

Dr. Frank Werner

Umwelt & Entwicklung

Idaplatz 3

CH-8003 Zürich

Schweiz

Tel.: ++41-(0)44-241 39 06

e-mail: frank@frankwerner.ch

Web: www.frankwerner.ch

Arbeitsbericht

für die unabhängige Prüfung der Berechnung der

**Indikatorwerte von Hanf-Kalk-Ziegel aus Hanf und
Kalk des Schönthaler Betonsteinwerks**

für die KBOB-Liste

bzw. als Projektbericht gemäss EN 15804

Eine Studie im Auftrag des

Schönthaler Betonsteinwerks

Vinschgauer Straße | Via Venosta 33

I-39023 Eysr | Oris (BZ)

21. April 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Geltungsbereich.....	3
2	Ziel der Studie.....	3
3	Umfang der Studie	3
3.1	Deklarierte/funktionale Einheit.....	3
3.2	Produktbeschreibung	4
3.3	Herstellung von Hanf-Kalk-Ziegeln	4
3.4	Anwendungsbereiche von Hanf-Kalk-Ziegeln	4
3.1	Anwendungsbereiche von Hanf-Kalk-Ziegeln	4
3.2	Systemgrenzen der Ökobilanz.....	5
3.3	Auswahl der Daten/Hintergrunddaten	5
3.4	Datenqualität der Hintergrunddaten	5
4	Erhebung der Betriebsdaten.....	6
4.1	Datenerhebung und Berechnungsverfahren.....	6
4.1.1	Herstellung von Hanf-Kalk-Ziegel	6
4.1.2	Produktion von Hanfschäben	6
4.2	Kriterien für den Ausschluss von Inputs und Outputs und deren Anwendung.....	7
5	Sachbilanz	8
5.1	Systemgrenze	8
5.2	Allokationen und verwendeter Strommix.....	9
5.2.1	Co-Produkt Allokation	9
5.2.2	Allokation bei Multi-Input Prozessen	9
5.2.3	Allokationsverfahren für Wiederverwertung, Recycling und Rückgewinnung.....	10
5.2.4	Strommix	10
5.3	Weitere methodische Setzungen	10
5.4	Hintergrunddaten.....	10
5.5	Darstellung der Einheitsprozesse („unit processes“)	10
6	Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung nach KBOB.....	16
7	Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung nach den Rechenregeln SN EN 15804	18
7.1	Berechnungsgrundlage der ausgewiesenen Indikatoren.....	18
7.1	Zusammenstellung der Ergebnisse.....	19
7.1.1	Indikatoren der Wirkungsabschätzung.....	21
7.1.2	Ausgewählte Indikatoren der Sachbilanz	24
7.1	Aussagefähigkeit und Datenqualität	24
8	Referenzen	25

1 Geltungsbereich

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Berechnung der Umweltindikatoren für durchschnittlichen Hanf-Kalk-Ziegel aus Hanf und gebranntem Kalk des Schönthaler Betonsteinwerks, wie sie in der von der Plattform für Ökobilanzdaten im Baubereich gepflegten „KBOB-Liste“ (KBOB et al. 2016a) für Baustoffe gelistet sind. Der vorliegende Projektbericht enthält alle Daten und Informationen, die zur unabhängigen Prüfung durch die Fachgruppe der Plattform für Ökobilanzdaten basierend auf den Regeln für Ökobilanzdaten im Baubereich gemäß der KBOB-Liste (Frischknecht 2014) notwendig sind.

Der Projektbericht ist nicht Teil der öffentlichen Kommunikation. Er wird der Fachgruppe der Plattform Ökobilanzdaten im Baubereich unter den Bedingungen der Vertraulichkeit zugänglich gemacht.

Zusätzlich dokumentiert der vorliegende Bericht die Umsetzung der methodischen Anforderungen für die Auswertung der Ökobilanz nach den Anforderungen der SN EN 15804+A1.

2 Ziel der Studie

Ziel der Studie ist es, für die Herstellung und Entsorgung von Ziegeln aus Hanf und Branntkalk des Schönthaler Betonsteinwerks die in der Schweiz für Bauprodukte üblicherweise verwendeten Umweltindikatoren nach den Rechenregeln der KBOB-Liste zu berechnen. Die Datenerhebung umfasst das Werk des Schönthaler Betonsteinwerks, ergänzt um eine Literaturrecherche zur Produktion von Hanf bzw. Hanfschäben als einem der wesentlichen Hauptbestandteile der bilanzierten Hanf-Kalk-Ziegel.

Die entsprechenden Umweltindikatoren für Hanf-Kalk-Ziegel des Schönthaler Betonsteinwerks sollen danach in der KBOB-Liste aufgenommen werden.

Weiter werden die Umweltindikatoren nach den Anforderungen der EN 15804+A1 ausgewertet, damit das Produkt im Rahmen des Südtiroler Förderprogrammes für energieeffiziente Bauten (Klimahaus A nature) eingesetzt werden kann.

3 Umfang der Studie

3.1 Deklarierte/funktionale Einheit

Als funktionale Einheit wird für die Hanf-Kalk-Ziegel in Übereinstimmung mit der in der KBOB-Liste ausgewiesenen Einheit berechnet:

- 1 kg Hanf-Kalk-Ziegel der mittleren Dichte von 300 kg/m^3 aus der Produktion des Schönthaler Betonsteinwerks in Eys | Oris (BZ)

3.2 Produktbeschreibung

Der bilanzierte Naturstein aus Hanf und Branntkalk ist ein künstlich hergestellter Mauerstein aus Branntkalk (Kalziumoxyd in Kombination mit verschiedenen Mineralisierungen) sowie losen Hanfschäben, die in einem Kaltluftverfahren zu einem Ziegel gepresst werden. Die technischen Daten von Wänden aus Hanf-Kalk-Ziegel sind in Abhängigkeit der Wandstärke in Tabelle 3-1 zusammengestellt.

Tabelle 3-1: Technischen Daten von Wänden aus Hanf-Kalk-Ziegel sind in Abhängigkeit der Wandstärke (Quelle: technisches Merkblatt)

Mauerdicke	8	12	20	24	38	Vollziegel
Maße cm	8x50x22	12x60x22	20x55x22	24x48x22	38x50x22	6x22x11
Stück/m ²	9	7,5	8	9,5	9	/
Stück/m ³	111	62,5	40	38,5	23,8	500
Wärmeleitfähigkeit W(mK)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Wärmedurchgangskoeffizient in W(m ² K)	0,76	0,53	0,33	0,27	0,18	/
Dichte in kg/m ³	300	300	300	300	300	300
Schallabsorbtionsgrad	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Phaseverschiebung in Stunden	3:09	5:53	12:06	14:48	24:30	
Spezifische Wärmekapazität [J/(kg x K)]	1870	1870	1870	1870	1870	1870
Brandverhalten EN ISO 9239-1 Euroklasse B B-s1, d0	B-s1, d0	B-s1, d0	B-s1, d0	B-s1, d0	B-s1, d0	B-s1, d0

3.3 Herstellung von Hanf-Kalk-Ziegeln

Für die Herstellung der Hanf-Kalk-Ziegel werden die Hanfschäben mit dem Kalk und Wasser gemischt, in eine Formanlage für Betonsteine gefüllt, gepresst und danach luftgetrocknet. Bei der Herstellung reagiert das CaO mit dem Wasser zu Ca(OH). Das Ca(OH) wiederum reagiert unter Aufnahme von CO₂ und Abspaltung von Wasser zu CaCO₃.

Nach der Trocknung werden die Ziegel palettiert und gelagert.

3.4 Anwendungsbereiche von Hanf-Kalk-Ziegeln

Der Hanf-Kalk-Ziegel wird im Rohbau für Innen- und Außenwände verwendet, namentlich für Trennwände, Außenwände, Neuerrichtung von Isolationsmauern, Vollwärmeschutz von existierenden Bauwerken, Innendämmung von existierenden Bauwerken, Unterfußbodendämmung, innere Akustikwände, Vollwärmeschutz von Neubauten sowie für Sanierungen von Altbauten.

Der Stein kann mit Isoliermauermörtel oder Kalk-Hanf-Mauermörtel (Röfix) vermauert werden. Grund- und Feinputz müssen atmungsaktiv sein (z. B. Röfix Hanf-Kalk Putze, Sumpfkalk, NHL-, Kalk, Hanf- oder Lehmputz). Hanfsteine können innen auch direkt mit Kalkmilchfarbe oder Lehmfarbe gestrichen werden ohne Verputz. Sie werden mit einer Hand-, Motor- oder Kreissäge geschnitten.

3.1 Anwendungsbereiche von Hanf-Kalk-Ziegeln

Hanf-Kalk-Ziegel können unterschiedlich entsorgt werden:

- Kompostierung und Verwendung zur Bodenverbesserung (wobei organische Substanz und Kalk routinemäßig zur Bodenverbesserung eingesetzt werden),

- Wiederverwendung der mit dem Bagger zerkleinerten Hanf-Kalk-Ziegel auf der Baustelle unter Zusatz einer geringen Menge Kalk. Verwendung für Anwendungen mit erhöhter Dichte, z.B. als Bodenmaterial,
- Verbrennung in einer KVA (da nicht deponiefähig).

