

Claytec GmbH & Co. KG

**Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung und solaren
Trocknung einer Lehmplatte aus Lehm-Faser-Mischungen**

Abschlussbericht zum Vorhabens, gefördert durch die Deutsche
Bundesstiftung Umwelt unter Az.: 35520

Peter Breidenbach, Manfred Lemke

Viersen, 31.08.2022

Projektkennblatt

der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az	35520	Referat	25	Fördersumme	82.380 €
----	--------------	---------	-----------	-------------	-----------------

Antragstitel **Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung und solaren Trocknung einer Lehmplatte aus Lehm-Faser-Mischungen.**

Stichworte Lehmmischung, Lehmbauplatte, Solartrocknung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
30	17.02.2020	31.08.2022	1
Zwischenberichte	18.09.2020	07.02.2022	

Bewilligungsempfänger	Claytec GmbH & Co. KG	Tel	02153 918-0
	Nettetalter Strasse 113	Fax	02153 918 -18
	41751 Viersen	Projektleitung	Peter Breidenbach
		Bearbeiter	Manfred Lemke

Kooperationspartner -

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Ziel war die Entwicklung einer neuen solar getrockneten Lehmbauplatte. Eine stillgelegte Gewächshausanlage zur Trocknung von Blumenzwiebeln sollte im Projekt modellhaft umgenutzt werden, um eine neue Lehmmischung allein durch passive Solareinträge zu trocknen. Die Entwicklung der neuen Mischung zielte darauf ab, nur Baulehm aus Erdaushub und Pflanzenfasern (hier. Miscanthus) als Ausgangsstoffe zu verwenden. Technische Zielsetzung des Projektes war die experimentelle Entwicklung einer kompletten Pilotanlage für Versuche im industriellen Maßstab zur Herstellung der Lehmplatte im Strang-Guss-Verfahren für pastöse Lehmmischungen mit formgebenden Prozesslinien. Insgesamt sollte im Projekt eine rationell und energieeffizient hergestellte Lehmplatte mit einer signifikant verbesserten Ökobilanz entstehen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die experimentelle Entwicklung und Erprobung im industriellen Maßstab umfasst vier Aufgabenstellungen:

- Entwicklung einer Rezeptur/Mischung
- Lösungsansätze zu Formgebung und Handhabung im Prozess
- Aufbau einer solaren Trocknung
- Qualitätssicherung durch geeignete Kalibrierungsstrecke.

Daraus ergeben sich einzelne Arbeitsschritte, die im Verlauf der experimentellen Entwicklung und Erprobung immer wieder angepasst bzw. ergänzt werden mussten.

Arbeitsschritt I Rezeptur/Mischung: Laborversuche mit Baulehm und pflanzlichen Zusatzstoffen nach DIN 18948; Mischverfahren für eine homogenen und konsistente Verbindung erdfeuchter mineralischer und pflanzlicher Komponenten.

Arbeitsschritt II Formgebung/Handhabung: Entwicklung und Erprobung geeigneter Formkästen zur Befüllung am Strang; Schneidversuche zum Trennen des Stranges miteinander gekoppelter Formkästen; Handhabung der vereinzelter Formbleche im Prozessablauf.

Arbeitsschritt III Trocknungsprozess: Entwicklung von Trockentunneln; Test der luftdurchlässigen Trockengestelle, Optimierung der Durchströmung; Erprobung einer automatisierten, schadensfreien Logistik zwischen Formgebung und Trocknung und zurück.

Arbeitspaket IV Kalibrierung: Schleifstrecke zum Entgraten und Sicherung der Maßhaltigkeit nach gewünschter Plattendicke.

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

Ergebnisse und Diskussion

Es entstand eine neue Mischung für Lehmplatten aus Sekundärlehm der beim Kiesabbau als Abfall anfällt. Die Miscanthusfasern kommen von einem landwirtschaftlichen Versuchsfeld in der Nachbarschaft des für die Lehmplatte umgenutzten Gewächshauses. Der Produktionsablauf und die passive Solartrocknung konnten soweit erprobt werden, dass die Funktionsfähigkeit nachgewiesen ist. Unterstützt durch Industrieventilatoren und Schwarzfolie erreichen die Platten im Trockentunnel nur durch Sonneneinstrahlung eine ausreichende Durchtrocknung bis auf die kapillare Wasserrückhaltung der Tonminerale im Lehm.

Erntebedingte Qualitätsschwankungen der Miscanthusfasern lassen sich zum Teil durch Variation des Mischungsverhältnisses ausgleichen. Das verursacht andererseits die festgestellten Schwankungsbreiten der Rohdichte der Platten. Deshalb folgt nach der Kalibrierung eine automatische Wägung und Sortierung nach Raumgewichten zwischen 900 – 1.100 kg/m³. Leichte Platten eignen sich z.B. für Deckenkonstruktionen, schwere Platten haben besser Brandschutzeigenschaften.

Die Anwendungstests mit ersten solar getrockneten Lehmplatten zeigten, dass sich die Platten mit Standardwerkzeugen und Schrauben im Trockenbau rationell und entsprechend des Leitfadens „Ökologische Trockenbauwände im System“ ([file:///C:/Users/lemke/Downloads/Claytec-Arbeitsblatt-Online%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/lemke/Downloads/Claytec-Arbeitsblatt-Online%20(3).pdf)) verarbeiten lassen. Die Anwendungstests dienten der Vorbereitung

zur Prüfung nach DIN 18948 und DIN 4103, die erst mit Aufnahme der Serienproduktion durchgeführt werden.

Solarplatten werden zu 94% mit regenerativen Energieträgern produziert. Das schließt die Vorprodukte und die Stromverbräuche für die entwickelte Automatisierung der Prozesse bereits mit ein. Der Strombedarf der solaren Lehmplattenproduktion und der Fahrzeuge im Werk wird zu 100% aus Wasserkraft (Flusswasser) bezogen.

Die Treibhausgaspotenziale (GWP 100) der solar getrockneten Lehmplatte sind mit **-279 kg CO₂ equiv. /m³ Lehmplatte** negativ, weil darin eine CO₂ - Gutschrift für das im Miscanthus gespeicherte CO₂ in Höhe von 286 kg CO₂ equiv./ m³ (Masseanteil von 225 kg / m³) enthalten ist. Ohne die CO₂ Gutschrift würde sich ein Treibhausgaspotenzial von 6,87 kg CO₂ equiv. /m³ Lehmplatten ergeben. Die nachfolgende Tabelle ordnet die vorläufige Ökobilanz der solar getrockneten Lehmplatte im Vergleich zu anderen Umweltbilanzen von Trockenbauplatten ein. Die Umweltfaktoren werden auf m² Trockenbauwand bezogen.

Umweltfaktoren	Nicht regenerative Energie	Re-generative Energie	GWP 100 mit CO ₂ Gutschriften	GWP 100 ohne CO ₂ Gutschriften
Einheiten	MJ/m ²	MJ/m ²	kg CO ₂ equiv./m ²	kg CO ₂ equiv./m ²
Solar-Lehmplatte 30kg/m ²	5,90	94,85	-8,45	0,21
Muster UPD Lehmplatte 32kg/m ² 1)	124,00	1,98	3,08	7,2
Gipskartonplatte 17,5 kg/m ² 2)	117,25	7,53	7,63	Nicht relevant
1) vorläufige Angaben DVL e.V.				
2) Bundesverband der Gipsindustrie e.V; EPD-KNA-20160144-IAG1-DE; bezogen auf 20mm und 17,5kg/m ²				

Beide Lehmplatten verursachen weniger Treibhausgaspotenziale als Gipskartonplatten. Die Solar-Lehmplatte ist bislang die einzige Trockenbauplatte mit einer negativen CO₂ Bilanz. Die Mischung von Sekundärgrubenlehm aus Bodenabfällen der Kiesgewinnung mit einem hohen Masseanteil von Miscanthusfasern ist ursächlich für diesen Treibhausgas-Entlastungseffekt in der Ökobilanz. Alle Lehmplatten werden stofflich verwertet als „Rohstoffquelle“ für neue Lehmprodukte. Deshalb bleibt das im Miscanthusanteil gespeicherte CO₂ im Kreislauf und wird nicht bei energetischer Verwertung wieder freigesetzt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Nach Beginn der Serienproduktion werden die neuen Solar-Lehmplatten in die Vertriebsstruktur von Claytec integriert und über den Baustoffhandel in Deutschland und Europa am Markt eingeführt. Zugleich folgen Vorführungen, Schulungen und Anwendungsunterlagen für die Planer und Handwerker im Claytec-Verbund

Die Platten werden auf Messen präsentiert. Assoziierte Teilnehmer erfahren von der Innovation im Clay Blog und im Clay Newsletter (<https://www.claytec.de/de/clayblog>; <https://www.claytec.de/de/newsletter>).

Fazit

Die Umkehrung der Funktion von Gewächshäusern von „Klimakammern“ zu „Wärmelieferanten“ durch verstärkte passive Solareinträge öffnet nach Projektabschluss die neue Möglichkeit, Trockenbauplatten oder Steine aus Lehm ohne fossile Wärmeenergie oder Verbrennung von Holz klimaneutral herzustellen.

Zum Projektabschluss sind damit alle Zielsetzungen der experimentellen Entwicklungsphase erreicht worden. Insgesamt konnte eine klimaneutrale Produktion der Lehm-Trockenbauplatte im industriellen Maßstab modellhaft erprobt und optimiert werden, dies ohne zusätzliche Flächenversiegelung. Nach dem Muster dieses geförderten Pilotprojektes sollen weitere solare Produktionsstandorte entstehen.

Inhalt	
Projektkennblatt	2
1. Zusammenfassung.....	8
2. Einleitung	9
2.1 Ausgangslage	9
2.2 Zielsetzungen.....	9
2.3 Aufgabenstellungen	10
3. Hauptteil.....	11
3.1 Darstellung der technischen Arbeitsschritte.....	11
3.1.1 Rezeptur und Mischung	12
3.1.2 Formgebung	14
3.1.3 Logistik und Handhabung	15
3.2 Diskussion der Ergebnisse.....	22
3.3 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung.....	29
3.4 Ökobilanz –Bewertung der Testphase.....	31
3.4.1 Ökologische Gebäudebewertung – Trockenbau mit Solarplatten	36
3.4.2 Tabellenanhang zur Ökobilanzierung.....	37
3.5 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabenergebnisse.....	41
4. Fazit	41
Literaturverzeichnis	43

Verzeichnis von Bildern, Diagrammen und Tabellen

Abbildung 1: Nahaufnahme der Lehm-Faser-Mischung.....	12
Abbildung 2: Miscanthusanlieferung und Miscanthusfeld	12
Abbildung 3: Versuchsreihe mit Trennschichten aus Papier und Lehmklebemörtel ..	13
Abbildung 4: Entwicklung trocknungsoptimierter Formbleche	14
Abbildung 5: Versuche zur Wasserstrahltrennung der Bleche	15
Abbildung 6: Prozessabschnitt von der Wasserstrahltrennung zur Wechselstellage	16
Abbildung 7: Übergabe vom Wechselgestell zum Transportgestell zur Trocknung...	17
Abbildung 8: Einfuhr der Platten in die Trockenanlage	18
Abbildung 9: Blick in die Trockentunnel mit Ventilator	19
Abbildung 10: Detailzeichnung der Formbleche	19
Abbildung 11: Wechsellvorrichtung Formblech/Trockenrahmen	20
Abbildung 12: Nahaufnahme Tockenrahmen	21
Abbildung 13: Blick in das Gewächshaus in der Umbauphase	23
Abbildung 14: Lehm-Faser-Mischung nach Mischvorgang	24
Abbildung 15: Lehmplatten zu Beginn der Trocknung	25
Abbildung 16: Detailaufnahme einer getrockneten Lehmplatte	26
Abbildung 17: Trockenbauversuch mit Solar-Lehmplatten.....	26
Abbildung 18: Sägeversuch.....	27
Abbildung 19: Verschraubung der Solar-Lehmplatten	27
Abbildung 20: Bau der Trocknungsanlagen.....	30
Diagramm 01: Primärenergieeinträge – Muster UPD Lehmplatten vs. Solarverfahren	33
Diagramm 02: Treibhausgasemissionen – Muster UPD vs Solarverfahren	35
Tabelle 3.1: Umweltwirkung der Rezepturänderung	31
Tabelle 3.2: Umweltwirkungen unterschiedlicher Trockenbauplatten pro m ²	36
Tabelle 3.3: Inputfaktoren pro m ³ solar getrockneter Lehmplatten	38
Tabelle 3.4: Umweltwirkungen pro m ³ solar getrockneter Lehmplatten	39
Tabelle 3.5: Outputfaktoren pro m ³ solar getrockneter Lehmplatten	40

1. Zusammenfassung

Im Rahmen einer experimentellen Entwicklung und Erprobung entstand ein neuartiges Herstellverfahren für Lehmbauplatten, das sich grundlegend von dem seinerzeit geförderten Strangpressverfahren und anderen Formpressverfahren unterscheidet. Eine Zielsetzung des Verfahrens war die Trocknung einer neuen Lehmischung allein durch passiven Solareintrag in einer alten Gewächshaushalle. Dazu wurden brachliegende Glashallen, die ehemals zur Trocknung von Blumenzwiebeln genutzt wurden angemietet.

