprechend bilanziert (ecoinvent 3.2). Der nicht regenerative Energieanteil (76 %) entfällt auf Diesel für Transporte, Gewinnung von Rohstoffen und Verpackungen.

Abb. B.1: Erdfeuchtverfahren – Gesamtenergieeinsatz (PET) und Verteilung



Als Orientierung für die Interpretation können die entsprechenden Richtwerte der natureplus RL 0803 herangezogen werden, die zur Vergabe des Qualitätszeichens „natureplus“ führen (Tab. B.1). Für durchschnittlich 10 mm Putzdicke werden 10 kg LPM (erdfeucht) verbraucht. Bei 0,15 MJ/kg ergibt das einen PET-Wert von 1,5 MJ pro m²/cm. Das liegt signifikant unter den empfohlenen natureplus-Richtwerten nach Tab. B.1. Auch der Anteil der nicht erneuerbaren PE (PENRE) bleibt mit 1,14 MJ pro m²/cm deutlich unter den Richtwerten von natureplus.

Tab. B.1: Richtwerte für ökologische Kennwerte von LPM zur Erlangung des Qualitätszeichens nach natureplus RL 0803

Kennwert pro m ² x je cm Putzdicke	Einheit	Empfohlener Richtwert
Nicht erneuerbare PE (PENRE)	MJ	21
Nicht erneuerbare und erneuerbare PE (PET)	MJ	25
Sommersmog POCP	kg Ethylen Äq.	0,0006
Versauerungspotenzial AP	kg SO ₂ Äq.	0,005
Überdüngungspotenzial EP	kg PO ₄ ³⁻ Äq.	0,0018
Treibhauspotenzial GWP	kg CO ₂ Äq.	1,3
Verbrauch abiotische Ressourcen ADPE	kg Sb Äq.	0,0000011

Abb. B.2 zeigt den PET-Aufwand der Nachtrocknung im Trommeltrockner im Verhältnis zum PEI der erdfeuchten Vorproduktion: Von insgesamt 1,13 MJ/kg LPM für regenerative und nicht regenerative Primärenergie entfallen auf die Nachtrocknung, hier mit Flüssiggas, rund 88%. Die gesamte vorgelagerte Prozesskette aus dem Erdfeuchtverfahren einschließlich Transporte und Verpackung umfasst 0,15 MJ/kg LPM.

Der Anteil der regenerativen Energieträger sinkt relativ dazu von 24 % auf knapp 4 %. Der vorgelagerte erdfeuchte Prozess mit 10-fach geringerem Energieaufwand schafft aber genügend Spielraum, um dennoch die natureplus-Richtwerte (Tab. B.1) einzuhalten.

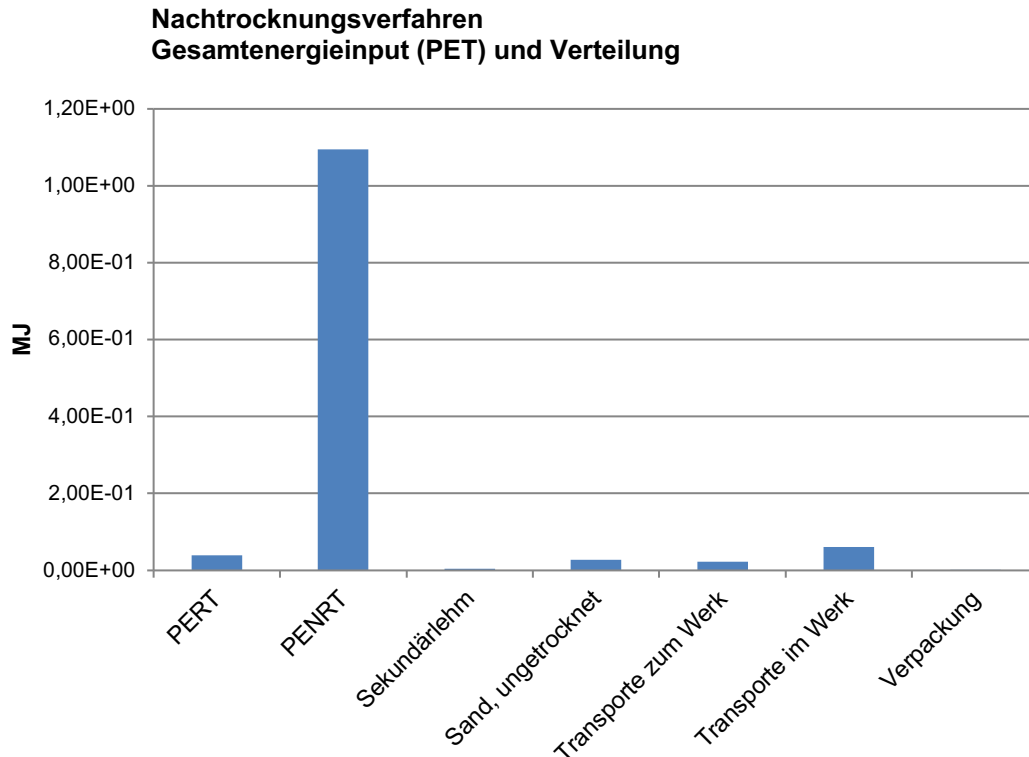


Abb. B.2: Nachtrocknung erdfeuchter Vorproduktion

B.1.2 Beitrag zur globalen Klimaerwärmung GWP

Erdfeucht hergestellte LPM tragen mit knapp 0,007 kg CO₂ Äq. zur globalen Klimaerwärmung (GWP) bei (Abb. B.3). Dieser Wert liegt deutlich unter dem Richtwert nach natureplus RL 0803 von 1,3 kg CO₂ Äq. (Tab. B.1).

Die Anteile für Transporte (31,1 %) und Verpackungen (47,5 %) mit insgesamt rund 80 % am Gesamtwert des GWP ragen heraus. Der Herstellprozess selbst profitiert hier vom Einsatz regenerativer Energiequellen und trägt nur marginal (< 1 %) zur Klimaerwärmung bei.

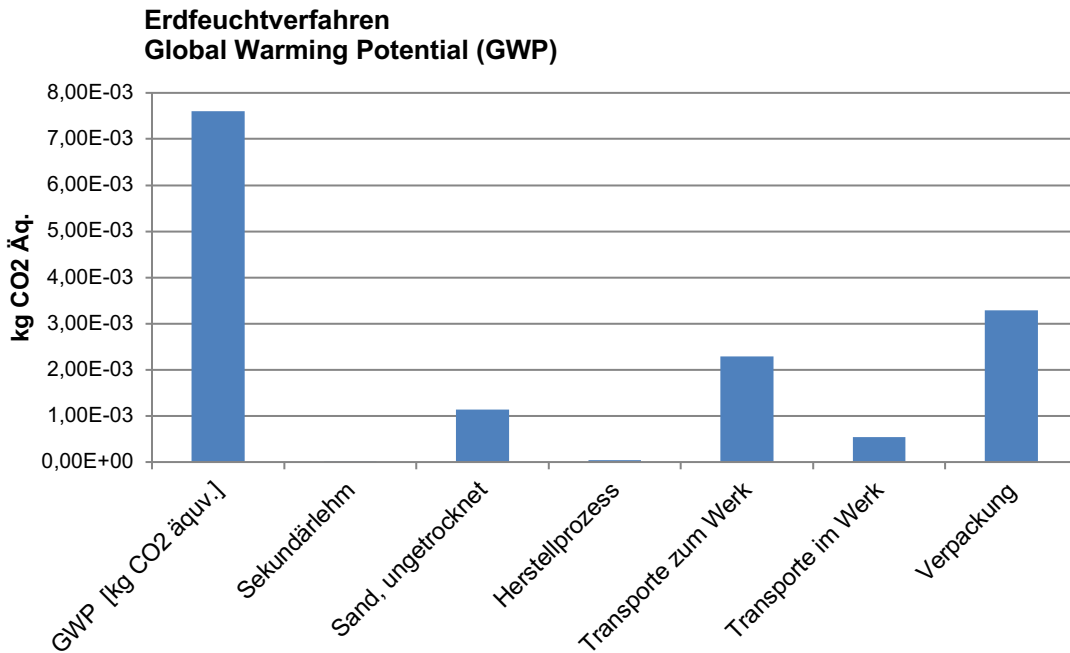


Abb. B.3: Erdfeuchtverfahren – Beitrag zur globalen Klimaerwärmung (GWP)

Abb. B.4 verdeutlicht den Anteil des dem Erdfeuchtverfahren nachgelagerten Nachtrocknungsverfahrens und die damit verbundenen Wirkungen auf das GWP des Nachtrocknungsverfahrens.

