

Dachverband Lehm e.V.
Fachhochschule Potsdam
Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe

Erarbeitung von Datengrundlagen und Muster-Umweltproduktdeklarationen für Lehmmauermörtel, Lehmsteine und Lehmplatten unter besonderer Berücksichtigung der Möglichkeiten des Recyclings

Abschlussbericht zum Kooperationsvorhaben, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter Az.: 35658/01

Manfred Lemke, Klaus Pistol, Horst Schroeder, Jens-Uwe Schulz

unter Mitarbeit von
Joschua George, Basel Dawod, Maximilian Rentz, Juan Hernandez Leal,
Stephan Jörchel

Weimar, 30.11.2022

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	35658/01	Referat	25	Fördersumme	78.184,00
Antragstitel		Erarbeitung von Datengrundlagen und Muster-Umweltproduktdeklarationen für Lehmmauermörtel, Lehmsteine und Lehmplatten unter besonderer Berücksichtigung der Möglichkeiten des Recyclings			
Stichworte		Lehmprodukte, Muster-Umweltproduktdeklarationen, Recyclingkonzepte			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
29	01.04.2020	31.08.2022			
Zwischenberichte	3				
Bewilligungsempfänger	Dachverband Lehm e.V.			Tel	03643 778349
	Friedrich-Naumann-Str. 16			Fax	
	99423 Weimar			Projektleitung	
				Dr. Horst Schroeder	
Kooperationspartner	Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe (TH OWL)				
	Prof. Jens-Uwe Schulz; Maximilian Rentz (B.A.); Juan Camilo Hernandez Leal (B.sc)				
	Fachhochschule Potsdam (FH P)				
	Prof. Dr. Klaus Pistol; Joshua George; Basel Dawod				

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Das Projekt knüpft an die Ergebnisse des vorangegangenen, ebenfalls von der DBU 2016 – 2018 geförderten Projektes (Az.: 32985) zum Aufbau von Strukturen und Regelwerken zur Erstellung und Verifizierung von Umweltproduktdeklarationen (UPD) für Lehmbaumaterialien an. Es wurden die Datengrundlagen für Muster-UPD nach der aktualisierten DIN EN 15804: 2002-03 für weitere Produktkategorien auf Basis des zuvor entwickelten Regelwerkes gemäß DIN EN ISO 14025 erarbeitet, und zwar für Lehmmauermörtel (LMM), Lehmsteine (LS) und Lehmplatten (LP).

Mit der verpflichtenden Berücksichtigung der Module C (Entsorgung) und D (Gutschriften) im allgemeinen Schema der Ökobilanz nach DIN EN 15804:2022-03 erhalten die Rückgewinnungspotenziale einen größeren Stellenwert als bisher. In Kooperation mit der FHP wurden Modelle zur Quantifizierung der Rückgewinnungspotenziale der drei Lehmbaumaterialien LMM, LS und LP entwickelt und verifiziert. Dieser Projektabschnitt umfasste Untersuchungen zu Baustoff- bzw. Bauteileigenschaften, Rückgewinnungstechniken und Wiederverwendungs- bzw. Wiederverwertungsmöglichkeiten. Die Analyse zu generischen Ökobilanzdaten für Lehmbaumaterialien im Rahmen des Vorgängerprojektes zeigte deutliche Defizite in der Abbildgenauigkeit der entsprechenden Daten in öffentlich zugänglichen Datenbanken auf, insbesondere in der Datenbank ÖKOBAUDAT des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). In Kooperation mit der TH OWL sollten Wissenslücken und Defizite durch Übertragung der Projektergebnisse in das Format der ÖKOBAUDAT abgebaut werden.

Kern der Projektarbeit war die systematische Erarbeitung von Datengrundlagen für die Entwicklung von Muster-UPD für das gesamte Spektrum der DIN-basierten Lehmbaumaterialien unter Einbeziehung neuer Daten zum Rückgewinnungspotenzial der Lehmbaumaterialien. Die Daten beziehen sich auf die verschiedenen, bekannten Verfahrenstechniken für die Herstellung von LMM, LS und LP.

Ein erstes Ziel der Analyse war die Erstellung einer Typ III UPD nach DIN EN ISO 14025 als Umweltinformation für die Planung und Ausführung von Bauteilen / Konstruktionen mit Lehmprodukten. Ein weiteres Ziel bezog sich auf die Optimierung von Produktionsprozessen und Verfahrenstechniken durch das Aufzeigen ökologischer Schwachstellen, durch deren Beseitigung Umweltbelastungen reduziert werden konnten. Ein drittes Ziel war die Beantwortung der Frage, ob sich aus Gebäudeabbruch oder Demontage rückgewonnene Lehmbaumaterialien mit „ökologischem Gewinn“ wiederverwenden bzw. wiederverwerten lassen.

In Kooperation mit der Fachhochschule Potsdam wurden Versuche zum Rückbau und zur Wiederverwendung / Weiterverwertung von Lehmbauprodukten durchgeführt und Rückgewinnungsverfahren experimentell erprobt. Damit bilanzierte Lehmbauprodukte stärkere Berücksichtigung bei Gebäudeplanungen für nachhaltige Neubauten und Sanierungen finden können, werden die Ergebnisse der Muster-UPD in Kooperation mit der TH Ostwestfalen-Lippe in einschlägige Datenbankformate transferiert.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Projektverlauf entstand eine Arbeitsteilung zwischen den Kooperationspartnern, die sich auf drei Schwerpunktthemen erstreckte:

- 1) Erstellen der Muster-UPD nach systematischer Auswertung von Produktdatenblätter und Herstellerbefragung unter Einbeziehung generischer Hintergrunddaten.
- 2) Experimente und Baustoffprüfungen zur Rückgewinnung der drei untersuchten Lehmproduktkategorien (FH Potsdam).
- 3) Verifizierung der Muster-UPD und Übertragung der Bilanzergebnisse in Datenbankformate (TH Ostwestfalen-Lippe).

Die Bewertung der End-of-Life Phase von Lehmbaustoffen erforderte die Entwicklung methodischer Ansätze für die Schaffung von Grundlagen für zukünftige UPD nach DIN EN 15804:2022-03. Für das Informationsmodul A1 „Rohstoffbereitstellung“ wurde der Begriff Baulehm unter Einbeziehung von Rückgewinnungspotenzialen in vier Kategorien klassifiziert:

Grubenlehm ist erdfeucht dem geologisch „gewachsenen“ Boden entnommener natürlicher Primärrohstoff [mit unterschiedlicher granulometrischer und schwankender mineralogischer Zusammensetzung (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaCO_3).

Primärgrubenlehm wird zielgerichtet für die Herstellung von Lehmbauprodukten abgebaut. Durch Gewinnungstechnik verursachter Aufwand wird dem Modul A1 zugerechnet („Verursacherprinzip“).

Sekundärgrubenlehm fällt bei Tiefbauarbeiten als Bodenaushub an, kann als Sekundärrohstoff weiterverwertet werden und reduziert das Aufkommen an Bauabfällen. Er verliert damit seine Abfalleigenschaft, tritt in ein neues Produktsystem über und erfährt dort eine Aufwertung (Up-Cycling).

Trockenlehm ist getrockneter, ggf. gemahlener Grubenlehm. Tonmehl ist natürlicher, getrockneter, ggf. gemahlener Ton. Beide Produkte können zur Erhöhung der Bindekraft von mageren Baulehmen als Zusatzstoff verwendet werden. Tonmehl und Trockenlehm sind Vorprodukte die auf Basis originärer Herstellerangaben und nicht nach generischen Datensätzen (z.B. Ökobaudat) im Projekt bilanziert wurden.

Presslehm ist ein bei der Kiesgewinnung anfallendes Abfallprodukt, das beim „Aufsuchen, Ausbeuten und Gewinnen sowie bei der chemischen / physikalischen Behandlung von Bodenschätzen“ anfällt. Er wird als Kies-Wasch-Schlamm in Silos oder Becken aufgefangen und enthält die für die Betonindustrie nicht nutzbaren Feinkörnigen Ton, Schluff und Feinsand. Der nach Entwässerung zurückbleibende Filterkuchen besitzt noch einen hohen Wassergehalt, der mittels Kammer- / Membranfilterpressen auf eine Restfeuchte von 15 – 20 % erheblich reduziert wird.

Recyclinglehm ist aus Abbruchbauteilen trocken zerkleinerter, rückgewonnener Lehmbaustoff. Er liegt i. d. R. als Bestandteil von Baumischabfall (vor und muss durch geeignete Trennverfahren für eine Wieder- bzw. Weiterverwertung separiert werden. Wie Sekundärgrubenlehm den Verbrauch natürlich gewachsener Primärrohstoffe verringert, reduziert Recyclinglehm das Aufkommen an Bauabfällen. Bei der Berechnung der Ökobilanz wird die Verwendung von Recyclinglehm dem Einsatz von Primärgrubenlehm gegenübergestellt und im Modul D der „ökologische Gewinn“ nach Aufbereitung als Rückgewinnungspotenzial ausgewiesen.

Recycling ist allgemein definiert als „erneute Verwendung oder Verwertung von Produkten sowie Werkstoffen in Form von Kreisläufen“. Im Bauwesen unterscheidet man in Produkt- und Materialrecycling, in Abhängigkeit von der Beibehaltung der ursprünglichen Produktgestalt.

Produktrecycling bedeutet die Wieder- / Weiterverwendung von Baustoffen / Bauteilen in ihrer ursprünglichen Gestalt und i. d. R. für die ursprüngliche Verwendung. Dazu erforderlich ist ein selektiver Rückbau, um sortenreine / unbeschädigte Produkte / Bauteile zu erhalten, gefolgt von den Teilprozessen Zwischenlagerung, Säuberung und ggf. Reparatur.

Materialrecycling ist die Wieder- / Weiterverwertung von Baustoffen / Bauteilen nach Auflösung ihrer ursprünglichen Gestalt. Die Verwertung kann anschließend im ursprünglichen Produktsystem (Primärrecyclinglehm) oder in einem anderen Produktsystem erfolgen (Sekundärrecyclinglehm).

Primärrecyclinglehm wird zielgerichtet als Baulehm wiederverwertet.

Sekundärrecyclinglehm wird für einen Produktionsprozess außerhalb des Lehmbaus weiterverwertet, z. B. die Separierung von Kies- und Sandfraktionen im rückgebauten Lehmprodukt für eine mögliche Betonproduktion („urban mining“). Unterschieden werden vier Recyclingformen bei denen von der Wiederverwendung bis Weiterverwertung ein stufenweiser Wertverlust im Vergleich zum Ausgangsprodukt / -stoff eintritt (Downcycling):

Wiederverwendung ist die direkteste Recyclingform mit geringstem Aufwand und größtem Werterhalt.

Weiterverwendung ist eine Verwendung in ursprünglicher Produktkategorie, aber niedrig wertiger Anwendung.

Die Wiederverwertung als Primärrecyclinglehm für neue Lehmbauprodukte ersetzt den Ausgangsstoff „Grubenlehm“ in ursprünglicher oder anderer Produktkategorie der Lehmstoffe.

Die Wiederverwertung als Sekundärrecyclinglehm ersetzt Ausgangsstoffe in Produktsystemen außerhalb des Lehmbaus, die aus dem Recyclinglehm extrahiert werden.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die ökologischen Kerngrößen Energieinput (PEI), Treibhausgaspotenzial (GWP) aus den Umweltbilanzdaten nach DIN EN 15804:2022-03 und die Rückgewinnungspotenziale (Modul D) für die drei Baustoffkategorien LMM, LS und LP dargestellt und interpretiert. Die Berechnungen und Datengrundlagen wurden von dem Kooperationspartner TH Ostwestfalen-Lippe (Prof. Jens-Uwe Schulz) verifiziert und in für Datenbanken kompatible Formate transferiert.

Lehmmauermörtel (LMM), ungetrocknet

Der Primärenergieeinsatz (PEI) für die Herstellung von erdfeuchten, ungetrockneten LMM nach DIN 18946 beträgt einschließlich der Vorkette zur Bereitstellung des Stroms und der Transporte zum Werk 0,091 MJ/kg LMM. Das sind ca. 40 % des gesamten PEI in Höhe von 2,33E-01 MJ/kg LMM. Der Anteil regenerativer Energieträger (PERT) beträgt 26 % des Gesamtenergieinput vom Sekundärrecyclinglehm bis zur Verpackung. Bei erdfeuchten LMM mit $\rho = 1.800 \text{ kg/m}^3$ beträgt das über die IM A1 – A3 aufsummierte Treibhausgaspotenzial (GWP 100) 0,01 kg CO₂ equiv. / kg LMM. Der Dosier- und Mischprozess erfolgt mit 100 % Wasserkraft aus Flusskraftwerken. Dieser regenerative Energieträger und der sparsame Verbrauch in Höhe von (30,6 MJ/t LMM führen insgesamt zu einem mit 3,76E-05 kg CO₂ equiv. / kg LMM „ungetrocknet“ marginalen Anteil an den Treibhausgasemissionen. Zur Absackung des Produktes werden offene Großgebäude aus PE/PP (Big Bags) mit bis zu 1 t LMM Fassungsvermögen genutzt. Mangels originärer UPD für diese Großgebäude wurde als worst-case-Ansatz als vergleichbares Produkt PE/PP Vliese bilanziert. Dieser theoretische Wert macht über 60% der Treibhausgaspotenziale aus (0,006 kg CO₂ equiv. / kg LMM).

Lehmmauermörtel (LMM), technisch getrocknet

Die hier analysierten technisch getrockneten LMM „leicht“ bestehen aus einem Rohstoffmix mit Sekundärgrubenlehm (70 M.-%), Sand (20 M.-%) und unbehandelten Holzspänen (10 M.-%). Die Ausgangsstoffe, der Dosier- und Mischprozess verbrauchen zusammen 0,38 MJ/kg LMM „leicht“ oder 37 % aller PE-Einträge in Höhe von insgesamt 1,04 MJ/kg LMM „leicht“. Der Gesamteinsatz an Flüssiggas für den Trommeltrockner beträgt 0,01 kg Flüssiggas / kg LMM „leicht“, entsprechend entfallen 0,62 MJ/kg LMM „leicht“ oder rund 60 % des gesamten PEI auf diese Prozessstufe. Insgesamt ergibt sich eine negative Bilanz der Treibhausgasemissionen mit -6,67E-02 kg CO₂ equiv./ kg LMM „leicht“. Die Rezeptur enthält 10 M.-% Holzspäne. Der darin gebundene Kohlenstoff reduziert die Summe der Treibhausgasemissionen der eingesetzten Ausgangsstoffe (Baulehm, Sand, Holzspäne) auf einen negativen Wert von -0,101 kg CO₂ equiv./ kg LMM „leicht“. Der in Holzspänen enthaltene Kohlenstoff wird im Verhältnis der Molmassen von CO₂ zu C (44/12) umgerechnet. Der Kohlenstoffgehalt im Holz wird für alle Holzarten mit 50 % der absolut trockenen Holzmasse angenommen. Somit entspricht 1 kg absolut trockene Holzmasse etwa 1,832 kg CO₂. Die Berechnung des gebundenen CO₂ in ungetrockneten Holzspänen geht von einem Abschlag von 30 % aus. Bezogen auf den Anteil der Holzspäne in der Rezeptur (10 M.-%) sind das 0,109 kg CO₂. Ohne diese Gutschrift trüge die Bereitstellung der Ausgangsstoffe mit ca. 8,98E-03 (0,0089) kg CO₂ equiv. / kg LMM oder 22 % zu den Treibhausgasemissionen bei. Das gesamte GWP ohne Gutschrift für gebundene Kohlenstoffe würde sich auf 4,3E-02 (0,043) kg CO₂ equiv./kg LMM „leicht“ erhöhen.

Lehmsteine (LS)

Die Daten zu Lehmsteinen beziehen sich auf zwei getrennt zu betrachtende Verfahren, die Freilufttrocknung zur Herstellung von Lehmsteinen (LS1) und die technische Trocknung von Lehmsteinen durch primäre Wärmezufuhr (LS2).

LS 1 (Freilufttrocknung): Der größte Anteil am gesamten PEI entfällt mit 0,377 MJ / kg LS1 oder 92 % auf die beiden Ausgangsstoffe Primärgrubenlehm (90 M.-%) und Holzspäne (10 M.-%). Dabei trägt der Betrieb

einer Lehmgrube zur Bereitstellung des Primärgrubenlehms nur mit 0,042 MJ / kg LS1 oder 11 % zum Energieeintrag bei. Der Hauptanteil (89 %) ergibt sich aus der Bewertung der Holzspäne nach massebezogener Allokation aus der Schnittholzproduktion. Für diese sog. Leichtlehmsteine (LS 1) ergibt sich über die IM A1 – A3 summiert ein negatives Treibhausgaspotential (GWP 100) von $-1,10E-01$ kg CO₂ equiv. / kg LS. Ursächlich dafür ist der in den Holzspänen (10 M.-% der Mischung) gespeicherte Kohlenstoff mit 0,12 kg / kg Holzspäne. Dagegen stehen die Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Lehmgrube mit $2,93E-03$ kg CO₂ equiv. / kg Primärgrubenlehm. Ohne die CO₂-Gutschrift für Holzspäne würde das Treibhausgaspotential aus den IM A1 –A3 zusammen auf $1,12E-02$ kg CO₂equiv. / kg LS 1 (Freilufttrocknung) ansteigen.

LS 2 (technisch getrocknet): Die technische Trocknung erfordert einen Energieeintrag in Höhe von $9,45E-01$ MJ / kg LS 2. Als theoretische Berechnungsgrundlage wurde die Verdampfungsenthalpie herangezogen. Die spezifische Verdampfungsenthalpie von 2.038 kJ/kg Wasser bei 20 M.-% Wassergehalt in der Mischung (und der Restfeuchtegehalt nach Trocknung von 5 M.-%) ergeben den als worst-case-Szenario physikalisch hergeleiteten Wärmebedarf zur Trocknung von 0,22 kWh/kg LS2 oder 0,79 MJ/kg LS2. Die technische Trocknung führt zu einer Bilanz der Treibhausgasemissionen von insgesamt $5,52E-02$ kg CO₂ equiv. / kg LS2. Anders als bei LS 1 gibt es keine CO₂-Gutschriften aus der Beimengung von Holzspänen. Knapp 95 % der Treibhausgaspotenziale entfallen auf den Trocknungsprozess, theoretisch abgeleitet aus der spezifischen Verdampfungsenthalpie des Wassergehaltes bei Formgebung der LS2, Erdgas als Energieträger unterstellt.

Lehmplatten (LP)

Die LP der Muster UPD nutzen die Kraft-Wärme-Kopplung zur Trocknung. Mit Erdgas betriebene Blockheizkraftanlagen erzeugen Strom und Abwärme. Der Primärenergiebedarf bewegt sich in einer Bandbreite von 3.018 – 4.822 MJ/m³ (einschließlich Vorketten bis Bereitstellung des Erdgases). Damit entfällt bis zu 86 % des durchschnittlichen Gesamtenergieeinsatzes von 5.600 MJ/m³ LP auf diese Art der Kraft-Wärme-Kopplung. Dem Gesamtenergieeinsatz von 5.600 MJ/m³ LP steht die exportierte elektrische Energie in Höhe von durchschnittlich 2.060 MJ/m³ LP aus der Wärme-Kraft-Kopplung gegenüber. Das ist der Netto-Effekt, denn der Eigenverbrauch für den Pressvorgang und weitere Prozesse ist dabei bereits herausgerechnet. Die Treibhausgaspotenziale ergeben sich für die IM A1 – A3 in Höhe von 137 kg CO₂ equiv. / m³ LP. Die für LP verwendeten pflanzlichen Rohstoffe mit bis zu 12M.-% enthalten gebundenes CO₂, das mit durchschnittlich 176 kg CO₂equiv. / m³ LP in die Berechnung einbezogen wurde. Am Ende des Lebenszyklus werden LP wiederverwendet (Rücknahme) oder stofflich wiederverwertet. Deshalb verbleibt dieses gebundene CO₂ auch danach im Stoffkreislauf und wird nicht wieder freigesetzt.

Der zweite Teil des Projektes befasste sich mit den bisher nicht behandelten Module Gebäudeabriss (C1), Abfallaufbereitung (Modul C3) und Rückgewinnungspotenziale (Modul D) in der Ökobilanz von Lehmbauprodukten. Bei der Aufbereitung und Wiederverwertung von Recyclinglehm wird die Möglichkeit der Replastifizierung trockenen Lehms genutzt – ein Alleinstellungsmerkmal von Lehmbaustoffen! Ausgehend von den erarbeiteten methodischen Grundlagen zum Recycling entstand eine Systematik des Rückgewinnungsmoduls D in allen Muster-UPD mit drei definierten Verwertungswegen D1 – D3:

- Modul D1 bewertet die direkte Wiederverwendung von sortenrein zurückgewonnen, unbeschädigten Lehmprodukten,
 - Modul D2 bewertet die Wiederverwertung von aufbereitetem Lehmsteinbruch Ausgangsstoff für die Herstellung neuer Lehmprodukte der gleichen Kategorie,
 - Modul D3 bewertet die Wiederverwertung von aufbereitetem Lehmsteinbruch für andere Lehmbaustoffe, die mit getrocknetem Baulehm (Trockenlehm) hergestellt werden (z. B. LPM im Trockendosierverfahren).
- Diese Differenzierung des Moduls D nach den erarbeiteten begrifflichen Grundlagen des Recyclings von Lehmbaustoffen ist ein Novum und zentrales Ergebnis dieses Teils des Projektes. In Tab.1 und Tab.2 werden die Rückgewinnungspotenziale für Lehmsteine und Lehmplatten zusammenfassend dargestellt. Bei allen Verwertungswegen reduzieren sich die Nettoeffekte nach Abbruch und Aufbereitung nur um bis zu 1%.