Die Umsetzung erfolgte – nach Laborversuchen zur Rezeptur der Mischung – hauptsächlich im industriellen Maßstab. Der im Projekt entwickelte Herstellprozess erforderte mehrere innovative Lösungen auf verschiedenen Prozessstufen.

Die Mischung der Lehmplatten besteht aus Baulehm und Miscanthusfasern ohne mineralische Zusätze mit hohem Eintrag „grauer Energie“. Schwankende Erntequalitäten der Fasern erschwerten eine konsistente Mischung mit gleichbleibenden Raumgewichten am Ende des Prozesses. Ein zusätzlicher Chargenmischer und die Beigabe von Kartoffelstärke konnten die Qualitätsschwankungen des Naturproduktes kompensieren.

Es wurden spezielle Formbleche, die am Strang befüllt werden können entwickelt. Auf eine hydraulische Pressung konnte verzichtet werden. Zur Trennung der auf die Maße der Lehmplatten ausgelegten Formbleche nach Befüllung mit einer nassen Lehm Masse kam eine automatisierte Wasserstrahltechnik zum Einsatz.

Nasse Lehm Mischungen mit Maßen von 1250x625mmx25mm wiegen ca. 40 kg. Eine manuelle Handhabung schied allein schon aus Arbeitsschutzgründen aus. Deshalb entwickelte Claytec mit externer Unterstützung und höheren Sachausgaben als geplant eine automatisierte, robotergestützte Handhabung von der Formgebung über die Trocknung bis zur Kalibrierung.

Für die Trocknungsphase wurden in den Glashallen mehrere Trockentunnel errichtet, die bis zu 200 Platten in Formblechen fassen. In den Trockentunneln erhitze sich die Luft auf Temperaturen >60°C (bis dahin funktionierte die Messung). Für eine optimierte Durchströmung der luftdurchlässig eingestapelten Platten sorgt ein Umluftgebläse. Die Entwicklung einer geeigneten strömungsoptimierten Perforation der Formbleche und eine Wendevorrichtung unterstützen den Prozess für eine vollständige Durchtrocknung.

Die Ökobilanz der experimentellen Produktion errechnet einen Klimaentlastungseffekt von -279 kg CO₂ equiv./m³ Lehmplatten durch regenerative Energiequellen für Wärme und Strom. Den Hauptanteil an dem „carbon-capture-effect“ hat der Masseanteil der Miscanthuspflanze in der neuen Mischung. Der Miscanthusanteil bindet 281 CO₂ equiv. pro m³ Solarplatte. Das gespeicherte CO₂ wird nicht durch energetische Verwertung am Lebensende wieder freigesetzt, weil eine stoffliche Wiederwendung oder -verwertung am Ende des Lebenszyklus erfolgt.

Die experimentelle Pilotanlage kann als „Blaupause“ für den weiteren Aufbau dezentraler Standorte zur solaren Trocknung von Lehmbauplatten dienen. Die

nachfolgende Umsetzung der Vorhabenergebnisse führt zur Markteinführung einer erdgasfrei und klimaneutral produzierten Trockenbauplatten aus Lehm.

2. Einleitung

2.1 Ausgangslage

Für die Herstellung von Lehmplatten sind nach DIN 18948 die Formgebungsverfahren „Streichen“, „Stampfen“ und „Pressen“ definiert. Die meisten am Markt befindlichen Lehmplatten sind „formgepresst“ oder „stranggepresst“

Beim Pressverfahren wird die Arbeitsmasse mit einem Wassergehalt von 15–20 M.-% in Formrahmen gefüllt, einzeln hydraulisch gepresst und anschließend getrocknet. Die angewandten Trocknungsverfahren sind unterschiedlich, ebenso die Trocknungszeiten und -temperaturen. Energieträger ist vorwiegend Erdgas, teilweise in Verbindung mit wärmegeführten Blockheizkraftwerken (BHKW).

Ein Strangpressverfahren wurde 1996 von der DBU unter Az.: 05468 gefördert und ist bis heute in Betrieb. In die nasse Masse werden armierende Schilfrohre eingebettet, die der Platte mechanische Stabilität verleihen und das Gewicht weiter reduzieren. Die Masse wird auf die beabsichtigte Dicke unter leichtem Walzendruck verdichtet und im Endlosstrang durch einen erdgasbefeuchten 18m langen Trockentunnel zur Kalibrierung geführt.

Nach vorläufigen Berechnungen in der Muster UPD für formgepresste Lehmplatten des Dachverbandes Lehm e.V. (DVL), gefördert durch die DBU (Az.: 35658) benötigen mit optimierter Kraft-Wärmekopplung allein für die Trocknung 838 – 1225 kWh Erdgas / m³ Lehmplatten [DVL 22]. Für das Strangpressverfahren liegen keine Daten vor. Das Trocknungsverfahren mit direkter Erdgasbefeuerung in einem 18m langen Tunnel dürfte aber einen noch höheren Energieeintrag erfordern. Die vorläufige Muster UPD des DVL für Lehmplatten beziffert die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen allein für die Trocknung von formgepressten Lehmplatten auf 218 kg CO₂ equiv. / m³ Lehmplatte. CO₂ Gutschriften für Holzspäne in der Rezeptur reduzieren sich die Treibhausgasemissionen (GWP100) auf insgesamt 137 kg CO₂ equiv / m³ Lehmplatten (s. 3.4).

Das geförderte Vorhaben der passiven solaren Trocknung einer nach dem Strang-Guss-Verfahren hergestellten Lehmplatte basiert auf einer neuen Lehm-Faser-Mischung, ausschließlich mit Pflanzenfasern als Leichtzuschlag, verzichtet auf fossile Energieträger sowohl für die Trocknung als auch den Herstellprozess.

2.2 Zielsetzungen

Ziel des Projektvorschlages war die Entwicklung eines neuen Strang-Guss-Verfahrens für pastöse Lehmmischungen mit formgebenden Prozesslinien von der Materialauftrag bis zur Trocknung. Die Art der Formgebung, die passive Solartrocknung in einem brachliegenden Gewächshaus und eine speziell darauf

angepasste neue Rezeptur bilden die innovativen technischen Kernpunkte des Projektvorschlages.

Die Auswahl der Inhaltsstoffe der neu zu entwickelnden Lehmplatte richtet sich nach den geforderten Eigenschaften der hier relevanten DIN 18948: 2018-12 für Lehmplatten. Ausgangsstoffe mit einem erhöhten Eintrag „grauer Energie“, wie sie insbesondere auf Trockenlehm oder Perlite entfallen. Miscanthusfasern bzw. zerkleinerte Halme sollen einer neuen Verwertung in einer damit leichteren Lehmmischung unter 1.000kg/m³ zugeführt werden.

Diese pastöse, nasse Vormischung wird in einer zusammenhängenden Produktionslinie in mehrere trennbare Formbleche entsprechend der geforderten Maße und Dicke in einem sog. Strang-Guss-Verfahren eingebracht. Die Formbleche werden nicht einzeln, sondern am Strang hintereinander mit Lehmmischung befüllt. Die befüllten Formbleche werden nicht hydraulisch gepresst, sondern mechanisch geglättet, danach voneinander getrennt und in speziellen Trockengestellen in der Glashalle des Gewächshauses zur Trocknung luftdurchströmt übereinander in Stellagen gestapelt. Nach Durchtrocknung folgt eine Kalibrierung zur Sicherstellung der Maßhaltigkeit nach Breite, Länge und Dicke.

Eine stillgelegte Glashalle zur Trocknung von Blumenzwiebeln (Tulpen) sollte im Projekt modellhaft umgenutzt werden, um die in Trockengestellen gestapelten feuchten Lehmplatten allein durch passive Solarwärme zu trocknen (Solar-Lehmplatten). Solche Glashallen bzw. Gewächshäuser sind für eine maximale Ausnutzung der Sonneneinstrahlung ausgelegt und verfügen über eine regelbare Lüftungstechnik. Im Projekt wurden die Wärmeströme in der Glashalle für die Trocknung der optimierten Materialmischung optimiert. Die materialeitige Entwicklung einer Mischung aus Baulehm und Pflanzenfasern erfolgte im Labormaßstab. Technische Zielsetzung des Projektes war die experimentelle Entwicklung einer kompletten Pilotanlage für Versuche im industriellen Maßstab zur Herstellung einer neuartigen Lehmplatte von der Mischung über die Formgebung bis zur Solartrocknung. Insgesamt sollte im Projekt eine rationell und energieeffizient hergestellte Lehmplatte mit einer signifikant besseren Ökobilanz gegenüber der gasbefeuchten Trocknung der bisherigen Press- bzw. Strangpressverfahren entstehen.

Die angestrebten Umweltentlastungseffekte ergeben sich aus dem Zusammenwirken mehrerer Ansätze:

- Reduktion „grauer“ Energieeinträge in der Mischung
- Verwendung lokaler nachwachsender Rohstoffe
- Vermeidung von Flächenverbrauch
- Verzicht auf Dieselantriebe im Werk
- Umstellung auf Grünstrom im Produktionsprozess
- Minderung der CO₂ Emissionen durch Solartrocknung.

2.3 Aufgabenstellungen

Das Projekt unterteilt sich in vier Aufgabenstellungen:

- Rezeptur/Mischung
- Formgebung/Handhabung
- Trocknung

- Kalibrierung.

Daraus ergeben sich einzelne Arbeitsschritte, die im Verlauf der experimentellen Entwicklung und Erprobung immer wieder angepasst bzw. ergänzt werden mussten.

Arbeitsschritt I Rezeptur/Mischung: Auswahl und Mischversuche im Labor mit Baulehm und pflanzlichen Zusatzstoffen nach DIN 18948; Herstellung einer homogenen und konsistenten Mischung erdfeuchter mineralischer und pflanzlicher Komponenten.

Arbeitsschritt II Formgebung/Handhabung: Entwicklung/Erprobung geeigneter Formkästen zur Befüllung am Strang; Schneidversuche zum Trennen des Stranges miteinander gekoppelter Formkästen; Handhabung der vereinzelter Formbleche.

Arbeitsschritt IIIa Trocknungsprozess: Entwicklung von Trockentunneln; Test der luftdurchlässigen Trockengestelle zur Optimierung der Trocknungszeiten; Erprobung einer automatisierten, schadensfreien Logistik zwischen Formgebung und Trocknung und zurück.