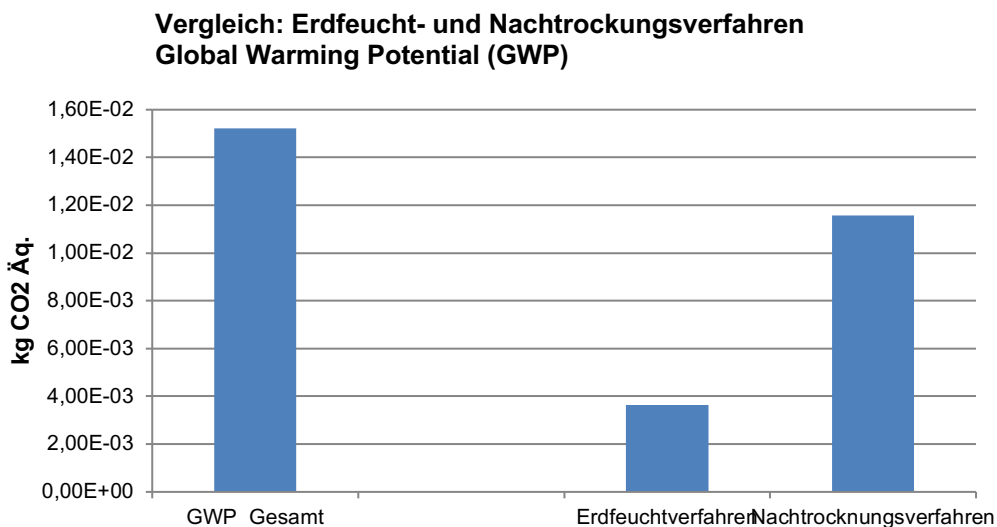


Abb. B.4: GWP-Vergleich des Erdfeucht- und Nachtrocknungsverfahrens

Das GWP beträgt insgesamt $1,52E-02$ kg CO₂ Äq. pro kg LPM. Davon entfallen ca. 24 % auf das vorgelagerte Erdfeuchtverfahren und 76 % oder $1,16E-02$ kg CO₂ Äq. pro kg LPM auf die Nachtrocknung im mit Flüssiggas betriebenen Trommeltrockner. In den $1,52E-02$ kg CO₂ Äq. pro kg LPM ist die Verpackungsumstellung von Kunststoffgroßgebinden (PP) für erdfeuchte LPM auf ungebleichte Kraftpapiersäcke berücksichtigt worden. Anstelle der PP-Gebinde mit $3,28E-03$ kg CO₂ Äq. ist hier eine Gutschrift in Höhe von $-2,45E-03$ kg CO₂ Äq. für Papiersäcke eingerechnet.

Die im Vergleich zu den anderen betrachteten Verfahren günstigen Ökobilanzwerte des im Erdfeuchtverfahren hergestellten Vorproduktes begünstigt das GWP der LPM aus dem Nachtrocknungsverfahren trotz höherem Energieinput durch Flüssiggas. Eine energetische Optimierung des Trocknungsprozesses durch Umstellung auf andere Energieträger (z.B. Biogas) oder eine effizientere Trocknungsanlagentechnik könnte das GWP des Nachtrocknungsverfahrens weiter reduzieren.

B.1.3 Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)

Der Beitrag zum Abbau der Ozonschicht (ODP) durch den Herstellungsprozess von LPM erdfeucht ist mit einer Größenordnung von $2,68E-10$ kg Sb Äq. gering (*Abb. B.5*). Der Beitrag entsteht ausschließlich durch vorgelagerte Prozesse bei der Sandgewinnung.

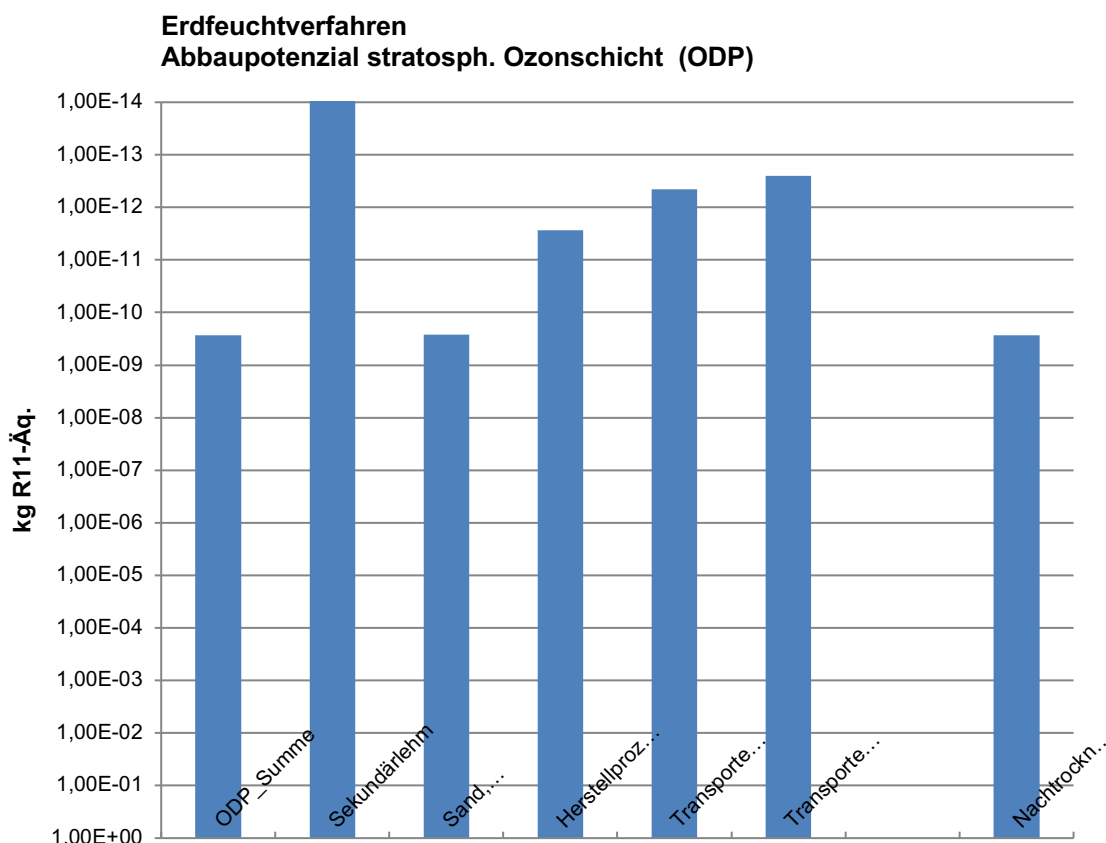


Abb. B.5: Erdfeuchtverfahren – Abbaupotenzial der Ozonschicht ODP

Zum Vergleich ist in *Abb. B.5* das OPD des Nachtrocknungsprozesses eingefügt, dass mit zusätzlich $2,73E-10$ eine Verdopplung in Bezug auf Erdfeuchtverfahren bewirkt. Zur Bewertung des OPD lagen keine Daten für die Verpackung vor.

B.1.4 Potenzial zur Verknappung von abiotischen Ressourcen ADPE und ADPF

Die wachsende Weltwirtschaft erfordert einen stetig steigenden Bedarf an abiotischen Rohstoffen, die zu Rohmaterialien aufbereitet und verarbeitet werden. Dieser Trend verschärft die globalen Umweltprobleme. Ziel ist deshalb, die Umweltbelastung bei der Gewinnung von Rohstoffen auf ein verträgliches Maß zu reduzieren.

Abiotische Ressourcen sind alle Rohstoffe, die nicht aus oder von Lebewesen stammen. Zu ihnen gehören fossile Energieträger, Erze und sonstige mineralische Rohstoffe, Baumineralien wie Sand, Kies, Lehm, Steine sowie Industriemineralien wie Quarzsand und Kalisalze.

Abiotische Rohstoffe (ADPE) umfassen alle nicht erneuerbaren Materialien, die primär aus der Natur gewonnen werden, nicht weiter bearbeitet wurden und in einen Produktionsprozess eingehen können. Als einheitliche Bezugsgröße wurde in DIN EN 15804 Antimon festgelegt.

Abiotische Ressourcen (ADPF) beschreiben das Potenzial für den Abbau fossiler Brennstoffe, der als spezifischer unterer Heizwert [MJ] angegeben wird.

Der in *Abb. B.6* dargestellte Summenwert ADPE ergibt sich zu ca. 90 % aus der Prozesskette für Transporte. Mit $3,59\text{E-}07$ kg Sb Äq. liegt der ADPE-Wert deutlich unter dem entsprechenden nature-plus-Richtwert nach *Tab. B.1* ($1,1\text{ E-}06$ kg Sb Äq.).

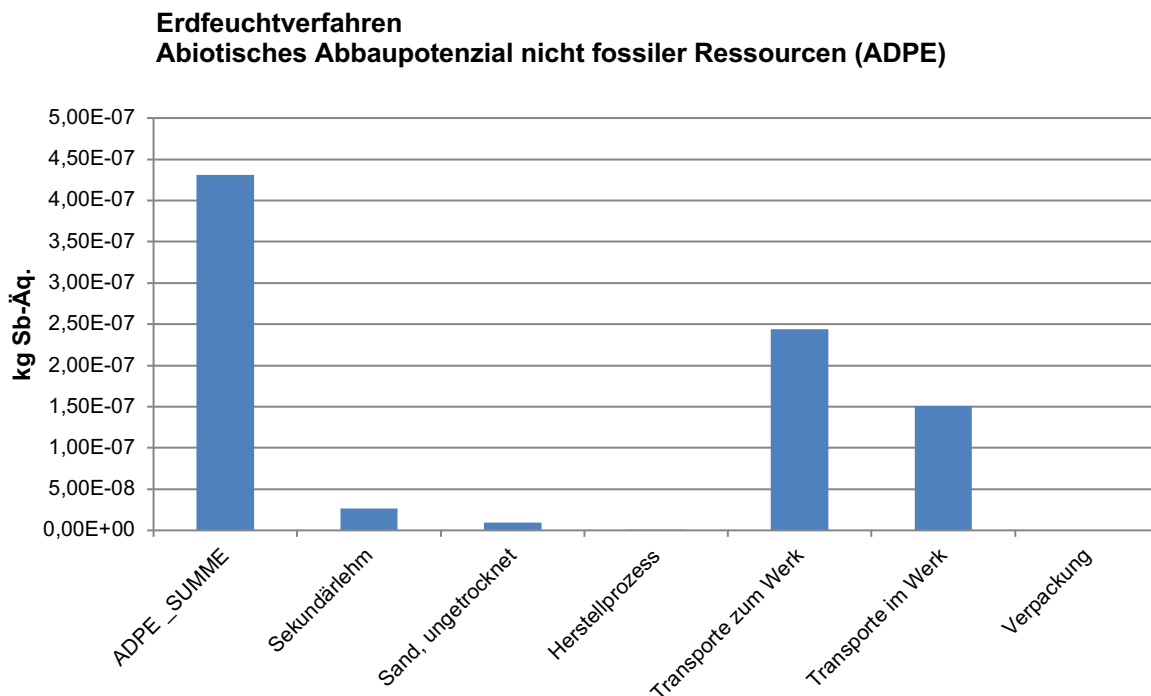


Abb. B.6: Erdfeuchtverfahren – Abbaupotenzial abiotischer, nicht fossiler Ressourcen ADPE

Der Nachtrochnungsprozess weist ein signifikant höheres Abbaupotenzial auf (*Abb. B.7*). Ursache dafür ist der indirekte Anteil nicht fossiler Ressourcen bei der Flüssiggasherstellung.