3.2 Systemgrenzen der Ökobilanz

Für den deklarierten Hanf-Kalk-Ziegel wird eine Ökobilanz für:

- die Herstellung gemäß KBOB-Liste bzw. über die Module A1-A3 nach EN 15804 (Tabelle 3.1)),
- die Entsorgung gemäß KBOB-Liste bzw. über die Module C2-C4 plus Modul D nach EN 15804 erstellt.

Tabelle 3-2: Angaben zur Systemgrenze gemäß SN EN 15804+A1

Angaben zur Systemgrenze (X = in Ökobilanz enthalten ; MND = Modul nicht deklariert)																
Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerks		Nutzungsstadium							Entsorgungsstadium				Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze
Rohstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport zur Baustelle	Einbau ins Gebäude	Nutzung / Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	X	X	X	X

Weitere Aspekte der Systemgrenze werden im Detail in Kap. 5.1 ausgeführt.

3.3 Auswahl der Daten/Hintergrunddaten

Es wurde die allgemeine Regel eingehalten, dass spezifische Daten von spezifischen Produktionsprozessen oder Durchschnittsdaten, die von spezifischen Prozessen abgeleitet sind, bei der Berechnung einer Ökobilanz bzw. einer EPD Priorität haben müssen.

Als Datenbank für die Hintergrunddaten wurden ausschließlich die Datensätze aus ecoinvent v2.2:2016 verwendet, deren letzte Aktualisierung 2016 erfolgte.

3.4 Datenqualität der Hintergrunddaten

Die Anforderungen an die Datenqualität und die Hintergrunddaten entsprechen den Vorgaben aus SN EN 15804.

- Die Datensätze beruhen in der Regel auf einem 1-Jahresdurchschnitt.

-
- Für die Berechnung nach EN 15804: Die Zeitperiode, über die Inputs und Outputs berücksichtigt werden, beträgt 100 Jahre von dem Jahr an gerechnet, für das die Daten als repräsentativ deklariert werden. Somit wurden Langzeit-Emissionen bei der Berechnung der Ökobilanz in SimaPro ausgeblendet.
 - Für die Berechnung nach KBOB: die Langzeit-Emissionen werden bei der Berechnung der Ökobilanz in SimaPro eingeblendet.
 - Der technologische Hintergrund der erfassten Daten gibt die physikalische Realität für die deklarierten Produkte wieder.
 - Die Datensätze entsprechen den Qualitätsrichtlinien von ecoinvent 2.2; Abweichungen von den methodischen Vorgaben der SN EN 15804 sind möglich.

4 Erhebung der Betriebsdaten

4.1 Datenerhebung und Berechnungsverfahren

4.1.1 Herstellung von Hanf-Kalk-Ziegeln

Die Datensammlung erfolgte gemäß der Anleitung aus ISO 14044, Abschnitt 4.3.2, direkt im Betonsteinwerk.

Zusätzlich wurden ergänzende Annahme aus dem ecoinvent Datensatz zur Herstellung von Betonpflastersteinen verwendet, namentlich zur Infrastruktur aus dem Datensatz „mine, clay/CH

Die Daten zur ökobilanziellen Modellierung der Herstellung von Hanf-Kalk-Ziegel durch das Schönthaler Betonwerk bilden die durchschnittliche Produktion des Jahres 2016 ab.

4.1.2 Produktion von Hanfschäben

Als Schäben werden die relativ gleichmäßig gebrochenen, holzähnlichen Teilchen bezeichnet, die bei der Erzeugung von Bastfasern, vor allem von Flachs- oder Hanffasern, im maschinellen Prozess der Entholzung (Dekortikation) des Pflanzenstängels anfallen. Sie entstammen der holzigen Kernröhre des Stängels, der von den Fasern umgeben ist. Ihre Länge variiert von unter einem bis zu wenigen Zentimetern. Sie sind ein Neben- oder Kuppelprodukt der Fasererzeugung, das vorwiegend als Tiereinstreu Verwendung findet.

Hanfschäben können bis zum Vierfachen ihres Eigengewichts an Feuchtigkeit aufnehmen und sind leicht kompostierbar. Im Vergleich zu anderen natürlichen Faserstoffen zeichnen sich Schäben durch ein geringes Gewicht, eine hohe Porosität und damit hohe Dämmwirkung sowie eine hohe Elastizität aus.

Schäben machen bei Hanf etwa 50 bis 60 Prozent des Stängels aus. Sie sind damit das mengenmäßig umfangreichste Produkt des Faseraufschlusses. Hanfschäben haben eine längliche Form und setzen sich zusammen aus etwa 35 Prozent Zellulose, 18 Prozent Hemizellulose und 21 Prozent Lignin. Proteine, Pektine und Kohlenhydrate sind insgesamt zu etwa 18 Prozent enthalten.

Hanfschäben können bis zum Vierfachen ihres Eigengewichts an Feuchtigkeit aufnehmen und sind leicht kompostierbar. Im Vergleich zu anderen natürlichen Faserstoffen zeichnen sich Schäben durch

ein geringes Gewicht, eine hohe Porosität und damit hohe Dämmwirkung sowie eine hohe Elastizität aus.

Schäben fallen bei der Gewinnung von Hanffasern neben Werg und Superkurzfasern bzw. Staub an. In einer Faseraufschlussanlage werden getrockneten Pflanzenstängel (Stroh) in Fasern und Schäben getrennt. Dieser Aufschluss erfolgt in der Regel rein mechanisch: Der verholzte Innenteil des Strohs wird gebrochen, dabei entstehen die Schäben, die dann in mehreren Prozess-Schritten von den Fasern getrennt werden. Anfall beziehungsweise Gewinnung der Schäben erfolgen unterschiedlich je nach eingesetzter Technologie des Faseraufschlusses. Je höher der Anteil der bei der Faserproduktion anfallenden Schäben, desto geringer ist (bei gleichem Pflanzenmaterial) der Anteil an Schäben im Produkt „Faser“.

Als gereinigtes Produkt stellen Schäben ein marktfähiges Erzeugnis dar, in der Flachs- oder Hanffaser selbst wird dagegen meist ein niedriger Schäbengehalt angestrebt.

Die Gewinnung von Hanf und dessen Aufschluss zur Fasergewinnung wird basierend auf Literaturwerten modelliert; die zugrunde liegenden Daten stellen laut Autoren der hauptsächlich verwendeten Studie (Turunen & van der Wert, 2006) ein generisches zentraleuropäisches Szenario dar.

4.2 Kriterien für den Ausschluss von Inputs und Outputs und deren Anwendung

In der Ökobilanz wurden alle Daten aus der detaillierten Betriebsdatenerhebung verwendet.

Vernachlässigt wurde der Dieserverbrauch für werksinterne Transporte zur Herstellung der Ziegel; angesichts der Unsicherheiten bei den Hintergrunddaten ist diese Datenlücke nicht signifikant.

Weiter wird die Produktion von Hanfsamen mangels Daten und aufgrund der geringen Mengen vernachlässigt.

Mangels Daten wurden auch mögliche Staubemissionen bei der Herstellung der Ziegel nicht berücksichtigt.

Aufwendungen für Geschäftsleitung, Forschung und Entwicklung, Administration und Marketing sind, soweit bekannt, nicht berücksichtigt.

Für die Modellierung des End-of-life wurden die Aufwendungen und Emissionen für das Kompostieren bzw. die Aufwendungen für das Zerkleinern der Ziegel für das stoffliche Recycling mangels Daten vernachlässigt.

Weiter wurde für die Berechnung nach EN 15804 die C-Speicherung in der Verpackung (Palette) vernachlässigt.

Darüber hinaus wurden im Rahmen der Ökobilanz keine Material- oder Energieflüsse vernachlässigt, die den Projektverantwortlichen bekannt wäre und die eine maßgebliche Umweltwirkung hinsichtlich der ausgewiesenen Indikatoren erwarten ließen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Summe der vernachlässigten Prozesse 5 % der Wirkkategorien nicht übersteigt.

Damit sind die Kriterien für den Ausschluss von Inputs und Outputs nach Frischknecht (2014), Kap. 4.2 und Kap. 4.8. bzw. nach EN 15804, Kap. 6.3.5 erfüllt.

5 Sachbilanz

Die methodischen Setzungen zur Berechnungen der Indikatoren der KBOB-Liste sind in Frischknecht (2014) festgeschrieben, wobei weitestgehend auf die ecoinvent 2.2 Qualitätsrichtlinien (Frischknecht et al. 2007a) verwiesen wird.

5.1 Systemgrenze

Die Systemgrenze beinhaltet im Rahmen eines „cradle-to-gate Inventares“ („Herstellung“ gemäß KBOB; „Module A1-A3“ gemäß EN 15804) sämtliche Material- und Energieflüsse aus allen primären Prozessketten. Entstehen bei einem Multioutput-Prozess Beiprodukte bzw. Co-Produkte mit geringem Wert, so verlassen sie den Systemraum ohne Lasten über einen „cut-off“ (Frischknecht et al. 2007a, S. 39). In Analogie gelangen Beiprodukte bzw. Co-Produkte mit geringem Wert ohne Lasten in ein nachfolgendes Produktsystem. Dabei bleiben die CO₂-Bilanz und die Energiebilanz für biogene Materialien gewahrt (Frischknecht et al. 2007a, S. 39).