Tab. 1: Ermittelte Rückgewinnungspotenziale für Lehmsteine

Modul	Lehmprodukt	Einheit	Energieeinsparung in MJ/Einheit	Treibhausgasreduktion in kg CO ₂ equiv./Einheit
D1	Lehmstein LS 1 (AK Ia)	Kg	4,10E-01	1,15E-02

	Lehmstein LS 2 (AK Ib)	Kg	9,45E-01	5,52E-02
D2	Lehmstein LS 1 (AK Ia)	Kg	3,77E-01	3,49E-03
	Lehmstein LS 2 (AK Ib)	Kg	4,19E-02	2,93E-03
D3	Lehmstein LS 1 (AK Ia)	Kg	8,87E-01	7,73E-02
	Lehmstein LS 2 (AK Ib)	Kg	6,09E-01	7,64E-02

Tab. 2: Ermittelte Rückgewinnungspotenziale für Lehmplatten

Modul	Lehmplatten	Ein- heit	Energieeinsparung in MJ/Einheit	Treibhausgasreduktion in kg CO ₂ equiv./Einheit
D1	Lehmplatte	m ³	5,04E+03	1,23E+02
D2	Lehmplatte	m ³	6,18E+02	2,67E+01
D3	Lehmplatte	m ³	6,94E+02	8,71E+01

Die Verwertung von Lehmsteinen und Lehmplatten hat die Fachhochschule Potsdam (Prof. Dr. Klaus Pistol) experimentell in Großversuchen nachvollzogen. Die entstandenen Rezyklate entsprechend der Module D1 bis D3 wurden im Baustofflabor nach Prüfnorm mit den werkseitig hergestellten Primärprodukten verglichen. Die geprüften bauphysikalischen Eigenschaften der Rezyklate entsprachen den werkseitig hergestellten Originalprodukten.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Während der Projektlaufzeit wurden drei Maßnahmen zur Verbreitung und Präsentation der Projektergebnisse durchgeführt oder eingeleitet:

- Die FH Potsdam organisierte zusammen mit allen Kooperationspartnern ein interdisziplinäres Symposium unter dem Titel „Baustoffrecycling & Lehmbaumstoffe – Perspektiven für eine Kreislaufwirtschaft im Bauwesen“.
- Der Dachverband Lehm veranstaltete gemeinsam mit allen Kooperationspartnern ein Herstellerseminar zur Präsentation und Diskussion der Ergebnisse. Alle Teilnehmer erhielten die drei Muster-UPD zur kritischen Kommentierung.
- Die TH Ostwestfalen Lippe beantragte die Aufnahme der Muster-UPD in die ÖKOBAUDAT. Übertragung in ein mit Datenbanken kompatibles Format mit openLCA Software.

Im Nachgang zum Projekt folgen weitere, während des Projektes begonnene oder vereinbarte Veröffentlichungen:

- Zwei Gradierungsarbeiten zu den Ergebnissen der durchgeführten Rückbauversuche.
- Eine Buchveröffentlichung über das interdisziplinäre Symposium zu Baustoffrecycling & Lehmbaumstoffe.
- Veröffentlichung der verifizierten drei neuen Muster-UPD auf der Internetseite des Dachverbandes Lehm e.V.
- Eine Buchveröffentlichung über beide, aufeinander aufbauende Förderprojekte „UPD Lehm 1/ 2“ der DBU von 2016 – 2022.

Fazit

Gegenüber DIN EN 15804/A1:2018 enthalten die drei in diesem Projekt entwickelten Muster-UPD eine ausführliche Bewertung der End-of-Life Phase gemäß der überarbeiteten DIN EN 15804:2022-03. Mit dem Kooperationspartner Fachhochschule Potsdam FHP (Prof. Dr. Klaus Pistol mit Joschua George, Basel Dawod) fanden erstmals systematisch untersuchte Abbruch- und Rückgewinnungsversuche mit Lehmsteinmauerwerk und Lehmplatten statt.

Methodisch wird ein neuer Ansatz zur Bewertung von Rückgewinnungspotenzialen aus den Versuchen abgeleitet und in den drei Ökobilanzen quantifiziert. Unterschieden wird zwischen a) Wiederverwendung in ursprünglicher Produktgestalt und gleicher Produktkategorie (Lehmsteine, Lehmplatten), b) Wiederverwertung nach Auflösung der ursprünglichen Produktgestalt (Lehmputzmörtel, Lehmmauermörtel) und c) Aufbereitung zu Lehm-Rezyklat für Anwendungen im Lehm- und Ziegelbau sowie Weiterverwertung von Komponenten des Abbruchmaterials für andere Baustoffe außerhalb des Lehmbaus (Abtrennung von Sand für Beton).

Im Verlauf des Projektes stellte sich die Kommunikation der ermittelten Daten der drei Muster-UPD im Rahmen der Gebäudezertifizierung als größere Herausforderung dar, als bei Antragstellung angenommen. Mit dem Kooperationspartner Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe TH OWL (Prof. Jens-Uwe Schulz, mit Maximilian Rentz, Juan Hernandez Leal) konnten einschlägige Datenbanken und Software eingebunden werden, die zunächst der Verifizierung der errechneten Daten der Muster-UPD dienen. In einem weiteren Arbeitsschritt transferierte die TH OWL die verifizierten Daten in kompatible Datenformate als zwingende Voraussetzung für den Eintrag in Umweltdatenbanken. Nach dieser Grundlagenarbeit wurde die Eintragung der umformatierten Daten in die ÖKOBAUDAT beantragt und seitens der verantwortlichen Stellen in einem Gutachterverfahren positiv beurteilt aber zum Zeitpunkt dieser Berichterstattung noch nicht entschieden..

Das Projekt schließt die Wissenslücken bei der ökologischen Bewertung von Lehmbaustoffen, erstellt eine systematische Bewertung der Rückgewinnungspotenziale, schafft Anreize für Hersteller nach den Muster-UPD eigene produktspezifische UPD zu erstellen und eröffnet den Zugang zu Datenbanken für die Gebäudezertifizierung.

Inhalt

1 Zusammenfassung	11
2 Einleitung	12
2.1 Ausgangssituation	12
2.2 Zielsetzung	12
2.3 Aufgabenstellung	13
3 Hauptteil	15
3.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sowie der dabei angewandten Methoden und der tatsächlich erzielten Ergebnisse	15
3.2 Interpretation der Umweltbilanzen	19
3.2.1 Muster-UPD Lehmmauermörtel (LMM)	19
3.2.2 Muster-UPD Lehmsteine (LS)	24
3.2.3 Muster-UPD Lehmplatten (LP)	27
3.3 Rückgewinnungspotenziale – Methodik, Berechnungsgrundlagen und experimentelle Überprüfung	30
3.4 Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung	38
3.4.1 Kooperation mit den Hochschulpartnern	38
3.4.2 Zugangshürden zur ÖKOBAUDAT	38
3.4.3 Herstellerdaten	39
3.4.4 DIN 18940	39
3.5 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse des Vorhabens	39
4. Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse des Vorhabens	42
4.1 Symposium Baustoffrecycling & Lehmbaumstoffe	42
4.2 Herstellerseminar DVL	42
4.3 ÖKOBAUDAT	43
4.4 Graduierungsarbeiten	43
4.5. Buchveröffentlichungen	43
4.6 DIN	43
Relevante Standards / Literaturhinweise	43
Standards	43
Literaturverzeichnis (im Berichtsteil)	44
Weitere Hintergrundquellen	45

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGE UND TABELLEN

- Abb. 3.1.1 Informationsmodule der Umweltbilanz
- Abb. 3.1.2 Klassifizierung des Begriffes „Baulehm“
- Abb.3.1.3 Recycling von Lehmbaustoffen / Lehmbauteilen, Begriffe
- Abb. 3.2.1 Primärenergieeinsatz PEI für LMM „schwer“, erdfeucht
- Abb. 3.2.2 Primärenergieeinsatz PEI für LMM „leicht“, getrocknet
- Abb. 3.2.3 Treibhausgaspotentiale (GWP 100) LMM „schwer“, erdfeucht
- Abb. 3.2.4 Treibhausgaspotentiale (GWP 100) LMM „leicht“, getrocknet
- Abb. 3.2.5 Primärenergieeinsatz PEI für LLS, AK Ia, Freilufttrocknung
- Abb. 3.2.6 Primärenergieeinsatz PEI für LS, AK Ib, technische Trocknung
- Abb. 3.2.7 Treibhausgaspotentiale (GWP 100) LLS, AK Ia, Freilufttrocknung
- Abb. 3.2.8 Treibhausgaspotentiale (GWP 100) LS AK Ib, technische Trocknung (Erdgas)
- Abb. 3.2.9 Primärenergieeinsatz PEI für Lehmplatten (Erdgas)
- Abb. 3.2.10 Treibhausgaspotenziale (GWP 100) von Lehmplatten (Erdgas)
- Abb. 3.3.1 Umweltkennzahlen der Aufbereitung von Lehmmauerwerksabbruch (Modul C3)
- Abb. 3.3.2 Modul D1: Wiederverwendung von LS aus Lehmsteinbruch als LLS AK Ia, PEI u. GWP
- Abb. 3.3.3 Modul D1: Wiederverwendung von LS aus Lehmsteinbruch als LS AK Ib, PEI u. GWP
- Abb. 3.3.4 Modul D2: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für neue LLS AK Ia, Freilufttrocknung
- Abb. 3.3.5 Modul D2: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für neue LS AK Ib, technische Trocknung
- Abb. 3.3.6 Modul D3: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch mit LLS AK Ia als Trockenlehm für andere Lehmbaustoffe
- Abb. 3.3.7 Modul D3: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch mit LS AK Ib als Trockenlehm für andere Lehmbaustoffe
- Abb. 3.3.8 Rückgewinnungspotenziale IM D1 – Wiederverwendung demontierter LP
- Abb. 3.3.9 Rückgewinnungspotenziale IM D2– Wiederverwertung für neue LP (Nassverfahren)
- Abb. 3.3.10 Rückgewinnungspotenziale IM D3: Substitution von Trockenlehm

Abb. 3.5.1 Nassverfahren zur Aufbereitung und Wiederverwertung von
Lehmabbruchmaterial

Abb. 3.5.2 Trockenverfahren zur Aufbereitung und Wiederverwertung vom
Lehmabbruchmaterial

Abb. 3.5.3 Typischer Prallbrecher

Tab. 3.1.1 Ausgangsstoffe für die Herstellung von Lehmbaustoffen

Tab. 3.1.2 Verfahren nach Lehmproduktkategorien

Tab. 3.1.3 Sachbilanz der untersuchten LS

1 Zusammenfassung

Mit Projektabschluss stehen Muster-UPD für alle vier Produktkategorien im Lehmbau - Lehmputzmörtel, Lehmmauermörtel, Lehmsteine und Lehmplatten - zur Verfügung. Damit können Hersteller eigene Prozesse bewerten und nach dem Muster eigene produkt-spezifische UPD erstellen.

Die Muster-UPD wurden nach DIN EN ISO 14025 interessierten Kreisen zur kritischen Prüfung vorgestellt. Nach den entsprechenden Abläufen hat das Sachverständigen-gremium im DVL die Kommentare geprüft und stellt die Muster-UPD auf der Internetseite des DVL bereit.

Die ermittelten Energieeinträge und Umweltwirkungen der drei Produktkategorien zeigen, dass nicht die Ausgangsstoffe der Rezepturen, sondern die Verfahrenstechniken die bestimmenden Größen für die Umweltbilanz sind. Insbesondere stellte sich die technische Trocknung als Treiber für den Energiebedarf und die resultierenden Umweltwirkungen heraus.

Gegenüber DIN EN 15804/A1:2018 enthalten die drei in diesem Projekt entwickelten Muster-UPD eine ausführliche Bewertung der End-of-Life Phase gemäß der überarbeiteten DIN EN 15804:2022-03. Mit dem Kooperationspartner Fachhochschule Potsdam FHP (Prof. Dr. Klaus Pistol, Joshua George, Basel Dawod) fanden Abbruch- und Rückgewinnungsversuche mit Lehmsteinmauerwerk und Lehmplatten statt. Die Ergebnisse bestätigten die in den UPD entwickelten und quantifizierten drei Szenarien zur Rückgewinnung von Lehmabbruchmaterial:

Unterschieden wird zwischen Wiederverwendung in ursprünglicher Produktgestalt und gleicher Produktkategorie (Lehmsteine, Lehmplatten), Wiederverwertung nach Auflösung der ursprünglichen Produktgestalt (Lehmputzmörtel, Lehmmauermörtel) und Aufbereitung zu Lehm-Rezyklat für Anwendungen im Lehmbau sowie Weiterverwertung von Komponenten des Abbruchmaterials für andere Baustoffe außerhalb des Lehmbaus (Abtrennung von Sand für Beton). Die Rezyklate für die Wiederverwertung wurden geprüft. Sie erwiesen sich in ihren bautechnischen Eigenschaften als gleichwertig zu originär produzierten Lehmbauprodukten.

Im Verlauf des Projektes stellte sich die Kommunikation der ermittelten Daten der drei Muster-UPD im Rahmen der Gebäudezertifizierung als größere Herausforderung dar, als bei Antragstellung angenommen. Mit dem Kooperationspartner Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe TH OWL (Prof. Jens-Uwe Schulz, Maximilian Rentz B.A., Juan Hernandez Leal B.sc.) konnten einschlägige Datenbanken und Software (openLCA) eingebunden werden, die zunächst der Verifizierung der errechneten Daten der Muster-UPD dienten. In einem weiteren Arbeitsschritt transferierte die TH OWL die verifizierten Daten in kompatible Datenformate als zwingende Voraussetzung für den Eintrag in Umweltdatenbanken. Nach dieser Grundlagenarbeit wurde die Eintragung der umformatierten Daten in die ÖKOBAUDAT beantragt und seitens der verantwortlichen Stellen in einem Gutachterverfahren positiv beurteilt.

Das Projekt schließt die Wissenslücken bei der ökologischen Bewertung von Lehm-baustoffen, schafft Anreize für Hersteller, nach den Muster-UPD eigene produktspezifische UPD zu erstellen und eröffnet den Zugang zu Datenbanken für die Gebäudezertifizierung.

2 Einleitung

2.1 Ausgangssituation

Das Projekt knüpft an die Ergebnisse des vorangegangenen, ebenfalls von der DBU 2016 – 2018 geförderten Projektes (Az.: 32985) zum Aufbau von Strukturen und Regelwerken zur Erstellung und Verifizierung von Umweltproduktdeklarationen (UPD) für Lehmbaumstoffe an. Im nun abgeschlossenen Projekt werden die Datengrundlagen für Muster-UPD nach der aktualisierten DIN EN 15804/A2 für weitere Produktkategorien auf Basis des zuvor entwickelten Regelwerkes gemäß DIN EN ISO 14025 (z.B.: Produktkategorieregeln (PKR), Programmanleitungen) erarbeitet, und zwar für Lehmmauermörtel (LMM), Lehmsteine (LS) und Lehmplatten (LP).

Mit der verpflichtenden Berücksichtigung der Module C (Entsorgung) und D (Gutschriften) im allgemeinen Schema der Ökobilanz nach DIN EN 15804:2022-03 erhält die Rückgewinnung von Baustoffen einen größeren Stellenwert als bisher. In Kooperation mit der FHP wurden deshalb Modelle zur Quantifizierung der Rückgewinnungspotenziale der drei Lehmbauprodukte LMM, LS und LP entwickelt. Dieser Projektabschnitt umfasst Untersuchungen zu Baustoff- bzw. Bauteileigenschaften, Rückgewinnungstechniken und Wiederverwendungs- bzw. Wiederverwertungsmöglichkeiten. Die Ergebnisse bilden die Datengrundlage für die erstmalige Quantifizierung der Module C und D den zu erarbeitenden Muster-UPD nach der aktualisierten DIN EN 15804:2022-03.

Die Analyse zu generischen Ökobilanzdaten für Lehmbauprodukte im Rahmen des Vorgängerprojektes zeigte deutliche Defizite in der Abbildgenauigkeit der entsprechenden Daten in öffentlich zugänglichen Datenbanken auf, insbesondere in der Datenbank ÖKOBAUDAT des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). In Kooperation mit der TH OWL sollten Wissenslücken und Defizite durch Übertragung der Projektergebnisse in das Format der ÖKOBAUDAT abgebaut werden.

2.2 Zielsetzung

Kern des Projektes ist die systematische Erarbeitung von Datengrundlagen für die Entwicklung von Muster-UPD für das gesamte Spektrum der DIN-basierten Lehmbauprodukte unter Einbeziehung neuer Daten zum Rückgewinnungspotenzial der Lehmbaumstoffe. Die Erhebung der Daten im abgeschlossenen Projekt bezieht sich auf die verschiedenen Verfahrenstechniken für die Herstellung von LMM, LS und LP.

Ein erstes Ziel der Analyse war die Erstellung einer Typ III UPD nach DIN EN ISO 14025 als Umweltinformation für die Planung und Ausführung von Bauteilen / Konstruktionen mit Lehmbauprodukten. Ein weiteres Ziel bezog sich auf die Optimierung von Produktionsprozessen und Verfahrenstechniken durch das Aufzeigen ökologischer Schwachstellen, durch deren Beseitigung Umweltbelastungen reduziert werden konnten. Ein drittes Ziel war die Beantwortung der Frage, ob sich aus Gebäudeabbruch oder Demontage rückgewonnene Lehmbauprodukte mit „ökologischem Gewinn“ wiederverwenden bzw. wiederverwerten lassen.

In Kooperation mit der FHP wurden Versuche zum Rückbau und zur Wiederverwendung / Weiterverwertung von Lehmbauprodukten durchgeführt und Rückgewinnungsverfahren experimentell erprobt.

Damit bilanzierte Lehmbauprodukte stärkere Berücksichtigung bei Gebäudeplanungen für nachhaltige Neubauten und Sanierungen finden können, werden die Ergebnisse der Muster-UPD in Kooperation mit der TH OWL in einschlägige Datenbankformate (ÖKOBAUDAT) transferiert.

2.3 Aufgabenstellung

Im Projektverlauf entstand eine Arbeitsteilung zwischen den Kooperationspartnern, die sich auf drei Schwerpunktthemen erstreckte:

- 1) Erstellen der Muster-UPD
- 2) Experimente und Baustoffprüfungen zur Rückgewinnung der drei Lehm-Produktkategorien
- 3) Verifizierung der Muster-UPD und Übertragung der Daten in die ÖKOBAUDAT.

Im Einzelnen:

Erstellen der Muster-UPD für LMM, LS und LP

DVL

- Befragung von Herstellern der Lehm-Produkte im DVL mit einem strukturierten Fragebogen
- Bearbeitung und Nachbereitung der eingegangenen Fragebögen, z. B. zu Verfahrenstechniken
- Kategorisierung der Lehm-Produkte nach Trocknungsgrad, Anwendungsklassen und weiteren Eigenschaften
- Auswertung von Datenbanken, Umweltbilanzen und Literaturangaben für Hintergrunddaten zu einzelnen Komponenten und Energieträgern
- Berechnung der Ökobilanzmodule A1 – A3 für LMM, LS und LP nach PKR und DIN EN 15804:2022-03 differenziert nach Kategorien innerhalb der Produktgruppen
- Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Quantifizierung der Module C und D nach DIN EN 15804
- Nachberechnung der Ökobilanzdaten aus der Modellierung nach PKR und DIN EN 15804/A+
- Verfassen der drei Muster-UPD für LMM, LS und LP.

Experimente und Baustoffprüfungen zur Rückgewinnung der drei Lehm-Produkte

Kooperationspartner FH Potsdam

- Experimenteller Versuchsaufbau für Lehmsteinmauerwerk (LSM) (verschiedene LS und LMM) im Baustofflabor der FH Potsdam
- Durchführung und Auswertung eines Wandabbruches
- Festlegung der Prüfmethodik für Rezyklate im Vergleich zu Originalprodukten
- Erprobung und Bewertung von zwei verschiedenen Aufbereitungstechniken
- Herstellung und Prüfung von Rezyklaten aus wiederverwertetem LSM und LP
- Entwicklung von Recyclingkonzepten bei Gebäuderückbauten mit Lehm-Baustoffen.

Verifizierung der Muster-UPD und Übertragung der Daten in die ÖKOBAUDAT

Kooperationspartner TH OWL

- Auswahl und Implementation einer Datenbank für Hintergrunddatensätze
- Verifizierung der erstellten drei Muster-UPD
- Beispielgebende Übertragung der bereits vom Prüfungsausschuss beim DVL zertifizierten UPD für LPM in Datenbankformat der ÖKOBAUDAT mit openLCA Software.

- Anmeldung der UPD LPM bei Zulassungsgremien der ÖKOBAUDAT als Pilotfunktion für alle weiteren UPD
- Übertragung der Daten der drei neuen Muster-UPD für LMM, LS und LP in das Dateiformat der ÖKOBAUDAT

Während des gesamten Projektes gab es einen regelmäßigen, virtuellen Austausch der Projektpartner. Nach dem Lock-down in der Pandemie führten die Partner erste gemeinsame Experimente zum Rückbau an der FH Potsdam durch.

Die Kooperationspartner beteiligten sich an verschiedenen Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse:

- Veröffentlichung der Muster UPD für LMM, LS und LP
- Durchführung eines Symposiums an der FH Potsdam zum Baustoffrecycling am Beispiel von Lehmbauprodukten
- Durchführung eines Herstellerseminars beim DVL zur Vorstellung der Muster-UPD
- Antrag zur Aufnahme der Muster UPD beim BBSR bzw. ÖKOBAUDAT (DVL)
- Fachpublikation zur Rückgewinnung von Lehmstoffen (Springer Verlag, in Planung).

3 Hauptteil

3.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sowie der dabei angewandten Methoden und der tatsächlich erzielten Ergebnisse

Im Ergebnis des Projektes entstanden drei neue Muster-UPD nach DIN EN 15804:2022-03 für LMM, LS und LP. Alle drei Muster-UPD bilanzieren die Module A1 – A3 (cradle-to-gate) mit zusätzlichen Optionen hinsichtlich der End-of-Life-Module C1 – C4 (Gebäudeabriss bis Abfallaufbereitung / Deponie) und Modul D (Rückgewinnungspotenziale) (Abb. 3.1.1).