Arbeitsschritt IIIb Trocknung: Optimierung der thermischen Luftbewegung in der solar erwärmten Glashalle, Optimierung der Durchströmung im Trockentunnel.

Arbeitspaket IV Kalibrierung: Schleifstrecke zum Entgraten von prozessbedingten Kanten und Sicherung der Maßhaltigkeit nach gewünschter Plattendicke.

3. Hauptteil

Der Hauptteil untergliedert sich in eine Darstellung der technischen Arbeitsschritte von der Rezepturentwicklung bis zur finalen Kalibrierung in Teil 3.1. In Teil 3.2 erfolgen die Bewertung der erzielten Ergebnisse und die Darlegung der bei der Projektdurchführung aufgetretenen Problemstellungen. Teil 3.3 bewertet die Projektergebnisse unter ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Teil 3.4 interpretiert die vorläufige Ökobilanz und enthält einen Tabellenanhang zur Lebenszyklusanalyse nach DIN EN 15804:2020. Der Hauptteil schließt in Teil 3.5 mit einem Ausblick zur weiteren Verwertung bzw. Vermarktung der Projektergebnisse.

3.1 Darstellung der technischen Arbeitsschritte

Die Darstellung technischer Arbeitsschritte folgt dem Prozessablauf entlang der Produktionsstrecke beginnend mit der Rezeptur, über den Formgebungsprozess zur Trocknung und finalen Kalibrierung der solar getrockneten Lehmplatten.

3.1.1 Rezeptur und Mischung

Im Berichtszeitraum haben die geplanten Laborversuche zur Auswahl geeigneter mineralischer und pflanzlicher Komponenten stattgefunden. Es zeichnete sich ab, dass die Beimischung pflanzlicher Faser einen deutlich höheren Anteil an Baulehm ermöglicht als bei Antragstellung angenommen. Dadurch konnte die Zielgröße für das Gewicht der neuen Lehmplatte $\leq 1.000 \text{ kg/m}^3$ erreicht werden. Auf

Leichtzuschläge mit hohem Eintrag „grauer“ Energie, wie z.B. Perlite konnte verzichtet werden (s. Tab. 3.1). Getestet wurden Kombinationen von Baulehm mit Stroh, Miscanthus, Bambusstäben und Hanfschäben. Die favorisierte Labormischung besteht aus Baulehm und Miscanthusfasern (Abb.1). Die Zusammensetzung der Mischung wurde experimentell im größeren Maßstab auf der Versuchsanlage immer wieder modifiziert. Dabei sind die

Miscanthusanteile teilweise auf eine Länge von 10mm gehäckselt worden (Abb. 1). Der Anteil des Baulehm als Sekundärgrubenlehm aus dem Kiesabbau schwankte zwischen 86 und 89 M.-% bei einer Gesamtmasse der Mischung mit Wasser von 1.433 kg. Der durchschnittliche absolute Miscanthusanteil über alle Versuchsreihen wog 225 kg.

Die Anbaufläche für Miscanthusfasern liegt in 200m Entfernung von der Produktionsstätte. Die Halme werden zerkleinert angeliefert (Abb. 2)

Im Projektverlauf, insbesondere nach Anlieferung mehrerer Erntechargen zerkleinerter Fasern wurde deutlich, dass die Fasern je nach Erntequalität und verwendeter Häckselmaschine erheblichen Schwankungsbereiten der Faserlängen,



Abbildung 1: Nahaufnahme der Lehm-Faser-Mischung



Abbildung 2: Miscanthusanlieferung und Miscanthusfeld

des Faserschnitts und der Faserdicke unterliegen. Das erfordert einen vorgeschalteten Chargenmischer vor dem Materialauftrag Mischer und die Zugabe von < 0,1M.-% Kartoffelstärke, um eine optimale Vermischung der Komponenten und Konsistenz der Masse zu erzielen. Unterschiedliche Faserstrukturen führen am Ende des Herstellprozesses zu unterschiedliche Rohdichten der Lehmplatten.

Der Baulehm fällt als Bodenaushub beim Betrieb einer nahegelegenen Kiesgrube an. Entsprechend der Definition in der Produktkategorieregeln und der Muster UPD Lehmplatten des DVL e.V. [DVL 22] wird dieser Ausgangsstoffe wie folgt definiert:

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

Der Einsatz von Sekundärgrubenlehm als Verwertung von Bodenabfall aus einem anderen System, verbessert die Umweltbilanz des Produktes gegenüber Primärgrubenlehm. Der Betrieb einer Lehmgrube zur Verwendung des gewonnenen Primärlehms würde vollständig in die Ökobilanz des Lehmbaustoffes eingehen. Der Energieeinsatz und die Umweltwirkung des Bodenaushubs aus einem anderen Produktsystem sind dem eigentlichen Zweck ökologisch zuzurechnen, hier der Kiesgewinnung und nicht der Abfallverwertung für Lehmplatten.

Mit ersten experimentellen Mischungen wurden im Labor verschiedene Trennschichten zwischen der Unterseite der Lehmplatte auf dem Form- und Trocknungsblechen erprobt. Als Trennschicht zwischen Boden der Formbleche und Lehmmasse kamen, nach Versuchen mit anderen Zwischenlagen zwei Lösungsansätze in die engere Wahl: ein Sprüh-Trennmittel aus der Backindustrie oder eine (Alt-) Papiersorten mit 110-140g/m² Masse und einer Wasseraufnahme von <40 g/m².



Abbildung 3: Versuchsreihe mit Trennschichten aus Papier und Lehmklebemörtel

Im Verlauf der Experimente stellt sich heraus, dass die Papiersorte als Trennschicht zwischen Formblech und Lehmmasse funktionierte. Zugleich erwies sich die Papiersorte nach Trocknung als geeignete einseitige Kaschierung der Lehmplatte, vergleichbar mit der Kaschierung einer Gipsplatte. Das Trennblatt aus Altpapier geht nach Trocknung nicht verloren, sondern wird zum in die Lehmmasse eingebetteten Bestandteil der neuen Lehmplatte. Abb. 3 zeigt einen wichtigen Entwicklungsschritt: die dünne Grundierungslage (<3mm) des Lehmklebe- und Armierungsmörtel (aus Claytec Eigenproduktion) verbessert die Haftung zwischen Papierkaschierung und nachfolgend aufgetragener Lehm/Miscanthusmasse (ca. 22mm).

3.1.2 Formgebung

Zur Formgebung der Lehmplatten mit einem Maß von 1.250mm x 625mm und einer Dicke von 20mm bedurfte es mehrerer Entwürfe des Zulieferers Stafier bis eine stabile, trennbare und luftdurchlässige Kastenform entstand. Das Schwindmaß konnte experimentell ermittelt und dementsprechend berücksichtigt werden. Die Abb. 4 zeigt den abgenommenen Entwurf für Formkästen zum Auftrag der Lehmischung. Die Formgebung

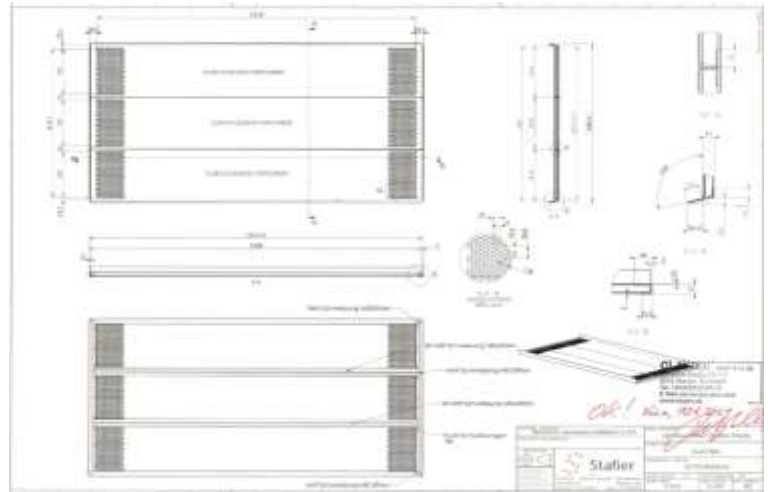


Abbildung 4: Entwicklung trocknungsoptimierter Formbleche

erforderte zahlreiche Tests, bis eine optimierte Lösung entstand. Die Mischung wird in Formbleche im Format der Lehmplatte gefüllt. Für die Trocknung musste seitlich und am Boden luftdurchlässige Öffnungen dimensioniert werden. Die Bleche haben definierte Schlitz- und Lochgrößen. Die in 3.1.1 erprobte Papiersorte dient als untere Einlage in die Formbleche und Trennschicht zwischen Lehm- masse und Blechboden.

Die formgebenden Lochbleche durchlaufen, zusammenhängend am Strang die Mischstrecke bis zu einem Schneidwerkzeug (Abb. 5). Das Transportband ist mit trennstreifen im Abstand der Plattenlänge segmentiert. Ein sensorgesteuerter Wasserstrahl trennt den Strang der einzelnen Formbleche unmittelbar vor der Handlingstation. Die Trennung muss präzise an der Nahtstelle der einzelnen Formbleche erfolgen. Mechanische Schneidwerkzeugen verschmutzen schnell und arbeiten nicht taktgetreu und präzise genug. In diesem Projektabschnitt wurde ein Wasserstrahlautomat erprobt und für die Aufgabe angepasst. Das erforderte zahlreiche Schneidversuche mit Hilfe externer Fachleute (Abb.5 oben

a) Von der Formgebung zur Trocknungsanlage



Abbildung 6: Prozessabschnitt von der Wasserstrahltrennung zur Wechselstellage

Am Ende des Transportbandes der Misch- und Formgebungsstrecke nimmt ein entsprechend programmierter Roboter die mit Wasserstrahl getrennten einzelnen Formbleche vom Band und stapelt 22 Bleche übereinander in ein Wechselgestell zum Transport in die Trocknung (Abb. 6). Abb. 7 zeigt die Übergabestelle zwischen Handhabungsroboter am Band (unten links gelber Roboterarm) und Transport-Hubwagen (rot, unten rechts). Der Hubwagen ist wie ein Gabelstapler mit zehn Gabeln konstruiert, um je Gabel zwei Formbleche aus dem Ablagegestell herauszuheben.

Die beiden unteren Abbildungen zeigen links den Transport-Gabelstapler nach Entnahme der Bleche aus dem Ablagegestelle am Ende der Produktionsstrecke und rechts das entleerte Ablagegestell zur Neubefüllung.



Abbildung 7: Übergabe vom Wechselgestell zum Transportgestell zur Trocknung

b) Einlagerung der Formbleche in die Trocknungsanlage

Die exakten Abstände der Lagen des Transport-Gabelstaplers sind passgenau zu den Ablageleisten im Trockentunnel konstruiert. Die Längskante der Platten mit 1.250 mm war dafür maßgebend. Der Transport-Hubwagen ist dafür ausgerüstet, zukünftig selbsttätig auf Schienen zwischen Produktionsstrecke und Einfuhr in den Trockentunnel zu fahren. Auf der Abb. 8 sind entsprechende Vorrichtungen am Boden der Trockentunnel erkennbar.



Abbildung 8: Einfuhr der Platten in die Trockenanlage

Die Abb. 9 zeigt den Blick in einen der 13m langen Trockentunnel für 22 übereinander stapelbare Platten in Formblechen. Ein Trockentunnel hat eine Aufnahmekapazität von 220 Platten. Die Tunnel sind mit schwarzer Folie bedeckt, um die Sonneneinstrahlung besser auszunutzen. Am Ende der Tunnel sind Industrieventilatoren installiert, die für einen Umluftstrom sorgen. Die Versuche im

Sommer 2021 und 2022 ergaben Temperaturen von über 60 °C im Versuchstunnel bis das Messinstrument ausfiel.

Die Trockentunnel (Abb. 9) wurden in Eigenleistung errichtet.