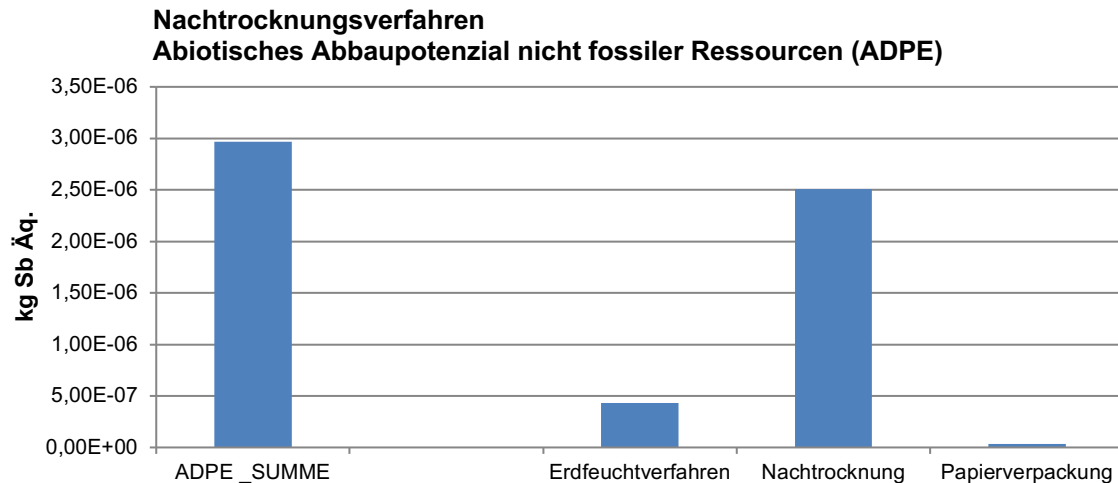


Abb. B.7: Nachtrocknungsprozess – Abbaupotenzial abiotischer, nicht fossiler Ressourcen ADPE

ADPF sind *fossile Energieträger*, deren Abbaupotenzial u. a. von Schätzungen über die verfügbaren Restvorkommen abhängt. Die Summe mit 0,135 MJ/kg LPM (Abb. B.8) entspricht in der Größenordnung in etwa dem Primärenergieeinsatz (0,149 MJ/kg, Abb. B.1). Wie schon bei anderen Kategorien festgestellt, entfällt der größte Teil mit 83 % auf Transporte (56 %) und Verpackungen (27 %). Dabei findet insbesondere die Stromerzeugung nach deutschem Energiemix mit höheren Anteilen von Braun- und Steinkohle Eingang in die Bilanz. Der Herstellungsprozess spielt mit 0,3 % keine Rolle. Bei den Abbaupotenzialen für Lehm (3,1 %) und Sand (11,9 %) sind Verbräuche durch Stromeinsatz der entscheidende Faktor. Schätzungen über Abbaureserven sind nicht bekannt.

Mit der Nachtrocknung erhöht sich das Abbaupotenzial ADPF auf 1,13E+00 MJ pro kg LPM verursacht durch den Energieeinsatz für die Trocknung mit 9,77E-01 MJ.

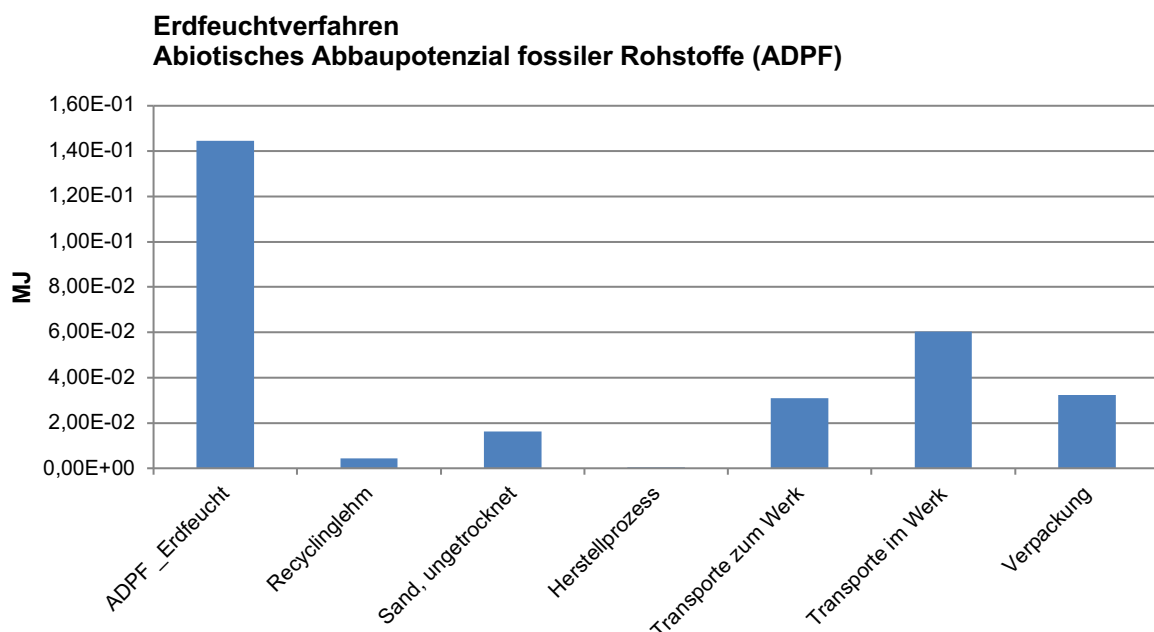


Abb. B.8: Erdfeuchtverfahren – Abbaupotenzial abiotischer, fossiler Brennstoffe (ADPF)

B.1.5 Versauerungspotenzial (AP)

Das Versauerungspotenzial für Böden und Wasser liegt mit insgesamt $1,7E-05$ kg SO₂ Äq. pro kg LPM deutlich unter dem entsprechenden natureplus-Wert nach *Tab. B.2* ($5E-03$ kg SO₂ Äq.). Die Hauptanteile entfallen auf Verpackung (49%) und den Sandgewinnungsprozess (44%) (*Abb. B.9*).

Durch die Nachtrocknung erdfeucht produzierter LPM erhöht sich des Versauerungspotenzial um $7,65E-05$ kg SO₂ Äq. durch den Einsatz von Flüssiggas.

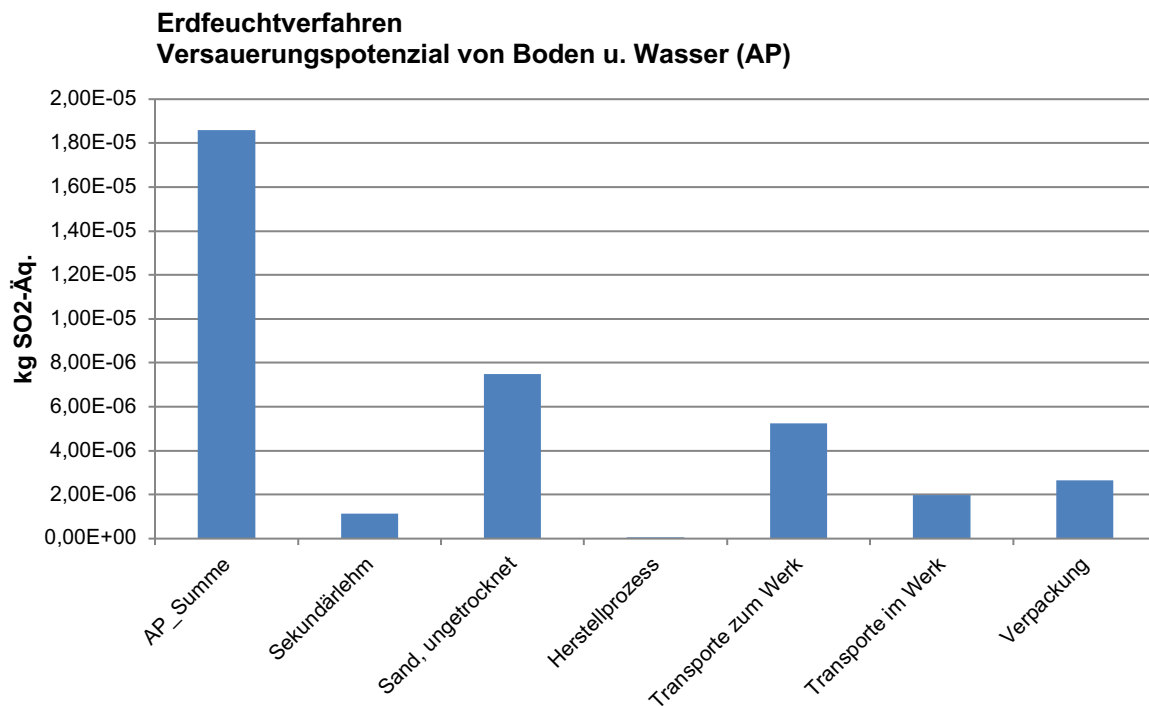


Abb. B.9: Erdfeuchtverfahren – Versauerungspotenzial von Wasser und Boden

B.1.6 Zusammenfassung Erdfeuchtverfahren und Nachtrocknung

Für die Herstellung von 1 m² Putzfläche nach Erdfeucht- und Nachtrocknungsverfahren und deren praxisüblichen Anwendung mit Putzdicken bis 10 mm werden die Richtwerte nach natureplus RL 0803 für LPM gemäß *Tab. B.1* signifikant unterschritten. Der relativ geringe Energiegehalt im erdfeucht produzierten Vorprodukt kompensiert einen Teil des höheren Energieinputs für die Nachtrocknung und begrenzt das durch das gasbetriebene Trocknungsverfahren verursachte GWP. Eine Umstellung auf andere Energieträger als Flüssiggas oder andere Trocknungstechniken können zu einer signifikanten Verbesserung der Ökobilanz des Nachtrocknungsverfahrens beitragen.