INFORMATIONEN ZUR BAUWERKSBEURTEILUNG																	
ANGABEN ZUM LEBENSZYKLUS DES BAUWERKS															ERGÄNZENDE INFORMATIONEN AUSSERHALB DES LEBENSZYKLUS DES BAUWERKS		
A1 - A3 HERSTELLUNGS- PHASE			A4 - A5 BAUPHASE		B1 - B7 NUTZUNGSPHASE							C1 - C4 ENTSORGUNGSPHASE				D	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
Rohstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Bau-/Einbauprozess	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz ¹	Umbau/Erneuerung	betrieblicher Energieeinsatz	betrieblicher Wassereinsatz	Rückbau, Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Deponierung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recycling-Potenzial	
Szenario			Szenario		Szenario							Szenario				Szenario	
von der Wiege bis zum Werkstor mit den Modulen C1-C4 und Modul D																Pflicht	
von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen, den Modulen C1-C4 und Modul D			optional		optional							Pflicht				Pflicht	
von der Wiege bis zur Baure und Modul D			Pflicht		Pflicht							Pflicht				Pflicht	
von der Wiege bis zum Werkstor ²																	
von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen ³			optional														

Abb. 3.1.1 Informationsmodule der Umweltbilanz

Erstmals kann die End-of-Life Phase von Lehmbaustoffen quantifiziert werden. Die Bewertung der End-of-Life Phase von Lehmbaustoffen erforderte präzisierte Definitionen und die Entwicklung methodischer Ansätze für die Schaffung von Grundlagen für zukünftige UPD nach DIN EN 15804:2022-03.

Für das Informationsmodul A1 „Rohstoffbereitstellung“ (Abb. 3.1.1) wurde der Begriff **Bau-lehm** unter Einbeziehung von Rückgewinnungspotenzialen in vier Kategorien klassifiziert: Grubenlehm, Trockenlehm / Tonmehl, Recyclelehm und Presslehm (Abb. 3.1.2).

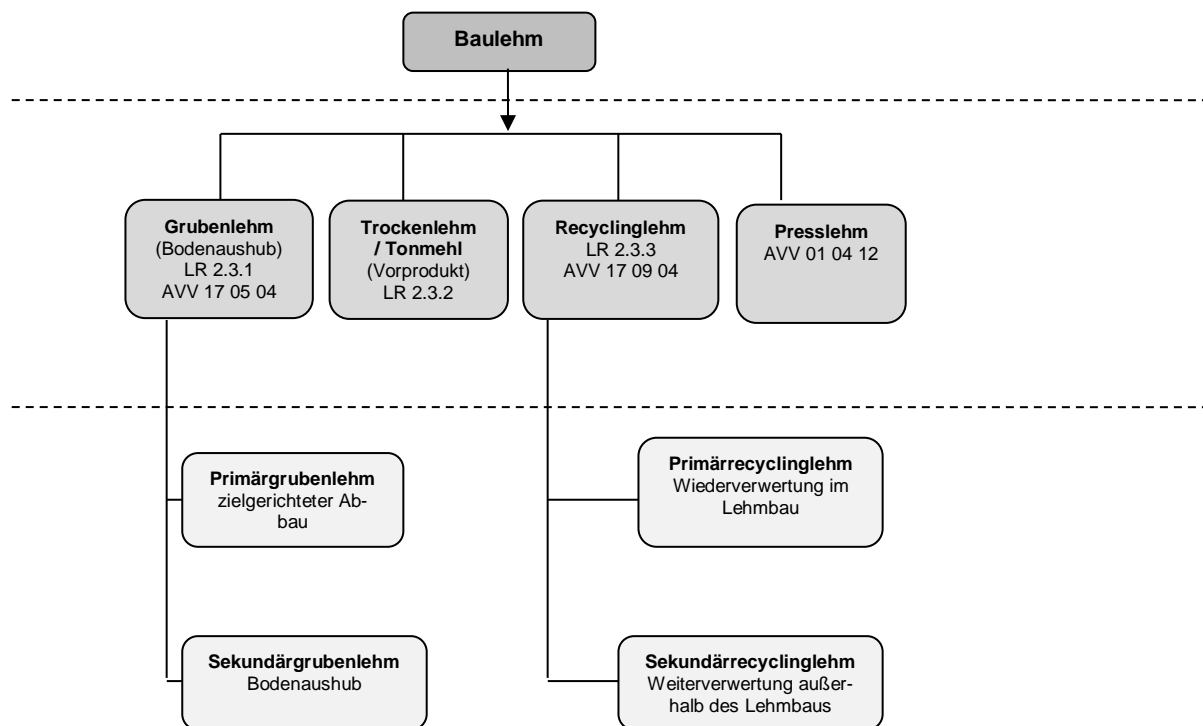


Abb. 3.1.2 Klassifizierung des Begriffes „Baulehm“

Grubenlehm ist erdfeucht dem geologisch „gewachsenen“ Boden entnommener natürlicher Primärrohstoff [1] mit unterschiedlicher granulometrischer und schwankender mineralogischer Zusammensetzung (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaCO_3). Dadurch können sich je nach Lehmvorkommen unterschiedliche plastische Eigenschaften während der Aufbereitung, Verarbeitung und Austrocknung (mager / fett) sowie Farben des Endprodukts ausbilden.

Primärgrubenlehm wird zielgerichtet für die Herstellung von Lehmbauprodukten abgebaut. Durch Gewinnungstechnik verursachter Aufwand wird dem Modul A1 zugerechnet („Verursacherprinzip“).

Sekundärgrubenlehm fällt bei Tiefbauarbeiten als Bodenaushub (AVV Nr. 17 05 04 [2]) an, kann als Sekundärrohstoff weiterverwertet werden und reduziert das Aufkommen an Bauabfällen. Er verliert damit seine Abfalleigenschaft, tritt in ein neues Produktsystem über und erfährt dort eine Aufwertung (Upycling). Durch Gewinnungstechnik verursachter Aufwand wird deshalb bei der Berechnung der Ökobilanz nicht in Ansatz gebracht (Modul A1).

Trockenlehm ist getrockneter, ggf. gemahlener Grubenlehm. Tonmehl ist natürlicher, getrockneter, ggf. gemahlener Ton. Tonmehl und Trockenlehm sind Vorprodukte mit einem eigenen generischen Datensatz in der ÖKOBAUDAT [3] (Lehmpulver 1.1.04). Beide Produkte können zur Erhöhung der Bindekraft von mageren Baulehmen als Zusatzstoff verwendet werden.

Presslehm ist ein bei der Kiesgewinnung anfallendes Abfallprodukt, das beim „Aufsuchen, Ausbeuten und Gewinnen sowie bei der chemischen / physikalischen Behandlung von Bodenschätzen“ anfällt und mit einer eigenen AVV-Schlüsselnummer 01 04 12 klassifiziert werden kann [2]. Er wird als Kies-Wasch-Schlamm in Silos oder Becken aufgefangen und enthält die für die Betonindustrie nicht nutzbaren Feinkörnigen Ton, Schluff und

Feinsand. Der nach Entwässerung zurückbleibende Filterkuchen besitzt noch einen hohen Wassergehalt, der mittels Kammer- / Membranfilterpressen auf eine Restfeuchte von 15 – 20 % erheblich reduziert wird [4].

Recyclinglehm ist aus Abbruchbauteilen trocken zerkleinerter, rückgewonnener Lehmstoff [1]. Er liegt i. d. R. als Bestandteil von Baumischabfall (Bauschutt / Baustellenabfälle, AVV 17 01 07 /17 09 04 [2]) vor und muss durch geeignete Trennverfahren für eine Wieder- bzw. Weiterverwertung separiert werden (Abb. 3.1.3, Materialrecycling). Wie Sekundärgrubenlehm den Verbrauch natürlich gewachsener Primärrohstoffe verringert, reduziert Recyclinglehm das Aufkommen an Bauabfällen. Bei der Berechnung der Ökobilanz wird die Verwendung von Recyclinglehm dem Einsatz von Primärgrubenlehm gegenübergestellt und im Modul D ein möglicher „ökologischer Gewinn“ als Rückgewinnungspotenzial ausgewiesen.

Recycling ist allgemein definiert als „erneute Verwendung oder Verwertung von Produkten sowie Werkstoffen in Form von Kreisläufen“ [5]. Im Bauwesen unterscheidet man in Produkt- und Materialrecycling, in Abhängigkeit von der Beibehaltung der ursprünglichen Produktgestalt [6] (Abb. 3.1.3).

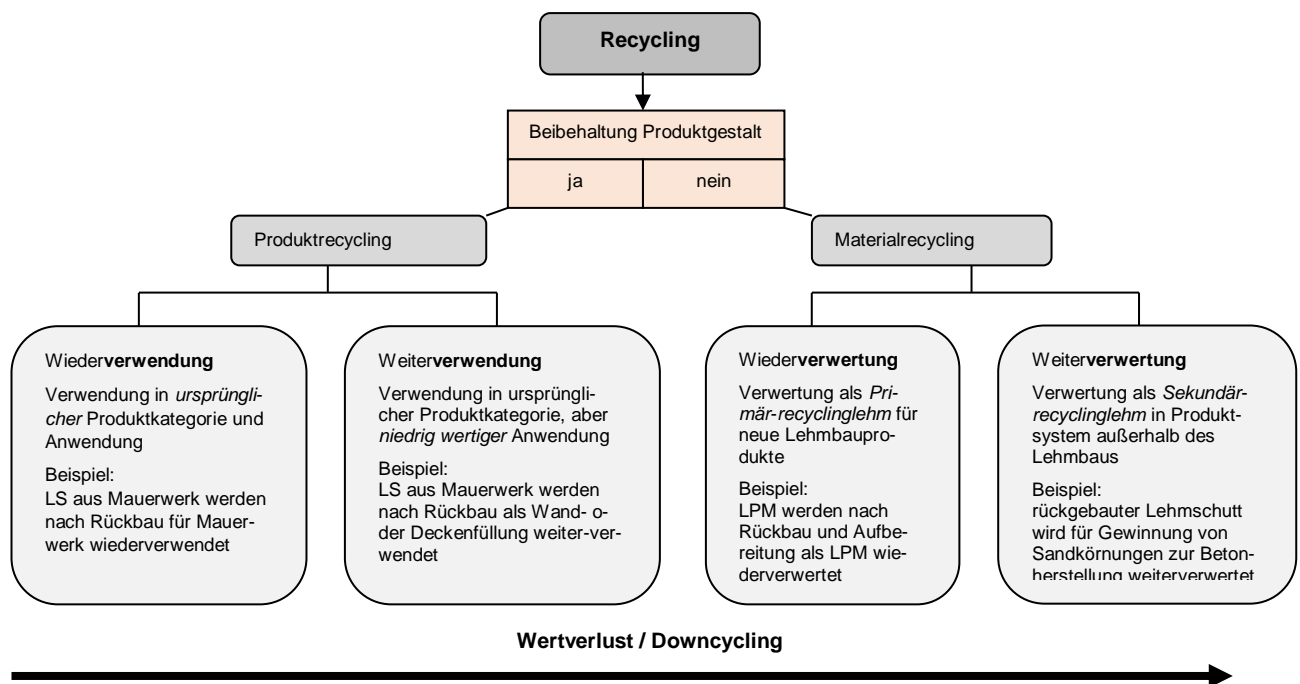


Abb.3.1.3 Recycling von Lehmstoffen / Lehmbauteilen, Begriffe

Produktrecycling bedeutet die Wieder- / Weiterverwendung von Baustoffen / Bauteilen in ihrer ursprünglichen Gestalt und i. d. R. für die ursprüngliche Verwendung. Dazu erforderlich ist ein selektiver Rückbau, um sortenreine / unbeschädigte Produkte / Bauteile zu erhalten, gefolgt von den Teilprozessen Zwischenlagerung, Säuberung und ggf. Reparatur.

Materialrecycling ist die Wieder- / Weiterverwertung von Baustoffen / Bauteilen nach Auflösung ihrer ursprünglichen Gestalt. Die Verwertung kann anschließend im ursprünglichen Produktsystem (Primärrecyclinglehm) oder in einem anderen Produktsystem erfolgen (Sekundärrecyclinglehm).

Primärrecyclinglehm wird zielgerichtet als Baulehm wiederverwertet. **Sekundärrecyclinglehm** wird für einen Produktionsprozess außerhalb des Lehmbaus weiterverwertet, z. B. die Separierung von Kies- und Sandfraktionen für eine mögliche Betonproduktion („urban mining“, Abb. 3.1.3).

Die *Wiederverwendung* ist die direkteste Form des Recyclings mit geringstem Aufwand und größtem Werterhalt. Über die vier Recyclingformen Wiederverwendung bis Weiterverwertung tritt ein Wertverlust im Vergleich zum Ausgangsprodukt / -stoff ein (*Downcycling*) (Abb. 3.1.3).

Hersteller des DVL stellten ihre Daten zu den von ihnen eingesetzten Anteilen der Ausgangsstoffe, den Transporten ins Werk und dem Energieeinsatz als Berechnungsgrundlagen zur Verfügung.

Vor einer Bilanzierung des Moduls A1 zu Ausgangsstoffen müssen die Baulehmkategorien nach Definition in Abb.3.1.3 hinsichtlich der Art ihrer Bereitstellung benannt werden (Tab. 3.1.1).

Art der Ausgangsstoffe	Baulehm					Presslehm
	Grubenlehm		Trockenlehm / Tonmehl	Recyclinglehm		
	Primär~	Sekundär~		Primär~	Sekundär~	
Rohstoff	•	•				
Recyclingmaterial				•	•	
Vorprodukt			•			
Bauabfall		•			•	•

Tab. 3.1.1 Ausgangsstoffe für die Herstellung von Lehmbaustoffen

Reale Daten für typische Produktrezepturen und Herstellungsverfahren lagen für LMM und LP vor. Allein für LS fehlten solche Realdaten, sodass auf normative Vorgaben nach DIN 18945, veröffentlichte Datenblätter und physikalische Berechnungsmodelle zurückgegriffen werden musste. Wiederholte Versuche der DVL-Geschäftsführung, doch noch Realdaten bei Herstellern einzuholen, trugen zur Verzögerung des Projektablaufs bei.

Bei allen drei bilanzierten Lehmbauprodukten wurden unterschiedliche Verfahrenstechniken zur Herstellung eingesetzt (Tab. 3.1.2). Das machte eine Durchschnittsbetrachtung, wie für Muster-UPD üblich, schwieriger. Unterschiedliche Verfahrenstechniken für gleiche Lehmbauprodukte erforderten eine differenzierte Bilanzierung der jeweiligen Lehmbauprodukte nach Herstellungsverfahren.

Produkte	LMM / DIN 18946	LS / DIN 18945	LP / DIN 18948
Verfahren	-Erdfeuchtmischung	-Freilufttrocknung	- Indirekte Abwärmenutzung
	-technische Trocknung	-technische Trocknung	- direkte Wärmeerzeugung
<i>LMM-Lehmmauermörtel; LS-Lehmsteine; LP-Lehmplatten</i>			

Tab. 3.1.2 Verfahren nach Lehmproduktkategorien

Die Verfahren in Tab. 3.1.2 lassen sich nach Grad und Art der erforderlichen Trocknung kategorisieren: Bei LMM (sowie LPM und Stampflehm) haben die Hersteller grundsätzlich die Möglichkeit, die Lehmprodukte ohne Trocknung als erdfeuchte Mischung herzustellen, zu verpacken, zu lagern und zu transportieren. Am Markt wird zwischen „schweren“ (Rohdichteklasse 1,4 - 1,6) erdfeuchten, und getrockneten sowie „leichten“ technisch getrockneten LMM (Rohdichteklasse 1,2 - 1,4) unterschieden. Letztere enthalten pflanzliche Leichtzuschläge. Zu beiden Verfahren lagen gemessene Daten zum Energieeinsatz (A3), Transporten (A2) und Ausgangsstoffen (A1) vor. Nach DIN 18946 werden Bauprodukte mit einer Rohdichteklasse < 1,2 als Leichtlehmmauermörtel (LLMM) bezeichnet.

Angesichts der vielfältigen LS-Formate und Zusammensetzungen konzentrierte sich die Bilanzierung auf zwei LS-Kategorien, die für die Anwendungsklasse AK Ia (z. B. Ausfachungen) und die Anwendungsklasse AK Ib (u. a. tragendes Lehmsteinmauerwerk LSM) repräsentativ sind.

Die LS der AK Ia erhalten durch einfache Freilufttrocknung in offenen, regengeschützten Stellagen oder Hallengebäuden ihre Festigkeit. Es handelt sich meist um saisonale Produktionen.

Die hier untersuchten LS der AK Ib bestehen zu 100 % aus Baulehm. Sie werden technisch getrocknet. Typischerweise produzieren Klinkerwerke solche LS als zweites Standbein und nutzen dazu die Abwärme aus der Primärproduktion. Zur technischen Trocknung von LS lagen dem DVL, trotz aller Bemühungen, keine gemessenen Daten von Herstellern vor.

Für die technische Trocknung von LS wurde der Wärmebedarf rechnerisch ermittelt. Als worst case Szenario wird die zur Verdampfung des Anmachwassers bei der Formgebung der LS aufgewendete Wärmeenergie zugrunde gelegt und Erdgas als Energieträger angenommen. Für die Formgebung der LS ist ein bildsamer Zustand der Lehmmasse erforderlich (DIN EN 17892-11), das entspricht der Konsistenzform I_c „weich-steif“ mit einem Wassergehalt von 15 – 25 M.-% in der Mischung. Für die weitere Berechnung des Wärmebedarfs für die Trocknung wird ein Wassergehalt von 20 M.-% angenommen. Die nach Trocknung verbleibende absolute Restfeuchte der LS fungiert als zweite Variable zur Bestimmung der erforderlichen Trocknungsenergie. Ausschlaggebend ist dabei der Porenwassergehalt in den Tonmineralien des verwendeten Grubenlehms. Die Schwankungsbreite des Porenwassergehalts reicht von 2 M.-% bei Zweischicht-Tonmineralien (z. B. Kaolin) bis 6 M.-% bei Dreischicht-Tonmineralien (z. B. Montmorillonit). Für die Berechnung des Wärmebedarfs wird ein Mittelwert von 5 M.-% angenommen. Diese Grundannahmen sind die Variablen für eine vereinfachte Berechnung der Verdampfungsenthalpie [7]. Die Verdampfung des Wassers erfordert einen Energieinput von 2.308 kJ/kg H₂O bei ca. 80 °C und Normaldruck (1.013 bar). Das entspricht einem Energiebedarf von 0,22 kWh/kg LS. Dieser Wert soll den Herstellern eine Orientierungsgröße geben, wie sie durch energetische Optimierung, z. B. Wärmerückgewinnung / nicht-fossile Energieträger, ihre spezifischen Umweltbilanzen verbessern können.

Alle LP bedürfen einer technischen Trocknung. Die Verfahren unterscheiden sich nach indirekter und direkter Wärmeerzeugung zur Trocknung. Ebenso gibt es Rezepturen mit unterschiedlichen Ausgangsstoffen. Zur äußeren Armierung der LP verwenden Hersteller entweder Glasfasergewebe, Jute oder Papier. Die Muster-UPD fasst die Daten zweier Hersteller zu einem Durchschnittswert zusammen, weil beide vergleichbare Ausgangsstoffe einsetzen und beide mit einer indirekten Wärmeerzeugung aus der Abwärme von Blockheizkraftwerken (BHKW) trocknen. Die Daten eines weiteren Herstellers waren zur Durchschnittsbildung nicht geeignet, weil dieser eine direkte Wärmeerzeugung mit Holzhackschnitzeln anwendet. Die Umweltdaten zu diesem Sonderverfahren wurden ausgewertet und dem Hersteller zur Verfügung gestellt.

Innerhalb der Produktkategorien LMM, LS und LP gab es mehrere unterschiedliche Herstellungsverfahren für insgesamt fünf Lehmbauprodukte. Jede Muster-UPD enthält eine entsprechende verfahrenstechnische Differenzierung. Dieser methodische Ansatz unterscheidet sich von den generischen Ansätzen in einschlägigen Datenbanken, insbesondere der ÖKOBAUDAT, die für LPM, LP und LS undifferenzierte Rechenwerte enthalten.

Nachfolgend werden die ökologischen Kerngrößen Energieinput (PEI) und Treibhausgaspotenzial (GWP) aus den Umweltbilanzdaten nach DIN EN 15804:2022-03 für die drei Baustoffkategorien LMM, LS und LP dargestellt und interpretiert.

3.2 Interpretation der Umweltbilanzen

3.2.1 Muster-UPD Lehmmauermörtel (LMM)

Der Primärenergieeinsatz (PEI) für die Herstellung von erdfeuchten, ungetrockneten LMM nach DIN 18946 beträgt einschließlich der Vorkette zur Bereitstellung des Stroms und der Transporte zum Werk 0,091 MJ/kg LMM. Das sind ca. 40 % des gesamten PEI in Höhe

von 2,33E-01 MJ/kg LMM (Abb. 3.2.1). Die Verpackung in Großbinden von 1 t Fassungsvermögen trägt mit 0,142 MJ/kg LMM oder 60 % den Hauptanteil am PEI im gesamten Herstellungsprozess vom Ausgangsstoff bis zur Absackung. Es handelt sich dabei um eine worst case Betrachtung mit Annahmen zur Ökobilanz solcher Großbinden, abgeleitet aus Werten für ähnliche Kunststoffgewebe, die in der ÖKOBAUDAT gelistet sind. Der Anteil regenerativer Energieträger (PERT) beträgt 26 % des Gesamtenergieinput vom Ausgangsstoff bis zur Verpackung.