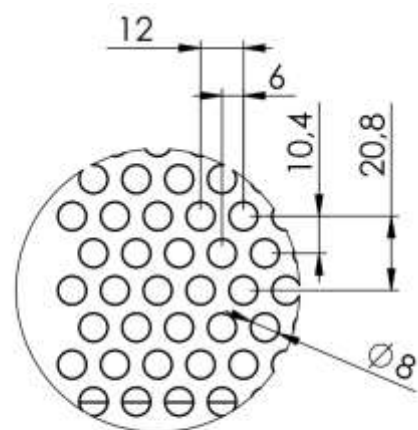


Abbildung 9: Blick in die Trockentunnel mit Ventilator

c) Umschichtung der Platten Ober/Unterseite zur Durchtrocknung

Die separierten formgebenden Bleche sind eine Spezialanfertigung mit optimierter Perforation. Die Abb. 10 zeigt einen Ausschnitt der Konstruktionszeichnung mit dem Detail des Lochbildes der Unterseite dieser Bleche. Die Perforation unterstützt die unterseitige Durchströmung der Formbleche mit Warmluft.

Nach einer ersten Trocknungsphase der in die Trockentunnel eingelagerten, mit der neuen Lehmischung befüllten Formbleche stellte sich heraus, dass die Lehmplatten auf der Oberseite gehärtet sind, aber noch keine vollständige Durchtrocknung erreicht haben. Dafür



D (1 : 2)
Detail Lochbild

Abbildung 10: Detailzeichnung der Formbleche

wurden Trocken-Lattengestelle in Eigenleistung gebaut und eine automatisierte Wechselvorrichtung konstruiert. Ein manuelles Umwenden wäre aufgrund des Gewichts auf Dauer gesundheitsschädlich. Ferner müssen die Platten einer Charge möglichst schnell und gleichzeitig einem erneuten Trocknungsgang zugeführt werden. Es kommt also auf die Umschicht-Geschwindigkeit an. Die bruchfreie Umwendung aus den Formblechen auf einen speziell entwickelten Trockenrahmen wird von einer eigens entwickelten Wechselvorrichtung unterstützt (Abb. 11).



Abbildung 2: Wechselvorrichtung Formblech/Trockenrahmen

Nach dem Wechselvorgang gelangen die entleerten Formbleche wieder zurück zum nächsten Chargendurchlauf in die Produktion. Auf den Trockenrahmen (Abb. 12) fährt der Transport-Gabelstapler die, nach erster Trocknung schon festen Lehmplatten erneut in den Trockentunnel zur zweiten Durchtrochnungsphase.

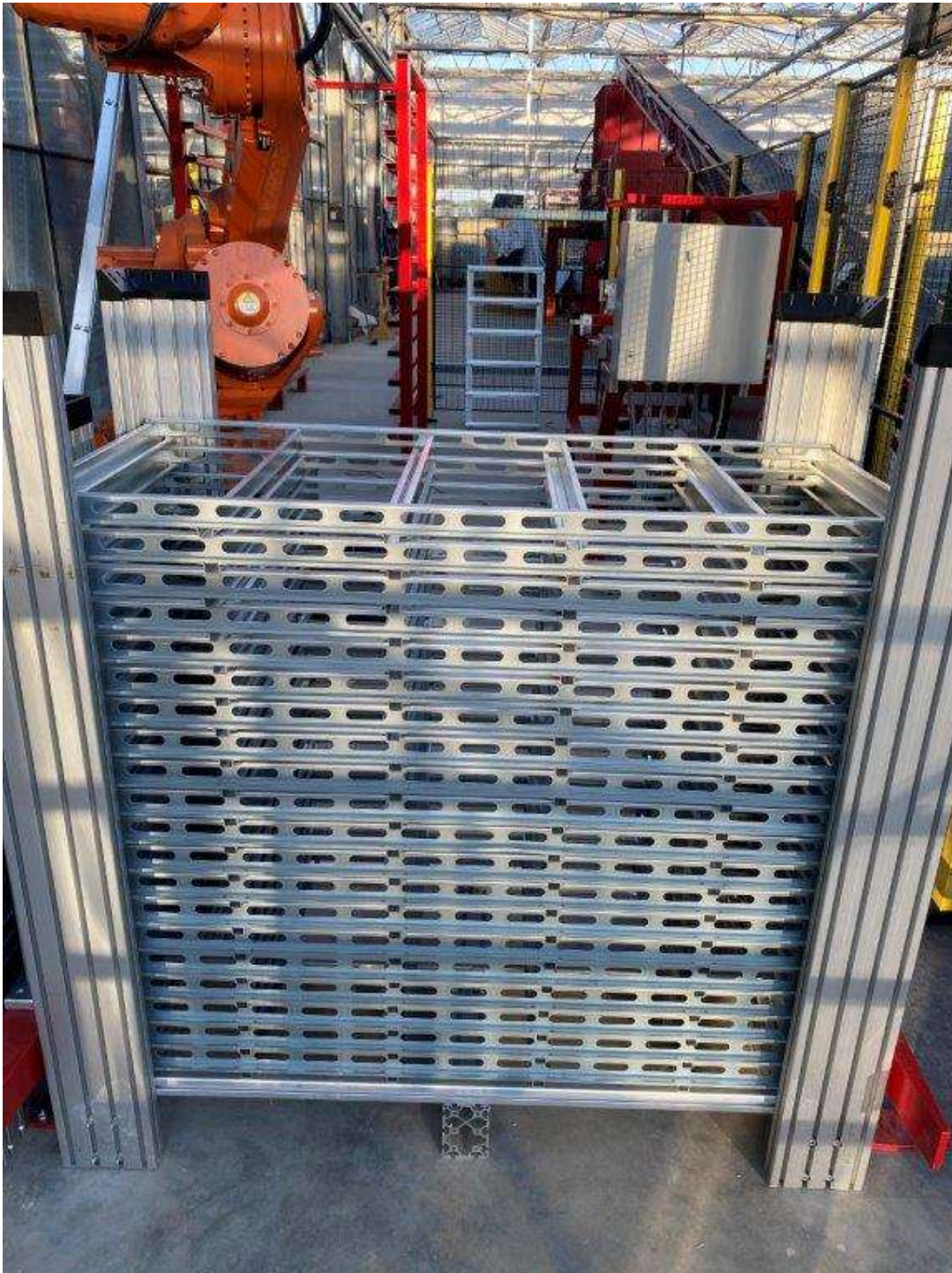


Abbildung 3: Nahaufnahme Trockenrahmen

d) Von der Trocknung zur Kalibrierung und Konfektionierung

Nach zweiter Durchtrocknung der Platten entnimmt der Transport-Gabelstapler die fertig getrockneten Platten aus dem Trocknungstunnel und fährt in die Produktionshalle an die Kalibrierungsstrecke heran. Ein weiterer Handhabungsroboter übernimmt die Platten, wendet sie und legt sie auf das Transportband zur Kalibrierung. Beim Wasserstrahlschneiden entstehen bei einer Plattendicke von 20-25mm je nach Düsendurchmesser und Vorschubgeschwindigkeit

wulstartige Grate an den Schnittstellen. Auch beim Wechseln der Platten im Trocknungsprozess kann es zu unregelmäßigen Kanten kommen. Die Entgratung der Kanten erfolgt an zwei Sägestationen einmal in Querrichtung, einmal in Längsrichtung. Zum Schluss durchlaufen die Platten eine Schleifanlage zur Sicherstellung maßhaltiger Plattendicken. Schwankungen der Ernte- und Verarbeitungsqualität der Miscanthusfasern führen zu unterschiedlichen Gewichten (Rohdichten) der Platten. Am Ende des Prozesses findet eine Wägung der Platten statt, um die Unzulänglichkeiten des natürlichen Pflanzenanteils auszugleichen. Der Roboter sortiert und stapelt die Platten nach Rohdichteklassen.

Diese beschriebenen vier Zwischenschritte a) – d) zur Optimierung der Handhabung und Prozessabläufe erwies sich als größte Herausforderung mit viel mehr eigenen und externen Entwicklungsleistungen und Erprobungen als bei Antragstellung erwartet.

Die in Teil 3.1 beschriebenen technischen Lösungen wurden im Versuchsbetrieb entwickelt und optimiert. Erst wenn keine wesentlichen Änderungen im Herstellprozess der Platten mehr zu erwarten sind und eine Serienproduktion anläuft, kann eine Prüfung nach DIN 18948 durchgeführt werden. Ansonsten müsste nach jeder Änderung im Prozess eine neue Prüfung durchgeführt werden.

3.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Projektplanung umfasste sowohl Laborversuche als auch den Aufbau einer Versuchsanlage im industriellen Maßstab. Die Umnutzung des dafür vorgesehenen, brachliegenden Gewächshauses (Abb. 13) bei eine der beispielgebenden Zielsetzungen des Vorhabens. Eben diese modellhafte Umnutzung zur Realisierung des Versuchsbetriebes stieß auf unvorhergesehene Genehmigungshürden, die diesen zentralen Teil des Vorhabens verzögerte. Vor Aufnahme des Versuchsbetriebes mussten verschiedene Gutachten zur Umnutzung der Glashallen beigebracht werden, u.a. Emissions-, Lärm- und Brandschutzgutachten. Die endgültige Umnutzungsgenehmigung lag erst im August 2021 vor.



Abbildung 4: Blick in das Gewächshaus in der Umbauphase

Die Trennung des Stranges zusammenhängender Formkästen mittels Wasserstrahl war ein innovativer Lösungsansatz im Produktionsablauf. Im Testbetrieb fiel allerdings die Pumpe des Wasserstrahlautomaten aus. Die Ersatzbeschaffung und Reparatur dauerte zwei Monate. Dadurch verzögerte sich das Projekt weiter, weil Testläufe nicht wie geplant oder nur teilweise durchgeführt werden konnten. Am 06.11.2021 zerstörte ein Brand die Werkstatt. Dort wurden Einbauten und Teile in Eigenleistungen vorgefertigt, Materialien, Komponenten und Werkzeuge gelagert. Vom Totschaden war insbesondere der Aufbau der Trocknungstunnel betroffen (s. 3.1.3).

Im Versuchsbetrieb stellte sich heraus, dass die angelieferten Miscanthusfasern erntebedingte oder verarbeitungsbedingte Qualitätsschwankungen haben, z.B. zu grob, zu staubig, unterschiedliche Längen und Schnittkanten. Nach Anlieferung mehrerer Erntechargen zerkleinerter Fasern wurde deutlich, dass die Fasern je nach verwendeter Häckselmaschine erheblichen Schwankungsbereiten der Faserlängen, des Faserschnitts und der Faserdicke unterliegen.

Das erforderte einen vorgeschalteten Chargenmischer vor dem Materialauftrag und die Zugabe von $< 0,1$ M.-% Kartoffelstärke, um eine optimale Vermischung der Komponenten und Konsistenz der Masse zu erzielen. Unterschiedliche Faserstrukturen führen am Ende des Herstellprozesses zu unterschiedlichen Rohdichten der Lehmplatten. Solche Qualitätsschwankungen gibt es auch bei anderen Pflanzen - die Natur liefert keine Standards. Die Qualitätsschwankungen

lassen sich zum Teil durch Variation des Mischungsverhältnisses ausgleichen. Das verursacht andererseits die festgestellten Schwankungsbreiten der Rohdichte der Platten. Deshalb folgt nach der Kalibrierung eine automatische Wägung und Sortierung nach Raumgewichten zwischen 900 – 1.100 kg/m³. Leichte Platten eignen sich z.B. für Deckenkonstruktionen, schwere Platten haben besser Brandschutzeigenschaften. Mit dieser Lösungen entstehen quasi nebenbei neue Produktlinien.