B.2 Vortrocknungsverfahren

B.2.1 Ressourceneinsatz

Der Gesamtenergieeinsatz (PET) für LPM, die im Vortrocknungsverfahren hergestellt wurden, beläuft sich auf 1,07 MJ/kg und liegt damit deutlich höher als im Erdfeuchtverfahren (0,15 MJ/kg). Ökostrom hat einen Anteil von knapp 20 % für die Produktion und Fahrzeuge im Werk. Der Ökostrom stammt aus Flusswasserkraftwerken und ist entsprechend bilanziert worden (Datenquelle: ecoinvent 3.2). Gut

88 % des PET entfallen auf die graue Energie für die aufbereiteten trockenen Rohstoffe Lehmpulver und Sand. Für die Bewertung des Pflanzenanteils wurde die UPD Baustroh herangezogen. Darin sind 12,5 % des PET enthalten. Der Rest entfällt auf Diesel für Transporte und Verpackungen (*Abb. B.10*).

Für durchschnittlich 10 mm Putzdicke werden 10 kg LPM (trocken) verbraucht. Bei 1,07 MJ/kg ergibt das einen PET-Wert von 10,7 MJ pro m²/cm. Das liegt immer noch signifikant unter dem empfohlenen PET-Richtwert von natureplus (25 MJ/kg). Auch der Anteil der nicht erneuerbaren Energie (PENRE) bleibt mit 8,6 MJ pro m²/cm deutlich unter dem in *Tab. B.1* angegebenen natureplus-Richtwert.

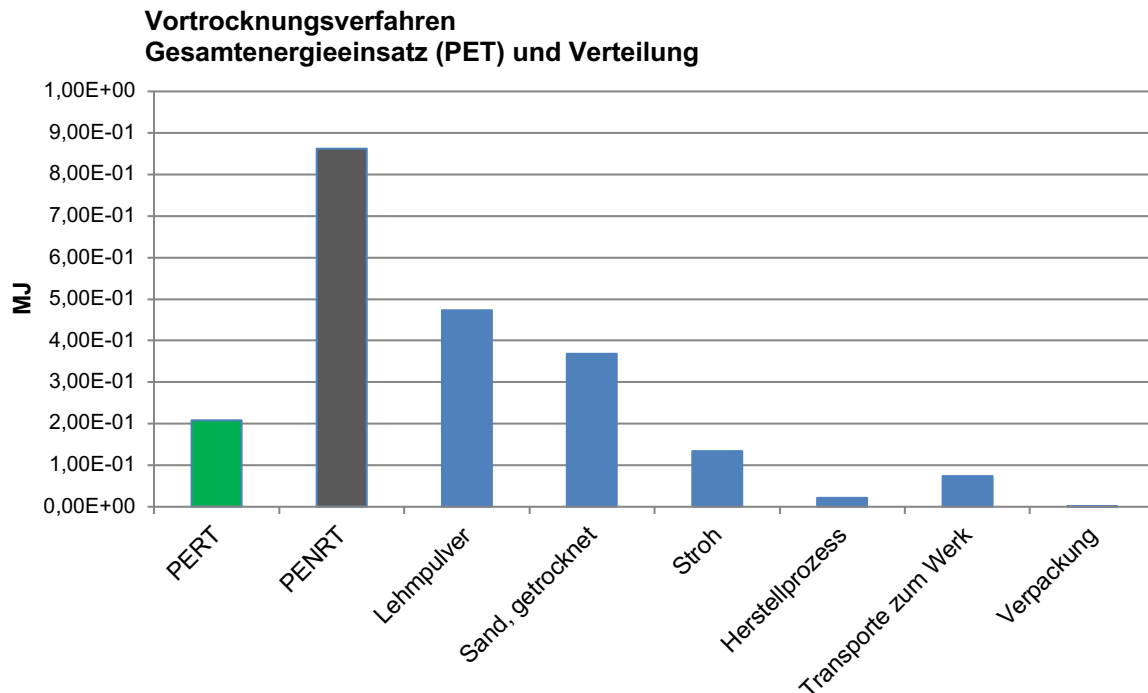


Abb. B.10: Vortrocknungsverfahren – Gesamtenergieeinsatz (PET) und Verteilung

B.2.2 Beitrag zur globalen Klimaerwärmung

Im Vortrocknungsverfahren hergestellte LPM tragen mit knapp 0,12 kg CO₂ Äq. zur Klimaerwärmung bei (*Abb. B.11*). Dieser Wert liegt deutlich unter dem GWP-Richtwert nach natureplus von 1,3 kg CO₂ Äq. (*Tab. B.1*) Der Anteil des Vorproduktes Lehmpulver ragt mit über 91 % des Gesamtwertes GWP deutlich hervor. Enthaltene Gutschriften aus der UPD Baustroh und für die Papierverpackung kompensieren einen Teil des GWP (-1,64E-02). Insbesondere der Strohannteil mit nur 1,1 M.-% hat in dieser Wirkungskategorie einen signifikanten Einfluss (-1,40E-02).

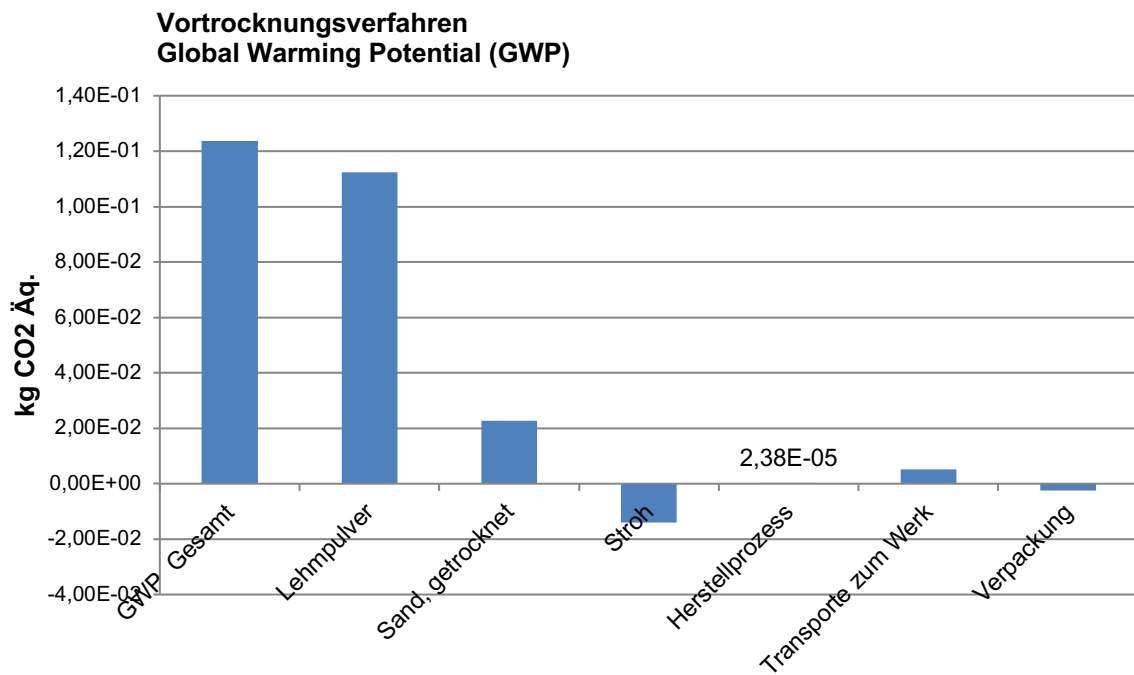


Abb. B.11: Vortrocknungsverfahren – Beitrag zur globalen Klimaerwärmung GWP

B.2.3 Bildungspotenzial des troposphärischen Ozons (POCP)

Der POCP-Wert beschreibt das Bildungspotenzial von bodennahem Ozon (Sommersmog). Der mit 1,64E-05 kg Ethen Äq. ermittelte POCP-Wert (Abb. B.12) liegt wesentlich unter dem natureplus-Richtwert von 0,0006 kg Ethen Äq. (Tab. B.1). Ursächlich dafür sind in erster Linie die Vorprodukte und Transporte.