Während für die Berechnungen der KBOB-Indikatoren der im Produkt gespeicherte Kohlenstoff in CO₂-Äquivalent weder als Speicherung noch als Emission berücksichtigt wird, wird im Rahmen der Bilanzierung nach EN 15804 mit Bezug auf EN 16485 bzw. CEN/TR 16970 die Speicherung bzw. Emissionen von biogenem CO₂ explizit als Teil des GWPs modelliert. Dabei wird eine Kohlenstoffdichte von 0.496 kg C/kg atro Hanfschäben verrechnet (wie für Holz).

Weder bei der Herstellung von gebranntem Kalk oder Hanf noch bei der Herstellung von Hanf-Kalk-Ziegeln im Werk werden Abfälle oder Sekundärmaterial bzw. Sekundärbrennstoffe eingesetzt. Der Einsatz von Sekundärmaterial in Infrastrukturdatensätzen oder generell in den verwendeten Hintergrunddaten wird vernachlässigt.

Die Systemgrenze für die Entsorgung wird für die Berechnung der KBOB-Indikatoren wie folgt gesetzt:

- *Entsorgung des Hanf-Kalk-Ziegeln in einer Müllverbrennungsanlage (KVA)*¹: das rückgebaute Material wird mit einem LKW zu einer Müllverbrennungsanlage transportiert und dort thermisch behandelt. Die mögliche Substitutionswirkung der rückgewonnenen Energie wird gemäß methodischen Vorgaben der KBOB-Liste nicht berücksichtigt.

Für die Berechnung der Entsorgung gemäß EN 15804 werden 3 Szenarien ausgewiesen:

- *Kompostierung*: das rückgebaute Material wird mit einem LKW zu einem Kompostierplatz transportiert (Modul C2) und dort kompostiert; hier erreicht das kompostierte Material das Ende der Abfalleigenschaften, da für kompostierte Erde zur Bodenverbesserung ein Markt besteht und es gesetzlich erlaubt ist, Kompost in den Verkehr zu bringen. Im Rahmen dieses Szenarios wird das im Kompost gespeicherte CO₂ aus dem Produktsystem „exportiert“ (um die C-Neutralität des Produktsystems zu gewährleisten); die im Kompost gespeicherte Primärener-

¹ Für kompostierbare Abfälle gemäß Schweizer Abfallgesetzgebung besteht eine Liste des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW). Darin sind sowohl organische Ernteabfälle als auch Kalk als zulässige Materialien für die Kompostierung gelistet; dies gilt aber nicht a priori auch für Bauabfälle. Entsprechend müsste eine produktspezifische Bewilligung beantragt werden, damit die Ziegel in der Schweiz kompostiert werden dürfen. Da der organische Anteil für eine Deponierung zu hoch ist, unterstützt das Bundesamt für Umwelt die Annahme einer Entsorgung des Hanf-Kalk-Ziegels in der KVA (BAFU, persönliche elektronische Mitteilung von Hr. Hiltbrunner, 3.4.2017).

gie wird nicht umgebucht (vgl. dazu NF EN 15804/CN bzw. IBU 2016), da sie im nächsten Produktsystem aus technischer Sicht nicht mehr zur Verfügung steht (Modul C3). Auf eine Bilanzierung des entsprechenden Moduls D wird verzichtet.

- *Wiederverwendung*: das rückgebaute Material wird mit einem LKW zu einem neuen Bauplatz transportiert (Modul C2) oder direkt vor Ort belassen (Modul C2 = 0) und dort zerdrückt; hier erreicht das Material das Ende der Abfalleigenschaften, da für dieses Material als Ausgangsmaterial für neue Hanf-Kalk-Ziegel ein Markt besteht und es gesetzlich erlaubt ist, das Material in Verkehr zu bringen. Im Rahmen dieses Szenarios wird das im Material gespeicherte CO₂ aus dem Produktsystem „exportiert“ (um die C-Neutralität des Produktsystems zu gewährleisten) und die im Material gespeicherte Primärenergie umgebucht, da sie im nächsten Produktsystem aus technischer Sicht im Prinzip weiterhin zur Verfügung steht (Modul C3). Auf eine Bilanzierung des entsprechenden Moduls D wird verzichtet.
- *Thermische Abfallbehandlung in einer Müllverbrennungsanlage*: das rückgebaute Material wird mit einem LKW zu einer Müllverbrennungsanlage transportiert (Modul C2) und dort thermisch behandelt. Dabei wird ein Wirkungsgrad der Müllverbrennungsanlage gemäß (Doka 2007) angenommen, d.h. ein thermischer Wirkungsgrad von 25.6 % und ein Wirkungsgrad zur Stromerzeugung von 13 %. Hierbei wird die im Material gespeicherte erneuerbare Primärenergie als energetisch genutzt umgebucht; die generierte thermische Energie und Strom werden exportiert (Modul C4). In Modul D werden als potentielle Nutzen und Lasten die Vermeidung der Verbrennung von Erdgas zur Wärmeerzeugung sowie der italienische Konsummix für den Strom deklariert.

5.2 Allokationen und verwendeter Strommix

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

5.2.1 Co-Produkt Allokation

Bei der Umsetzung der Vordergrunddaten in ein Ökobilanzmodell wurden mehrere Co-Produktallokationen vorgenommen:

- die Prozesse zur Gewinnung von Hanf und dessen Aufbereitung zu Langfasern, kurzen Fasern und Schäben wurden ökonomisch alloziert, da das Hauptprodukt – die Langfasern – eine vergleichsweise hohe Wertschöpfung im Vergleich zu ihrem Masseanteil der Endprodukte hat (vgl. Turunen & van der Werf 2006, S. 26),
- die Flächenbeanspruchung sowie die Infrastruktur bei der Herstellung von Hanf-Kalk-Ziegeln wurde nach Volumen auf die Gesamtproduktion an Beton- und Kalkziegelsteinen der Firma Schönthaler umgelegt, da die Produktion über dieselben Maschinen läuft und Hanf-Kalk-Ziegel z.Z. nur einen geringen Anteil an der Gesamtproduktion haben.

5.2.2 Allokation bei Multi-Input Prozessen

Es wurden keine Prozesse modelliert, die eine Multi-Input Allokation erfordert hätten.

5.2.3 Allokationsverfahren für Wiederverwertung, Recycling und Rückgewinnung

Allokationsverfahren für Wiederverwertung, Recycling und Rückgewinnung werden in Übereinstimmung mit den ecoinvent.2.2 Qualitätsrichtlinien (Frischknecht et al. 2007a) durch den „cut-off“-Ansatz modelliert.

5.2.4 Strommix

In den neu erstellten Datensätzen zur Herstellung von Hanf-Kalk-Ziegeln wurde der italienische Strom-Mix (Verbrauchsmix) mit Bezugsjahr 2008 aus den Datensätzen aus www.lc-inventories.ch verwendet.

5.3 Weitere methodische Setzungen

Es wurden keine CO₂-Zertifikate verrechnet.

5.4 Hintergrunddaten

Als Datenbank für die Hintergrunddaten wurden ausschließlich die Datensätze aus ecoinvent v2.2 inkl. der Aktualisierungen von Datensätzen aus www.lc-inventories.ch in der Version ecoinvent 2.2:2016 (KBOB et al. 2016b) verwendet. Diese Datenbank wurde von der Firma treeze GmbH zur Verfügung gestellt; sie wurde unverändert für diese Berechnungen verwendet.

Die Berechnung der Ökobilanz erfolgte in der Ökobilanzsoftware SimaPro, Version 8.3.0.0.

5.5 Darstellung der Einheitsprozesse („unit processes“)

Tabellen 5-1 bis 5-4 stellen die Inputs und Outputs zusammen für den Anbau von Hanf, die Herstellung von Hanfschäben, die Herstellung der Hanf-Kalk-Ziegel sowie die Entsorgung des Ziegels:

1. Anbau von Hanf,
2. Herstellung von Hanfschäben,
3. Herstellung des Hanf-Kalk-Ziegels,
4. Entsorgung des Hanf-Kalk-Ziegels.

Ist in den nachfolgenden Tabellen in diesem Kapitel einem Input bzw. Output kein ecoinvent Prozess zugewiesen, so wird der entsprechende Massen- bzw. Energiefluss bei der Modellierung der Ökobilanz nicht berücksichtigt.

5.5.1 Herstellung

In Tabelle 5-1 sind die Prozessdaten für die Gewinnung von Hanf unter zentraleuropäischen Bedingungen dokumentiert (Turunen & van der Werf 2016, S. 72). Die Kulturen werden weder bewässert noch mit Pestiziden behandelt. Es wird einer 1-jährigen Umtriebszeit angenommen.

Die Herstellung der Samen wird mangels Daten und aufgrund untergeordneter Umweltrelevanz vernachlässigt.