Entgegen ursprünglichen Annahmen bei Antragstellung ist der Wassergehalt der Mischung kein limitierender Faktor für die passive Solartrocknung. Es kommt vielmehr darauf an, dass der Lehm die Pflanzenfasern quasi „ummantelt“. *Abb. 14* zeigt die Durchmischung von Fasern und Baulehm im Versuch mit ersten Formkästen.

Für die Formgebung ist ein bildsamer Zustand der Lehmmasse erforderlich, das entspricht der Konsistenzform I_c „weich-steif“ nach DIN EN 17892-11 mit einem Wassergehalt von mindestens 15M.-% in der Mischung. Die nach Trocknung verbleibende absolute Restfeuchte hängt vom Porenwassergehalt in den Tonmineralien des verwendeten Baulehms ab. Die Schwankungsbreite des Porenwassergehalts geht von 2 M.-% bei Zweischicht-Tonmineralien (z. B. Kaolin) bis 6 M.-% bei Dreischicht Tonmineralien (z. B. Montmorillonit). Die Differenz zwischen dem Wassergehalt von durchschnittlich 20 M.-% und einem tolerablen Porenwassergehalt nach Trocknung von durchschnittlich 4 M.-% konnte im Projekt durch passive solaren Wärmeeintrag und unterstützende Umluftführung verdampft werden.

Abb. 15 zeigt die nassen Lehmplatten auf perforierten Formblechen bei Eintritt in den Trockentunnel.



Abbildung 5: Lehm-Faser-Mischung nach Mischvorgang



Abbildung 15: Lehmplatten zu Beginn der Trocknung

Die Detailaufnahme Abb. 16 verdeutlicht die Verbindung von Fasern und Baulehm nach Trocknung. Die untere Papierkaschierung ist ebenfalls zu erkennen.



Abbildung 16: Detailaufnahme einer getrockneten Lehmplatte

Die Abb. 17 -19 zeigen solargetrocknete Lehmplatten in Anwendungsversuchen zum Trockenbau, hier mit Holzständerkonstruktion nach üblichem Rastermaß.



Abbildung 17: Trockenbauversuch mit Solar-Lehmplatten

Die Anwendungsversuche dienen der Erprobung und Qualitätsprüfung, sowie der Vorbereitung auf Prüfungen nach DIN 18948:2018 mit Beginn einer Serienproduktion. Die Platten ließen sich mit Standardwerkzeugen sägen (Abb. 18).



Abbildung 18: Sägeversuch

Die Platten lassen sich mit Tellerschrauben an der Holzunterkonstruktion befestigen (Abb.19).



Abbildung 19: Verschraubung der Solar-Lehmplatten

Die quer zur Lattung befestigten Lehmplatten bilden eine putzfertige Grundfläche. Mit dem feinen Grundputz wird ein Gewebe aus Jute oder Flachs eingebettet, um abschließend Lehmfarbputz oder Lehmfarbe nach individueller Gestaltung aufzutragen. Die Anwendungstests belegen die Praxistauglichkeit der neuen Platten.

Im Projektverlauf erwies sich die Formgebung als eine diffizile Optimierungsaufgabe mit Auswirkungen auf die Trocknung und die gesamte Prozessführung. Ein simpler Kasten genügt hier nicht. Die Formgebung hat Folgewirkungen im Produktionsprozess, die berücksichtigt werden mussten:

- Mehrseitige Luftdurchlässigkeit für die Solartrocknung
- Vermeidung von Anhaftungen bei Umschichtung/Entnahme der Lehmplatten.
- Wiederverwendbarkeit im Produktionskreislauf.

Perforierte Bleche wurden auf die Maße der Platten plus Schwindung zugeschnitten. In Versuchen entstand eine Konstruktion (Abb. 4) mit seitlichen Luftschlitzen und definierten Lochmaßen und deren Anordnungen. Ein Spezialanbieter für Formbleche unterstützte diesen Entwicklungsschritt mit entsprechendem Know-how.

Eine nasse, weich-steife Lehmmischung auf einem „durchlöcherten“ Blech wirft ganz praktische Probleme auf: wie konnte diese Masse in Form gehalten werden? Der Lösungsansatz verbesserte zugleich die Produkteigenschaft. Nach Labortests mit verschiedenen starken, ungebleichten Recycling-Papiersorten erwies sich eine 140gr./m² als haltbare Einlage gegen das Durchsickern Lehmmischung auf dem Lochblech. Im nächsten Schritt wurde erkannt, dass sich die Papiereinlage besser mit der Lehmmischung verbindet, wenn eine dünne Schicht Lehmklebemörtel aufgetragen wird. Bei den Versuchsreihen schaffte der Lehmklebemörtel eine stabile Verbindung zwischen Lehmmischung und Papiereinlage. Was zuerst als Handhabung zum Wenden der Platten im Trocknungsprozess gedacht war, erwies sich als neue Produkteigenschaft. Nach Trocknung bildet die Papierschicht eine Kaschierung der Oberfläche wie bei Gipskartonplatten. Die ursprünglich beabsichtigte schadensfreie Umschichtung bzw. Entnahme der Lehmplatten aus Form- und Trockenblechen wurde zum Nebeneffekt der Produkteigenschaft.

Die Lösung des Problems der Formgebung korrespondiert mit einer sich daraus ergebenden Kette von Automatisierungsschritten:

- Wasserstrahlautomat zur Trennung der Bleche nach durchgehender Befüllung am Strang,
- Handhabung der nach Befüllung 40kg schweren Formbleche mit Robotern,
- Anpassung von Transportgestellen und –gabelstapler,
- Konstruktion der Entnahme aus den Formblechen und Umwendung in Trockengestelle im Trocknungsprozess,
- Rückführung der Formbleche.

Detaillösungen wurden im vorangegangenen Abschnitt 3.1 beschrieben und gezeigt. Der Prozessablauf von der neuen Mischung mit Sekundärgrubenlehm und Miscanthusfasern zum passiven solaren Trocknungstunnel erforderte innovative und rationelle Zwischenschritte, die mehr Entwicklungsleistungen und Sachinvestitionen benötigten als bei Antragstellung erwartet. Dementsprechend überstiegen die Projektgesamtkosten mit 362.163,69 € die anfänglichen Planungen um 197.403,69 € oder rund 120%.

Der geförderte Versuchsbetrieb endete mit Ablauf des bewilligten Durchführungszeitraums am 31. Mai 2022. Es entstand eine neue Mischung für

Lehmplatten aus Sekundärlehm der bei Erdarbeiten (hier: Kiesabbau) als Abfall anfällt. Die Miscanthusfasern kommen von einem landwirtschaftlichen Versuchsfeld in der Nachbarschaft der bis dahin ungenutzten Gewächshäuser. Der Produktionsablauf und die passive Solartrocknung konnten soweit erprobt werden, dass die Funktionsfähigkeit nachgewiesen ist. Unterstützt durch Industrieventilatoren und Schwarzfolie erreichen die Platten im Trockentunnel bei Sonneneinstrahlung eine ausreichende Durchtrocknung ohne zusätzliche Wärmeenergie.

Die Anwendungstests mit ersten solar getrockneten Lehmplatten zeigten, dass sich die Platten mit Standardwerkzeugen und Schrauben im Trockenbau rationell und entsprechend des Leitfadens „Ökologische Trockenbauwände im System“ ([file:///C:/Users/lemke/Downloads/Claytec-Arbeitsblatt-Online%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/lemke/Downloads/Claytec-Arbeitsblatt-Online%20(3).pdf)) verarbeiten lassen. Die Anwendungstests dienten auch der Vorbereitung zur Prüfung nach DIN 18948 und DIN 4103, die erst mit Aufnahme der Serienproduktion durchgeführt werden.

Zum Projektabschluss sind damit alle Zielsetzungen der experimentellen Entwicklungsphase erreicht worden. Insgesamt konnte eine klimaneutrale Produktion der Lehm-Trockenbauplatte im industriellen Maßstab modellhaft erprobt und optimiert werden, dies sogar ohne zusätzliche Flächenversiegelung. Nach dem Muster dieses geförderten Pilotprojektes sollen weitere Standorte, nicht nur für Lehmplatten sondern auch für Lehmsteine entwickelt werden.

Die ökologische Bewertung wird nachfolgend in den Abschnitten 3.3 und 3.4 ausführlich dargelegt.

3.3 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Die im Projekt vollendete Umnutzung brachliegender Gewächshäuser in Rubbelrath (LK Neuss), zuletzt zur Trocknung von Blumenzwiebeln genutzt, lässt sich unter drei Aspekten bewerten:

- Optimierung passiver Solarnutzung (technologischer Aspekt)
- Einsparung von Energiekosten (ökonomischer Aspekt)
- Vermeidung von Flächenversiegelungen (ökologischer Aspekt)

- Optimierung passiver Solarnutzung (technologischer Aspekt)

Gewächshäuser sind auf die Nutzung passiver Solareinträge ausgerichtet. Die bauliche Ausrichtung und technische Ausgestaltung eines Gewächshauses zur optimalen Nutzung des Solareintrages bietet ideale Voraussetzungen für die erprobte Umnutzung zur Trocknung von Baustoffen, hier Lehmplatten. Die Umnutzung oder Umkehrung der ursprünglichen Funktion besteht darin, kein gleichmäßiges wachstumsförderndes Klima für Pflanzen zu erzeugen, sondern nur einen maximalen, solaren Wärmeeintrag zu erhalten. Das ist der innovative Grundgedanke dieses Arbeitspakets im Vorhaben.

Diese Grundidee der Entwicklung einer mit passiver Solarenergie getrockneten Lehmplatte konnte im Projektverlauf mit Verzögerung und unerwartet hohen Sachausgaben realisiert werden.

Nach langwierigen Genehmigungsverfahren (fast ein Jahr) konnten die Glashallen entsprechend der Planungen für einen Versuchsbetrieb umgebaut werden.

In Eigenbau entsandten mehrere 13m lange Trockentunnel (Abb. 20), die auf die Standardmaße der Lehmplatten zugeschnitten wurden.



Abbildung 20: Bau der Trocknungsanlagen

In jedem Trockentunnel lassen sich mit Hilfe von eigens entwickelten Transportgeräten bis zu 200 nasse Platten in ihren Formblechen einlagern. Im Projektverlauf erwiesen sich zwei Modifikationen als hilfreich zur Unterstützung des Trocknungsprozesses. Die Abdeckung der Tunnel mit schwarzer Folie dient dazu den Wärmeeintrag durch eine Art „Hitzestau“ zu erhöhen. Gemessen wurden Temperaturen von $>60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Oberflächen der Platten erhitzen sich merklich. Leistungsstarke Industrieventilatoren mit einem Luftdurchsatz von 10 - 15% der Maximalleistung von $17.300\text{ m}^3/\text{h}$ wälzen die gestaute Heißluft zur besseren Wärmeverteilung um.

Der Trocknungsprozess verläuft in zwei Stufen. Nach einer ersten Antrocknungsphase mit anfangs nassen Platten (ca. 20 M.-% Wassergehalt) in Formbleche werden die Platten mit einem Wendeautomat auf speziell entwickelte Trockengestelle gelegt, um Ober- und Unterseite gleichmäßig durchzutrocknen (kapillarer Wassergehalt in Tonmineralien nach Trocknung ca. 4 M.-%).

Die Umkehrung der Funktion von Gewächshäusern von „Klimakammern“ zu „Wärmelieferanten“ durch verstärkte passive Solareinträge öffnet nach Projektabschluss die neue Möglichkeit, Trockenbauplatten aus Lehm ohne fossile Wärmeenergie oder Verbrennung von Holz klimaneutral herzustellen.

- Einsparung von Energiekosten (ökonomischer Aspekt)

Die Solarwärme in einem Gewächshaus ist kostenfrei. Entgegen der Erwartung zu Projektbeginn konnte auf weitergehende Entlüftungstechnik verzichtet werden. Die vorläufige Muster-Umweltproduktdeklaration (Muster-UPD) des DVL für Lehmplatten geht von einem durchschnittlichen Wärmeenergieeinsatz von 1.300 kWh/m^3 mit gasbetriebenen BHKW. Bei einem durchschnittlichen Raumgewicht von 1.425 kg/m^3 sind das $0,91\text{ kWh}$ pro kg Lehmplatte.