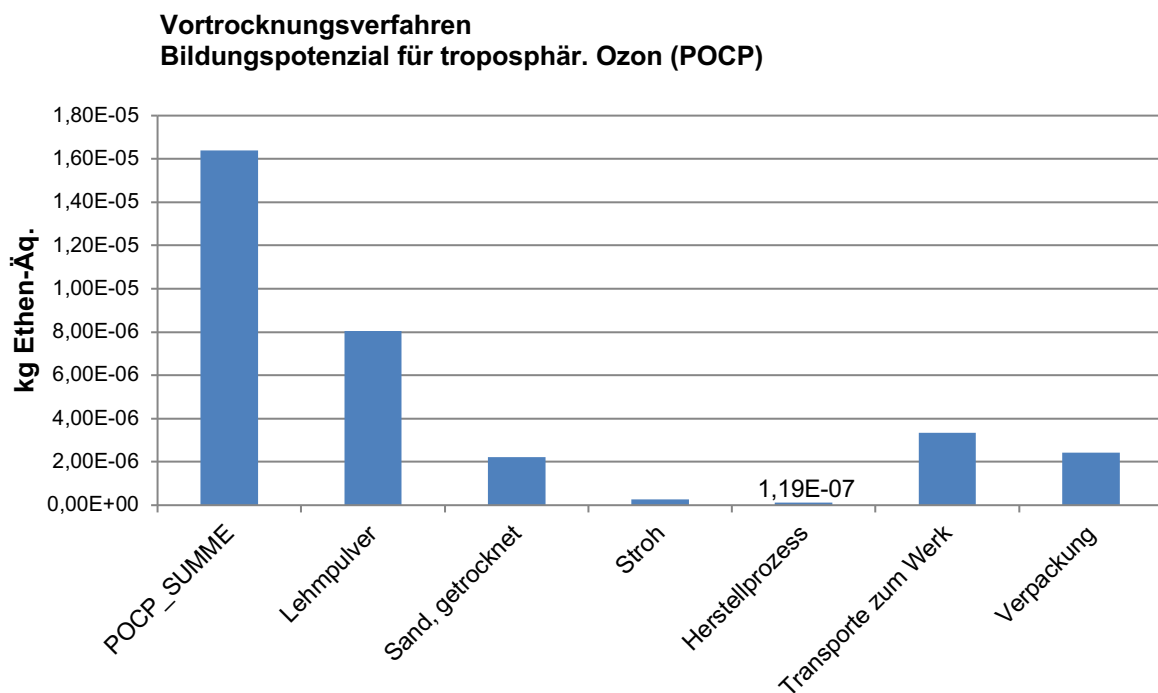


Abb. B.12: Vortrocknungsverfahren: Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon POCP

B.2.4 Abiotisches Abbaupotenzial ADPE und ADPF

Das Abbaupotenzial nicht fossiler Ressourcen (ADPE) bezieht sich hier auf die Bewertung von mineralischen Rohstoffen (Sand, Kies, Lehm, Steine), die für die Aufbereitung von Lehmputz und Sand benötigt werden und die mit über 90% in die Bilanz eingehen (*Abb. B.13*). Der Summenwert $9,00E-06$ kg Sb Äq. liegt deutlich über dem natureplus-Richtwert von $1,1E-06$ kg Sb Äq. (*Tab. B.1*).

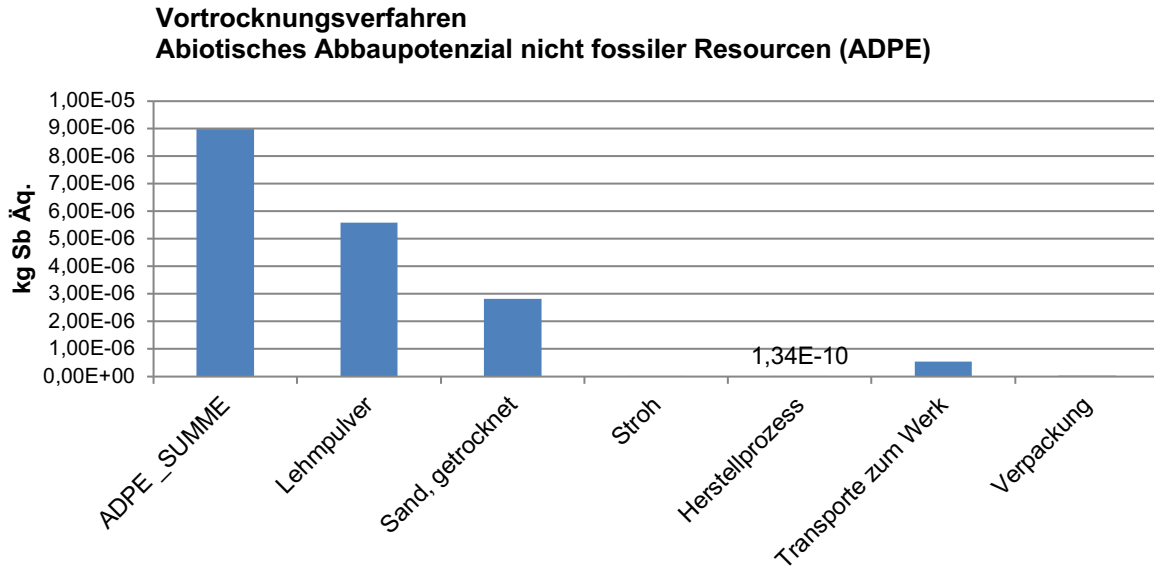


Abb. B.13: Vortrocknungsverfahren – Abbaupotenzial abiotischer nichtfossiler Ressourcen ADPE

ADPF sind fossile Brennstoffe, deren Abbaupotenzial u. a. von Schätzungen über die verfügbaren Restvorkommen abhängt. Der ADPF-Summenwert mit $0,884$ MJ/kg LPM (*Abb. B.14*) entspricht in der Größenordnung in etwa dem Gesamtenergieeinsatz ($1,07$ MJ/kg, *Abb. B.10*). Wie schon bei anderen Kategorien festgestellt, entfällt der größte Teil mit 78 % auf die Vorprodukte. Dabei findet insbesondere die Stromerzeugung nach deutschem Energiemix mit höheren Anteilen von Braun- und Steinkohle Eingang in die Bilanz. Der Herstellungsprozess spielt mit 0,03 % keine Rolle.

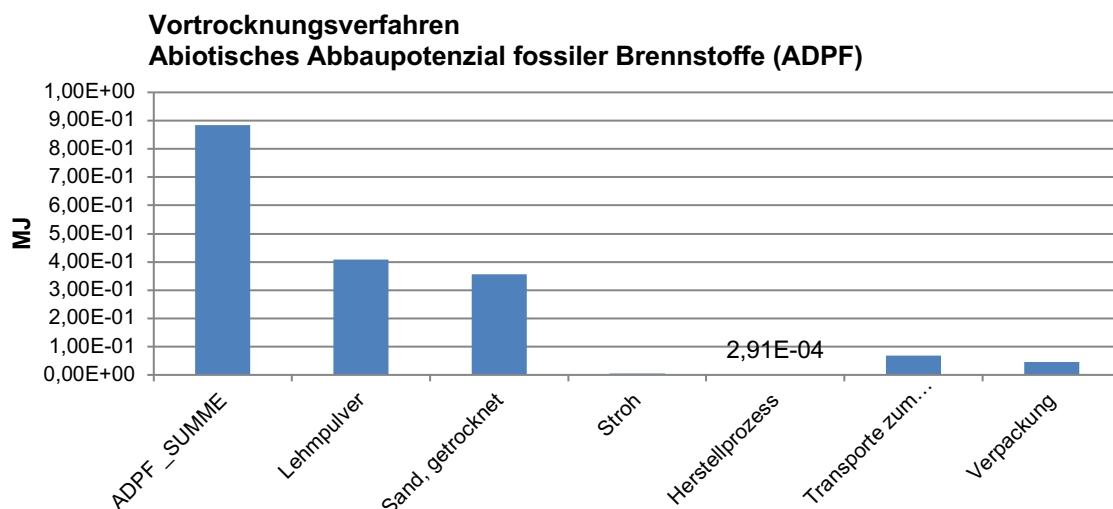


Abb. B.14: Vortrocknungsverfahren – Abbaupotenzial abiotischer fossiler Energieträger ADPF

B.2.5 Versauerungspotenzial AP

Das Versauerungspotenzial für Böden und Wasser beträgt insgesamt 0,00018 kg SO₂ Äq. pro kg LPM (Abb. B.15). Lehmpulver (66%) Transporte und Verpackung (je 11%) sind die Hauptverursacher. Der AP-Wert liegt damit deutlich unter dem natureplus-Richtwert von 0,005 kg SO₂ Äq. (Tab. B.1).