In Tabelle 5-2 sind die Prozessdaten für die Nachernteprozesse und für die Gewinnung von Hanffasern dokumentiert; diese Prozesskette umfasst das Verladen des getrockneten Hanfs, den Transport zur Verarbeitung und danach das Brechen der Stängel und Entholzen der Hanffasern. Als Nebenprodukte

fallen dabei die Hanfschäben und kurze Fasern an. Zur Aufteilung der Lasten auf die 3 Co-Produkte wird wie oben ausgeführt eine ökonomische Allokation vorgenommen.

In Tabelle 5-3 sind die Prozessdaten für die Herstellung von Hanf-Kalk-Ziegeln aus Hanfschäben und Kalk dokumentiert. Strom aus der eigenen PV-Anlage wird nicht direkt in der Produktion eingesetzt sondern vollständig ins Netz eingespeist. Deshalb wird in der Modellierung der Herstellung der Ziege der Strommix für Italien bilanziert. Die Rohstoffe Hanfschäben und Kalk werden lose angeliefert, weshalb keine Entsorgung der Verpackung der Rohstoffe bilanziert ist. Wärme wird für den Herstellungsprozess nicht verwendet; in den Wintermonaten wird nicht produziert. Der Prozess verläuft abwasserfrei. Zu Staubemissionen oder anderen Emissionen in die Luft liegen keine Messungen vor.

Beim Abbinden von CaO bzw. Ca(OH)_2 wird über die Karbonatisierung zu CaCO_3 CO_2 aus der Atmosphäre rückgebunden, das beim Brennen des Kalks als geogenes CO_2 freigesetzt wurde. Da die Hydratation vollständig und die Schichtdicke des Kalks im Produkt vergleichsweise dünn ist, wird (vereinfacht) von einer vollständigen Karbonatisierung ausgegangen.

In Tabelle 5-4 wird die Umwandlung von CaO zu Ca(OH)_2 , in Tabelle 5-5 die Umwandlung von Ca(OH)_2 zu CaCO_3 bezogen auf die nach Rezeptur eingebrachten Mengen dokumentiert, um die durch die Karbonatisierung rückgebundene Menge CO_2 zu berechnen.

Tabelle 5-1: Prozessdaten für die Gewinnung von getrocknetem Hanf, auf Feld, pro 1000 kg (Quelle: Turunen & van der Werf 2016, S. 72)

Elementarfluss/Prozess	Einheit	Menge	Datensatz aus ecoinvent 2.2:2016
Ressourceninput			
Transformation	m ²	1250	Transformation, from arable, non-irrigated
	m ² a	1250	Transformation, to arable, non-irrigated
Landbelegung	m ² a	1250	Occupation, arable, non-irrigated
Primärenergiegehalt ¹⁾	MJ	17340	Energy, gross calorific value, in biomass
C-Speicherung	kg	²⁾	
Material, Energie, Transporte			
Samen	kg	6.88	
Kalk zur Bodenverbesserung	kg	83.2	Limestone, milled, loose, at plant/CH U
Dünger			
<i>Ammoniumnitrat (NH₄)(NO₃)</i>	kg	25.8	Ammonium nitrate, as N, at regional storehouse/RER U
	kg N	9.03	
<i>Triple superphosphat</i>	kg	8.22	Triple superphosphate, as P ₂ O ₅ , at regional storehouse/RER U
	kg P ₂ O ₅	3.78	
<i>Kaliumchlorid</i>	kg	23.7	Potassium chloride, as K ₂ O, at regional storehouse/RER U
	kg K ₂ O	15.1	
Diesel	MJ	309	Diesel, burned in building machine/GLO U
Transport Dünger	tkm	28.9	Transport, lorry >16t, fleet average/RER U
Emissionen			
Nitrat ins Grundwasser	kg	22.2	Nitrate/ground-water
Phosphat ins Grundwasser	kg	0.0506	Phosphate/ground-water
Ammonium in Luft	kg	0.207	Ammonia/to air
N ₂ O in Luft	kg	0.363	Dinitrogen monoxide/to air
NO _x in Luft	kg	0.076	Nitrogen oxides/to air
Cd in Boden	kg	3.33E-04	Cadmium/to soil
Cr in Boden	kg	2.41E-03	Chromium/to soil
Ni in Boden	kg	7.10E-04	Nickel/to soil
Pb in Boden	kg	5.46E-04	Lead/to soil
Output			
Hanf, grün, getrocknet	kg	1.00E+03	neu_Hanf, grün, getrocknet

¹⁾ bei 15 % Wassergehalt und 20.4 MJ/kg oberer Heizwert (wie Nadelholz, gemäss Frischknecht et al. 2007a)

²⁾ wird für die Berechnungen nach EN 15804 produktspezifisch berechnet, vgl. Tabelle 5-3.

Tabelle 5-2: Prozessdaten für die Nacherntebehandlung des grünen Hanfs, inkl. Transport und Schwingen des Hanfs zur Fasergewinnung, pro 8000 kg grüner Hanf bzw. 1 kg verholzte Teile/Hanfeschäben nach ökonomischer Allokation (Turunen & van der Werf 2006, S. 26 und S. 72)

Elementarfluss/Prozess	Einheit	Menge		Datensatz aus ecoinvent 2.2:2016	Ökonomische Allokation		
		pro 8000 kg Input	pro kg verholzte Teile		€/kg	€	
Material, Energie, Transporte							
Hanf, grün, getrocknet	kg	8000	0.721	neu_Hanf, grün, getrocknet			
Transport	tkm	480	0.0432	Transport, lorry >16t, fleet average/RER			
Strom, Mittelspannung	MJ	3240	0.292	electricity, medium voltage, at grid/kWh/IT			
Maschinerie	kg	27.10	0.00244	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/l			
Produkte					€/kg	€	
Lange Fasern	kg	1000			1.0	1000	45.0%
Kurze Fasern	kg	1000			0.5	500	22.5%
Verholzte Teile	kg	3600	1		0.2	720	32.4%
Abfall							
Staub aus Filter	kg	960	0.0864	neu_Wood chips, from industry, mixed, burned in furnace 300kW/CH ohne Holzinput			
Grobe Pflanzenreste	kg	1440	0.129				
	MJ	40800	3.675				

Tabelle 5-3: Prozessdaten für die Herstellung aus Hanf-Kalk-Ziegeln des Schönthaler Betonsteinwerks 2016, pro kg (Quelle: eigene Auswertung der Betriebsdaten)

Elementarfluss/Prozess	Einheit	Menge	Datensatz aus ecoinvent 2.2:2016	Anmerkungen/Annahmen
Input				
Hanfschäben	kg/kg	0.357	neu_Hanfschäben	125 kg/350 kg Endprodukt (technisches Datenblatt Kalk)
davon H ₂ O	kg/kg	0.054		15% Wassergehalt (Turunen & van der Werf 2016)
Biogene CO ₂ -Speicherung	kg/kg	0.550		Annahme: C-Dichte wie bei Holz: 0.494 kg CO ₂ /kg atro
Hydraulischer Kalk (CaO)	kg/kg	0.471	Lime, hydraulic, at plant/CH U	165 kg/350 kg Endprodukt (technisches Datenblatt Kalk)
Trinkwasser	l/kg	0.514	tap water, at user/kg/RER	180 kg/350 kg Endprodukt (technisches Datenblatt Kalk)
Strom ab Netz	kWh/kg	0.0397	electricity, medium voltage, at grid/kWh/IT	
Transporte				
Transport LKW	tkm	0.778	Transport, lorry >16t, fleet average/RER	Transportdistanz Schäben: 1006 km; Kalk: 889 km
Output				
Naturziegel	kg/kg	1.00	neu_Hanf-Kalk-Ziegel	keine weiteren Nebenprodukte
Produktionsabfall	kg/kg	0.0167		1 Schütt-m ³ /Tag (ca 200 kg/m ³), wird kompostiert
Biogene CO ₂ -Freisetzung	kg/kg	9.20E-03		Annahme: C-Dichte wie bei Holz: 0.494 kg CO ₂ /kg atro
Karbonatisierung	kg/kg	s. unten		100 %-igen Karbonatisierung des aus CaO umgewandelten Ca(OH) ₂
Infrastruktur und Flächenbelegung				
Maschinenpark	kg/kg	6.68E-04	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I	Wie für "light weight concrete blocks" in ecoinvent 2.2
Produktionshalle	m ² /kg	3.25E-05	Building, hall, steel construction/CH/I (98% Elektro-stahl)	Fläche Produktion 3366 m ² ; 50 Jahre Betrieb bei 40 m ³ /Tag über 9 Monate/Jahr bei 22 Arbeitstagen pro Monat
Flächenbelegung	m ² a/kg	1.62E-03	Occupation, industrial area	Belegung der transformierten Fläche über 50 Jahre
Transformation	m ² /kg	3.25E-05	Transformation, from unspecified, natural Transformation, to industrial area	Fläche Produktion 3366 m ² ; Lagerfläche Betonpflastersteine 500 m ² ; 50 Jahre Betrieb bei 40 m ³ /Tag über 9 Monate/Jahr (22 Tage/Monat)
Verpackung				
Holzpalette	p/kg	5.72E-03	EUR-flat pallet/RER	22 kg/Palette, 10 Umläufen und einer Beladung von 400 kg/Palette
Biogene CO ₂ -Speicherung	kg/kg			vernachlässigt
Plastikband/PE	kg/kg	3.00E-03	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER	bei 12 m Band pro Palette bei 400 kg/Beladung
CO₂-Bindung beim Aushärten				
Karbonatisierung inkl. Produktionsabfall	kg/kg	- 3.70E-01	Carbon dioxide, fossil	100 %-ige Karbonatisierung des aus CaO umgewandelten Ca(OH) ₂