Bei drastisch gestiegenen Gaspreisen von bis zu 0,16 €/kWh (Stand Juli 2022) und einem Raumgewicht der neuen solaren Lehmplatten von durchschnittlich 1.000kg/m³ spart die Gewächshaustrocknung gegenüber einer fossilen technischen Trocknung von Lehmplatten 145 € / m³ oder pro Solarplatte 3,60 €.

- Vermeidung von Flächenversiegelungen (ökologischer Aspekt)

Die Nutzflächen zur Mischung, Formgebung, Trocknung und Kalibrierung umfassen 2.123 m². Die Umnutzung dieser brachliegenden Gebäudeflächen vermeidet die zusätzliche Versiegelung einer Fläche gleicher Größenordnung. Die Umnutzung vorhandener Gebäude und technischer Einrichtungen spart Ressourcen gegenüber einem Neubau. Rohstoffe und Energieinput für Glasflächen, Aluminiumträger und Beton werden nicht neu verbraucht, sondern erhalten durch Wiederverwertung in neuer Nutzung einen zweiten Lebenszyklus. Das Projekt ist ein Modell für weitere Standorten mit geeigneten Brachflächen und Gebäuden zur Produktion von solar getrockneten Lehmplatten.

3.4 Ökobilanz –Bewertung der Testphase

Der Zusammenhang zwischen Mischung und Trocknungsverfahren wird am Beispiel der im Strangverfahren hergestellten Lehmplatten der 1. Generation deutlich. Bei diesem Verfahren mit Gasbefeuerung musste die Mischung möglichst trocken gehalten werden, um den Gasverbrauch im Trockentunnel zu minimieren. Die mineralische Achse der Mischung besteht demzufolge zu großen Teilen aus vorgetrockneten Ausgangsstoffen mit hohem Eintrag grauer Energie.

Die passive Solartrocknung eröffnete Freiheitsgrade zur energetischen Optimierung der Rezeptur. Erdfeuchter Baulehm ersetzt getrocknetes Tonmehl und Miscanthusfasern ersetzen Leichtzusätze aus Perliten.

Die ökologische Wirkung verdeutlicht *Tabelle 3.1* im Vergleich der Ausgangsstoffe (ohne CO₂ Gutschriften für pflanzliche Zusätze) des neuen Solarverfahrens mit dem Strangverfahren.

Tabelle 3.1: Umweltwirkung der Rezepturänderung

Ausgangsstoffe (o. CO ₂ Gutschriften)	PEI	GWP	ODP	POCP	AP	EP	ADPE	ADPF
	MJ	kg CO ₂ equiv.	kg CFC- 11 äquiv	kg C ₂ H ₄ äquiv	kg SO ₂ äquiv	kg PO ₄ ³⁻ äquiv	kg Sb äquiv	MJ H _u äquiv
Strangproduktion	7,77E+02	7,44E-01	7,37E-03	7,84E-03	1,43E-02	1,54E-02	1,42E-02	5,44E-01
Solarproduktion	2,37E-01	2,67E-02	1,81E-09	1,22E-05	3,01E-04	3,13E-04	9,58E-06	4,74E-02

Die *Tabelle 3.1* bezieht sich auf einen Vergleich der Komponenten einer Mischung, nicht auf den Gesamtprozess der Herstellung der Platten. Durch die neue Rezeptur

verbessern sich alle Wirkungsfaktoren auf die Umwelt um einen oder mehrere Faktoren. Dieses Ergebnis entspricht einer der Zielsetzungen des Projektes.

Über das Strangverfahren liegen keine weiteren Daten zur Ökobilanzierung vor. Zur Einordnung der ökologischen Projektergebnisse wird daher auf ein parallel laufendes, von der DBU gefördertes Projekt des Dachverbandes Lehm e.V. [DVL22] unter dem Az.: 35658 Bezug genommen. Der DVL hat vorläufige Umweltdaten im Rahmen der Mitwirkung von Claytec im Fachbeirat des DVL vorgelegt. Zur Einordnung der Ökobilanz solar getrockneter Lehmplatten wird auf die Muster-UPD des DVL zu Lehmplatten als Vergleichsgröße Bezug genommen. Die Muster-UPD bewertet marktübliche Lehmplatten, die nach dem Pressverfahren mit anschließender Trocknung durch gasbetriebene BHKW hergestellt werden. Die entwickelte solar getrocknete LP (kurz. Solar-LP) unterscheidet sich von diesen am Markt befindlichen Lehmplatten nicht nur hinsichtlich der Mischung, sondern auch in Bezug zum Energieeintrag und den Umweltwirkungen (nach DIN EN 15804). Die nachfolgende Darstellung und Interpretation der Umweltwirkungen konzentriert sich auf die Treibhausgaspotenziale beider Herstellverfahren.

Die Umweltwirkungen hängen im Wesentlichen von den eingesetzten Energiemengen und Energieträgern ab. Im *Balkendiagramm 01* werden die Energieeinträge in MJ /m³ für die Bereitstellung der Ausgangsstoffe (Modul A1 nach DIN EN 15804), die Transporte in Werk (Modul A2) und die Herstellung (Modul A3) dargestellt.

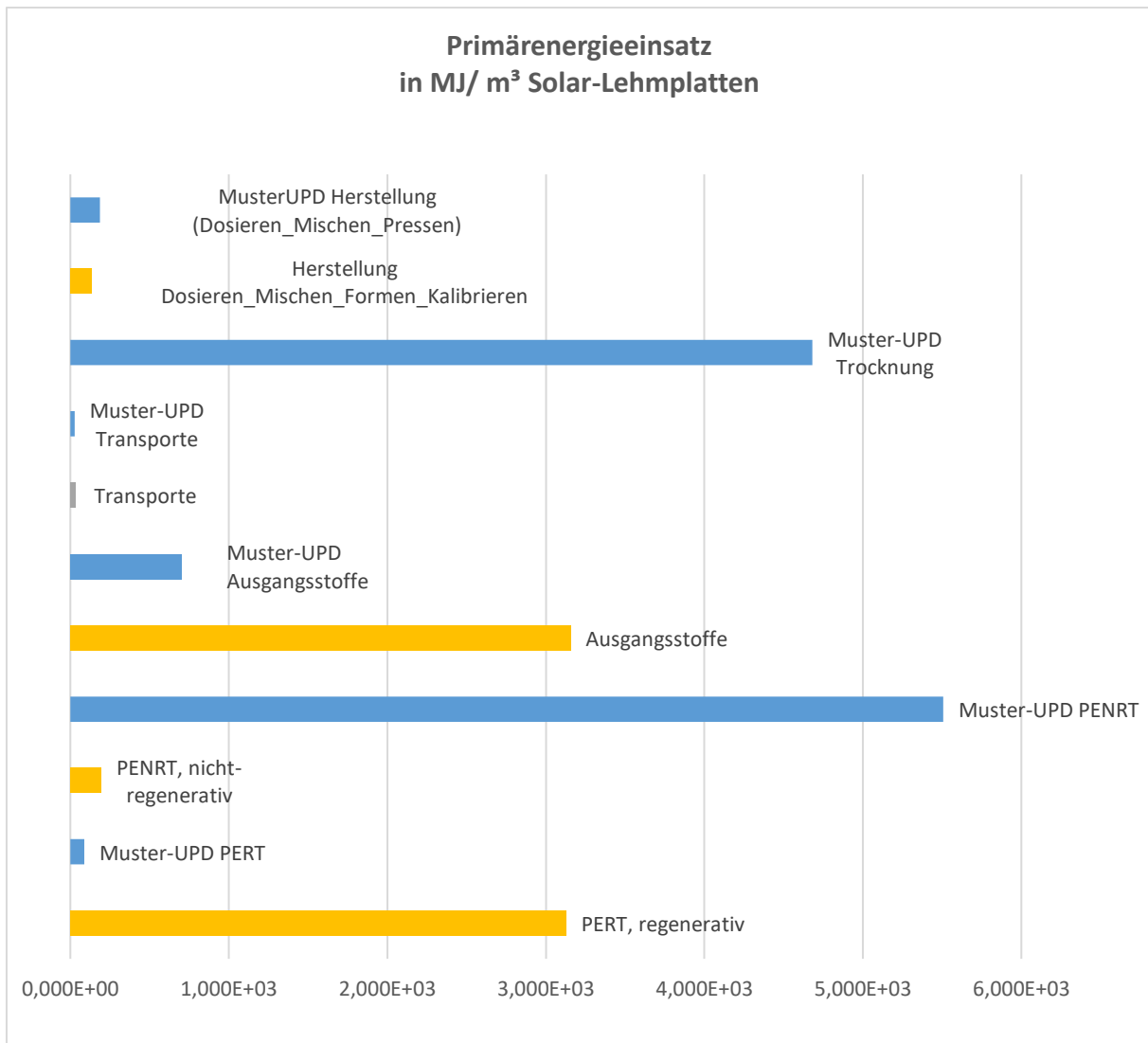


Diagramm 01: Primärenergieeinträge – Muster UPD Lehmplatten vs. Solarverfahren

Das solare Trocknungsverfahren ermöglicht eine Umkehr des Verhältnisses von nicht-regenerativer Primärenergie (PENRT) zu regenerativer Primärenergie (PERT). Die vorläufigen Daten der Muster-UPD für Lehmplatten des DVL e.V. zeigen ein deutliches Übergewicht der nicht-regenerativen Energieträgern mit 98% des Energieeinsatzes, während die Solarplatten zu 94% mit regenerativen Energieträgern produziert werden. Das schließt die Vorprodukte und die Stromverbräuche für die entwickelte Automatisierung der Prozesse bereits mit ein. Der Strombedarf der solaren Lehmplattenproduktion und der Fahrzeuge im Werk wird zu 100% aus Wasserkraft (Flusswasser) bezogen.

Eine Besonderheit der solar getrockneten Lehmplatte ist die graue Energie aus der Bereitstellung der Miscanthusfasern (Ausgangsstoffe in Diagramm 01). Abgeleitet aus der UPD für Baustroh unterstellt dieser Bilanzierungsansatz einen Energieaufwand von 3.000 MJ/m³ LP davon 95% erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (z.B. Dünger). Das ist eine worst-case-Annahme mangels spezifischen Umweltbilanzdaten für den Anbau und die Ernte der Miscanthuspflanzen (Säen, Bewässern, Düngen und ggf. Pflanzenschutz). Der Gesamtenergieeinsatz ohne den Anteil der Bereitstellung von Miscanthus mit der

gesamten Vorkette (z.B. Transporte ins Werk) beträgt 323 MJ/m³ Lehmplatten, davon 82% regenerativ.

Trotz Kraft-Wärme-Kopplung durch den Einsatz von BHKW erfordert allein die Trocknung der Lehmplatten der Muster-UPD 4.681 MJ/m³ (Herstellung (Trocknung) in Diagramm 01). Dem steht der Export elektrischer Energie als Kuppelprodukt für andere Prozesse mit durchschnittlich 2.060 MJ/m³ Lehmplatte gegenüber.

Die verstärkte Nutzung regenerativer Energieträger und der Verzicht auf fossile Trocknungsenergie spiegeln sich im Vergleich der Treibhausgasemissionen zwischen der Muster-UPD für das Pressverfahren und dem Solarverfahren wider. Balkendiagramm 02 zeigt die Treibhausgaspotenziale (GWP 100) der Prozessstufen von den Ausgangsstoffen bis zur Herstellung als CO₂ Äquivalentkennwerte. Die Treibhausgaspotenziale der solar getrockneten Lehmplatte sind negativ mit -279 kg CO₂ equiv. /m³ Lehmplatte, weil darin eine CO₂ - Gutschrift für das im Miscanthus gespeicherte CO₂ in Höhe von 286 kg CO₂ equiv./ m³ (Masseanteil von 225 kg / m³) enthalten ist.