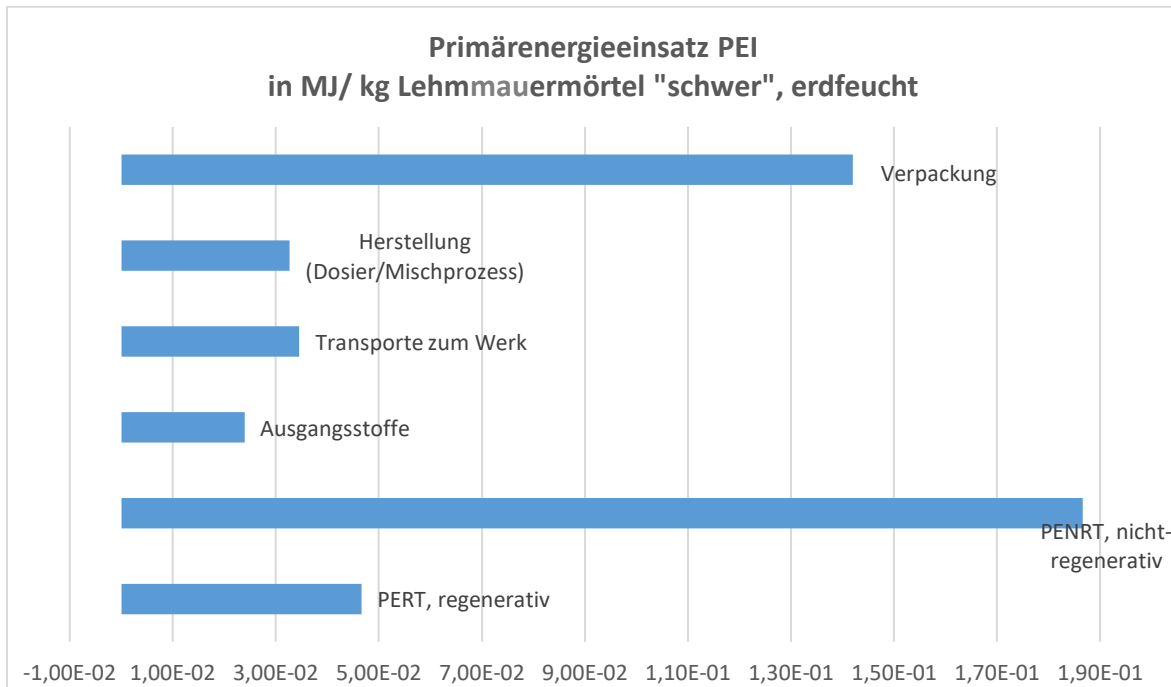


Abb. 3.2.1 Primärenergieeinsatz PEI für LMM „schwer“, erdfeucht

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

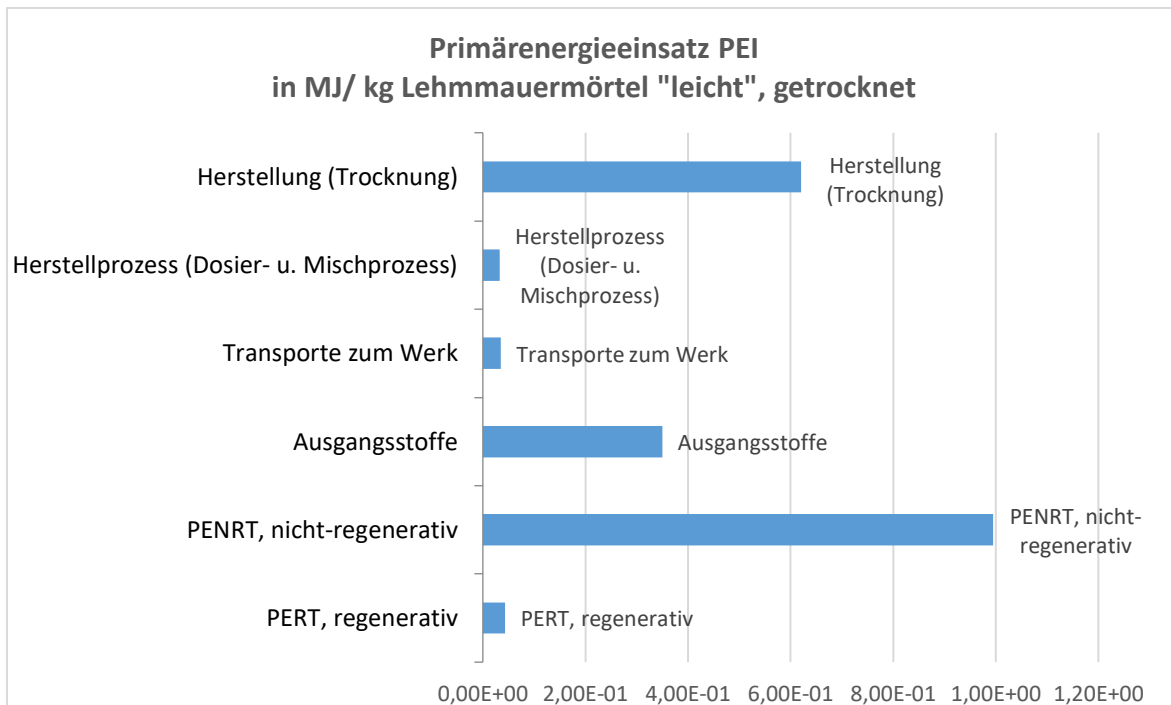


Abb. 3.2.2 Primärenergieeinsatz PEI für LMM „leicht“, getrocknet

In Abb. 3.2.2 wird der Herstellungsprozess ohne Verpackung dargestellt. Kraftpapiersäcke tragen mit 90 g / 25 kg LMM weniger als 1 % zur Masse und zum PEI bei ($4,000E-08$ MJ/kg LMM, getrocknet), so dass hier das Abschneidekriterium zutrifft.

Das Herstellungsverfahren unterscheidet sich von LMM „schwer“, erdfeucht insofern, als dass nach demselben Dosier- und Mischvorgang (mit anderer Mischung) ein zusätzlicher Durchlauf durch einen mit Flüssiggas betriebenen Trommeltrockner folgt. Die Ausgangsstoffe und der Dosier- und Mischprozess verbrauchen zusammen $0,38$ MJ/kg LMM „leicht“ (Abb. 3.2.2) oder 37 % aller PE-Einträge. Auf Transporte ins Werk entfallen 3,3 % aller PE-Einträge.

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

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

Bei erdfeuchten LMM mit $\rho = 1.800$ kg/m³ beträgt das über die IM A1 – A3 aufsummierte Treibhausgaspotential (GWP 100) $0,01$ kg CO₂ equiv. / kg LMM. In Abb. 3.2.3 werden die Beiträge der einzelnen Module dargestellt und nachfolgend interpretiert.

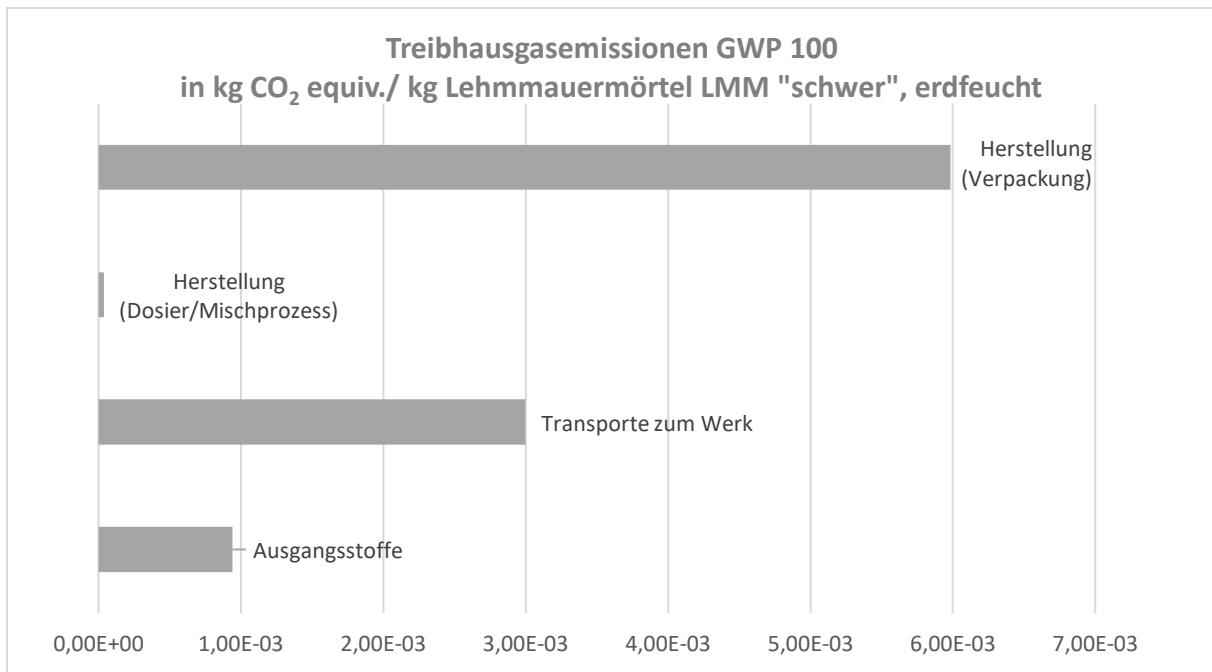


Abb. 3.2.3 Treibhausgaspotentiale (GWP 100) LMM „schwer“, erdfeucht

Sand ist der einzige Ausgangsstoff der Rezeptur (43 M.-%) für erdfeuchten LMM, der mit 11 % zu den Treibhausgaspotenzialen von insgesamt 8,23E-03 kg CO₂ equiv./kg LMM „schwer“ beiträgt. Die Verwendung von Sekundärgrubenlehm (57 M.-%) verursacht Treibhausgasemissionen beim Abbaggern, die jedoch außerhalb der Systemgrenze entstehen und der Kiesgewinnung zuzurechnen sind.

Transporte zum Werk berücksichtigen neben anderen Rohstofflieferungen auch den Weg des Sekundärgrubenlehms von der Kiesgewinnung zur Produktionsstätte. Die Transporte mit LKW (EURO 5) mit 34 – 40 t zulässigem Gesamtgewicht und 27 t Nutzlast im Speditionsverkehr bei 85 % Auslastung verursachen 3,00E-03 (0,003) kg CO₂ equiv. oder 36 % der gesamten Treibhausgasemissionen für LMM „schwer“. Die durchschnittliche Transportentfernung beträgt 45 km.

Der Dosier- und Mischprozess erfolgt mit 100 % Wasserkraft aus Flusskraftwerken. Dieser regenerative Energieträger und der sparsame Verbrauch in Höhe von 8,5 kWh/t (30,6 MJ/t) LMM führen insgesamt zu einem mit 3,76E-05 kg CO₂ equiv. / kg LMM „schwer“ oder 0,45 % vergleichsweise marginalen Anteil an den Treibhausgasemissionen.

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

Die Rezeptur für technisch getrocknete LMM „leicht“ führt zu einem anderen Bild der Treibhausgasemissionen (Abb. 3.2.4). Insgesamt ergibt sich eine negative Bilanz mit - 6,67E-02 kg CO₂equiv./ kg LMM „leicht“.

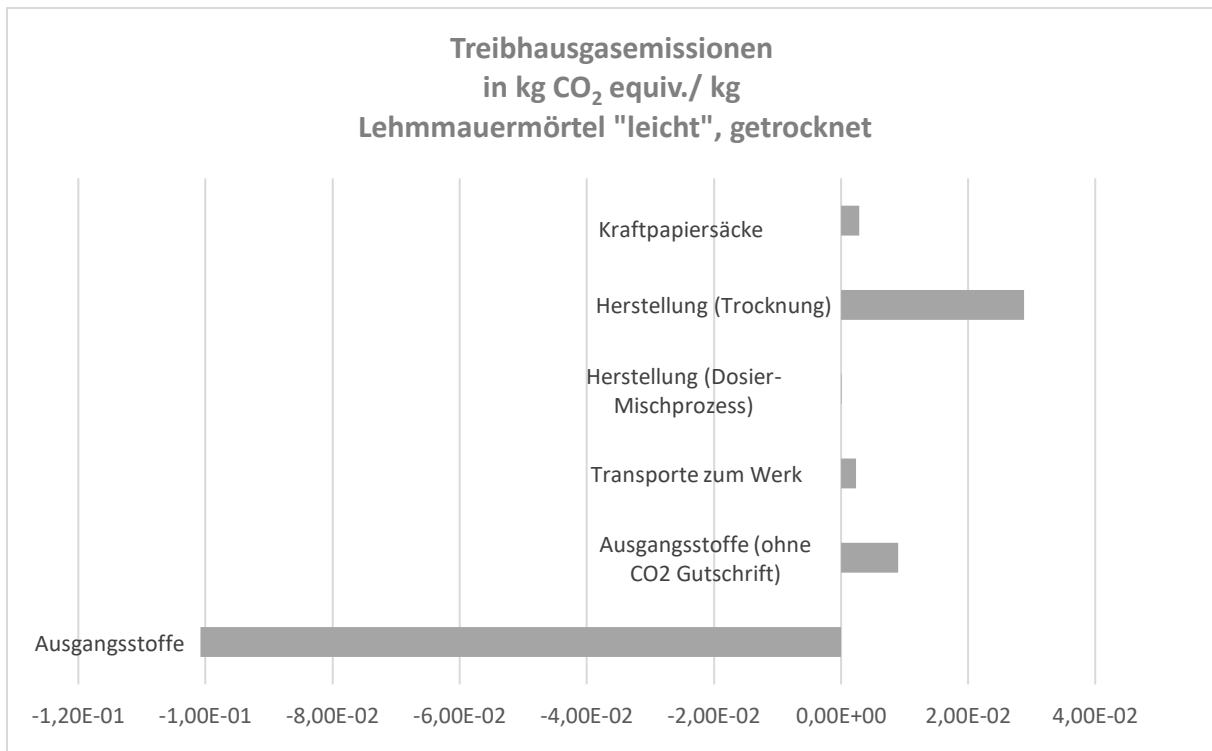


Abb. 3.2.4 Treibhausgaspotentiale (GWP 100) LMM „leicht“, getrocknet

Die Rezeptur enthält 10 M.-% Holzspäne. Der darin gebundene Kohlenstoff reduziert die Summe der Treibhausgasemissionen der eingesetzten Ausgangsstoffe (Baulehm, Sand, Holzspäne) auf einen negativen Wert von -0,101 kg CO₂equiv./ kg LMM „leicht“, getrocknet. Der in Holzspänen enthaltene Kohlenstoff wird im Verhältnis der Molmassen von CO₂ zu C (44/12) umgerechnet. Der Kohlenstoffgehalt im Holz wird für alle Holzarten mit 50 % der absolut trockenen Holzmasse angenommen. Somit entspricht 1 kg absolut trockene Holzmasse etwa 1,832 kg CO₂ [8]. Die Berechnung des gebundenen CO₂ in ungetrockneten Holzspänen geht von einem Abschlag von 30 % aus. Gegenüber absolut trockener Holzmasse reduziert sich das gebundene CO₂ von 1,83 kg CO₂ auf 1,09 kg CO₂ pro kg Holzspäne. Bezogen auf den Anteil der Holzspäne in der Rezeptur (10 M.-%) sind das 0,109 kg CO₂. Ohne diese Gutschrift trüge die Bereitstellung der Ausgangsstoffe mit ca. 8,98E-03 (0,0089) kg CO₂ oder 22 % zu den Treibhausgasemissionen bei. Das gesamte GWP ohne Gutschrift für gebundene Kohlenstoffe würde sich auf +4,3E-02 (0,043) kg CO₂equiv./kg LMM „leicht“ erhöhen (Abb.3.2.4, Ausgangsstoffe ohne CO₂ Gutschrift).

Kraftpapiersäcke tragen mit 0,003 kg CO₂equiv. oder 5 % zum GWP von getrockneten LMM bei und wurden deshalb in die Berechnung des GWP einbezogen. Eine Gutschrift für stoffliche oder energetische Verwertung der Papiersäcke ist nicht darin enthalten.

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

3.2.2 Muster-UPD Lehmsteine (LS)

Tab. 3.3 bildet die Sachbilanz für beide LS ab. Der Hauptausgangsstoff ist Baulehm. Hauptinputfaktoren sind Energieträger für Strom und Wärme. Weitere Inputfaktoren sind die Transporte ins Werk. Outputfaktoren sind Abfälle aus Vorprodukten.

Input / Output	Lehmsteine LS		Einheit	Erläuterungen Rohdichteklassen 1,8 bzw. 1,2 / Anwendungsklassen Ib bzw. Ia nach DIN 18945, LS1 = LLS
	LS2 / AK Ib (1.800 kg/m ³)	LS1 / AK Ia (1.200 kg/m ³)		
INPUT				
Ausgangsstoffe				
Baulehm	1,0	0,9	kg/kg LS	Primärgrubenlehm
Holzspäne, unbehandelt	-	0,1	kg/kg LS	nach Rezeptur unterschiedlich
Energie / ET				
Strom	0,0085	0,0085	kWh/kg LS	Strom aus Wasserkraft; Dosieren, Mischen, Transportbänder
Erdgas (technische Trocknung)	0,22	-	kWh/kg LS	berechnet nach Verdampfungsenthalpie des Wassergehaltes bei Formgebung
FW / Verpackungen				
Frischwasser FW	0,01	0,007	l/kg LS	IM A1 - A3
Holzpaletten	0,02	0,02	kg/kg LS	Mehrweg
PE Folie	0,0002	0,0002	kg/kg LS	t > 20 µ; 2 m ² pro Palette mit 1 m ³ LS
OUTPUT				
Abfälle	0,0006	0,0001	kg/kg LS	aus Vorketten

Tab. 3.3 Sachbilanz der untersuchten LS

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

Die in Tab. 3.3 aufgelisteten mineralischen und pflanzlichen Zusätze entsprechen der DIN 18945. Die Hersteller haben spezifische Rezepturen mit abweichenden Anteilen der einzelnen Komponenten. Als pflanzlichen Zusatzstoff nutzen die Hersteller für LS1 unbehandelte Holzspäne (hier: rund 10 M.-%).

Die Herkunfts- und Verbrauchsangaben zum Strom basieren auf Rechnungsangaben der Energielieferanten für vergleichbare Dosier- und Mischverfahren, z. B. LMM.

Der Berechnung des Wärmeenergiebedarfs zur technischen Trocknung von LS, AK Ib (w = 20 %, bildsam) liegt das oben beschriebene Rechenmodell [7] (Verdampfungsenthalpie) nach folgender vereinfachter Formel zugrunde. Als Energieträger wurde Erdgas angenommen:

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

Q = zur Verdampfung aufgewendete Wärmeenergie in kJ

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

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

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

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

Der Primärenergieinput PEI für die Herstellung von LLS, AK Ia mit Freilufttrocknung beträgt in den IM A1 – A3, einschließlich der Vorkette zur Bereitstellung des Grubenlehms und der elektrischen Energie 0,41 MJ/kg LLS (Abb. 3.2.5).

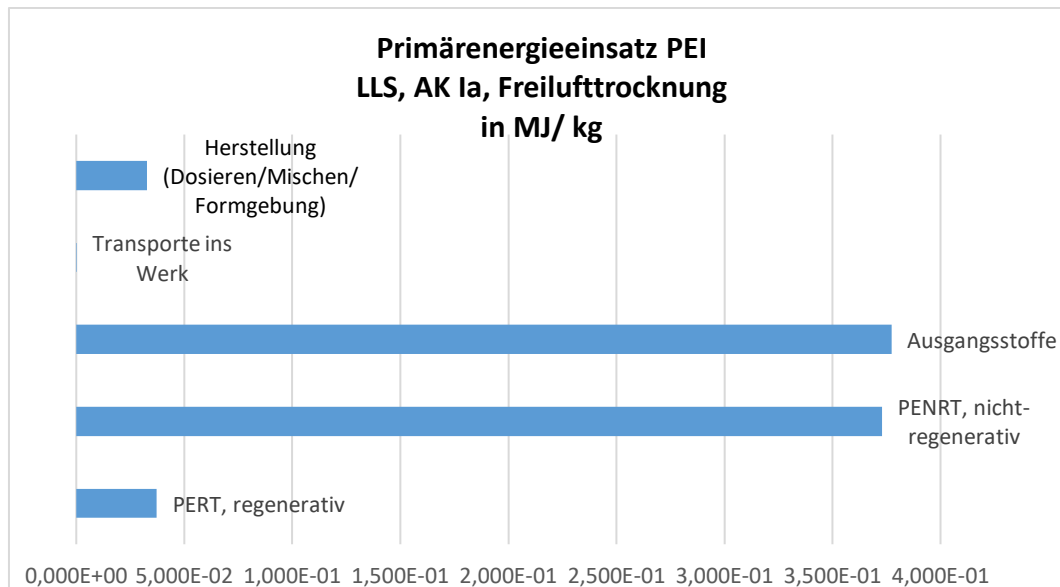


Abb. 3.2.5 Primärenergieeinsatz PEI für LLS, AK Ia, Freilufttrocknung

Der größte Anteil am gesamten PEI entfällt mit 0,377 MJ / kg LS oder 92 % auf die beiden Ausgangsstoffe Primärgrubenlehm (90 M.-%) und Holzspäne (10 M.-%). Dabei trägt der Betrieb einer Lehmgrube zur Bereitstellung des Primärgrubenlehms für die LS nur mit 0,042 MJ / kg LS oder 11 % zum Energieeintrag bei. Der Hauptanteil (89 %) ergibt sich aus der Bewertung der Holzspäne nach massebezogener Allokation aus der Schnittholzproduktion. Der Gewichtsanteil des Kuppelproduktes „Holzspäne“ wird auf den Gesamtenergieinput der Schnittholzproduktion bezogen. Der Energiebedarf für die Prozessschritte zu mechanisierter Herstellung beträgt mit 3,3E-02 MJ/kg LS, AK Ia knapp 8 % des gesamten Primärenergieinput (Abb. 3.2.5). Die Transporte ins Werk (1,38E-04 MJ/kg LS, AK Ia) entstehen durch die Bereitstellung von Holzspänen aus Sägewerken im angenommenen Umkreis von 50 km. Primärgrubenlehm stammt aus einer Lehmgrube auf dem Werksgelände (z. B. Ziegelei) ohne Transportaufwand.