Tabelle 5-4: Stöchiometrische Umwandlung von Kalziumoxid zu Kalziumhydroxid in Wasser, gemäß Rezeptur aus Tabelle 5-3

		CaO	+	H ₂ O	=	Ca(OH) ₂
g/mol		56		18		74
Ca	40	1				1
O	16	1		1		2
H	1			2		2
C	12					
Reaktion des Inputs (kg)		0.471	+	0.152	=	0.623

Tabelle 5-5: Stöchiometrische Umwandlung von Kalziumhydroxid zu Kalziumcarbonat unter Einbindung von CO₂ und Abspaltung von Wasser, gemäß Rezeptur aus Tabelle 5-3 bzw. Kalziumhydroxid aus Tabelle 5-4

		Ca(OH) ₂	+	CO ₂	-	H ₂ O	=	CaCO ₃
g/mol		74		44		18		100
Ca	40	1						1
O	16	2		2		1		3
H	1	2				2		
C	12			1				1
aus CaO (kg)		0.623						
nach Rezeptur (kg)		0						
Reaktion des Inputs (kg)		0.623	+	0.370	-	0.152	=	0.842

5.5.2 Entsorgung

Für den Transport zum Kompostplatz, zum nächsten Bauplatz bzw. zu einer Müllverbrennungsanlage wird eine Transportdistanz von 20 km angenommen (Tabelle 5-6).

Tabelle 5-6: Prozessdaten für das Transportszenario im End-of-life, pro kg

Elementarfluss/Prozess	Einheit	Menge	Datensatz aus ecoinvent 2.2:2016
Material, Energie, Transporte			
Transport LKW	tkm	0.02	Transport, lorry >16t, fleet average/RER
Output			
Transport im End-of-life	kg	1.00	neu_Transport EoL

Für die Varianten „Kompostierung“ und „Wiederverwendung“ werden mangels Daten keine Prozesse bilanziert. Die Verrechnung des biogenen C-Gehaltes bzw. des erneuerbaren Primärenergiegehalts erfolgt wie in Kapitel 5.1 beschrieben und in Kapitel 7.1.1 dokumentiert.

Die Variante „thermische Behandlung in einer Müllverbrennungsanlage (KVA)“ wird wie in Tabelle 5-7 dokumentiert bilanziert. Der Glasdatensatz wird mangels spezifischem Datensatz als Datensatz für inertes Material verwendet. Die Menge der Schäben in die KVA wird von 15 % Wassergehalt auf 20 % Wassergehalt extrapoliert, wobei der Anteil Produktionsabfall von 14.3 % vom Input an Schäben abgezogen wird.

Im Grundsatz kann während der thermischen Behandlung des CaCO_3 wieder CO_2 freigesetzt werden, da die Verbrennungstemperatur in KVAs über $898\text{ }^\circ\text{C}$ als der Temperatur liegen kann, bei der die Kalzinierung abläuft. Im Sinne einer konservativen Bilanzierung wird angenommen, dass diese Temperatur in der KVA tatsächlich erreicht wird und das CaCO_3 vollständig zu CaO in der Schlacke umgewandelt wird. Die Menge errechnet sich aus der Menge CO_2 -Einbindung beim Aushärten, abzüglich 14.3 % Produktionsabfälle.

Tabelle 5-7: Prozessdaten für das Szenario der thermischen Behandlung von Hanf-Kalk-Ziegeln in einer Müllverbrennungsanlage, pro kg

Elementarfluss/Prozess	Einheit	Menge	Datensatz aus ecoinvent 2.2:2016
Material, Energie, Transporte			
Schäben in KVA	kg	0.325	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration/kg/CH
Kalk in KVA	kg	0.675	disposal, glass, 0% water, to municipal incineration/kg/CH
Output			
Entsorgung in KVA	kg	1.00	neu_Entsorgung KVA
CO_2 aus Kalzinierung	kg	0.317	Carbon dioxide, fossil
Exportierte Energie – thermisch	MJ	1.29	
Exportierte Energie – Strom	kWh	0.182	

Die exportierte Energie errechnet sich aus der Menge Schäben mal einem unteren Heizwert von 16.5 MJ/kg bei einem angenommenen 15 % Wassergehalt (nach Frischknecht et al. 2007a) und einem Anteil Produktionsabfall von 14.3 % bezogen auf den Input, der nicht im EoL behandelt wird. Daraus errechnen sich mit den in Kap. 5.1 beschriebenen Effizienzen der Müllverbrennungsanlage die in Tabelle 5-8 ausgewiesenen Substitutionen.

Tabelle 5-8: Prozessdaten für die in Modul D vermiedenen Prozesse der Energiebereitstellung für das Szenario der thermischen Behandlung von Hanf-Kalk-Ziegeln in einer Müllverbrennungsanlage, pro kg

Elementarfluss/Prozess	Einheit	Menge	Datensatz aus ecoinvent 2.2:2016
Material, Energie, Transporte			
Exportierte Energie – thermisch	MJ	1.29	
Exportierte Energie – Strom	kWh	0.182	
Output			
Vermiedene Wärmebereitstellung	MJ	- 1.29	Heat, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW/RER
Vermiedene Strombereitstellung	kWh	- 0.182	electricity, medium voltage, at grid/kWh/IT

6 Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung nach KBOB

Entsprechend den Vorgaben der KBOB-Liste (Frischknecht 2014) werden folgende Indikatoren ausgewiesen:

- Umweltbelastungspunkte gemäß der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Bafu, 2013),
- Treibhausgas-Emissionen (IPCC, 2013),
- kumulierter Energieaufwand, total (Frischknecht et al., 2007),
- kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (Frischknecht et al., 2007).

Für die Berechnung des Treibhausgaspotenzials gemäß methodischen Vorgaben der KBOB-Liste werden die Kohlendioxidemissionen aus fossilen (und unspezifizierten) Quellen mit einem Faktor von 1 kg CO₂-eq/kg CO₂ bewertet; Kohlendioxidemissionen aus biogenen Quellen mit einem Faktor von 0 kg CO₂-eq/kg CO₂ bewertet. Die geogenen CO₂-Emissionen aus der Kalzinierung werden mit 1 kg CO₂-eq pro kg emittiertes CO₂ charakterisiert; die Einbindung von CO₂ durch die Karbonatisierung wird mit -1 kg CO₂-eq pro kg gebundenes CO₂ charakterisiert.

Langzeitemissionen (> 100 Jahre) werden bei der Wirkungsabschätzung mit berücksichtigt.

In den folgenden Tabellen 6-1 bis 6-3 sind die Ergebnisse der Ökobilanz entsprechend den Vorgaben der KBOB-Liste pro kg hergestellter Hanf-Kalk-Ziegel dargestellt.

Tabelle 6-1: Zusammenstellung der Resultate für die Berechnungen der Umweltindikatoren nach den Anforderungen für die KBOB-Liste 2016: Primärenergie

	Einheit	Hanf-Kalk-Ziegel Herstellung	Hanf-Kalk-Ziegel Entsorgung
Non renewable, fossil	MJ/kg	6.06E+00	3.54E-01
Non-renewable, nuclear	MJ/kg	7.44E-01	1.85E-02
Non-renewable, biomass	MJ/kg	3.54E-05	6.62E-07
Renewable, biomass	MJ/kg	7.23E+00	1.12E-03
Renewable, wind, solar, geothemal	MJ/kg	3.10E-02	4.03E-04
Renewable, water	MJ/kg	2.72E-01	4.08E-03
Primärenergie nicht erneuerbar	MJ/kg	6.80E+00	3.73E-01
Primärenergie total	MJ/kg	1.43E+01	3.78E-01

Tabelle 6-2: Zusammenstellung der Resultate für die Berechnungen der Umweltindikatoren nach den Anforderungen für die KBOB-Liste 2016: Treibhausgaspotenzial GWP100

	Einheit	Hanf-Kalk-Ziegel Herstellung	Hanf-Kalk-Ziegel Entsorgung
Global warming potential	kg CO₂-Ä./kg	3.23E-01	3.37E-01

Tabelle 6-3: Zusammenstellung der Resultate für die Berechnungen der Umweltindikatoren nach den Anforderungen für die KBOB-Liste 2016: Umweltbelastungspunkte 2013