Die Lehmplatten der Muster-UPD enthalten ebenfalls CO₂ Gutschriften für die darin enthaltenen Holzspäne und Pflanzenteile in Höhe von 148 kg CO₂. Durch die technische Trocknung mit gasbetriebenen BHKW ergeben sich insgesamt 137 kg CO₂ equiv. /m³ mit CO₂ Gutschrift.

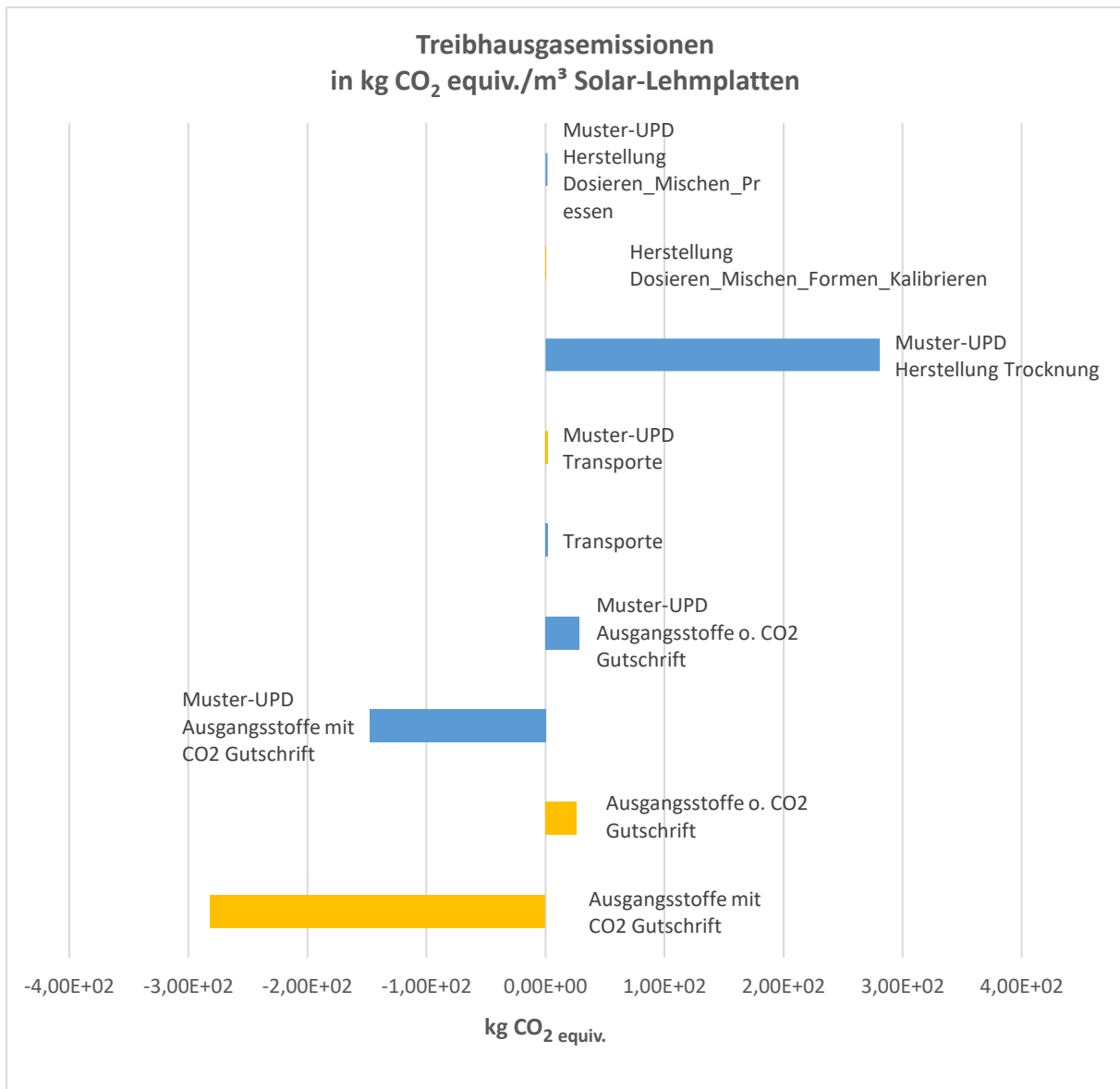


Diagramm 02: Treibhausgasemissionen – Muster UPD vs Solarverfahren

Die Treibhausgasemissionen der neuen solargetrockneten Lehmplatte sind über alle Prozessstufen hinweg geringer als bei Lehmplatten nach Pressverfahren in der Muster-UPD.

In den Lehmplatten der Muster-UPD sind Holzfasern als Holzspänen enthalten. Deren CO₂ Speichervolumen beträgt gemäß Muster-UPD 1,1 kg pro kg Holzspäne. Die zur Bewertung des Miscanthusanteils in der Solarplatte herangezogene UPD des Fachverbandes Strohballenbau [FASBA 14] zu Baustroh weist hingegen ein Speichervolumen von 1,27kg/kg Stroh aus. Mit den höheren Faseranteilen von 225 kg pro m³ der Solarplatte ergeben sich proportional höhere CO₂ Gutschriften von 286 kg /m³ LP gegenüber 148 kg/m³ bei Lehmplatten der Muster-UPD, deren Holzanteil 12 M.-% beträgt.

Ohne CO₂ Gutschriften beträgt die CO₂-Bilanz der Solar-Lehmplatte 6,87 kg CO₂ equiv. / m³ Lehmplatte . Die Lehmplatte der Muster-UPD kommt ohne CO₂

Gutschrift auf eine CO₂ Bilanz von 311,33 kg CO₂ equiv. / m³ Lehmplatte. Mit der hier entwickelten neuen Mischung und dem erprobten solaren Trocknungsverfahren ist es gelungen, die Treibhausgasemissionen gegenüber den Lehmplatten der Muster-UPD um 98% zu senken - ohne CO₂ Gutschriften.

3.4.1 Ökologische Gebäudebewertung – Trockenbau mit Solarplatten

Aus Sicht der Gebäudebewertung können die Umweltdaten auf m² umgerechnet werden. Demnach entfiel auf die Solar-Lehmplatte für eine typische beplankte Trockenbauwand ein Eintrag „grauer Energie“ aus regenerativen Energieträgern in Höhe von 94,85 MJ/m² und aus nicht-regenerativen Energieträgern noch rund 6 MJ/m².

Zur Veranschaulichung der ökologischen Effekte der Solar-Lehmplatte stellt *Tabelle 3.2* die Energieeinträge und Treibhausgaspotenziale verschiedener Beplankungsmaterialien pro m² gegenüber.

Tabelle 3.2: Umweltwirkungen unterschiedlicher Trockenbauplatten pro m²

Umweltfaktoren	nicht-regenerative Energie	Regenerative Energie	GWP 100 mit CO ₂ Gutschriften	GWP 100 ohne CO ₂ Gutschriften
Einheiten	MJ/m ²	MJ/m ²	kg CO ₂ equiv./m ²	kg CO ₂ equiv./m ²
Solar-Lehmplatte 30kg/m ²	5,90	94,85	-8,45	0,21
Muster UPD Lehmplatte 32kg/m ² 1)	124,00	1,98	3,08	7,2
Gipskartonplatte 17,5 kg/m ² 2)	117,25	7,53	7,63	Nicht relevant
1) vorläufige Angaben DVL e.V. [DVL22]				
2) Bundesverband der Gipsindustrie e.V.; EPD-KNA-20160144-1AG1-DE; bezogen auf 20mm und 17,5kg/m ² [BdG 14]				

Die Platten in *Tabelle 3.2* haben unterschiedliche Raumgewichte und dementsprechend abweichende Gewichte pro m². Auffällig ist die Umkehr der Anteile regenerativer Energieeinträge im Verhältnis zu nicht regenerativen Energieeinträgen gegenüber den anderen Platten. Der mit knapp 95 MJ/m² hohe Anteil regenerativer Energie für die Solar-Lehmplatte entsteht bei der Bereitstellung der Miscanthusfasern und dem Strom aus Wasserkraft. Die anderen Platten setzen mehr fossile Energieträger ein, insbesondere Gas.

Beide Lehmplatten verursachen weniger Treibhausgaspotenziale als Gipskartonplatten. Die Solar-Lehmplatte ist bislang die einzige Trockenbauplatte mit einer negativen CO₂ Bilanz. Die Mischung von Sekundärgrubenlehm aus Bodenabfällen der Kiesgewinnung mit einem hohen Masseanteil von

Miscanthusfasern ist ursächlich für diesen Treibhausgas-Entlastungseffekt in der Ökobilanz. Alle Lehmplatten werden stofflich verwertet als „Rohstoffquelle“ für neue Lehmprodukte. Deshalb bleibt das im Miscanthusanteil gespeicherte CO₂ im Kreislauf und wird nicht bei energetischer Verwertung wieder freigesetzt (s. 3.4.2 Modul D).

3.4.2 Tabellenanhang zur Ökobilanzierung

Im Tabellenanhang ist ein Auszug aus der vorläufigen Ökobilanz nach DIN EN 15804:2020. Die Tabelle 3.3 enthält die Daten zu den Inputfaktoren (Energie, Wasser etc). Die Tabelle 3.4 enthält die Daten zu den Umweltwirkungen (Treibhausgase, Ozonbildung, Versauerung Boden/Wasser etc.). Die Tabelle 3.5 zeigt die Outputfaktoren (Abfälle einschließlich aus Vorprodukten). Alle Daten spiegeln den Stand der geförderten Pilotphase wider, erst mit einer Serienproduktion lässt sich die Ökobilanz abbilden.

Eine erklärungsbedürftige Besonderheit in den Tabellen ist die Bewertung der Rückgewinnungspotenziale nach Informationsmodul D der DIN EN 15804:2020. In allen Tabellen werden drei Szenarien betrachtet:

- Modul D1 bewertet die Wiederverwendung von LP nach Demontage mit 10% Verlust.
- Modul D2 bewertet die Wiederverwertung der Ausgangsstoffe einer Alt-Platte zur Herstellung einer neuen LP
- Modul D3 bewertet die Wiederverwertung der Ausgangsstoffe, insbesondere den trockenen Baulehm für andere Lehmstoffe, z.B. Lehmputz.

Die Muster-UPD des DVL e.V. weist die grundsätzlichen Verwendungs- und Verwertungswege für alle Lehmplatten nach. Entsprechend des Ansatzes der Muster-UPD sind die Rückgewinnungspotenziale abhängig vom Baulehmanteil und dem jeweiligen Verwendungs- bzw. Verwertungsweg in den Modulen D1 - D3. So ergeben sich Rückgewinnungspotenziale als Einsparung des Energieeinsatzes in Höhe von rund 3.000 (D1 Demontage und Wiederverwendung) bis 694 MJ/m³ Lehmplatten (D3 Verwertung des enthaltenen Baulehms für andere Lehmprodukte). Die vermeidbaren Treibhausgasemissionen als CO₂ equiv. (GWP100) betragen je nach Rückgewinnungsszenario zwischen 6,7 kg CO₂ (D 2) und 87 kg CO₂ pro m³ Lehmplatte (D 3).