Abb. 3.2.6 zeigt die Verteilung des gesamten Primärenergieeinsatzes in Höhe von 9,45E-01 MJ / kg LS für technisch getrocknete LS der AK Ib. Die LS, AK Ib bestehen zu 100 % aus Baulehm. Dieser stammt aus Gruben der unmittelbaren Umgebung der Ziegeleien, die LS als weitere Produktkategorie neben Ziegeln herstellen. Transporte von Ausgangsstoffen ins Werk (IM A2) entfallen.

In Abb. 3.2.6 wird deutlich, dass die technische Trocknung einen nahezu doppelt so hohen Energieinput (92 % = 8,7 MJ/kg LS) im Vergleich zur Freilufttrocknung erfordert. Die spezifische Verdampfungsenthalpie von 2.038 kJ/kg Wasser bei 20 M.-% Wassergehalt in der Mischung (und der Restfeuchtegehalt nach Trocknung von 5 M.-%) ergeben den physikalisch hergeleiteten Wärmebedarf zur Trocknung von 0,22 kWh / kg LS. Als worst case Szenario geht die Primärenergie zur Bereitstellung des Energieträgers „Erdgas“ mit 4 MJ / kWh Erdgas in die Berechnung ein. Dementsprechend überwiegt der Anteil nicht-regenerativer Primärenergie (PENRT) mit 96 %. Regenerative Primärenergie, z. B. Strom aus Wasserkraft, hat nur einen Anteil von 4 %. Mögliche Energieeinsparpotenziale durch Optimierung der Trocknungsverfahren (z. B. Strömungsführung, Abluftnutzung) bleiben herstellereinspezifischen UPD vorbehalten.

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

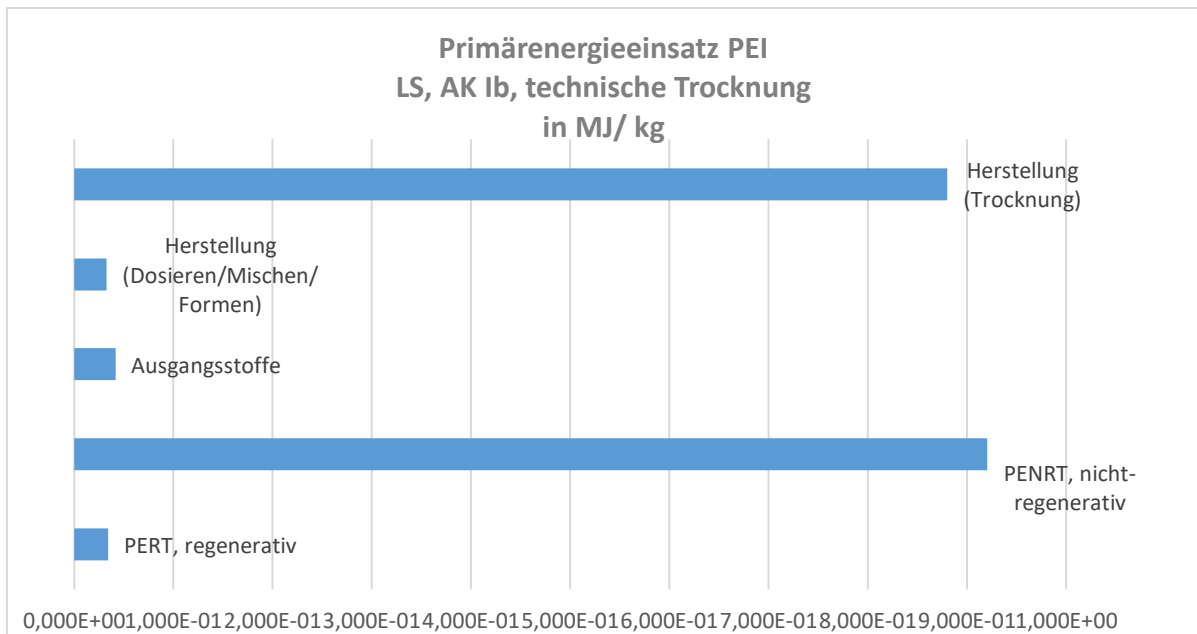


Abb. 3.2.6 Primärenergieeinsatz PEI für LS, AK Ib, technische Trocknung

Bei LLS, AK Ia ergibt sich über die IM A1 – A3 summiert ein negatives Treibhausgaspotential (GWP 100) von $-1,10E-01 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv. / kg LS}$ (Abb. 3.2.7).

Ursächlich für die Senkung der Treibhausgaspotenziale ist der in den Holzspänen (10 M.-% der Mischung) gespeicherte Kohlenstoff mit $0,12 \text{ kg / kg Holzspäne}$. Dagegen stehen die Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Lehmgrube mit $2,93E-03 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv. / kg Primärgrubenlehm}$ und die Bereitstellung der Holzspäne selbst mit $8,55E-03 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv. / kg Holzspäne}$. Der Transport der Holzspäne über 50 km mit LKW (EURO 5) mit 34 – 40 t zulässigem Gesamtgewicht und 27 t Nutzlast im Speditionsverkehr bei 85 % Auslastung verursacht $6,4E-06 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv. / kg Holzspäne}$. Der Herstellungsprozess mit 30,6 MJ/t Strom aus Wasserkraft ergibt ein Treibhausgaspotential von $3,67E-05 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv. / kg LLS, AK Ia}$. Insgesamt bleiben die Transporte und der Herstellungsprozess mit zusammen 0,04 % des GWP unterhalb des Abschneidekriteriums. Ohne die CO_2 -Gutschrift für Holzspäne würde das Treibhausgaspotential aus den IM A1 –A3 zusammen auf $1,12E-02 \text{ kg CO}_2 \text{ equiv. / kg LLS, AK Ia, Freilufttrocknung}$ ansteigen.

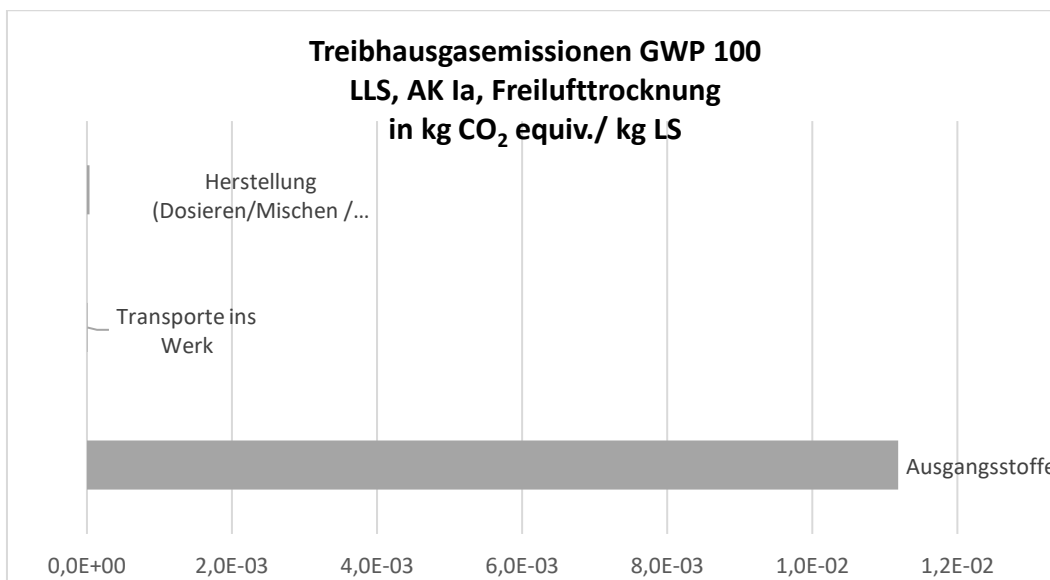


Abb. 3.2.7 Treibhausgaspotentiale (GWP 100) LLS, AK Ia, Freilufttrocknung

Die technische Trocknung von LS der AK Ib führt zu einem anderen Bild der Treibhausgasemissionen (Abb. 3.2.8). Mit Erdgas als Energieträger für den Wärmebedarf zur Trocknung ergibt eine Bilanz des GWP in IM A1 – A3 insgesamt $5,52E-02$ kg CO₂ equiv. / kg LS, AK Ib (Abb. 3.2.8).

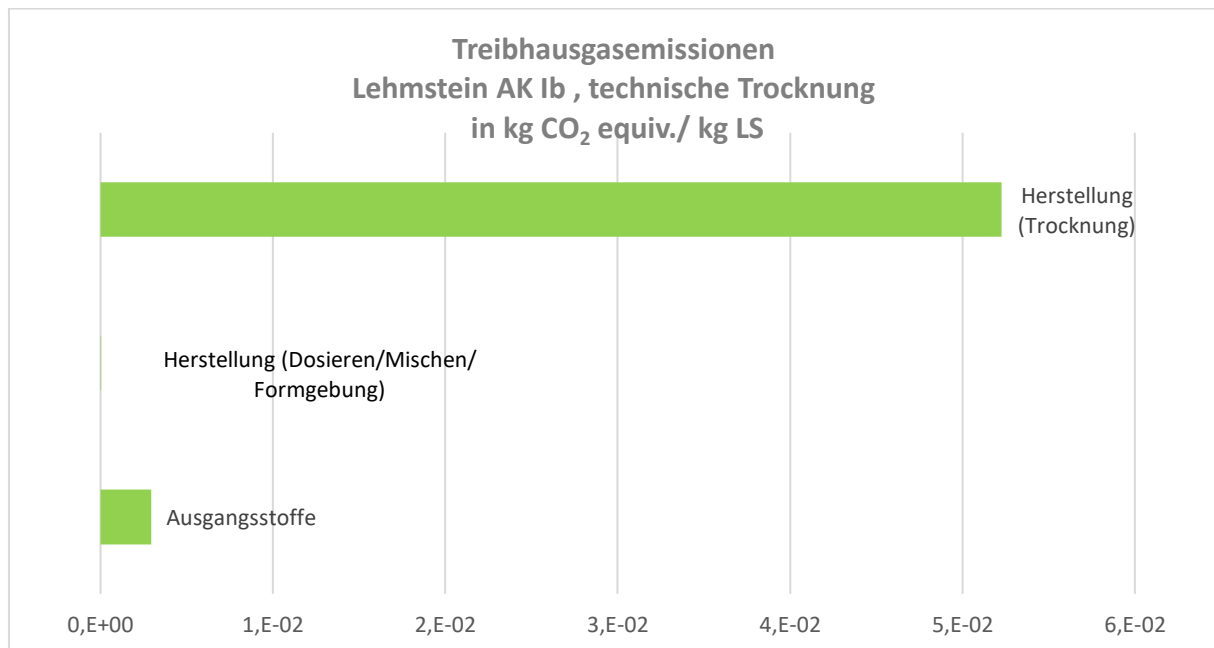


Abb. 3.2.8 Treibhausgaspotentiale (GWP 100) LS AK Ib, technische Trocknung mit Erdgas

Die Rezeptur enthält 100 M.-% Baulehm als Primärgrubenlehm auf dem Werksgelände (z. B. Ziegelei). Daher entfallen Transporte von Ausgangsstoffen ins Werk (IM A2). Der Betrieb der Lehmgrube trägt mit $2,93E-03$ kg CO₂ equiv./kg LS (knapp 5 %) zum GWP bei. Anders als bei LLS, AK Ia gibt es keine CO₂-Gutschriften aus der Beimengung von Holzspänen (Abb. 3.2.8). Knapp 95 % der Treibhausgaspotentiale entfallen auf den Trocknungsprozess, die Vorbereitung der LS (Dosieren / Mischen / Formgebung) trägt marginal (im Diagramm nicht darstellbar) mit 0,07 % zu den Treibhausgasemissionen bei.

Der Anteil der Trocknung mit $5,23E-02$ kg CO₂ equiv./kg LS, AK Ib ergibt sich rechnerisch aus einem theoretischen Ansatz, abgeleitet aus der spezifischen Verdampfungsenthalpie des Wassergehaltes bei Formgebung der LS [7]. Im Sinne eines worst case_Szenarios wurde Erdgas als Energieträger unterstellt (Abb. 3.2.8), aus dem sich der spezifische Wärmebedarf für die Verdampfung des Anmachwassers in der Arbeitsmasse der LS ergibt. Der Wärmebedarf von 0,22 kWh/kg LS, gedeckt aus Erdgas, verursacht ein Treibhausgaspotential von $5,23E-02$ kg CO₂ equiv./kg LS, AK Ib.

3.2.3 Muster-UPD Lehmplatten (LP)

Erdgas ist der Energieträger für die Kraft-Wärme-Kopplung mit BHKW und trägt mit einer Schwankungsbreite von 3.018 – 4.822 MJ/m³ (einschließlich Vorketten bis Bereitstellung des Erdgases) mit bis zu 86 % wesentlich zum durchschnittlichen Gesamtenergieeinsatz von 5.600 MJ/m³ LP bei. Dementsprechend überwiegt nicht regenerative Primärenergie (PENRT) mit rund 98 % in der Energiebilanz (Abb. 3.2.9).

Bei diesen Prozessen entfällt ein geringer Anteil des Gesamtenergieeintrages (PET = PENRT + PERT) auf den Ausgangsstoff Baulehm, einschließlich der Transporte zum Werk. Die werkseitige Bereitstellung des Baulehms verbraucht nur ca. 9 % der gesamten Primärenergieeinsätze (Abb.3.2.9: Ausgangsstoffe, Transporte). Der restliche Energieinput entfällt auf die Vorketten zur Gewinnung von Sand, Pflanzenfasern, Holzspänen,

Stärke und Armierungsgewebe. Dabei fiel auf, dass ein zur Oberflächenbewehrung verwendetes Glasgewebe (ca. 160 g/m²) allein schon 18 % des genannten PEI für Ausgangsstoffe dieses einzelnen Herstellers ausmacht. Ohne Glasfasergewebe würde sich der durchschnittliche PEI für Ausgangsstoffe in der Muster UPD insgesamt von 728 MJ/m³ auf ca. 660 MJ/m³ vermindern.

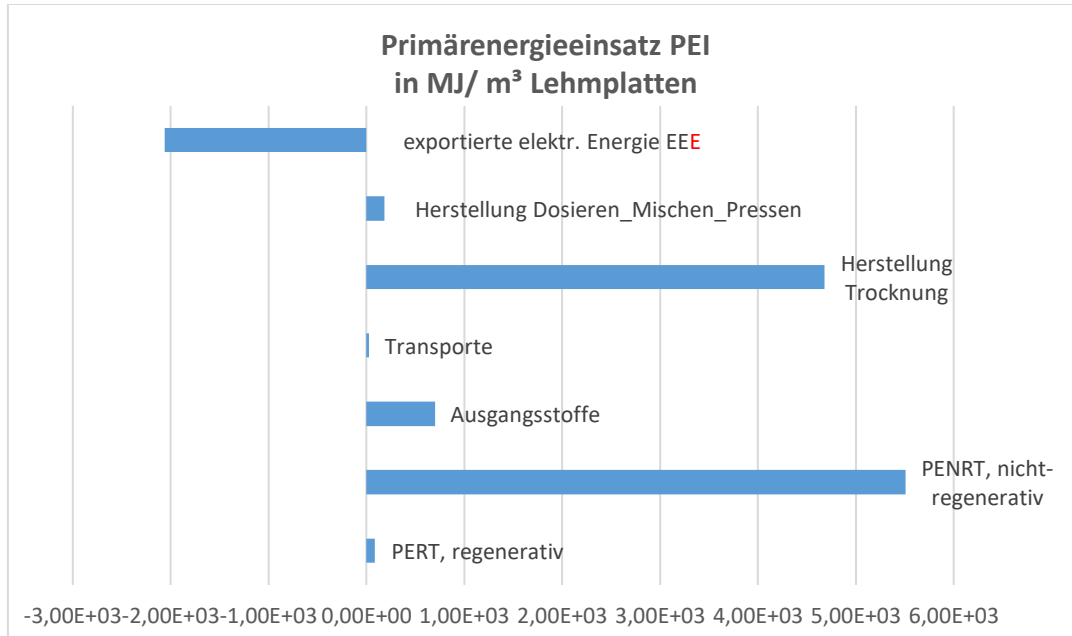


Abb. 3.2.9 Primärenergieeinsatz PEI für Lehmplatten (Erdgas)

Dem PEI von insgesamt 5.600 MJ/m³ LP steht die exportierte elektrische Energie (EEE) in Höhe von durchschnittlich 2.060 MJ/m³ LP aus der Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) der BHKW gegenüber. Der Eigenverbrauch für den Pressvorgang und weitere Prozesse ist dabei bereits heraus gerechnet, die EEE ist der Netto-Stromüberschuss. Zur Allokation der gekoppelten Energieströme wurde ein Exergie-Ansatz gewählt. Ausgehend vom durchschnittlichen Wärmebedarf für die Trocknung in Höhe von 4.681 MJ/m³ LP (Abb. 3.2.9) und dem dafür notwendigen bekannten Gasverbrauch von 60,6 m³/h des Muster-BHKW errechnet sich die daran gekoppelte Netto-Strommenge mit durchschnittlich 2.060 MJ/m³ LP. Der unterstellte elektrische Wirkungsgrad beträgt 33 % bei einem Umwandlungsverlust von ca. 13 %.

Die Trocknung verursacht im nach Produktionsvolumina ermittelten Durchschnitt 83,5 % des gesamten PEI. Abb. 3.2.9 veranschaulicht, dass Optimierungsbedarf hinsichtlich alternativer Trocknungsverfahren besteht.

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

Demnach ergibt sich ein durchschnittliches GWP für die IM A1 – A3 in Höhe von 137 kg CO₂ equiv. / m³ LP (Abb. 3.2.10).

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

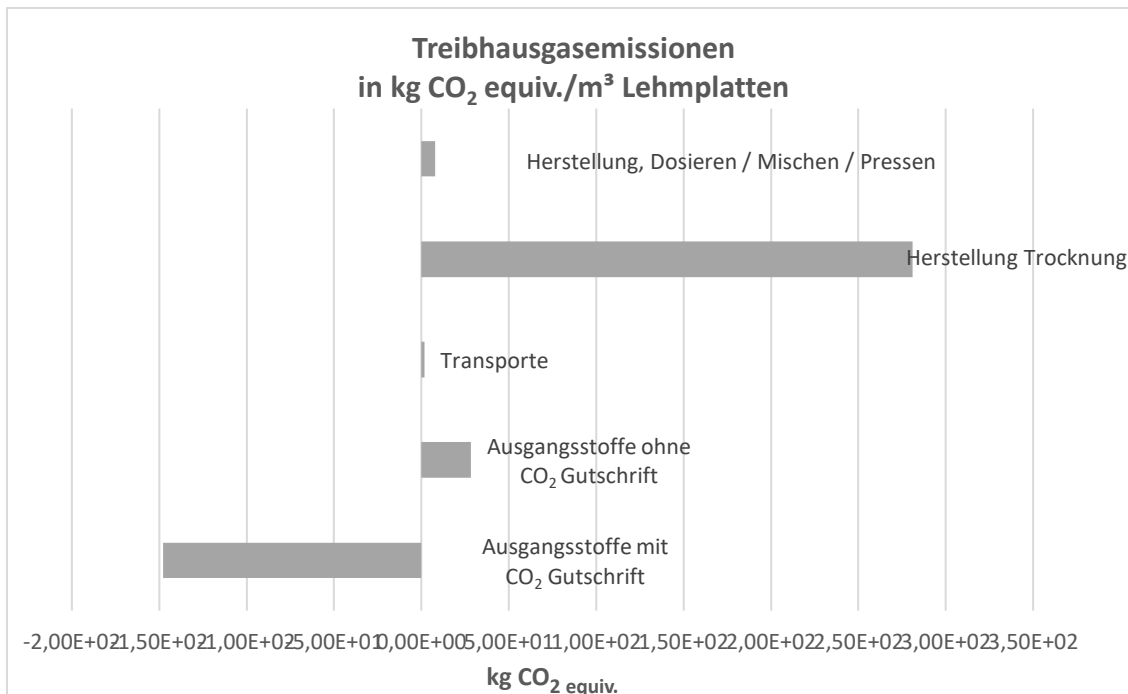


Abb. 3.2.10 Treibhausgaspotenziale (GWP 100) von Lehmplatten (Erdgas)

Hauptenergieträger des Herstellungsprozesses für LP ist Erdgas zum Betrieb wärmegeführter BHKW. Entsprechend des Exergie-Ansatzes zur Allokation der Energieströme der KWK entfallen durchschnittlich 281 kg CO₂ equiv. / m³ LP auf die Wärmeerzeugung mit Erdgas (Abb. 3.2.10, Herstellung Trocknung). Die anderen Prozessschritte in der Fertigung speisen ihren Strombedarf überwiegend aus der KWK des BHKW. Der Zusatzstrom und die Dieselverbräuche im Werk summieren sich auf 8 kg CO₂ equiv. / m³ LP für diese mechanischen Fertigungsschritte. Transporte zum Werk tragen mit 2 kg CO₂ equiv. / m³ LP zu den Treibhausgaspotenzialen bei. Die Hersteller verfügen über Lehmgruben im Werk oder haben Zulieferer in einem Umkreis unter 20 km.

Im Mix der Ausgangsstoffe trägt Baulehm mit 3 kg CO₂ equiv. / m³ LP oder 2,2 % kaum zum GWP bei. Pflanzliche Komponenten wie Stroh, Hanf, Miscanthus oder Holzspäne sind in einem Bereich von 4 – 12 M.-% / m³ LP enthalten. Die Umrechnung der in Holzspänen enthaltenen Kohlenstoffmenge erfolgt unter Annahme einer Holz-Restfeuchte von 30 %.

Zur Bewertung des gebundenen CO₂ in Pflanzenteilen wurde die Umweltbilanz von Baustroh herangezogen [9]. Darin wird die Speichermasse mit 1,27 kg CO₂/kg Stroh ausgewiesen. Im Vergleich zu allen anderen Ausgangsstoffen der LP, einschließlich Glasfasergewebe, ist der in den pflanzlichen Rohstoffen gebundene CO₂-Gehalt am größten. Am Ende des Lebenszyklus werden LP stofflich verwertet. Deshalb verbleibt das gebundene CO₂ auch danach im Stoffkreislauf.