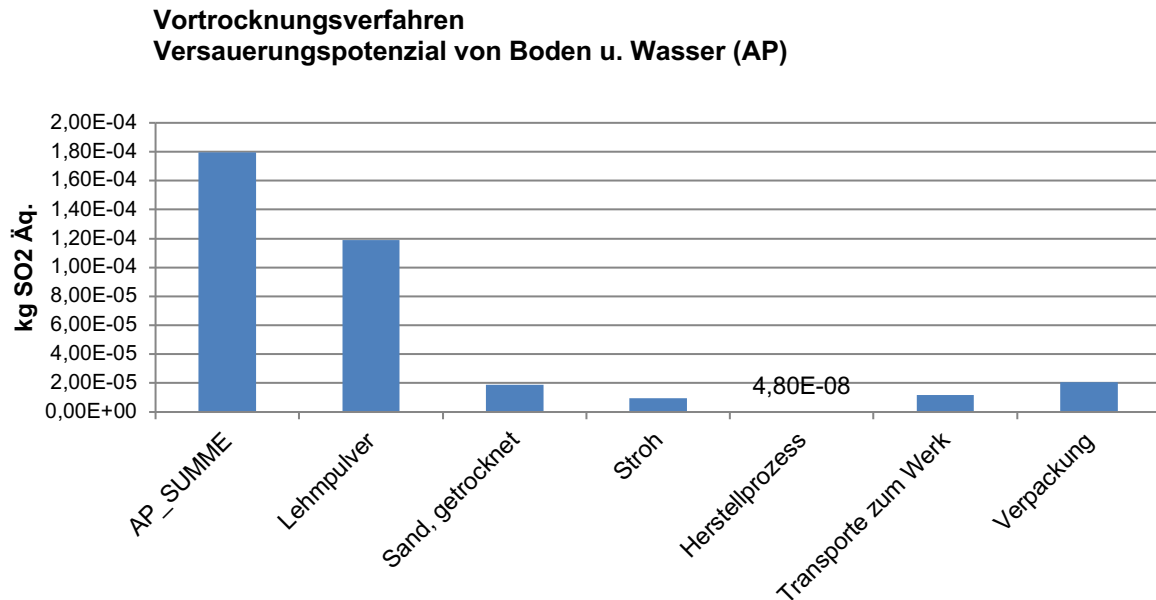


Abb. B.15: Versauerungspotenzial von Boden und Wasser AP

B.2.6 Zusammenfassung: Vortrocknungsverfahren

Für die Herstellung von 1 m² Putzfläche und deren praxisüblichen Anwendung mit Putzdicken bis 10 mm werden die Richtwerte nach natureplus RL 0803 für LPM in Tab. B.1 mit Ausnahme des ADPE-Wertes signifikant unterschritten. Die generischen Werte für das enthaltene Lehmpulver aus der ÖKOBAUDAT sind ursächlich für den Energiegehalt des Endproduktes und die damit verbundenen Umweltwirkungen, insbesondere das GWP. Die Datengrundlage ist unzureichend belegt und Bedarf der Überarbeitung, was jedoch nicht Gegenstand dieser Bilanzierung ist. Effizientere oder regenerative Verfahren zur Herstellung des Lehmputzes könnten zu einer erheblichen Verbesserung der Ökobilanz dieses Trocknungsverfahrens beitragen.

B.3 Passive Solartrocknung (Treibhaustrocknung)

B.3.1 Primärenergiebedarf

Der Gesamtenergieeinsatz (PET) für LPM, die mit passiver Solarnutzung und natürlicher Ventilation getrocknet wurden, beläuft sich auf 0,226 MJ/kg und ist damit deutlich niedriger als bei den anderen beteiligten Trocknungsverfahren (Übersicht Tab. A.1). Indirekte und direkte Ökostromanteile haben einen Anteil von knapp 40 %. Darin enthalten ist ein Anteil von 29,5 % insbesondere für indirekt enthaltene erneuerbare PE zur stofflichen Nutzung (PERM). Der Herstellungsprozess macht 27 %, die Transporte rund 20 %, und die Sandaufbereitung im Vorprozess schlagen 17 % vom PEI aus.

Für durchschnittlich 10 mm Putzdicke werden 10 kg LPM (solargetrocknet) verbraucht. Bei 0,226 MJ/kg ergibt das einen PET-Wert von 2,3 MJ pro m²/cm (Abb. B.16). Das liegt signifikant unter dem natureplus-Richtwert von 25 MJ (Tab. B.1). Auch der Anteil nicht erneuerbarer PET bleibt mit 1,35 MJ pro m²/cm deutlich unter dem entsprechenden natureplus-Richtwert von 21 MJ pro m²/cm.

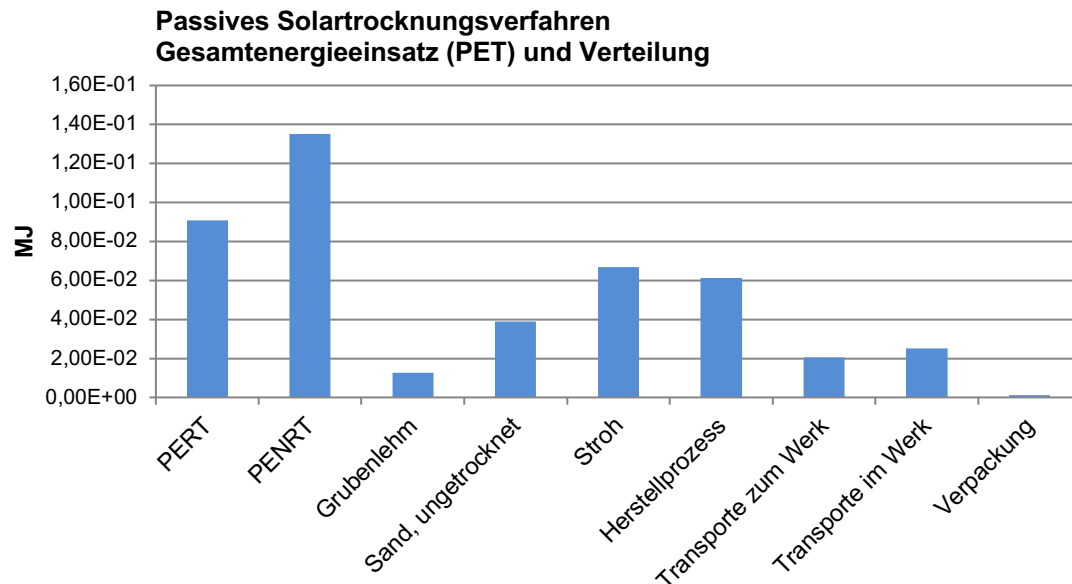


Abb. B.16: Passive Solartrocknung – Gesamtenergieeinsatz und Verteilung

B.3.2 Beitrag zur globalen Klimaerwärmung GWP

Mit passiver solarer Trocknung hergestellte LPM erhalten eine rechnerische Gutschrift mit einem GWP-Abbau von $-1,78E-03$ kg CO₂ Äq. (Abb. B.17). Die Ursachen sind in den Bilanzen der Vorprodukte Stroh ($-6,36E-03$ kg CO₂ Äq.) und Papierverpackung ($-2,45E-03$ kg CO₂ Äq.) zu finden (UPD Baustroh und ecoinvent 3.2). Dagegen stehen der Herstellungsprozess, Sand und Transporte mit zusammen $7,03E-03$ kg CO₂ Äq.

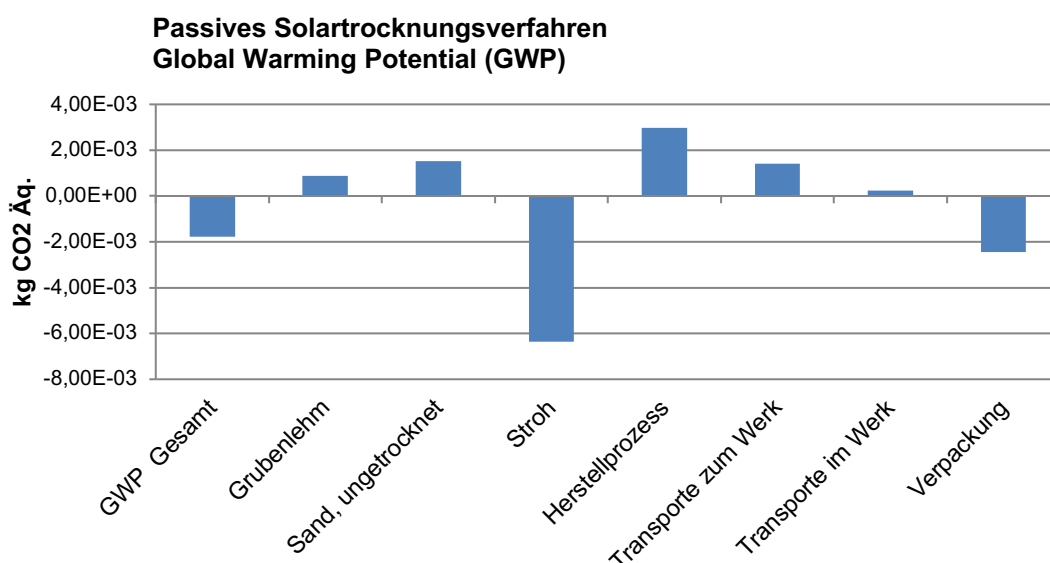


Abb. B.17: Passives Solartrocknungsverfahren – Beitrag zur globalen Klimaerwärmung GWP

B.3.3 Abbaupotenzial des troposphärischen Ozons POCP

Der mit $6,72\text{E-}06$ kg Ethen Äq. ermittelte POCP-Wert in *Abb. B.18* liegt wesentlich unter dem natureplus-Richtwert von $6\text{E-}04$ kg Ethen Äq. (*Tab. B.1*). Davon entfallen 36% auf die Verpackung.