Tabelle 3.3: Inputfaktoren pro m³ solar getrockneter Lehmplatten

Solar-Lehmplatte 25mm nach DIN 18948												
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA												
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM - Tabelle A2												
Produktstadium	Funktionale Einheit m ³	Parameter	PERE	PERM	PERT	PENRE	PENRM	PENRT	SM	RSF	NRSF	FW
		IM/Einheit	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	MJ H _u	kg	MJ H _u	MJ H _u
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	1,32E+02	2,85E+03	2,99E+03	1,57E+02	8,51E+00	1,65E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,53E-01
	Transport	A2	2,05E+00	0,00E+00	2,05E+00	3,05E+01	0,00E+00	3,05E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,37E-03
	Herstellung	A3	1,31E+02	0,00E+00	1,31E+02	7,51E-01	0,00E+00	7,51E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,35E-01
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	2,65E+02	2,85E+03	3,13E+03	1,88E+02	8,51E+00	1,96E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,91E-01
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung	C3	6,03E-05	0,00E+00	6,03E-05	1,65E-02	0,00E+00	1,65E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,00E-08
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwendung LP	D1	-2,38E+02	-2,57E+03	-2,81E+03	-1,69E+02	-7,65E+00	-1,77E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-3,52E-01
	Wiederverwertung neue LP	D2	-1,32E+02	-2,85E+03	-2,99E+03	-1,57E+02	-8,51E+00	-1,65E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung Baulehm	D3	-3,39E+01	0,00E+00	-3,39E+01	-6,60E+02	0,00E+00	-6,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

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

PERM Nutzung erneuerbarer Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

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

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

PENRM Nutzung nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen, die als Rohstoffe verwendet werden

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

SM Nutzung von Sekundärstoffen

RSF Nutzung erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

NRSF Nutzung nicht erneuerbarer Sekundärbrennstoffe

FW Nettonutzung von Frischwasser

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

Tabelle 3.4: Umweltwirkungen pro m³ solar getrockneter Lehmplatten

Solar-Lehmplatte 25mm nach DIN 18948												
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										Ergänzende Parameter		
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM - Tabelle A2												
Funktionale Einheit m ³		Parameter	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	GWP (fossil)	GWP (biogen)	GWP LuL
		IM/ Einheiten	kg CO ₂ äquiv	kg CFC-11 äquiv	kg SO ₂ äquiv	kg PO ₄ ³⁻ äquiv	kg C ₂ H ₄ äquiv	kg Sb äquiv	MJ H _u äquiv	kg CO ₂ äquiv	kg CO ₂ äquiv	kg CO ₂ äquiv
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	-2,81E+02	1,53E-01	3,92E-01	1,60E-01	3,76E-01	1,53E-01	1,57E+02	4,57E+00	-2,86E+02	0,00E+00
	Transport zum Werk	A2	2,24E+00	4,44E-10	5,16E-03	1,20E-03	1,48E-03	2,40E-04	3,04E+01	2,24E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	5,12E-02	1,44E-13	7,39E-05	2,28E-04	5,67E-05	2,12E-04	2,08E-01	5,12E-02	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	Gesamt	-2,79E+02	1,53E-01	3,97E-01	1,62E-01	3,78E-01	1,54E-01	1,88E+02	6,87E+00	-2,86E+02	0,00E+00
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung	C3	1,47E-04	6,81E-14	5,43E-07	3,64E-08	9,25E-08	4,11E-08	1,64E-02	1,47E-04	0	0
Rückgewinnungs- potenziale	Wiederverwendung LP	D1	-2,52E+01	-1,38E-01	-3,58E-01	-1,45E-01	-3,40E-01	-1,38E-01	-1,69E+02	-2,520E+01	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung neue LP	D2	-6,66E+00	-1,73E-06	-2,88E-01	-3,09E-01	-9,33E-03	-4,22E-05	-1,76E+02	-6,66E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung Komponenten	D3	-8,71E+01	-1,25E+01	-1,26E+01	-1,25E+01	-1,26E+01	-1,25E+01	-6,63E+02	-8,71E+01	0	0

GWP Globales Erwärmungs-Potenzial

ODP Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht

AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser

EP Eutrophierungspotenzial

POCP Potenzial hinsichtlich der Bildung von troposphärischem Ozon

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

ADPF Potenzial für den abiotischen Ressourcenabbau - fossile Brennstoffe

MB Modul beschrieben

MND Modul nicht deklariert

MNR Modul nicht relevant

Tabelle 3.5: Outputfaktoren pro m³ solar getrockneter Lehmplatten

Solar-Lehmplatte 25mm nach DIN 18948										
Deklaration der Umweltparameter, abgeleitet aus der LCA										
Darstellung gemäß DIN EN 15942 Anhang A Muster ITM - Tabelle A5										
Funktionale Einheit m ³		Parameter	HWD	NHWD	RWD	CRU	MFR	MER	EEE	EET
		MI/ Einheiten	kg	kg	kg	kg	kg	kg	MJ	MJ
Produktstadium	Ausgangsstoffe	A1	4,41E-05	8,47E-01	1,83E-02	3,33E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,75E+01
	Transport	A2	1,91E-03	2,34E-03	4,62E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Herstellung	A3	3,27E-06	2,98E-02	1,82E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Summe (des Produktstadiums)	A1-A3	1,96E-03	8,79E-01	3,65E-02	3,33E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,75E+01
Baustadium	Transport	A4	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Montageprozess	A5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
Nutzungsstadium	Nutzung	B1	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Instandhaltung	B2	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Reparatur	B3	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Ersatz	B4	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Erneuerung	B5	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	Betriebliche Energienutzung	B6	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Betriebliche Wassernutzung	B7	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
Entsorgungsstadium	Rückbau, Abriss	C1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Transport	C2	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--	MNR--
	Abfallaufbereitung	C3	1,43E-07	1,47E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Rückgewinnungspotenziale	Wiederverwendung LP	D1	-1,76E-03	-7,91E-01	-3,29E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Wiederverwertung neue LP	D2	-4,41E-05	-8,47E-01	-1,83E-02	-3,33E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,75E+01
	Wiederverwertung Komponenten	D3	-5,24E-02	-6,86E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

HWD Gefährlicher Abfall zur Deponie
NHWD Entsorgter nicht gefährlicher Abfall
RWD Entsorgter radioaktiver Abfall
CRU Komponenten für die Wiederverwendung
MFR Stoffe zum Recycling
MER Stoffe für die Energierückgewinnung
EEE Exportierte Energie elektrisch
EET Exportierte Energie thermisch

MB Modul beschrieben
MND Modul nicht deklariert
MNR Modul nicht relevant

3.5 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabenergebnisse.

Die Erkenntnisse aus der Entwicklung und Erprobung der ersten Pilotanlage dienen dazu, das Konzept solar getrockneter Lehmplatten an weiteren Standorten umzusetzen. Diese Art der Verbreitung der Vorhabenergebnisse führt zu einer hinreichend großen Kapazität, verlässlicher Lieferfähigkeit und dezentraler Verfügbarkeit mit geringeren Transportentfernungen zu den Baustellen bzw. Bauhandelsstrukturen. Als ersten Schritt reservierte Claytec eine Fläche auf dem Gelände der ehemaligen Javelin Barracks in Elmpt im Kreis Viersen, weil eine ökologisch nachhaltige Ausrichtung möglicher Ansiedlungen geplant wird.

Nach Beginn der Serienproduktion werden die neuen Solar-Lehmplatten in die Vertriebsstruktur von Claytec integriert und über den Baustoffhandel in Deutschland und Europa am Markt eingeführt. Zugleich folgen Vorführungen, Schulungen und Anwendungsunterlagen für die Planer und Handwerker im Claytec-Verbund

Die Platten werden auf Messen präsentiert. Assoziierte Teilnehmer erfahren von der Innovation im Clay Blog und im Clay Newsletter (<https://www.claytec.de/de/clayblog>; <https://www.claytec.de/de/newsletter>).

4. Fazit

Erhebliche Genehmigungshürden vor Aufnahme der Arbeitsschritte erforderten eine Verlängerung der Projektlaufzeit bis Ende Mai 2022. Neben pandemiebedingten Einschränkungen im Projektablauf ab März 2020 taten sich unerwartete administrative Hindernisse auf. Die Anmietung und Nutzung einer geeigneten, leerstehenden ehemaligen Trocknungshalle für Blumenzwiebeln (Glashallen) in Korschenbroich verzögerte sich, weil eine Umsetzungsgenehmigung der zuständigen Unteren Immissionsschutzbehörde umfangreiche behördliche Begutachtungen folgender Punkte erfordert:

- Brandschutzgutachten
- Ausführliche Betriebsbeschreibung,
- Maschinenaufstellungsplan,
- Schalltechnisches Gutachten durch anerkannten Sachverständigen auf Grundlage der TA Lärm
- Ausführliche Beschreibung der Anlagen zur Stauberfassung, Abluftreinigung, Abluftableitung und Staublagerung.

Zum Zeitpunkt dieses Berichtes steht noch das Schallschutzgutachten aus.

Alle Hinweise auf den experimentellen Charakter des Vorhabens und die Förderung durch die DBU wurden seitens der Genehmigungsbehörde nicht akzeptiert. Stattdessen erfolgt die behördliche Prüfung anhand des vorläufigen Planungsstandes vor Durchführung des Probetriebes.

Die Kosten für Gutachten und Umnutzungspläne beliefen sich, ohne eigene Arbeitsleistungen, auf rund 5.000 € oder 5% der Fördersumme.

Das Ausmaß der erforderlichen technischen Innovationen (s. Formgebung) und der Grad der notwendigen Automatisierung waren bei Antragstellung nicht von vornherein absehbar. Die Optimierung technischer Problemstellungen ergab sich erst durch Erkenntnisse im Verlauf der experimentellen Erprobung der einzelnen Prozessschritte. Die tatsächlichen Sachausgaben liegen dementsprechend drastisch über den geplanten Sachausgaben. Selbst unter Berücksichtigung der Abschreibungsdauer einzelner Gegenstände nur während der Projektlaufzeit überstiegen die Ist-Sachausgaben mit 207.000,00 € die Plan-Sachausgaben von 21.600 € fast um das 10-fache. Damit verbundene Fremdleistungen für Ingenieurleistungen zum Anlagen- und Maschinenbau in Höhe von rund 30.000,00 € überstiegen die Planzahlen um das Doppelte.

Insgesamt musste CLAYTEC statt geplanter 82.360 € am Ende 288.338,84 € Eigenmittel einsetzen. Die tatsächliche Förderquote sank entsprechend von 50% auf 22%.

Die energetische Optimierung und Umstellung auf regenerative Energieträger für Wärme und Strom kann als Erfolg verbucht werden. Unter Berücksichtigung der CO₂ Abscheidung durch Speicherung in den Miscanthuspflanzen vom „Feld nebenan“ weist die Ökobilanz einen negativen Wert der Treibhausgaspotenziale (oder Treibhausgasentlastungspotenziale) von -279 kg CO₂ equiv. / m³ Lehmplatte aus.

Aus ökologischer Sicht hat sich das Projekt zur Entwicklung und Erprobung der solaren Trocknung einer Lehmplatte gelohnt. Es gibt eine klimaneutrale, wenn nicht sogar klimaentlastende Trockenbauplatte aus Lehm. Betriebswirtschaftlich rechnet sich das Vorhaben erst, wenn eine kontinuierliche Serienproduktion läuft und mit dieser „Blaupause“ weitere Produktionsstandorte leichter aufgebaut werden können.

Literaturverzeichnis

Zitierte Normen:

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

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

Zitierte Umweltproduktdeklarationen:

[FASBA 14] Fachverband Strohballenbau Deutschland (FASBA) e.V.: Baustroh,
EPD-FASBA-2014-1-ECOINVENT, Wien 2014

[BdG 14] Bundesverband der Gipsindustrie e.V.: Gipsplatten, EPD-KNA-20160144-
IAG1-DE, Berlin 2014

[DVL 22] Dachverband Lehm e.V.: Musterumweltproduktdeklaration für die
Baustoffkategorie Lehmplatten (UPD LP) nach DIN EN 15804; Entwurf Juli 2022

Sonstige Quellen:

[CLAY 22:] Ökologische Trockenbauwände im System, Viersen 2022