Ohne diese CO₂-Gutschriften erhöht sich das GWP 100 für Ausgangsstoffe IM A1 von -148 auf +28,4 CO₂ equiv./m³ LP (Abb. 3.2.10, Ausgangsstoffe ohne CO₂-Gutschrift). Das gesamte Treibhausgaspotenzial würde sich von 137 auf 319 kg CO₂ equiv. / m³ LP mehr als verdoppeln. Auch bei dieser Bewertung bleiben die Klimawirkungen des Energieträgers Erdgas zur Trocknung der LP mit dann 88 % Hauptursache der Treibhausgasemissionen.

Im Herstellerseminar des DVL am 16.09.2022 konnte diese Umweltwirkung der technischen Trocknung besonders erörtert werden, um Alternativen anzuregen. Inzwischen wurden andere Trocknungsverfahren ohne fossile Energieträger bekannt, wie z. B. die passive Solartrocknung in dem von der DBU geförderten Projekt mit dem Aktenzeichen 35520.

3.3 Rückgewinnungspotenziale – Methodik, Berechnungsgrundlagen und experimentelle Überprüfung

Der zweite Teil des Projektes umfasst die bisher nicht behandelten Module Gebäudeabriss (C1), Abfallaufbereitung (Modul C3) und Rückgewinnungspotenziale (Modul D) in der Ökobilanz von Lehmbauprodukten.

Bei der Aufbereitung und Wiederverwertung von Recyclinglehm wird die Möglichkeit der Replastifizierung trockenen Lehms genutzt – ein Alleinstellungsmerkmal von Lehmbaustoffen. Im Recyclinglehm ist das Bindemittel „Tonminerale“ bereits / immer noch enthalten, das bei Wasserzusatz reaktiviert wird. Rezyklate aus anderen mineralischen Baustoffen (Beton, Ziegel) können ihre ursprünglichen Bindemittel (Zement, Ton) nicht reaktivieren. Sie können „nur noch“ als körnige Zusatzstoffe in der Mischung verwendet werden. In jedem Fall ist ein erneuter Bindemittelzusatz (Beton / Zement) mit entsprechenden Energieeinträgen / Umweltwirkungen erforderlich.

Ausgehend von den erarbeiteten methodischen Grundlagen entstand eine Systematik des Rückgewinnungsmoduls D in allen Muster-UPD mit drei definierten Verwertungswegen D1 – D3:

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

Diese Differenzierung des Moduls D nach den erarbeiteten begrifflichen Grundlagen des Recyclings von Lehmstoffen ist ein Novum und zentrales Ergebnis dieses Teils des Projektes.

Der Abriss bzw. die Demontage realitätsnaher Wandaufbauten konnten an der FH Potsdam erprobt werden, ebenso zwei Aufbereitungstechniken. Nach Abriss von LSM und Demontage von LP wurden die Abfälle nass und trocken aufbereitet. Aus Lehmabbruchmaterial wurden neue Prüfkörper für LS und LP nach originären Herstellungsprozessen hergestellt (Modul D2) und die bautechnischen Kerneigenschaften im Labor ermittelt. Ebenso fand ein Experiment zu Modul D3 statt, bei dem aus Lehmsteinbruch neuer Lehmörtel gefertigt wurde. Die bautechnischen Eigenschaften unbeschädigter LS zur Wiederverwendung wurden im Labor untersucht und mit neuen LS verglichen.

Nachfolgend wird der mögliche Aufwand für die Aufbereitung von Lehmabbruchmaterial nach Modul C3 näher betrachtet (*Abb. 3.3.1*). Danach werden die Rückgewinnungspotenziale in den Modulen D1 bis D3 jeweils für LS und LP dargestellt.

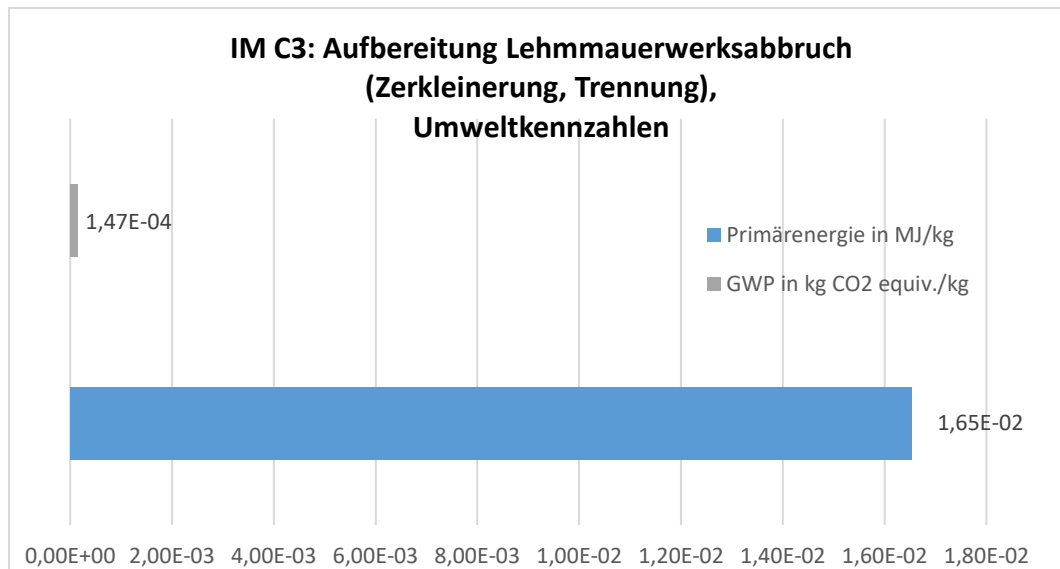


Abb. 3.3.1 Umweltkennzahlen der Aufbereitung von Lehmmauerwerksabbruch (Modul C3)

Modul C3 unterstellt maschinelle Zerkleinerungsprozesse mit stationär / mobil einsetzbaren Maschinen, deren Leistungsdaten in die Bilanzierung eingingen. Diese Aufbereitungstechnik eröffnet zusätzliche Rückgewinnungspotenziale zur Wiederverwertung für andere Lehmbaumstoffe und Weiterverwertung außerhalb des Systems Lehm.

Ausgewählt wurde eine für das Baustoffrecycling typische Prallmühle (Modell: SBM Remax 200) mit 0,23 l/t Dieselverbrauch einschließlich Stromgenerator [10]. Ein zusätzlicher Windsichter mit 30 kW Leistung bei 80 t/h Durchsatz sorgt für die Trennung leichter Pflanzen- und Holzbestandteile von schwereren mineralischen Komponenten. Eine kombinierte trockene Aufbereitungstechnik, bestehend aus Schredder und Windsichter, verbraucht 0,27 l Diesel / t Materialdurchsatz.

Die betrachtete Schredderanlage verbraucht 0,0165 MJ/kg Abbruchmaterial. Die Treibhausgasemissionen bei einem Betrieb mit dem angegebenen Dieselverbrauch betragen 0,00015 kg CO_{2equiv.}/kg Abbruchmaterial. Abb. 3.3.1 zeigt die Kenngrößen der Bilanzierung des IM C3 PEI und GWP.

Diesem Aufbereitungsaufwand steht ein Ertrag aus rückgewonnenem Lehmsteinbruch in den Modulen D2 und D3 gegenüber. Die direkte Wiederverwendung nach Modul D 1 erfordert keine Aufbereitung. Die nachfolgenden Abb. 3.3.2 – 3.3.10 zeigen die Kenngrößen PEI und GWP und deren Einspareffekte je nach Verwertungsweg.

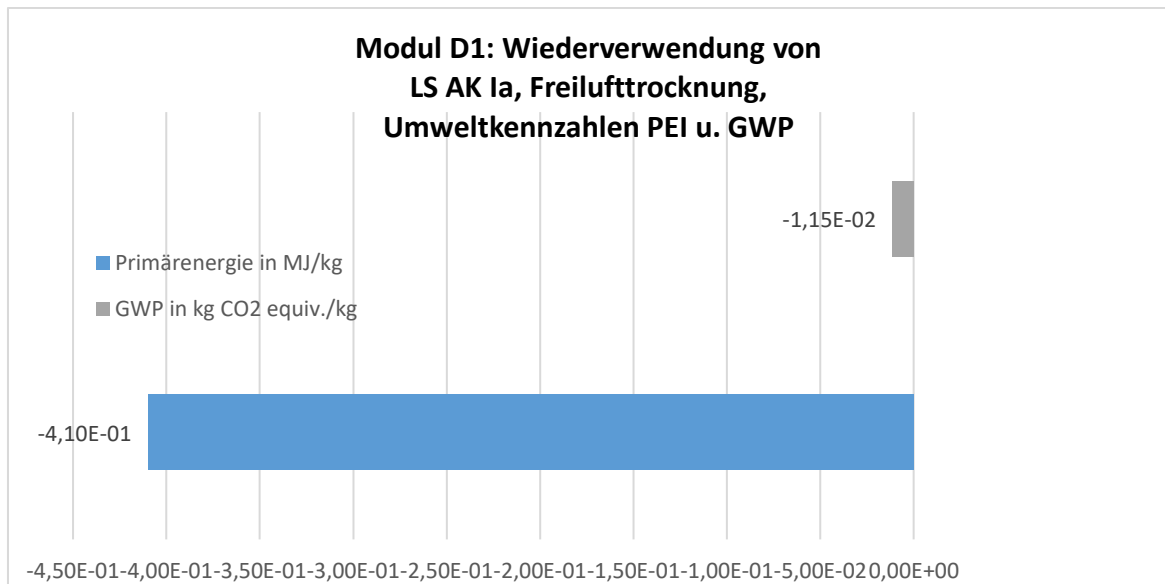


Abb. 3.3.2 Modul D1: Wiederverwendung von LS aus Lehmsteinbruch als LLS AK Ia, PEI u. GWP

Sortenrein und unbeschädigt zurückgewonnene LS AK Ia lassen sich in gleicher Anwendung wiederverwenden. In IM D1 wird der Einspareffekt durch Verzicht auf neu produzierte LS AK Ia in Bezug auf den Primärenergieeinsatz und das Treibhausgaspotenzial quantifiziert. Durch Verzicht auf die Neuproduktion entfällt der Energieinput in den Modulen A1 – A3 für diese LS. Die dadurch verursachten Umweltwirkungen werden vollständig vermieden. Die Wiederverwendung von LS aus Lehmsteinabbruch spart $4,10E-01$ MJ/kg LS Primärenergie und vermeidet $1,15E-02$ kg CO₂ equiv. / kg LS. Transporte vom Gebäudeabbriss zum Ort der Wiederverwendung an einem anderen Gebäude wurden nicht berücksichtigt (Abb. 3.3.2).

Bei sortenrein und brauchbar zurückgewonnenen LS AK Ib ergeben sich andere Umweltkennzahlen als bei LS AK Ia (Abb. 3.3.3). Die Bemessung der Einspareffekte durch Wiederverwendung bezieht sich auf einen anderen Produktionsprozess für neue LS dieser Kategorie. Die Wiederverwendung von LS AK Ib aus Lehmsteinbruch spart $9,45E-01$ MJ/kg LS Primärenergie und vermeidet $5,52E-02$ kg CO₂ equiv. /kg LS. Die Einspareffekte für Primärenergie und die Vermeidung von Treibhausgasen liegt um ein mehrfaches höher als bei LS AK Ia mit Freilufttrocknung. Bei Wiederverwendung dieser LS werden die Energieeinträge und Emissionen durch die technische Trocknung in IM A3 vermieden.

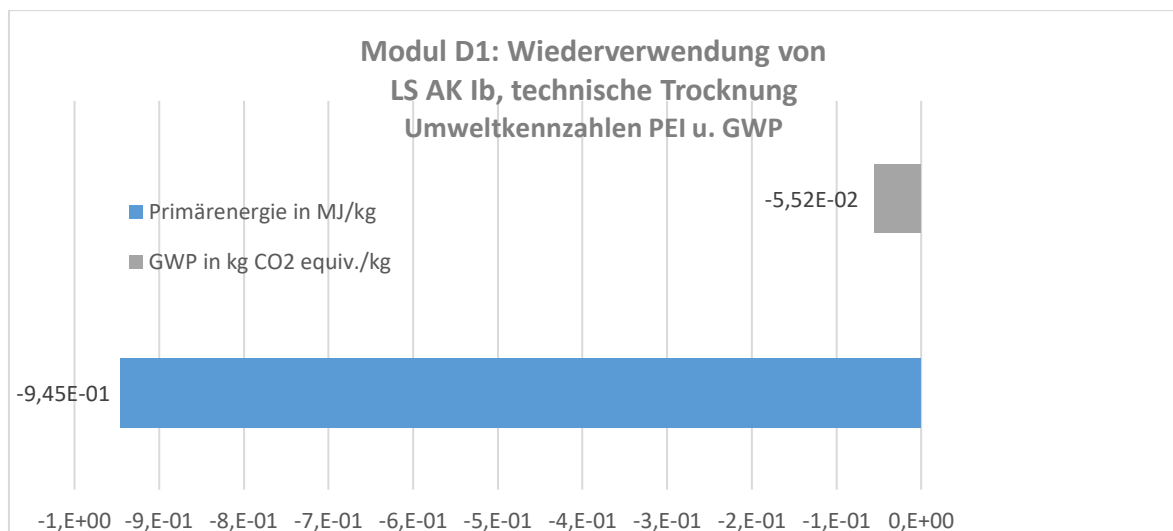


Abb. 3.3.3 Modul D1: Wiederverwendung von LS aus Lehmsteinbruch als LS AK Ib, PEI u. GWP

Bei Wiederwertung von Lehmsteinbruch zur Herstellung neuer LS AK Ia mit Freilufttrocknung nach IM D2 erfolgt die Aufbereitung des Lehmsteinbruches durch „Einsumpfen“ im Werk. Eine mechanische Zerkleinerung ist nicht zwingend erforderlich.

Die Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für neue LS AK Ia substituiert primäre Ausgangsstoffe. Der Primärenergieeinsatz und die Umweltwirkungen aus der Bereitstellung der Ausgangsstoffe Grubenlehm (90 M.-%) und Holzspäne (10 M.-%) in IM A1 können eingespart werden (Abb. 3.3.4). Der Substitutionseffekt für die eingesparte Primärenergie errechnet sich mit $-3,77E-01$ MJ/ kg LLS AK Ia entsprechend. Die vermeidbaren Treibhausgasemissionen belaufen sich auf $-3,49E-03$ kg / kg LLS AK Ia.

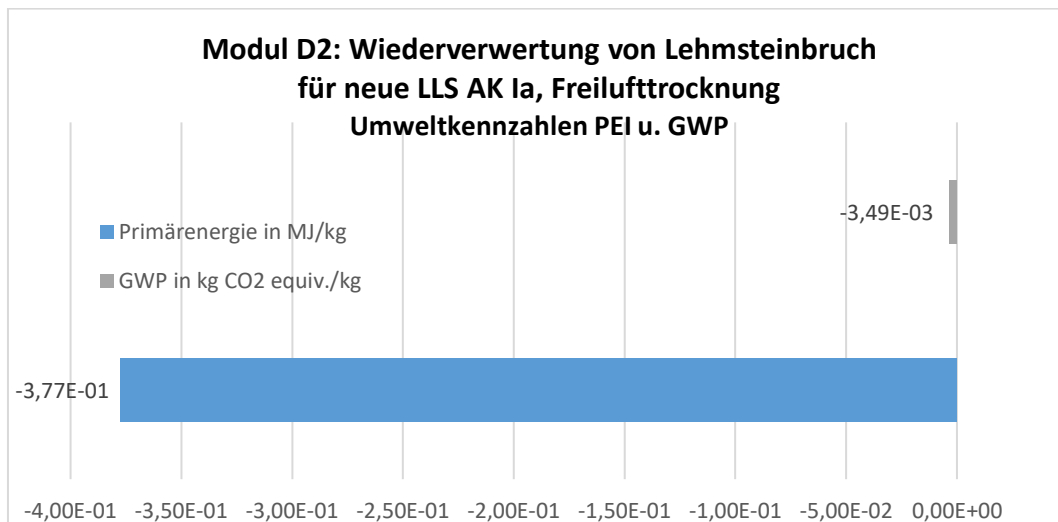


Abb. 3.3.4 Modul D2: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für neue LLS AK Ia, Freilufttrocknung

Bei der Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für die Herstellung von LS AK Ib durchlaufen diese alle Prozessschritte (IM A3) einschließlich technischer Trocknung erneut, so dass keine weiteren Rückgewinnungspotenziale in IM D2 entstehen (Abb. 3.3.5).

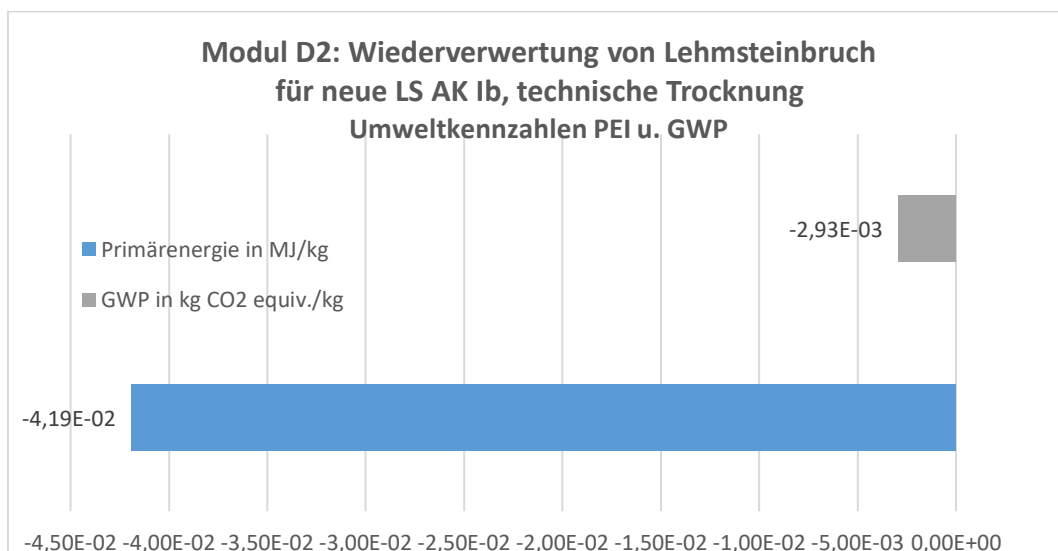


Abb. 3.3.5 Modul D2: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch für neue LS AK Ib, technische Trocknung

Abb. 3.3.6 und 3.4.7 zeigen die Umweltkennzahlen PEI und GWP bei einer Wiederverwertung von aufbereitetem Lehmsteinbruch als Alternative zur Trocknung erdfeuchter Ausgangsstoffe für andere Lehmbaumstoffe (IM D3).

Zu pulverförmigem Lehm-Rezyklat aufbereiteter Lehmsteinbruch eignet sich für Trocken-dosierverfahren. Der Lehmsteinbruch substituiert vorgelagerte Herstellungsprozesse für Trockenlehm. Die Herstellung von Trockenlehm benötigt nach vorliegender Umwelterklärung [11] einen Energieinput mit Erdgas, Diesel und Strom in Höhe von zusammen 0,32 kWh/kg Trockenlehm. Nach Herstellerangaben betragen die Treibhausgasemission 0,078 kg CO₂ equiv. / kg Trockenlehm.

Der Substitutionseffekt in *Abb. 3.3.6* und *3.4.7* bemisst sich nach dem eingesparten Primärenergieeinsatz und den vermiedenen Umweltwirkungen für primär hergestellten Trockenlehm und bereitgestellte Holzspäne. Danach reduziert sich der Einsatz von Primärenergie durch das Lehm-Rezyklat gegenüber der Primärproduktion um 8,87E-01 MJ/kg Lehmsteinbruch aus LLS AK Ia. Der im Lehmsteinbruch enthaltene Anteil von Baulehm (90 M.-%) trägt mit insgesamt 6,09E-02 MJ/kg den Hauptteil dazu bei.

Die Treibhausgasemissionen GWP 100 reduzieren sich um insgesamt 7,73E-02 kg / kg Lehmsteinbruch aus LLS AK Ia im Vergleich zur Primärproduktion der Ausgangsstoffe Trockenlehm und Holzspäne der LS gleicher AK. Jede t Lehmsteinbruch mit LLS AK Ia würde auf diesem Verwertungsweg (IM D3) 245 kWh (882 MJ) einsparen und die Treibhausgasemissionen um 77 kg reduzieren.

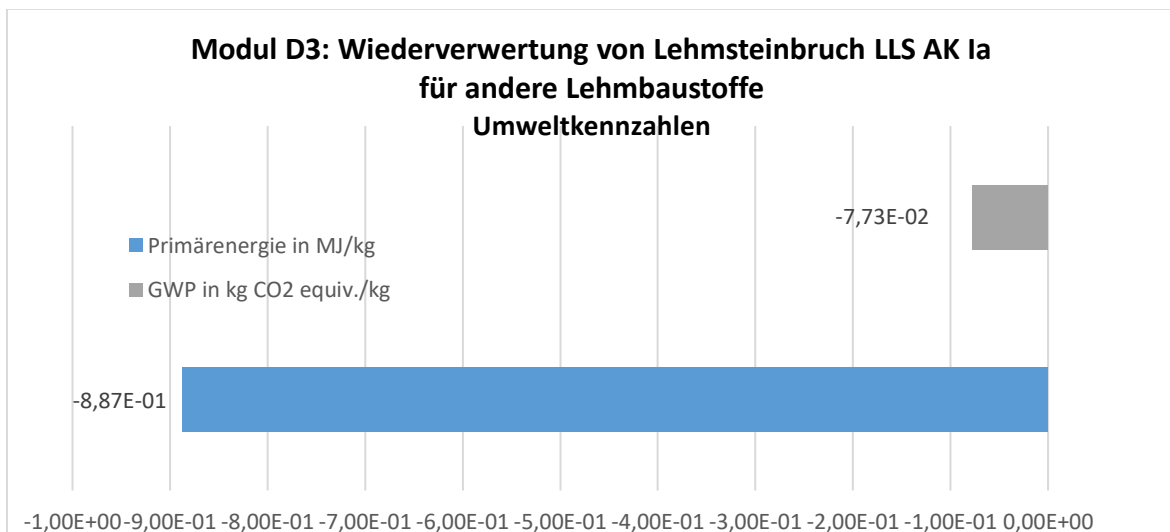


Abb. 3.3.6 Modul D3: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch mit LLS AK Ia als Trockenlehm für andere Lehmbaumstoffe

Abb. 3.3.7 zeigt Umweltkennzahlen PEI und GWP zur Wiederverwertung des im trockenen Zustand rückgewonnenen Lehmsteinbruchs (100 M.-%) aus LS AK Ib als Recyclinglehm (Trockenlehm) für Trockendosierverfahren zur Herstellung von anderen Lehmbaumstoffen, z. B. LPM oder LMM.