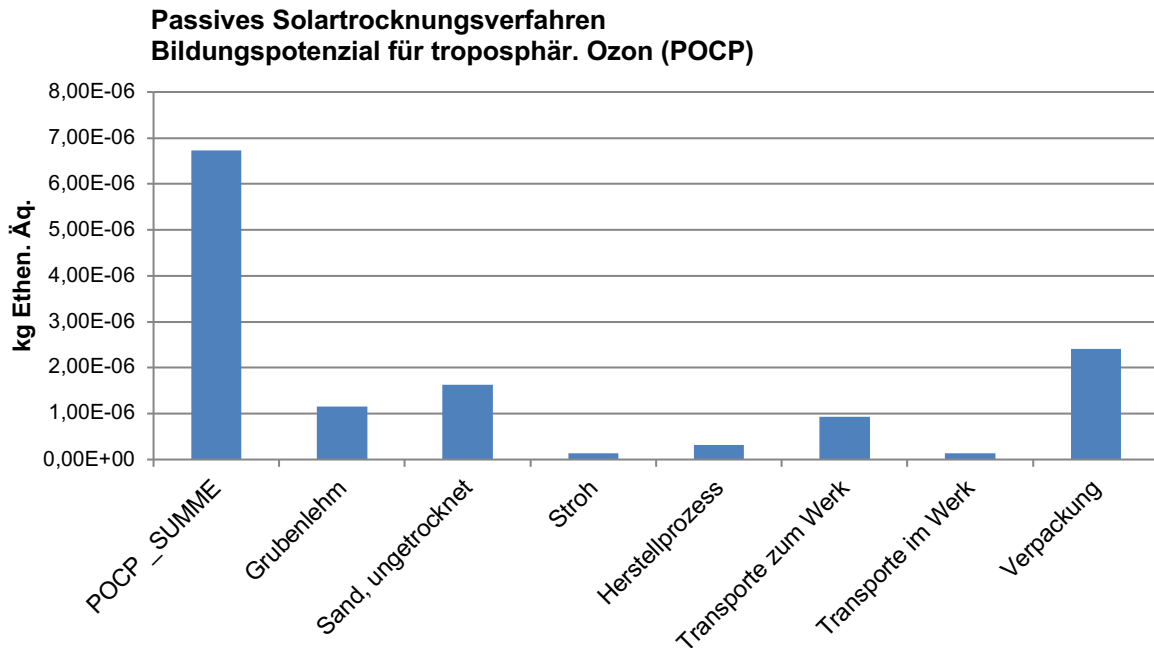


Abb. B.18: Passives Solartrocknungsverfahren – Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon POCP

B.3.4 Abiotisches Abbaupotenzial ADPE und ADPF

Das Abbaupotential nicht fossiler Ressourcen (ADPE) bezieht sich vor allem auf die Bewertung von mineralischen Rohstoffen (Sand, Kies, Lehm, Steine), die für die Aufbereitung von Lehm und Sand benötigt werden, und bei diesem Verfahren hauptsächlich auf den Herstellprozess selbst.

Der implizite Ressourcenverbrauch im eingesetzten deutschen Strommix (2015) und im Dieserverbrauch belasten mit 85 % die Summe des ADPE. Die passive Solartrocknung wird mit Null bewertet, da sie Teil der Infrastruktur (Gewächshaus) ist und keine zusätzlichen Ressourcen verbraucht, die nicht anderweitig erfasst sind (z. B. Transporte im Werk, Strom).

Der Summenwert $2,19\text{E-}06$ kg Sb Äq. (*Abb. B.19*) liegt unter dem natureplus-Richtwert von $1,10\text{E-}05$ kg Sb Äq. (*Tab. B.1*).

**Passives Solartrocknungsverfahren
Abiotisches Abbaupotenzial nicht fossiler Ressourcen (ADPE)**

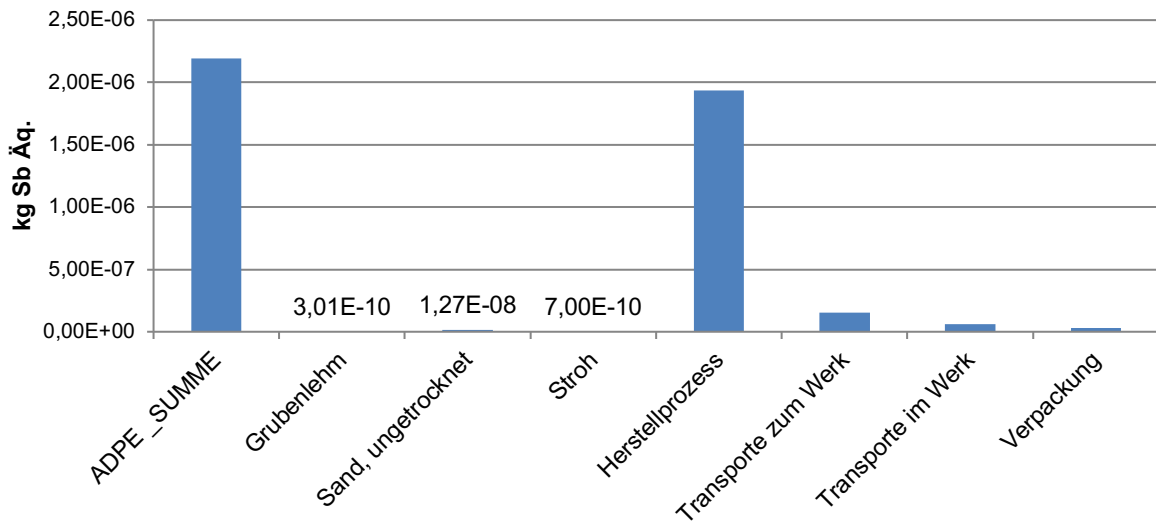


Abb. B.19: Passives Solartrocknungsverfahren – Abbaupotenzial abiotischer nicht fossiler Ressourcen ADPE

Der ADPF-Summenwert beträgt 0,156 MJ/kg LPM (Abb. B.20). Hauptursachen sind die Verpackung (15%), die Transporte insgesamt (15%) sowie der Strommix im Herstellungsprozess (10%).

**Passives Solartrocknungsverfahren
Abiotisches Abbaupotenzial fossiler Brennstoffe (ADPF)**

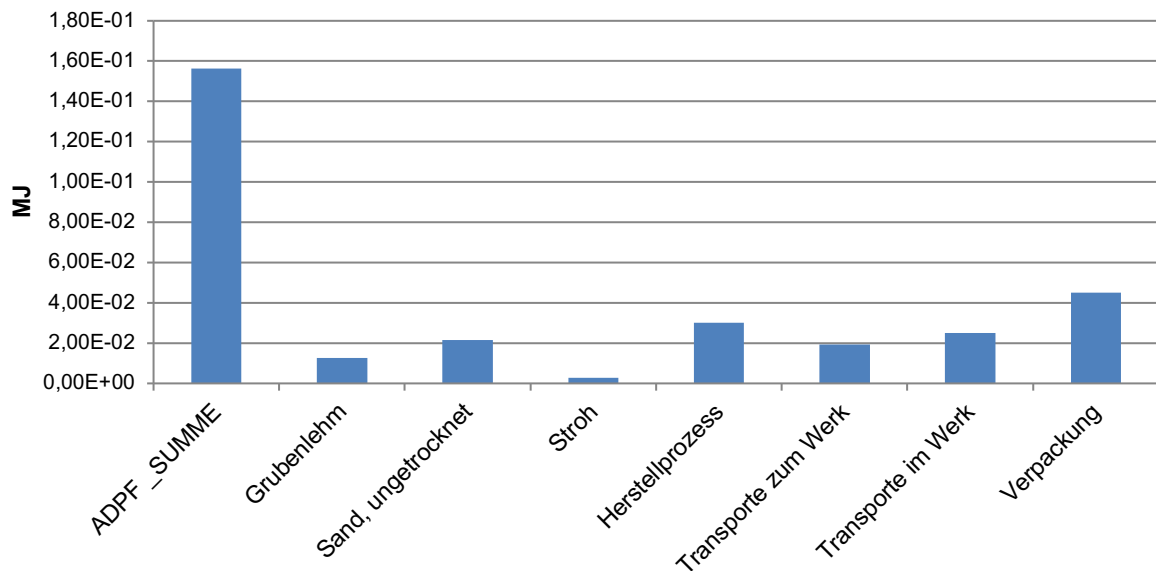


Abb. B.20: Passives Solartrocknungsverfahren – Abbaupotenzial abiotischer fossiler Ressourcen ADPF

B.3.5 Versauerungspotenzial AP

Das Versauerungspotenzial für Böden und Wasser in diesem solar gestützten Verfahren beträgt insgesamt 0,0000508 kg SO₂ Äq. pro kg LPM (*Abb. B.21*). Hauptverursacher sind die Verpackung mit 41 % und die Rohstoffe mit zusammen 42 %. Davon entfallen auf den mit nur 0,5 % geringen Strohteil fast 10%. Der AP-Wert liegt damit deutlich unter dem natureplus-Richtwert von 0,005 kg SO₂ Äq. (*Tab. B.1*).