Wirkungskategorie	Einheit	Hanf-Kalk-Ziegel Herstellung	Hanf-Kalk-Ziegel Entsorgung
Water resources	UBP/kg	1.76E+01	2.11E-02
Energy resources	UBP/kg	3.17E+01	1.30E+00
Mineral resources	UBP/kg	9.89E+00	4.09E+00
Land use	UBP/kg	1.51E+02	6.25E-01
Global warming	UBP/kg	1.50E+02	1.55E+02
Ozone layer depletion	UBP/kg	1.50E+02	8.02E-03
Main air pollutants and PM	UBP/kg	1.51E-01	1.01E+01
Carcinogenic substances into air	UBP/kg	1.42E+02	8.01E+00
Heavy metals into air	UBP/kg	4.84E+01	1.52E+00
Water pollutants	UBP/kg	2.47E+01	2.11E+00
POP into water	UBP/kg	1.82E+02	4.91E-01
Heavy metals into water	UBP/kg	5.96E+00	2.80E+00
Pesticides into soil	UBP/kg	2.93E+01	2.16E-04
Heavy metals into soil	UBP/kg	4.22E-02	1.41E-01
Radioactive substances into air	UBP/kg	2.95E+01	1.44E-07
Radioactive substances into water	UBP/kg	6.29E-06	1.39E-02
Noise	UBP/kg	5.72E-01	1.70E+00
Non radioactive waste to deposit	UBP/kg	1.99E+01	3.29E+00
Radioactive waste to deposit	UBP/kg	4.43E-01	4.79E-01
Total UBP 2013 (exkl. Ressourcenkorrektur)	UPB/kg	1.01E+03	1.92E+02

7 Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung nach den Rechenregeln SN EN 15804

7.1 Berechnungsgrundlage der ausgewiesenen Indikatoren

Die Berechnung der Wirkungsabschätzung beruht auf den Charakterisierungsfaktoren des Institute of Environmental Sciences, Leiden (CML) in der Spreadsheet-Version 3.2 (Dezember 2007)² wie in Sima-Pro implementiert. Für die Berechnung des Potenzials für die Verknappung von abiotischen Ressourcen - nicht fossile Ressourcen (ADP-Stoffe) wurden in der Charakterisierungsmethode die Faktoren für fossile Ressourcen gelöscht. Das Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen - fossile Brennstoffe wird über den in ecoinvent implementierten LCI Indikator *CED, non-renewable, fossil* ausgewiesen, wobei die unteren Heizwerte für die Charakterisierung der fossilen Ressourcen gewählt wurden.

Die Werte für die Indikatoren zum Einsatz von Primärenergie wurde aus den in ecoinvent implementierten CED Indikatoren (CED: Cumulated Energy Demand) hergeleitet, wobei bei der Charakterisierung der brennbare Primärenergieträger der untere Heizwert eingesetzt wurde. Die als Material eingesetzten Primärenergieträger wurden über den unteren Heizwert der im Produkt verbleibenden erneuerbaren bzw. nicht-erneuerbaren Stoffe bezogen auf atro-Mengen hergeleitet. Die als Brennstoffe eingesetzte erneuerbare bzw. nicht-erneuerbare Primärenergie wurde dann aus der Differenz des Totals

² <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>

der jeweiligen Indikatoren aus SimaPro und dem entsprechenden Wert für als Material eingesetzte Primärenergie berechnet.

Der Nettoeinsatz von Süßwasser wurde mangels allgemein akzeptierter Berechnungsregeln für diesen Indikator konservativ berechnet, indem Salzwasser und in Laufkraftwerken turbiniertes Wasser nicht verrechnet wurden, jeglicher anderer Süßwassereinsatz, sei es als Prozess- oder Kühlwasser – bei der Berechnung des Indikators aber berücksichtigt wurde.

Der Indikator Nicht-gefährliche Abfälle, deponiert, wurde über die Elementarflüsse *Transformation, to dump site, slag compartment, Transformation, to dump site, sanitary landfill, Transformation, to dump site, residual material landfill* und *Transformation, to dump site, inert material landfill* mit der Charakterisierung der jeweiligen Flächeninanspruchnahme pro kg deponierter Abfall aus ecoinvent 2.2 berechnet.

Der Indikator Gefährliche Abfälle, entsorgt, wurde analog über den Elementarfluss *Volume occupied, underground deposit* unter Berücksichtigung der Abfalldichte aus ecoinvent 2.2 bestimmt.

Der Indikator Radioaktive Abfälle, entsorgt, wurde analog über die Elementarflüsse *Volume occupied, final repository for radioactive waste* und *Volume occupied, final repository for low-active radioactive waste* unter Berücksichtigung der jeweiligen durchschnittlichen Schweizer Abfalldichte aus ecoinvent 2.2. bestimmt.

7.1 Zusammenstellung der Ergebnisse

Tabelle 7-1 fasst die Ergebnisse der Ökobilanz nach den Rechenregeln der EN 15804 zusammen.

Tabelle 6-3: Zusammenstellung der Resultate für die Berechnungen der Umweltindikatoren nach den Anforderungen der EN 15804+A1, pro kg

Parameter	Einheit	A 1 - A 3 Herstellung	C 2 Transport	C 3.1 Kompostierung	C 3.2 Wiederverwen- dung	C 4.1 Energierückge- winnung	D 4.1 Potenti- elle Nutzen und Lasten Energierückge- winnung
ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN:							
Globales Erwärmungspotenzial	[kg CO ₂ -Äq.]	-2.19E-01	2.58E-03	5.41E-01	5.41E-01	8.78E-01	-1.93E-01
<i>Fossil + Kalzinierung + Karbonatisierung</i>	[kg CO ₂ -Äq.]	3.22E-01	2.58E-03	0.00E+00	0.00E+00	3.37E-01	-1.93E-01
<i>Biogenes CO₂</i>	[kg CO ₂ -Äq.]	-5.41E-01	0	5.41E-01	5.41E-01	5.41E-01	0
Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht	[kg CFC11-Äq.]	1.83E-08	5.65E-11	0.00E+00	0.00E+00	1.16E-09	-1.79E-08
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	[kg SO ₂ -Äq.]	2.02E-03	1.49E-05	0.00E+00	0.00E+00	1.11E-04	-4.36E-04
Eutrophierungspotenzial	[kg (PO ₄) ³⁻ - Äq.]	9.80E-04	3.16E-06	0.00E+00	0.00E+00	2.78E-05	-4.29E-05
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon	[kg Ethen Äq.]	8.80E-05	4.44E-07	0.00E+00	0.00E+00	5.98E-06	-2.51E-05
Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen	[kg Sb Äq.]	1.19E-06	1.19E-08	0.00E+00	0.00E+00	4.48E-08	-5.07E-08
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe	[MJ]	5.64E+00	3.89E-02	0.00E+00	0.00E+00	3.32E-01	-2.75E+00
ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ RESSOURCENEINSATZ:							
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger	[MJ]	6.74E-01	4.14E-02	0	0	6.15E+00	-2.96E+00
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	[MJ]	5.80E+00	0	0	-5.80E+00	-5.80E+00	0
Total erneuerbare Primärenergie	[MJ]	6.47E+00	4.14E-02	0	0	3.53E-01	-2.96E+00
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger	[MJ]	7.06E+00	6.41E-04	0	0	5.53E-03	-1.80E-01
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	[MJ]	0	0	0	0	0	0
Total nicht erneuerbare Primärenergie	[MJ]	7.06E+00	6.41E-04	0	0	5.53E-03	-1.80E-01
Einsatz von Sekundärstoffen	[kg]	0	0	0	0	0	0
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe	[MJ]	0	0	0	0	0	0
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe	[MJ]	0	0	0	0	0	0
Einsatz von Süßwasserressourcen	[m ³]	2.91E-01	1.89E-05	7	0	3.74E-04	-2.84E-03
ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ OUTPUT-FLÜSSE UND ABFALLKATEGORIEN:							
Gefährlicher Abfall zur Deponie	[kg]	6.94E-06	4.91E-08	0	0	3.00E-07	-2.78E-06
Entsorgter nicht gefährlicher Abfall	[kg]	8.39E-02	3.20E-04	0	0	5.63E-01	-2.58E-03
Entsorgter radioaktiver Abfall	[kg]	1.54E-05	4.88E-08	0	0	3.63E-07	-4.18E-06
Komponenten für die Wiederverwendung	[kg]	0	0	0	0	0	0
Stoffe zum Recycling	[kg]	0	0	IND	1	0	0
Stoffe für die Energierückgewinnung	[kg]	0	0	0	0	0	0
Exportierte elektrische Energie	[MJ]	0	0	0	0	1.82E-01	0
Exportierte thermische Energie	[MJ]	0	0	0	0	1.29E+00	0

7.2 Interpretation

7.2.1 Indikatoren der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sind nur relative Aussagen, die keine Aussagen machen über „Endpunkte“ der Wirkungskategorien, Überschreitungen von Schwellenwerten, Sicherheitsmargen oder über Risiken.

Abbildung 7-1 stellt die relativen Beiträge der einzelnen Lebensabschnitte (Informationsmodule) zu den betrachteten Wirkungskategorien dar.