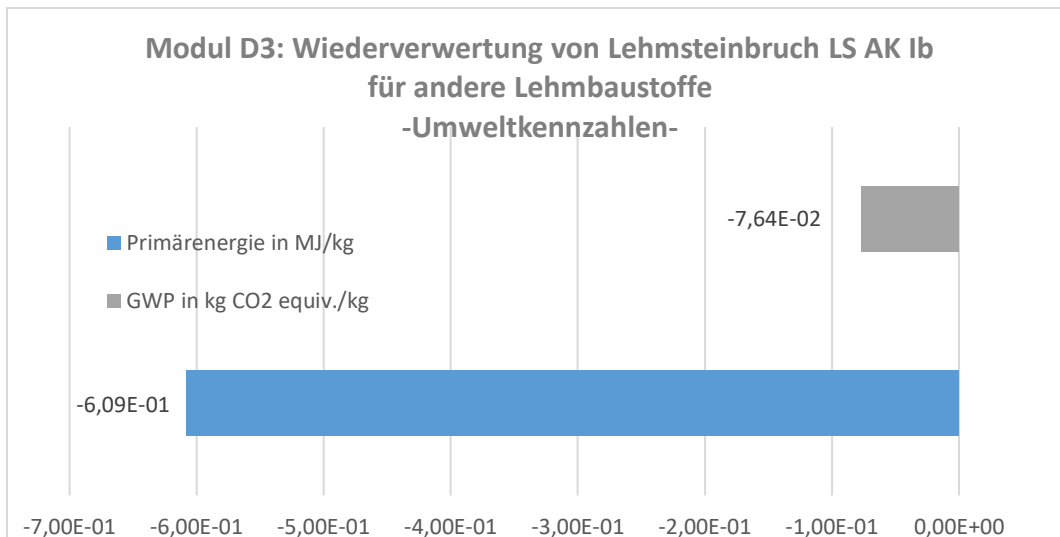


Abb. 3.3.7 Modul D3: Wiederverwertung von Lehmsteinbruch mit LS AK Ib als Trockenlehm für andere Lehmstoffe

Danach reduziert sich der Einsatz von Primärenergie durch das Lehm-Rezyklat gegenüber der Primärproduktion von Trockenlehm um $6,09E-01$ MJ/kg Lehmsteinbruch LS AK Ib. Der Unterschied zu Abb. 3.3.6 für LLS AK Ia entsteht aus unterschiedlichen Stoffzusammensetzungen und insbesondere durch den Rückgewinnungsbeitrag der Holzspäne.

Die Treibhausgasemissionen (GWP) reduzieren sich um insgesamt $7,64E-02$ kg / kg Lehmsteinbruch aus LS „schwer“ AK Ib im Vergleich zur Primärproduktion von Trockenlehm [10]. Jede t Lehmsteinbruch aus LS AK Ib würde auf diesem Verwertungsweg (IM D3) 169 kWh (608,4 MJ) einsparen und die Treibhausgasemissionen um 76 kg reduzieren.

Wird der Aufwand für den Abbruch von LSM und die Aufbereitung durch Prallbrecher gegengerechnet, reduziert sich der Nettoeffekt der Substitution von primären Ausgangsstoffen für andere Lehmstoffe (IM D3 für beide LS) nur minimal um 2,4 – 3,4 % und für die Treibhausgasemissionen um 0,2 %.

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

Demontierte LP können grundsätzlich ohne erneute Produktionsschritte wiederverwendet werden. Wie alle Lehmstoffe lassen sich auch LP mit geeigneten LPM reparieren. Abbruchkanten, die bei Demontage entstehen können, ließen sich damit wieder auffüllen und glätten. Anhaftende LPM aus vorangegangener Nutzung wurden mit Gewebeflächen aufgebracht. Der alte LPM kann mit dem Gewebe manuell abgelöst werden [12]. Diese Anwendungspraxis vorausgesetzt, wurde das Rückgewinnungspotenzial der Wiederverwendung in IM D1 mit einem angenommenen Demontageverlust von 10 M.-% berechnet.

Abb. 3.3.8 veranschaulicht die Rückgewinnungspotenziale im IM D1 unter der Annahme, dass bei einer Demontage von LP ein Verlust von 10 M.-% entsteht, der durch nachträgliche Reparatur ersetzt werden muss. Unter dieser Voraussetzung kann die Wiederverwendung einen großen Teil des sonst erforderlichen Energieinput in Höhe von rund 5.000 MJ/m³ LP einsparen. Ohne den Trocknungsprozess und neue Ausgangsstoffe vermeidet die Wiederverwendung 123 kg CO₂ equiv./m³ LP.

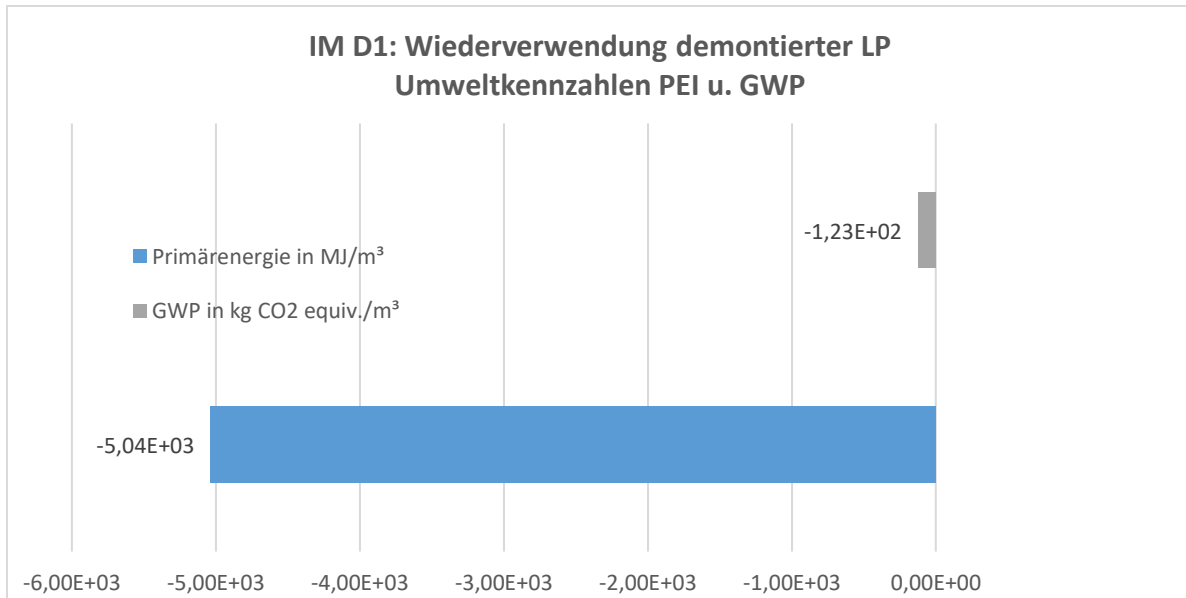


Abb. 3.3.8 Rückgewinnungspotenziale IM D1 – Wiederverwendung demontierter LP

Die Rückgewinnungspotenziale durch Wiederverwertung für neue LP in IM D2 ergeben sich aus der Substitution der originären Ausgangsstoffe durch rückgewonnene Ausgangsstoffe. Die dadurch eingesparten Prozessschritte zur Bereitstellung der Ausgangsstoffe (ohne Transporte) reduzieren den Primärenergieeinsatz um 618 MJ / m³ LP. Bezogen auf die in Abb. 3.3.9 dargestellte Wirkungskategorie GWP werden 26,7 kg CO₂ equiv. / m³ LP vermieden. Gegenüber dem ursprünglichen Herstellungsprozess in den IM A1 – A3 erbringt die Rückgewinnung eine Energieeinsparung von 11%, die Treibhausgasemissionen sinken um 19 % bei Wiederverwertung der Ausgangsstoffe demontierter LP für neue LP.

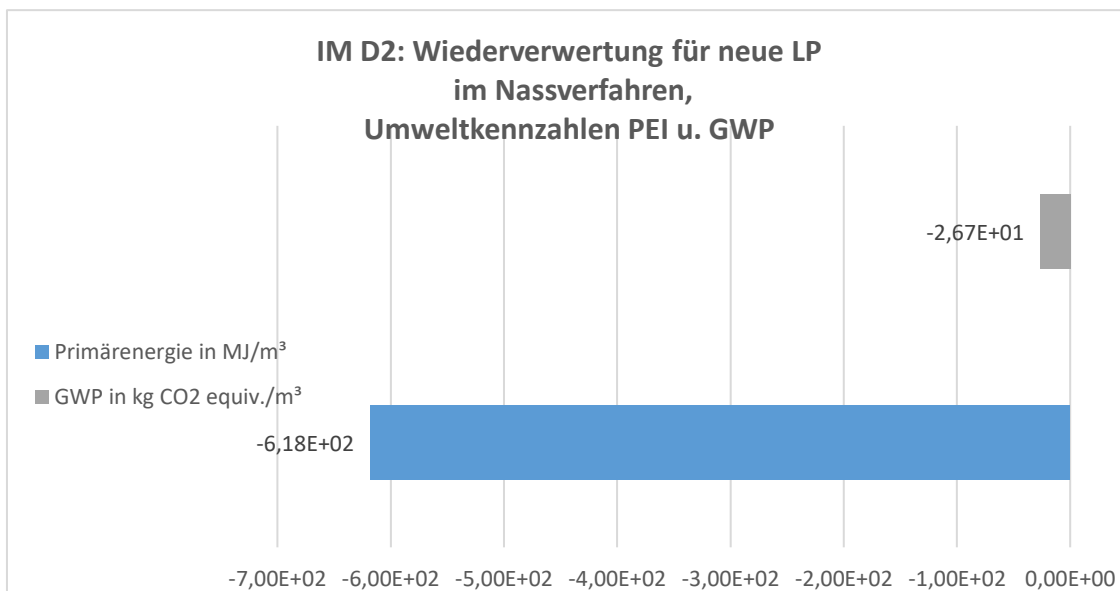


Abb. 3.3.9 Rückgewinnungspotenziale IM D2– Wiederverwertung für neue LP (Nassverfahren)

Die untersuchten LP bestehen zu 87 % aus Baulehm bzw. einem Gemisch aus 42 % Baulehm und 54% Sand. Der Rest sind Pflanzenteile und Holzspäne. Die Entfernung etwaiger Armierungsgewebe ist Teil der manuellen Demontage und wird hier nicht weiter betrachtet oder quantifiziert. Die trockene Lehmfraktion der zerkleinerten LP hat das Potenzial, im Trockendosierverfahren nach Muster UPD-LPM [13] ansonsten künstlich zu trocknenden Baulehm oder Baulehm/Sandgemische zu substituieren (Wiederverwertung im Lehmbau).

Im Trockendosierverfahren entstehen z. B. LPM und farbige LPM. Sofern diese nicht vollständig durch trockene Separationstechniken (z. B. Windsichter) aussortiert wurden, ist die Beimengung von Pflanzenteilen und Holzspänen bei diesen LPM häufig Teil der Rezeptur und ein zulässiger Zusatz (DIN 18947). Die Wiederverwertung in einem anderen Herstellungsprozess bedingt entsprechende Eingangskontrollen und kann Anpassungen für spezifische Rezepturen der Trockendosierung von neuen Lehm- baustoffen erfordern.

Abb. 3.3.10 zeigt die Umweltkennzahlen PEI und GWP bei einer Wiederverwertung des in einer LP enthaltenen Baulehms als Substitut für Trockenlehm im IM D3.

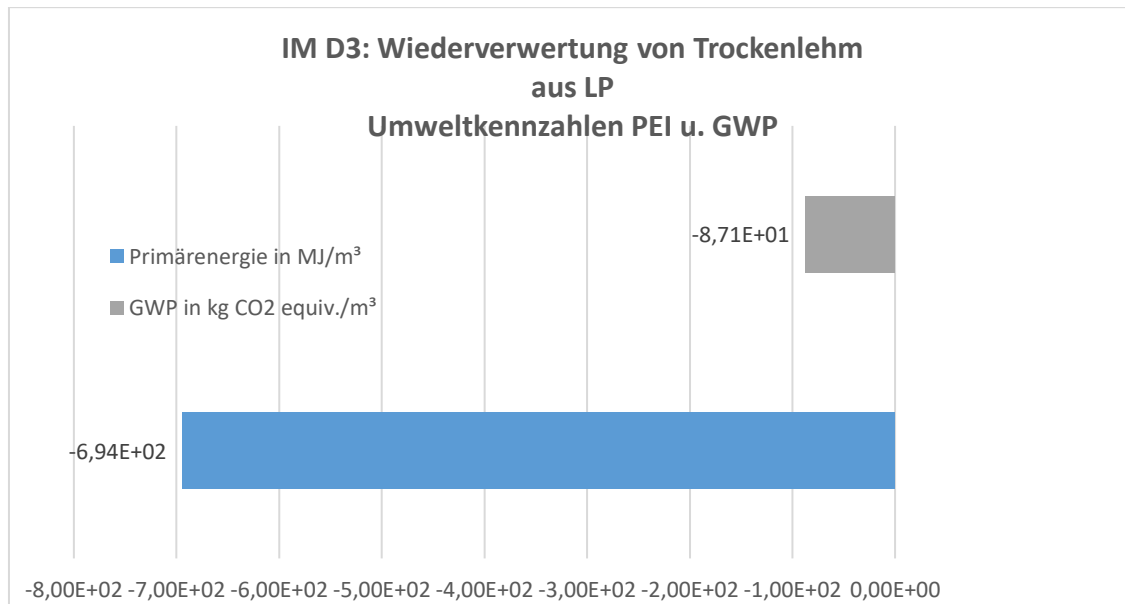


Abb. 3.3.10 Rückgewinnungspotenziale IM D3: Substitution von Trockenlehm

Pflanzliche Zusatzstoffe und Zusatzmittel < 1 M.-% werden nicht einbezogen. Zur Berechnung der Rückgewinnungspotenziale wurde der durchschnittliche Anteil von Baulehm in der Mischung der untersuchten LP angenommen. Eine durchschnittliche LP dieser Ökobilanz enthält nach Zerkleinerung 80 M.-% Baulehm.

Die pulverförmigen Massen der trocken rückgewonnenen mineralischen Bestandteile einer LP eignen sich für gravimetrische Dosierverfahren, wie sie z. B. für LPM [13] angewendet werden. In Abb. 3.3.10 sind zwei Kerngrößen zur Quantifizierung der Rückgewinnungspotenziale dargestellt: der Primärenergieeinsatz PEI und die Treibhausgasemissionen (GWP 100). Die Substitution des Trockenlehms als Ausgangsstoff für trockene Lehm- baustoffe, insbesondere LPM, durch wiederverwertete LP spart PEI in Höhe von 694 MJ/ m³ Alt-LP. Grund dafür ist die Vermeidung der originären Bereitstellung und notwendigen Trocknungsenergie für Baulehm (867 MJ/m³ Trockenlehm). Verglichen mit dem dafür angenommenen Energieaufwand zur Aufbereitung demontierter Alt-LP bleibt eine Netto- Energieeinsparung von 693 MJ/ m³ Alt-LP >99% des in Abb. 3.23 dargestellten Substituti- onseffektes.

Der Substitutionseffekt nach IM D3 vermeidet 87,1 kg CO₂equiv. pro m³ LP Treibhaus- gasemissionen (Abb. 3.3.10). Ursächlich dafür ist die Vermeidung von Treibhausgasemis- sionen für originär bereitgestellten, künstlich getrockneten Baulehm (109 kg CO₂equiv. / m³ Trockenlehm). Unter Berücksichtigung der Aufbereitung mit 0,00015 kg CO₂equiv. pro m³ LP reduziert sich der Netto-Einspareffekt von Treibhausgasemissionen nur marginal < 1%.

3.4 Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung

3.4.1 Kooperation mit den Hochschulpartnern

Beide Hochschulpartner hatten erhebliche Probleme, geeignete wissenschaftliche Hilfskräfte bzw. Mitarbeiter für das Projekt zu rekrutieren. An der *FH Potsdam* sprang der erste Kandidat nach kurzer Zeit ab. Erst im März 2021 meldete sich ein neuer Kandidat, der die gestellte Aufgabe zur Untersuchung von Rückgewinnungspotenzialen von LS und LMM im Rahmen seiner Diplomarbeit bis Projektende bearbeitete. Im April 2022 kam ein zweiter Kandidat dazu, der die Aufgabe zur Untersuchung von Rückgewinnungspotenzialen von LP im Rahmen einer Gradierung zum BS.sc. übernahm. Erst nach Aufhebung der Schließung des Baustofflabors während der COVID-Pandemie und Verlängerung der Projektlaufzeit konnten beide Rückgewinnungsversuche an der FH Potsdam experimentell durchgeführt werden. Die Versuche umfassten:

- simulierte Abbrucharbeiten an zuvor errichtetem LSM,
- Erprobung zweier Aufbereitungstechniken,
- Herstellung neuer LS bzw. LMM aus Abbruchmaterial,
- Prüfung der bautechnischen Eigenschaften der Rezyklate nach DIN.

Zwischenergebnisse lagen zum Ende des Projektes vor und wurden im Rahmen der Abschlussveranstaltung „Baustoffrecycling & Lehmbau“ vorgestellt. Beide Diplomarbeiten sind zum Zeitpunkt des Abschlussberichtes noch in Arbeit bzw. liegen zur Begutachtung vor.

An der *TH OWL* gelang die Einstellung eines wissenschaftlichen Mitarbeiters für das Projekt erst im April 2021. Zusätzlich wurde im Mai 2022 eine wissenschaftliche Hilfskraft im Projekt eingesetzt, um die Grundlagen zur Verbreitung von UPD, national, europäisch und international zu recherchieren.]Nicht allein aufgrund dieser Verzögerungen, sondern um den Anschluss an die inzwischen fortgeschrittenen Projektarbeiten der anderen Partner zu halten, musste die Arbeitsplanung neu strukturiert werden. Der Projektpartner TH OWL konzentrierte sich auf die Verifizierung und Übertragung der Umweltbilanzdaten in Datenbanken. Dazu beschaffte die TH OWL eine einschlägige, mit externen Datenbanken compatible Software „open LCA“ mit Hintergrundinformationen (Ecoinvent) zur Verifizierung und Erstellung der Umweltbilanzen.

Mit diesen Instrumenten konnten die Formatierungsvorgaben der ÖKOBAUDAT des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) erfüllt werden. Ein Antrag auf Eintragung der in diesem und im vorangegangenen DBU-Projekt erstellten Umweltbilanzen wurde beim BBSR gestellt. Die Begutachtung entsprechend der Statuten der ÖKOBAUDAT durch das ibo.at fiel positiv aus, so dass die Gremien des BBSR im Oktober 2022 über den Zugang der Umweltbilanzen aus den beiden Projekten beraten werden. Mit dieser Vorleistung des Kooperationspartners TH OWL soll der DVL auf Dauer in die Lage versetzt werden, nachfolgende Hersteller-UPD (auf Basis der geförderten Muster-UPD) in die ÖKOBAUDAT einzupflegen. Das hat den Vorteil, dass mit dem Eintrag ein Link zu anderen technischen Planungstools verbunden ist. Die Lehmbaumstoffe lassen sich damit einfach und direkt in Planungsrechnungen für Wandaufbauten einbinden.

3.4.2 Zugangshürden zur ÖKOBAUDAT

Der Zugang für kleinere Verbandsstrukturen und einzelne Hersteller zur ÖKOBAUDAT steht vor erheblichen Hürden. Das mehrstufige Prüfverfahren setzt Strukturen nach DIN EN 14025 voraus und verlangt die ausschließliche Nutzung der GABI Datenbank. Gerade bei Lehm und pflanzlichen Ausgangsstoffen hat diese Datenbank, wie andere auch, erhebliche „Wissenslücken“. Im Projekt wurde bei Holzspänen / Strohanteilen auf Fachliteratur oder andere Umweltbilanzen (z. B. für Baustroh die Bilanz des FASBA [9]) zurückge-

griffen. Ebenso ist offen, wie eine Kraft-Wärme-Kopplung zu bewerten ist und bedarf weitergehender Recherchen zur Allokation von Energieströmen. Damit gibt es in zentralen Punkten eine Abkehr von der GABI Datenbank, mit der Folge einer „Degradierung“ nicht nur der im Projekt entstandenen Bilanzen in die eigens für solche Besonderheiten eingerichtete Kategorie der „zusätzlichen Daten“.