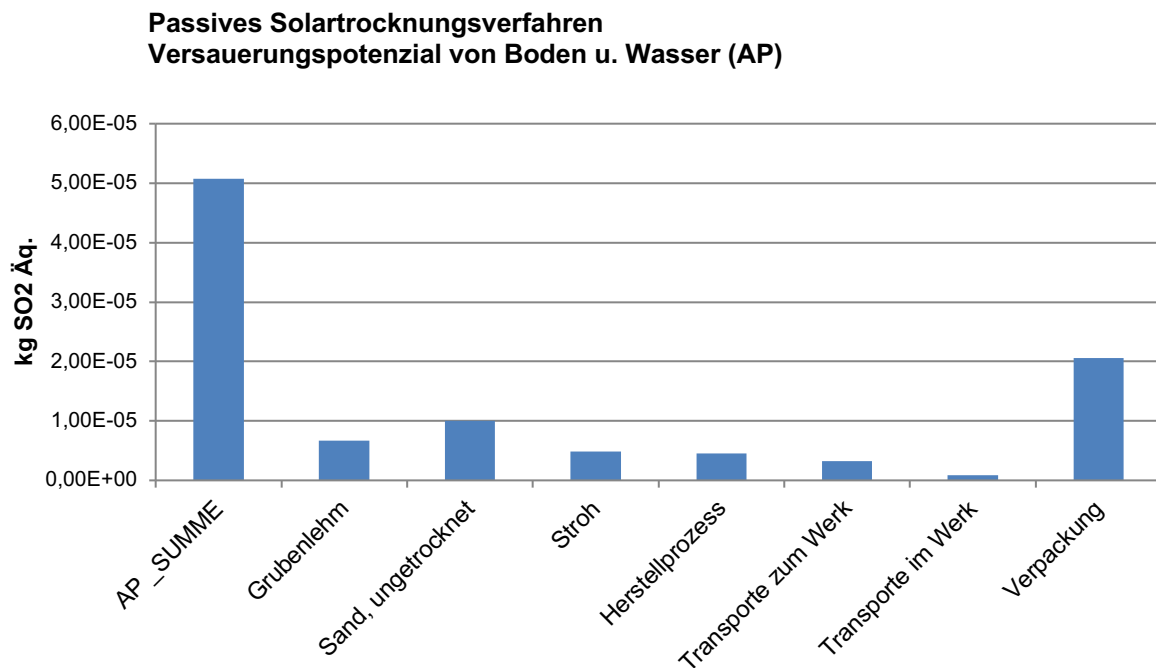


Abb. B.21: Passives Solartrocknungsverfahren – Versauerungspotenzial von Boden und Wasser AP

B.3.6 Zusammenfassung: Passives Solartrocknungsverfahren

Für die Herstellung von 1m² Putzfläche und deren praxisüblichen Anwendung mit Putzdicken bis 10mm werden die Richtwerte nach natureplus RL 0803 für LPM in *Tab. B.1* unterschritten. Die passive Solarnutzung nach dem Gewächshausprinzip in Verbindung mit einem temperatur- und feuchtegesteuerten Wenderoboter für erdfeuchte Ausgangsstoffe hat innovativen Charakter. Dieser Verfahrensansatz ermutigt dazu, regenerative Techniken zur Trocknung weiter zu entwickeln und einzusetzen.

ZITIERTE STANDARDS / LITERATURHINWEISE

- Lehmbau Regeln (LR DVL) Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): Lehmbau Regeln – Begriffe, Baustoffe, Bauteile. Wiesbaden: Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage, 3., überarbeitete Aufl., 2009
- DVL Lehmbau-Verbraucherinfo Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): Lehmbau-Verbraucherinformation. Eigenverlag DVL, Weimar, 2., überarbeitete Aufl. 2014
- DIN 4102 DIN 4102-1:1998-05, *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*
DIN 4102-4:2016-05, *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe und Bauteile und Sonderbauteile*
- DIN 18300 DIN 18300:2012-09, *VOB/C (ATV) – Erdarbeiten*
- DIN 18550 DIN 18550-2:2015-06, *Planung, Zubereitung u. Ausführung von Innen- u. Außenputzen – Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2 für Innenputze in Verbindung mit DIN EN 13914-2:2016-09 für Lehmputzmörtel*
- DIN 18942-1 DIN 18942-1: 2018-12, *Lehmabstoffe – Teil 1: Begriffe*
- DIN 18942-100 DIN 18942-100:2018-12, *Lehmabstoffe – Konformitätsnachweis*
- DIN 18945 DIN 18945:2018-12, *Lehmsteine – Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren*
- DIN 18947 DIN 18947:2018-12, *Lehmputzmörtel – Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren*
- DIN EN 12620 DIN EN 12620:2008-07, *Gesteinskörnungen für Beton*
- DIN EN 12664 DIN EN 12664:2001-05, *Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen u. Bauprodukten; Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät u. dem Wärmestrommessplatten-Gerät; Trockene u. feuchte Produkte mit mittlerem u. niedrigem Wärmedurchlasswiderstand*
- DIN EN 12878 DIN EN 12878:2014-07, *Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen – Anforderungen und Prüfverfahren*
- DIN EN 13055 DIN EN 13055: 2016-11, *Leichte Gesteinskörnungen*
- DIN EN 13139 DIN EN 13139 (E):2015-07, *Gesteinskörnungen für Mörtel*
- DIN EN 13501 DIN EN 13501-1:2010-01, *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*
DIN EN 13501-2:2016-12, *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*
- DIN EN 15804 DIN EN 15804:2014-07, *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*

DIN EN ISO 14025	DIN EN ISO 14025:2011-10, <i>Umweltkennzeichnungen u. -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen; Grundsätze u. Verfahren</i>
DIN EN ISO 14040	DIN EN ISO 14040:2009-11, <i>Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen</i>
DIN EN ISO 14044	DIN EN ISO 14044:2018, <i>Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen</i>
CEN ISO /TS 14071	CEN ISO /TS 14071:2014, <i>Umweltmanagement – Ökobilanz – Prozesse der Kritischen Prüfung und Kompetenzen der Prüfer: Zusätzliche Anforderungen und Anleitungen zu ISO 14044:2006</i>
DVL e. V. (Hrsg.)	Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Allgemeine Hinweise für die Erstellung von Ökobilanzen und Projektberichten (Teil 2), Ausgabe März 2018
PCR Werkmörtel	Regeln für Umwelt-Produktdeklaration – Mineralische Werkmörtel – Institut Bauen und Umwelt e. V., Version Juli 2006
UPD Werkmörtel	Deutsches Institut f. Bauen u. Umwelt e. V. (DIBU) (Hrsg.): DIBU Muster-Umweltproduktdeklaration für Mineralische Werkmörtel / Putzmörtel nach DIN EN ISO 14025. Duisburg, 2008 DIBU-IWM-20408-D
UPD Baustroh	Fachverband Strohballenbau Deutschland e. V. (FASBA) (Hrsg.): Umweltproduktdeklaration UPD für Baustroh nach DIN EN ISO 14025 u. DIN EN 15804. Wien, 2014 EPD-FASBA-2014-1-ECOINVENT
VDI 2243	VDI 2243:2002-07: Recyclingorientierte Produktentwicklung
Deponierichtlinie EU	Entscheidung des Rates zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gem. Art. 16 u. Anhang II der Richtlinie 1999/31/EG v. 19.12.2002 (Amtsbl. EG 16.01.2003 L11/27)
Deponieverordnung	Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) v. 27.04.2009 (BGBl. I, S.900), zuletzt geändert 04.03.2016 (BGBl. I, S.382)
Abfallverzeichnis-Verordnung:	Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung AVV) v. 10.12.2001 (BGBl. I, S. 3379), zuletzt geändert 22.12.2016 (BGBl. I, S. 3103)
Abfallwirtschaftsgesetz	Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002) (BGBl. I, Nr. 102/2002, Fassung v. 20.03.2017)
Natureplus RL 0803	natureplus e. V., Vergaberichtlinie 0803 zur Vergabe des Qualitätszeichens, Lehmputzmörtel, Ausgabe Juni 2015, Neckargemünd 2015
Natureplus RL 5003	natureplus e. V., Vergaberichtlinie 5003 zur Vergabe des Qualitätszeichens, Naturschutz beim Abbau mineralischer Rohstoffe, Ausgabe April 2015, Neckargemünd 2015
TM 01 DVL	Anforderungen an Lehmputz als Bauteil. Technische Merkblätter Lehm, TM 01:2014-06, Weimar: Dachverband Lehm e. V., 2. Aufl.

TM 05 DVL	Qualitätsüberwachung von Baulehm als Ausgangsstoff für industriell hergestellte Lehmbaumstoffe – Richtlinie. Technische Merkblätter Lehmbau, TM 05:2011-06, Weimar: Dachverband Lehm e. V.
TA Luft	Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft – v. 24.07.2002 (GMBI. S.511), BM f. Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2002
UBA 2013	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: Umweltbundesamt 2013
ÖKOBAUDAT	Bundesinstitut f. Bau-, Stadt- u. Raumforschung (BBSR) (Hrsg.): ÖKOBAUDAT – Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung. SR Zukunft Bauen Forschung für die Praxis Band 09, Bonn 2017
Bau-EPD (Hrsg.):	Nutzungsdauerkatalog der Bau-EPD für die Erstellung von UPDs. Wien: Bau-EPD GmbH, 2014
ECO-SEE BRE	Building Research Establishment Ltd. BRE (Ed.): Life Cycle Assessment (LCA) study of CLAYTEC M1 and M3 clay plasters as part of the project “Eco-innovative, Safe and Energy Efficient (ECO-SEE) wall panels and materials for a healthier indoor environment”, January 2017 Author: Dr. Fei Zhang, Senior Consultant, Centre for Sustainable Products, BRE Ltd. Approver: Dr. Owen Abbe, Associate Director, Centre for Sustainable Products, BRE Ltd.
Ecoinvent 3.2	https://www.ecoinvent.org
Schroeder, 2018	Schroeder, H.: Lehmbau – Mit Lehm ökologisch planen und bauen. Springer Vieweg: Wiesbaden 2019, 3. Aufl.
Ziegert, 2014	Natürliche Radioaktivität von Lehmbaumstoffen – Ergebnisse neuer Untersuchungen und Qualitätssicherung; in: Wohnung + Gesundheit” Nr. 151/2014; IBN – Institut für Baubiologie + Ökologie, Neubeuern.
Küppers, 2015	Hosser, D.; Zehfuß, J. Neue Forschungsergebnisse zum Brandschutz für mehrgeschossige Strohhallenbauten. In: vfdb Zeitschrift 1/2015.
Liblik, 2018	Küppers, J.; Just, A.; Zehfuß, J.; Ziegert, C.: Fire safety of historic timber buildings with traditional plasters in Europe; 3rd World Conference on Timber Engineering, Seoul 2018.