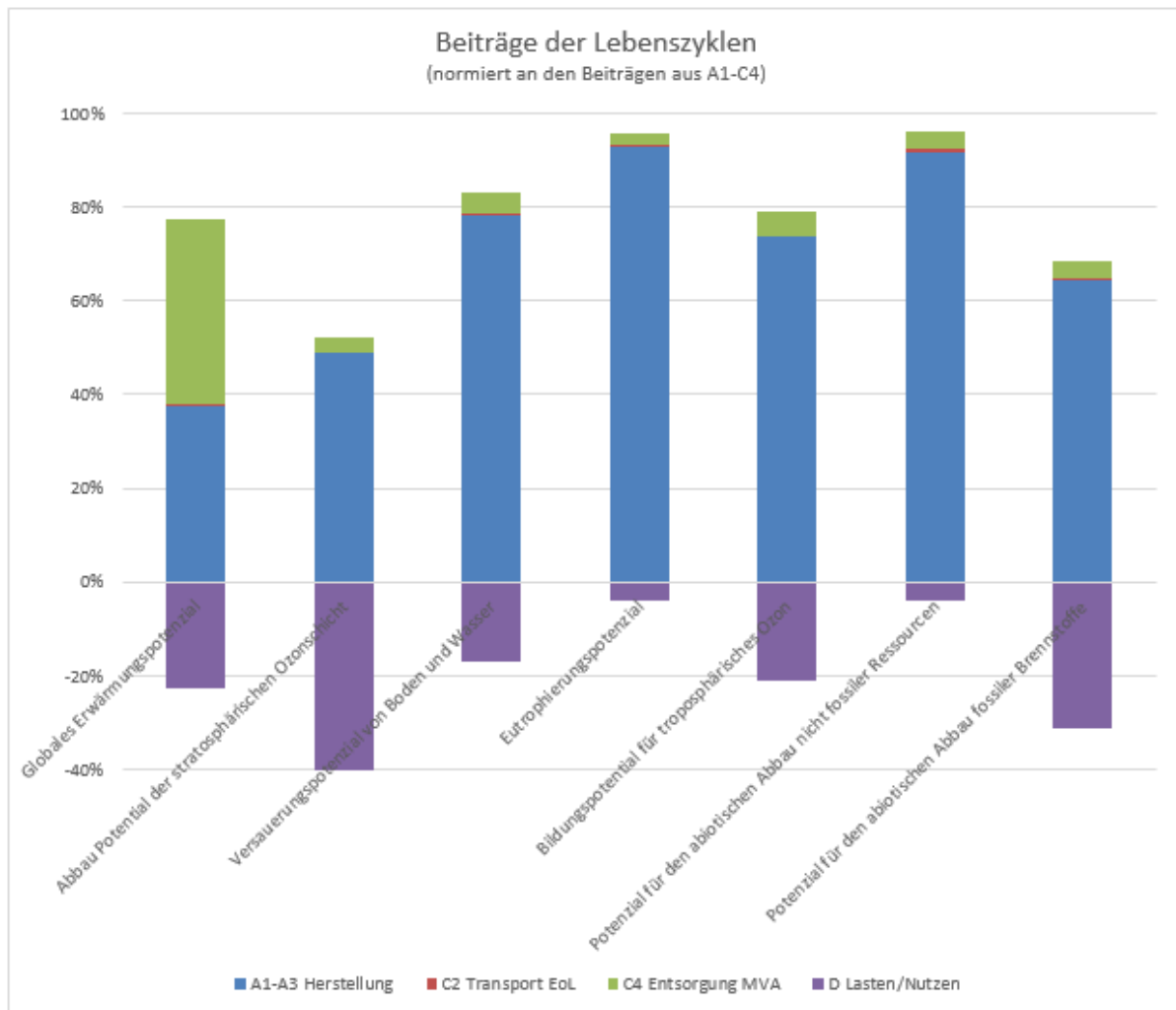


Abbildung 7-1: Beiträge der bilanzierten Lebensabschnitte (Informationsmodule) von Hanf-Kalk-Ziegeln zu den Indikatoren der Wirkungsabschätzung

Über den Lebenszyklus betrachtet dominiert die Herstellung (Module A1-A3) die Umweltwirkung in den meisten Wirkungskategorien; die Transporte und die Entsorgung sind von geringer Wirkung. Nur beim Treibhausgaspotenzial stellt die mögliche Kalzinierung des Kalks bei der Entsorgung in einer KVA einen wesentlichen Anteil der Umweltwirkung dar. Die potentiellen Substitutionswirkungen aus der energetischen Nutzung des Hanf-Kalk-Ziegels liegen je nach Indikator in der Größenordnung von 5 % bis 40 % der Wirkung des Gesamtlebenszyklus.

Abbildung 7-2 stellt die relativen Beiträge einzelner Inputs für die Herstellung (Module A1-A3) zu den betrachteten Wirkungskategorien dar.

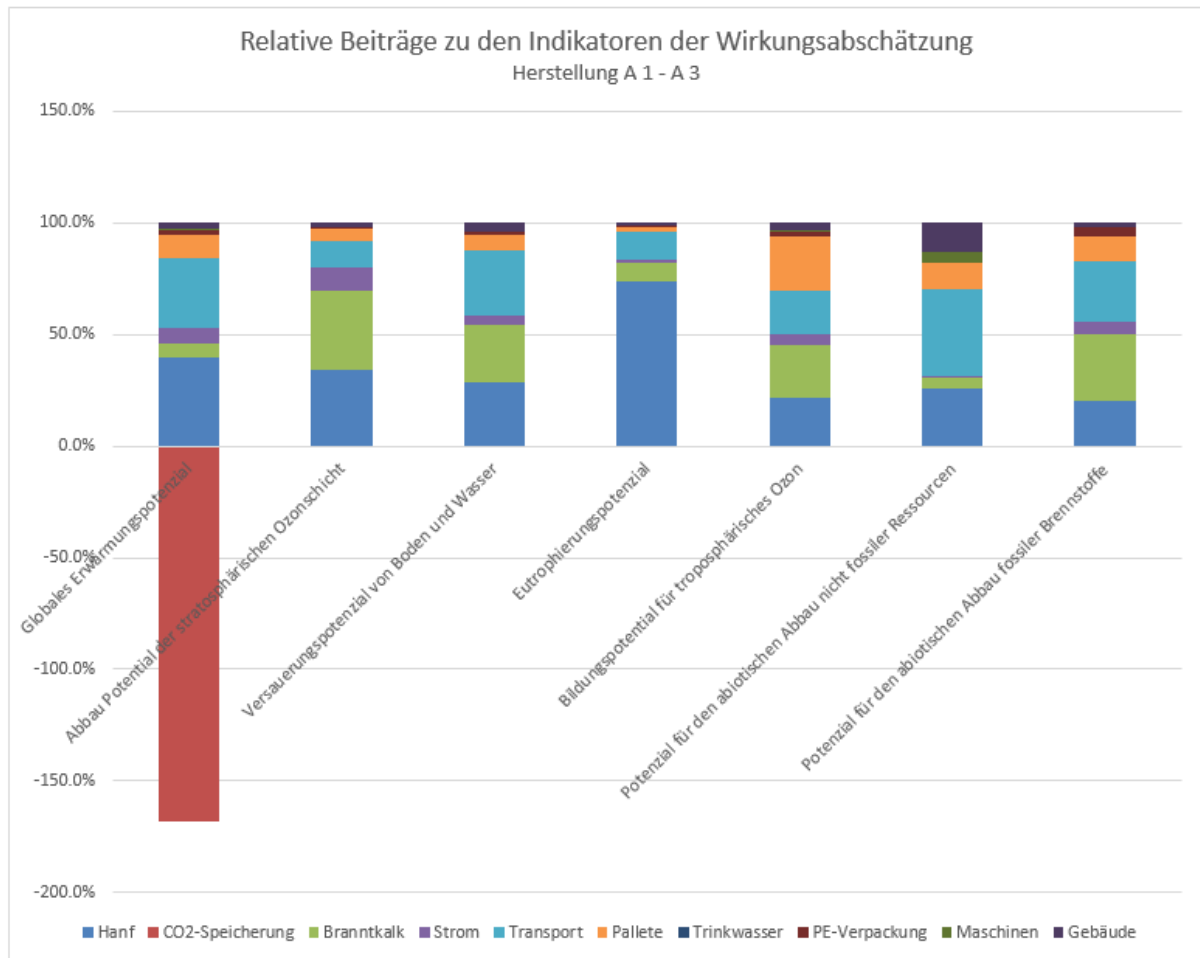


Abbildung 7-2: Beiträge der bilanzierten Prozesse zur Herstellung von Hanf-Kalk-Ziegeln zu den Indikatoren der Wirkungsabschätzung

Treibhauspotenzial

Das **Treibhausgaspotenzial** (GWP) ist ein Indikator für den Betrag zum Klimawandel und berechnet sich aus den Emissionen klimarelevanter Gase.

Die Hauptbeiträge zum Treibhausgaspotenzial stammen aus dem Anbau des Hanfs und dessen anteiliger Aufbereitung zu Hanfschäben (39 %), dem Transport der Hanfschäben und des Kalks zur Verarbeitung (31 %) sowie zu geringen Massen aus der Verwendung des Brantnkalks, der Herstellung der Holzpalette und der Stromgewinnung für die Herstellung. Die Treibhausgaswirkung des Brantnkalks ist in der Herstellungsphase vergleichsweise gering, da die geogenen CO₂-Emissionen aus der Kalzinierung durch die Karbonatisierung während des Abbindens wieder rückgebunden werden.