3.4.3 Herstellerdaten

Fast alle Hersteller von Lehmbaustoffen in Deutschland sind dem DVL bekannt und größtenteils Mitglieder des Verbandes. Mit einem auf die zentralen Umweltaspekte fokussierten Fragebogen u. a. zu Produktionsvolumina, Ausgangsstoffen, Energieinput, Transporte zum Werk, Abfällen und Abwasser sollte eine originäre Datengrundlage geschaffen werden. Nicht alle Hersteller gaben diese sensiblen Daten bereitwillig preis, trotz Geheimhaltungserklärung des DVL. Immerhin haben drei Hersteller von LP und einer der beiden Hersteller von LMM sich an der Erhebung beteiligt, so dass für diese Produkte eine hinreichende Berechnungsgrundlage vorlag. Anders bei LS. Mangels jedweder originärer Herstellerdaten musste sich die Bilanzierung auf bekannte Angaben zu Ausgangsstoffen und der eigenen Kenntnis über Herstellungsverfahren stützen. Der Energiebedarf für die technische Trocknung von LS konnte jedoch nur physikalisch aus der Verdampfungsenthalpie von Wasser nach plastischer Formgebung nachvollziehbar abgeleitet werden. Mit diesem Ansatz ließ sich der Energiebedarf annähernd bestimmen, nicht aber die Wahl des Energieträgers. Die Muster-UPD unterstellt ein worst case Szenario mit Erdgas als Energieträger und zeigt den Effekt der Alternativen mit Flüssiggas oder Biogas auf. Damit erhalten die Hersteller von technisch getrockneten LS Handlungsoptionen und Anreize, ihre jeweiligen Trocknungsverfahren zu optimieren.

Die beabsichtigte Anreizfunktion zur energetischen Optimierung von technischen Trocknungsprozessen zeigte sich im Austausch mit Herstellern insbesondere über die Ergebnisse zu LP. Beispielsweise ergab sich im Projektverlauf eine Art „spin-off“ zum ebenfalls von der DBU geförderten Vorhaben zur Entwicklung einer LP, die zu 100% mit passiver Solarenergie getrocknet wird. Das Vorhaben mit dem Az.35520 konnte aus diesem Projekt mit unterstützt werden, in dem eine vorläufige Umweltbilanz des neuen Solartrocknungsverfahrens bereitgestellt wurde.

3.4.4 DIN 18940

Unabhängig vom vorliegenden Projekt wurde durch den DIN Normausschuss NA 005-06-08 AA Lehm- und Ziegelbau im Jahr 2022 eine DIN 18940 *Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung* erarbeitet (geplante Einführung März 2023). In diese Norm wurde ein eigenständiges Kapitel „Rückbau und Recycling“ aufgenommen, in dem auf die entsprechenden Muster-UPD des Dachverbandes Lehm e. V. im vorliegenden Projekt verwiesen wird. Damit wurde erstmals in einer Bemessungsnorm das Thema „Ökobilanzierung“ berücksichtigt und mit diesem Projekt ein wichtiger Synergieeffekt erreicht.

3.5 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse des Vorhabens

Bisher gab es zur Umweltbilanz von LMM, LP und LS lediglich generische Daten in der ÖKOBAUDAT, deren Herkunft und Berechnungsgrundlagen sich nicht auf produkttypische und reale Produktionsprozesse beziehen. Die Quantifizierung der Umweltbilanzen der drei Lehmbauprodukte schließt den Kreis mit der im vorangegangenen Projekt entwickelten Muster-UPD für LPM. Damit kann die ökologische Qualität aller vier Lehmbauprodukte mit verifizierten Daten aus der Produktionspraxis und praktischen Versuchen zur

Rückgewinnung belegt werden. Die ökologische Bewertung der untersuchten Lehmbaustoffe zeigt Vorteile und Defizite auf. Die experimentellen Rückbauversuche mit anschließender Baustoffprüfung der Rezyklate nach DIN befassen sich erstmals systematisch mit den besonderen Eigenschaften der Produkte aus Baulehm für deren Rückgewinnbarkeit.

Die Ausgangsstoffe aller untersuchten Lehmbaustoffe bestehen i. w. aus Baulehm, der in einigen Rezepturen bis zu 100 M.-% als Bodenabfall in den Kreislauf des Systems Lehm eintritt. Pflanzliche Zuschläge machen bei den untersuchten Lehmbaustoffen, je nach Rezeptur, bis zu 12 M.-% aus. Das gespeicherte CO₂ ist aus anderen Ökobilanzen, z. B. Baustroh und Holz, bekannt und wird in den hier entwickelten Bilanzen als Gutschrift angerechnet. Die Kombination von pflanzlichen Zusätzen oder unbehandeltem Holzhäcksel hat eine lange Tradition und kennzeichnet den Lehm- (z. B. Leichtlehm-)bau. Diese Besonderheit wird in den Umweltbilanzen mit entsprechenden Gutschriften herausgearbeitet. Auch ohne Gutschriften entfallen aber nur 6 bis 12 % der Treibhausgasemissionen überhaupt auf die Ausgangsstoffe der untersuchten Lehmbauprodukte. Den größten Anteil an diesen relativ geringen Treibhausgaspotenzialen haben Komponenten mit hohem „grauen Energiegehalt“ wie z. B. Armierungsgewebe aus Glasfaser oder Großgebäude aus PE/PP Fasern. Der wesentliche Faktor für den Energieinput und die Umweltwirkungen ist das Herstellungsverfahren mit technischer Trocknung. Die technische Trocknung mit fossilen Energieträgern verursacht z. B. bei LS und LP 95 % bzw. 88 % der gesamten Treibhausgasemissionen dieser Produkte.

Diese Ergebnisse aus den Ökobilanzen haben technologische Auswirkungen. Die Hersteller müssen erkennen, dass die Produktionsverfahren die bestimmende Größe für die Umweltwirkung der Lehmbauprodukte sind und nicht die Rezeptur mit Lehm oder pflanzlichen Zusätzen als Ausgangsstoffen. Die erstellten Ökobilanzen zeigen Defizite der Verfahren auf. Der Effekt einer möglichen Umstellung von Trocknungsverfahren von fossilen Energieträgern wie Erdgas auf regenerative oder zumindest emissionsärmere Energieträger lässt sich im Vergleich zu den hier erstellten Muster-UPD realistisch einschätzen. Beispielfhaft sei auf Verfahren zur Trocknung mit Holzhackschnitzelöfen mit Wärmerückgewinnung oder die oben erwähnte, neu entwickelte 100 % Solartrocknung von LP hingewiesen.

Die experimentellen Projektarbeiten zur Rückgewinnbarkeit von Lehmbaustoffen beinhalteten einen simulierten Abbruch eines großflächigen LSM und die Erprobung von zwei Aufbereitungstechniken für Abbruchmaterial, das keine unmittelbare Wiederverwendung in gleicher Funktion erlaubte. Das Nassverfahren nutzt die Eigenschaft der Replastifizierbarkeit von Lehm mit Wasser. Lehm bindet nicht ab, sondern gewinnt Festigkeit durch Lufttrocknung. Durch Einsumpfen und Mauken im Wasser kann jeder Lehmbaustoff in eine neu verarbeitungsfähige weich-steife Konsistenz zurückverwandelt werden (Abb. 3.5.1). Dieses Verfahren bietet sich insbesondere an, wenn aus den zurückgewonnenen Lehmbaustoffen die gleichen Baustoffe wieder hergestellt werden sollen (Wiederverwertung alter LS für neue LS).

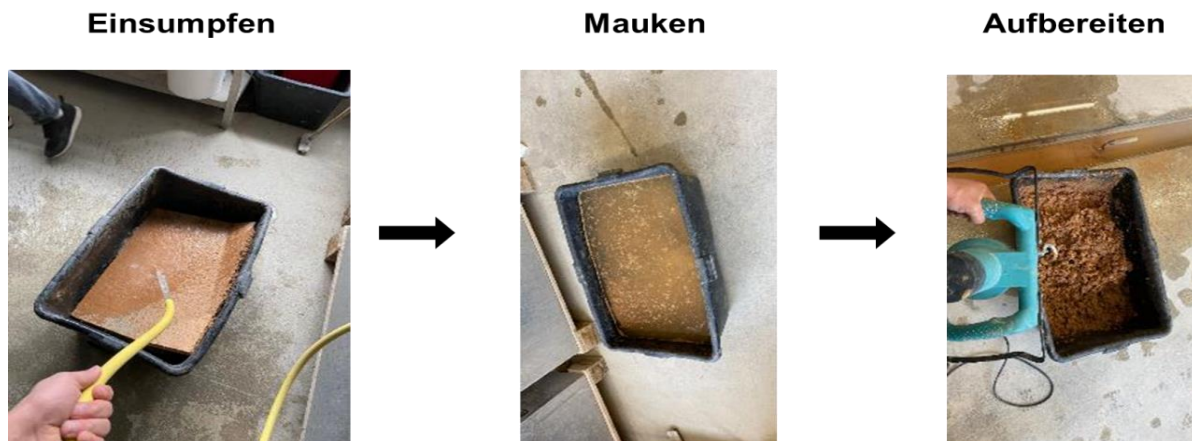


Abb. 3.5.1: Nassverfahren zur Aufbereitung und Wiederverwertung von Lehmabbruchmaterial

Das Trockenverfahren ist eine Alternative zur Rückgewinnung trockener Ausgangsstoffe für andere Lehmbaumstoffe (Abb. 3.5.2). Experimentelle Versuche fanden mit einer Labormühle statt.



Abb. 3.5.2: Trockenverfahren zur Aufbereitung und Wiederverwertung vom Lehmabbruchmaterial

Abb. 3.5.2 zeigt das Zerkleinern von Abbruchscherben in einer Labormühle (links) zu feinkörnigem, pulverförmigem Trockenlehm (mittig). Das trockene Lehmabbruchmaterial wurde zu LPM verarbeitet (rechts), der bei einer Wiederverwertung im Trockendosierverfahren hergestellt werden würde.

Größere, industrielle Backenbrecher oder Prallmühlen sind typische Anlagen im Baustoffrecycling. Die Leistungsdaten eines industriellen Prallbechers eigneten sich als reale Größenordnung zur Quantifizierung des energetischen Aufwandes und der Umweltwirkungen der trockenen Aufbereitung. Dem Modul C3 liegen die Leistungsdaten eines mobil und stationär einsetzbaren Prallbrecher zugrunde.

Das Trockenverfahren der Abbruchaufbereitung bietet sich an, um mineralische Komponenten oder mineralisch/pflanzliche Gemische als neue Ausgangsstoffe für Trockendosierverfahren zur Herstellung neuer Lehmbaumstoffe, z. B. LPM, zu nutzen. Damit entfällt der sonst erforderliche Trocknungsprozess für diese rieselfähigen Trockenkomponenten der Rezepturen. Die Ersparnis des Energieinputs durch Verwendung von trocken rückgewonnenem Baulehm aus Abbruchmaterial bestimmt das Rückgewinnungspotenzial in MJ bzw. $\text{CO}_2 \text{ equiv.} / \text{funktionale Einheiten}$ (z. B. kg, m^3).

Die wirtschaftlichen Auswirkungen der Analysen, insbesondere zu Trocknungsverfahren, konnten zu Beginn des Projektes vor dem Ukrainekrieg nicht erahnt werden. Auch bei der

Herstellung von Lehmbaustoffen dient knappes Erdgas als Energieträger. Die Rückgewinnung hat neben der unzweifelhaften ökologischen Kreislaufführung mit Ressourcenschonung unmittelbare wirtschaftliche Auswirkungen. Bei Wiederverwertung des Abbruchmaterials für neue Lehmbauprodukte der gleichen Kategorie (Modul D2) ergeben sich Kostenersparnisse für Ausgangsstoffe, wenn Lehm als Bauschutt wieder in den Prozess zurückgeholt wird. Bei einer Wiederverwertung aus dem Trockenverfahren zurückgewonnener Komponenten dürfte das wirtschaftliche Einsparpotenzial noch größer sein. Der ansonsten nötige Aufwand für Erkundung, Trocknung und Transport von Trockenlehm entfällt. Beide Verwertungswege von rückgebauten Lehmbaustoffen zeigen auch unter worst case Annahmen für maschinelle Aufbereitungstechniken eine positive Energie- und Umweltbilanz. Der Aufwand zur Aufbereitung ist um das 3 bis 4-fache niedriger als der Einspareffekt aus der Wiederverwertung.

Deutlich wurde, dass auch Lehmbaustoffe in verschiedenen Produktkategorien eine homogene Zusammensetzung aufweisen, die überwiegend aus Baulehm besteht. Der in allen DIN für Lehmbauprodukte praktizierte Verzicht auf Beimischung chemisch wirkender mineralischer Bindemittel begünstigt das Recycling, weil dadurch die Replastifizierbarkeit trockener Lehmbaustoffe erhalten bleibt. Damit wird der Abriss oder Rückbau von Lehmbauteilen aus Lehm für Unternehmen der Recyclingbranche interessant.

4. Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse des Vorhabens

4.1 Symposium Baustoffrecycling & Lehmbaustoffe

Zum Anschluss des Projektes veranstaltete die FH Potsdam zusammen mit allen Kooperationspartnern im August 2022 ein Symposium unter dem Titel „Baustoffrecycling & Lehmbaustoffe – Perspektiven für eine Kreislaufwirtschaft im Bauwesen“.

Auf diesem Symposium wurde einerseits das Potential von modernen Lehmbaustoffen für eine nachhaltige Bauwirtschaft und andererseits das übergeordnete Thema des Baustoffrecyclings einer breiten Fachöffentlichkeit vorgestellt. Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller vom Institut für Angewandte Bauforschung (IAB) berichtete über neuere Ansätze im Baustoffrecycling außerhalb des Lehmbaus. Prof. Dr. Rüdiger Schultz-Sternberg vom Brandenburger Landesamt für Umwelt erläuterte die abfallrechtlichen Rahmenbedingungen. In Verbindung mit der Präsentation der Ergebnisse des Projektes, insbesondere zu Rückgewinnungspotenzialen, entwickelte sich ein erster Dialog mit Akteuren des allgemeinen Baustoffrecyclings. Der Dialog soll in einer Reihe an der FH Potsdam fortgesetzt werden.



4.2 Herstellerseminar DVL

Im September 2022 fand ein Seminar für Hersteller an der Materialforschungs- u. Prüfanstalt (MFPA) in Weimar statt. Die Ergebnisse des Projektes wurden vorgestellt, mit Schwerpunkt auf den Energieinput und die Treibhausgasemissionen als Kernindikatoren für die Nachhaltigkeit von Lehmbaustoffen. Der Einsatz von Erdgas als Energieträger für technische Trocknungsprozesse wurde thematisiert und Alternativen vorgestellt. Die Beteiligten erfuhren erstmals von der experimentell durchgeführten Rückgewinnung von Lehmbaustoffen und deren Wirkung in der Umweltbilanz. Die Eigenschaft der Replastifizierbarkeit und die damit verbundenen Rückgewinnungsoptionen von Lehmbaustoffen erkannten die Teilnehmer als neues Argument für ihre Lehmprodukte. Die Teilnehmer erhielten die bis dahin erstellten Muster-UPD für LMM, LP und LS zur kritischen Kommentierung mit auf den Weg.

4.3 ÖKOBAUDAT

Die TH OWL konnte die Grundlagen schaffen, um die errechneten Umweltdaten für alle Lehmbaumstoffe und zukünftige Hersteller-UPD in das zwingend erforderliche Format der ÖKOBAUDAT zu transferieren. Ein Datensatz wurde als Beispiel den Entscheidungsgremien über den Zugang zur ÖKOBAUDAT im BBSR vorgelegt. Nach einer monatelangen Evaluierung der Daten fiel das vorgeschaltete Gutachten zur Aufnahme der Daten positiv aus, so dass die Gremien jetzt über einen Zugang des DVL zur ÖKOBAUDAT entscheiden können. Die Entscheidung steht noch aus.

Im Erfolgsfall entsteht aus dem Projekt heraus ein dauerhafter Übertragungsweg der Umweltbilanzen des DVL in die ÖKOBAUDAT. Viele Berechnungstools zur Nachhaltigkeit sind mit der ÖKOBAUDAT verlinkt, so dass über diesen Zugang eine Verbreitung der Ergebnisse für Planer und Anwender unterstützt wird.

4.4 Graduierungsarbeiten

Mit Projektabschluss begannen zwei Graduierungsarbeiten. Eine Diplomarbeit befasst sich mit den Rückbauversuchen von LSM. Eine Bachelorarbeit behandelt die Rückgewinnung von LP als demontierte LP. Die Abgabefristen laufen noch bis Dezember 2022. Es gibt weitere Anfragen für Graduierungsarbeiten.

4.5. Buchveröffentlichungen

Der Fachbuchverlag Springer plant, die Vorträge des Symposiums an der FH Potsdam als Tagungsband zu veröffentlichen.

Beim gleichen Verlag ist ein Buchprojekt als zusammenfassende Darstellung der Projektergebnisse „UPD Lehm.1/2“ (Autoren: Schroeder, H.; Lemke, M.; Dez. 2023) in Planung.

4.6 DIN

Die Ergebnisse zu Rückgewinnung von Lehmbaumstoffen werden in alle zur Überarbeitung anstehenden DIN für Lehmprodukte aufgenommen. Die neue, im Entwurf vorliegende DIN 18940 für Lehmsteinmauerwerk enthält bereits das Kapitel "Rückbau und Recycling", das unmittelbar Bezug auf die hier entwickelten Muster-UPD nimmt.

Relevante Standards / Literaturhinweise

Standards

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

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

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

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

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

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

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

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

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

DIN EN 12620:2008-07: Gesteinskörnungen für Beton

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

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

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

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

DIN EN ISO 354:2003-12: Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen

DIN EN ISO 717-1:2021-05: Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung

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

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

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

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

Literaturverzeichnis (im Berichtsteil)

- 1 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Lehmbau Regeln – Begriffe, Baustoffe, Bauteile*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage, 3., überarbeitete Aufl., 2009
- 2 Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung AVV) v. 10.12.2001 (BGBl. I, S. 3379), letzte Fassung v. 30.06.2020 (BGBl. I, S.1533)
- 3 Bundesinstitut f. Bau-, Stadt- u. Raumforschung (BBSR) (Hrsg.): *ÖKOBAUDAT – Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung*. SR Zukunft Bauen | Forschung für die Praxis | Band 09, Bonn 2017, <https://www.oekobaudat.de>
- 4 Krakow, L.: *Waschschlamm als Deponiebaustoff – Ein intelligenter Beitrag zur Rohstoffeffizienz und Ressourcenschonung*. Aggregates International 03/2008, S.29 – 37
- 5 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und zur Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG), BGBl. I, 06.10.1994, S. 2705, letzte Neufassung BGBl. I, S.1324 – 1346 v. 22.05.2013)
- 6 Müller, A.: *Baustoffrecycling*. Springer-Vieweg: Wiesbaden 2018
- 7 <https://de.wikipedia.org/wiki/Verdampfungsenthalpie>
- 8 Diederichs, S.; Rüter, S.: *Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz*. Institut für Holztechnologie und Holzbiologie Nr. 2012/1, Hamburg 2012
- 9 Fachverband Strohballenbau Deutschland (FASBA) (Hrsg.): *Umweltproduktdeklaration für Baustroh nach DIN EN ISO 14025 u. DIN EN 15804*. Wien 2014
- 10 <https://www.sbm-mp.at/de/produkte/aufbereitungsanlagen-mobil/mobile-prallbrecher/remax-200.html>

- 11 EMAS D-146-00004: 2. Aktualisierte Umwelterklärung der Stephan Schmidt KG, 2008
- 12 Sommerfeld, M.: *Umweltproduktdeklaration von Lehmbaustoffen – Ermittlung des Rückgewinnungspotenzials*. Unveröff. Diplomarbeit, FB Bauingenieurwesen, FH Potsdam 2019
- 13 Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen für Lehmbaustoffe – Musterumweltproduktdeklaration für die Baustoffkategorie Lehmputzmörtel (Muster-UPD LPM)*. Weimar 2018-10

Weitere Hintergrundquellen

Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Allgemeine Hinweise für die Erstellung von Ökobilanzen und Projektberichten (Teil 2)*. Weimar: 2018-03

Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.): *Qualitätsüberwachung von Baulehm als Ausgangsstoff für industriell hergestellte Lehmbaustoffe – Richtlinie*. Technische Merkblätter Lehmbau, TM 05, Weimar: 2011

Natureplus e. V.: *Vergaberichtlinie 1006 zur Vergabe des Qualitätszeichens, Lehmplatten*. Neckargemünd: 2015-06

Natureplus e. V.: *Vergaberichtlinie 5003 zur Vergabe des Qualitätszeichens, Naturschutz beim Abbau mineralischer Rohstoffe*. Neckargemünd: 2015-04

Bau-EPD (Hrsg.): *Nutzungsdauerkatalog der Bau-EPD für die Erstellung von UPDs*. Bau-EPD GmbH, Wien 2014

Fachverband Strohballenbau Deutschland e. V. (FASBA) (Hrsg.): *Umweltproduktdeklaration für Baustroh nach DIN EN ISO 14025 u. DIN EN 15804*. Wien 2014

<https://www.ecoinvent.org>

www.gemis.de

Schroeder, H.: *Lehmbau – Mit Lehm ökologisch planen und bauen*. Springer Vieweg: Wiesbaden 2019, 3. Akt. Aufl.

Umweltbundesamt (Hrsg.) / Weimann, K. u. a.: *Optimierung des Rückbaus / Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung*. Texte 05/2013, Dessau-Roßlau 2013

Jäger, W.; Hartmann, R.: *Lehmmauerwerk: Entwurfs- und Konstruktionsgrundsätze für eine Breitenanwendung im Wohnbau unter Berücksichtigung klimatischer Bedingungen gemäßiger Zonen am Beispielstandort Deutschland*. Abschlussbericht Forschungsarbeit Bundesinstitut f. Bau-, Stadt- u. Raumforschung (BBSR) im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart: 2019

Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (Hrsg.): Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH): *Grunddatensätze für Holz und Holzwerkstoffe im Netzwerk Lebenszyklusdaten - Projektbericht im Rahmen des Forschungsvorhabens FKZ 01 RN 0401 im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung*

Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. (Hrsg.): *Kreislaufwirtschaft Bau - Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018, Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018*. Berlin 2021

Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft - v. 24.07.2002 (GMBI. S.511), BM f. Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Berlin:2002, Entwurf Neufassung v. 17.12.2020

Landesarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (Hrsg.): *Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen*. Berlin: LAGA Mitteilung, Heft 20, 2004, 5. Aufl.

Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV) v. 18.04.2017 (BGbl.I, S.896), letzte Fassung v. 09.07.2021 (BGbl. I, S.2598)