Im Hanf-Kalk-Ziegels ist rund 60% mehr CO₂-gespeichert, als während der Herstellung des Ziegels freigesetzt wird.

Ozonabbaupotenzial

Das **Ozonabbaupotenzial** (ODP) errechnet sich aus den Emissionen an Gasen, die das stratosphärische Ozon abbauen können („Ozonloch“).

Beim Ozonabbaupotenzial sind die Vorketten für die Gewinnung der Hanfschäben (34 %) und des Branntkalks (35 %) die Prozesse mit den größten Beiträgen und werden durch die Bereitstellung von Erdgas und von Uran verursacht. Weiter tragen die Stromgewinnung für die Herstellung und die Transporte der Ausgangsstoffe zu je ca. 10% zu diesem Wirkungspotenzial bei.

Versauerungspotenzial

Das **Versauerungspotenzial** (AP) entsteht durch die Umwandlung von Luftschadstoffen in Säuren, was u.U. die Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigen kann.

Auch beim Versauerungspotenzial sind die Gewinnung inkl. Vorketten der Hanfschäben sowie die Vorketten für die Herstellung des Branntkalks und die Transporte mit Beiträgen von je rund 25 % die relevanten Prozesse.

Eutrophierungspotenzial

Das **Überdüngungspotenzial** (Eutrophierungspotenzial, EP) errechnet sich aus der Anreicherung von Nährstoffen im Böden und Gewässern, was zu verstärktem Algenwachstum und Verschiebungen des Artenspektrums führen kann.

Das Überdüngungspotenzial wird durch die landwirtschaftlichen Prozesse beim Hanfanbau dominiert (rund 75 %), namentlich durch die Nitratauswaschungen. In der Grössenordnung von 12 % tragen auch die Stickoxide aus den Transporten zu dieser Umweltwirkung bei.

Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial

Das **photochemische Oxidantienbildungspotenzial** (POCP) errechnet sich aus Luftemissionen, die zur sommerlichen Ozonbildung beitragen können.

Der „Sommersmog“ wird ungefähr zu gleichen Teilen durch die Gewinnung der Hanfschäben (aus der Strombereitstellung), der Herstellung des Branntkalks, der Anlieferung der Rohstoffe sowie durch die Herstellung der Palette (hier für die Spanplatte) verursacht (je ca. 20 %).

Abiotischer Ressourcenverbrauch (fossile Ressourcen)

Das **Potenzial zum Verbrauch abiotischer fossiler Ressourcen** (ADP_fossil) widerspiegelt den Einsatz knapper fossiler Ressourcen wie Rohöl oder Erdgas.

Das Verbrauchspotenzial fossiler Ressourcen wird durch die Verwendung von Brenn- und Treibstoffen verursacht, hauptsächlich für die Transporte (rund 40 %) und für die Gewinnung der Hanfschäben (25 %).

Abiotischer Ressourcenverbrauch (mineralische Ressourcen)

Das **Potenzial zum Verbrauch abiotischer mineralischer Ressourcen** (ADP_Stoffe) errechnet sich aus dem Einsatz knapper mineralischer Ressourcen wie Erze und andere mineralische Rohstoffe.

Das Verbrauchspotenzial abiotischer Ressourcenpotenzial wird vorwiegend durch Infrastrukturprozesse verursacht, namentlich durch die Bereitstellung von Metallen für die Herstellung von Fahrzeugen bzw. für die Produktionsanlagen.

7.2.2 Ausgewählte Indikatoren der Sachbilanz

Wasserverbrauch

Der Nettoeinsatz von Süßwasser wurde mangels allgemein akzeptierter Berechnungsregeln für diesen Indikator konservativ berechnet, indem Salzwasser und in Laufkraftwerken turbinirtes Wasser nicht verrechnet wurden, jeglicher anderer Süßwassereinsatz, sei es als Prozess- oder Kühlwasser – bei der Berechnung des Indikators aber berücksichtigt wurde.

Unter diesen Annahmen wird der Nettofrischwasserverbrauch zu 98 % durch den Bezug von Grundwasser für die Herstellung des hydraulischen Kalks verursacht.

Primärenergie erneuerbar und nicht erneuerbar

Die Herstellung des Ziegels benötigt etwa gleich viel erneuerbare wie nicht erneuerbare Primärenergie; im Fall der erneuerbaren Primärenergie werden aber rund 90 % stofflich als Hanfschäben verwendet. Je nach End-of-life Szenario wird dieser Anteil der erneuerbaren Primärenergie nicht weiter genutzt (Kompostierung), steht weiterhin für eine energetische Nutzung zur Verfügung (Wiederverwendung) oder wird im Rahmen einer thermische Abfallbehandlung energetisch genutzt und ermöglicht eine potenzielle Substitution von Strom und Wärme aus primären Energiequellen (in Modul D).

Abfall/Sekundärbrennstoffe

Die ausgewiesenen Abfallmengen stammen aus den Vorketten und beschreiben die entsprechenden deponierten Abfallmengen.

Sekundärstoffe

Es werden keine Sekundärstoffe gemäß SN EN 15804 eingesetzt.

Weitere Indikatoren der Sachbilanz

Die weiteren Indikatoren der Sachbilanz sind Einzelwerte, deren Inhalt in Kap. 5 erläutert ist.

7.1 Aussagefähigkeit und Datenqualität

Die Ökobilanz beruht auf einer umfassenden Analyse der durch die Gewinnung der Rohstoffe sowie der Herstellung der Hanf-Kalk-Ziegel im Schönthaler Betonwerk ausgelösten Material- und Energieströme. Die Werksdaten wurden vom Hersteller bereitgestellt, unabhängig auf Plausibilität überprüft und mit Datensätzen einer international anerkannten Datenbank verknüpft. Aus Datensicht besteht keine Einschränkung der Verwendung der Daten in einer Umweltproduktdeklaration nach SN EN 15804.

Die Modellierung der Ökobilanz erfolgte nach den Vorgaben der SN EN 15804 bzw. NF EN 15804/CN; darüber hinausgehend mussten keine methodischen Setzungen vorgenommen werden. Somit besteht aus methodischer Sicht keine Einschränkung der Verwendung der Daten in einer Umweltproduktdeklaration nach SN EN 15804.

8 Referenzen

NORMEN UND GESETZE

- ISO 14044 SN EN ISO 14044:2006, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen
- SN EN 15804 SN EN 15804+A1:2014-02:2013, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte
- NF EN 15804/CN NF EN 15804/CN:2016-06, Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction – Complément national à la NF EN 15804+A1
- SN EN 16485 SN EN 16485:2014-07, Rund- und Schnittholz - Umweltproduktdeklarationen - Produktkategorieregeln für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen; Deutsche Fassung EN 16485:2014
- CEN/TR 16970 CEN/TR 16970:2016-08-31, Sustainability of construction works - Guidance for the implementation of EN 15804

WEITERE REFERENZEN

- Bafu 2013 Frischknecht, R. und S. Büsser Knöpfel (2013): Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 1330, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Frischknecht et al. 2007a Frischknecht, R., N. Jungbluth, H.-J. Althaus, G. Doka, T. Heck, S. Hellweg, R. Hischier, T. Nemecek, G. Rebitzer, M. Spielmann und G. Wernet (2007): Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Frischknecht et al. 2007b Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hellweg S., Hischier R., Humbert S., Margni M. and Nemecek T. (2007): Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- Frischknecht 2014 Frischknecht (2014): Memo: Regeln für Ökobilanzdaten im Baubereich gemäss der KBOB-Liste. http://www.eco-bau.ch/resources/uploads/Produktspezifische_Regeln.pdf
- IBU 2016 IBU (2016) PCR – Teil A: Rechenregeln für die Ökobilanz und Anforderungen an den Hintergrundbericht, Version 1.5, Institut Bauen und Umwelt e.V., www.bau-umwelt.com, 2016

IPCC 2013	Myhre,G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nalajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura, H. Zhang et al.: In: Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. 30. September 2013, Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, S. Table 8.1.A, pages 8-88 to 8-99.
KBOB et al. 2016a	KBOB, eco-bau und IPB (2016) Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand September 2016, Empfehlung Nachhaltiges Bauen 2009/1. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik.
KBOB et al. 2016b	KBOB, eco-bau and IPB (2016) ecoinvent Datenbestand 2016 basierend auf Datenbestand ecoinvent 2.2; Grundlage für die KBOB Empfehlung 2009/1:2016: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand April 2016. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten Logistik.
Turunen & van der Warf 2006	Turunen L. und H. van der Warf (2006): Life cycle analysis of hemp textile yarn; comparison of three hemp fibre processing scenarios and a flax scenario. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Rennes.
Vicat (?)	VICAT (?): Bioprompt; the new VICAT hydraulic binder for hemp concrete (Verwendungsempfehlung). Vicat, Paris

Annex 1: Datensatz zur Modellierung der Verbrennung der Produktionsabfälle aus der Gewinnung von Hanffasern

Die folgende Tabelle stellt den Datensatz zur Wärmeerzeugung aus Hanfabfällen basierend auf dem Datensatz „Wood chips, from industry, mixed, burned in furnace 300kW/CH“ aus ecoinvent 2.2:2016 dar, wobei der Holzinput und der Transport des Brennstoffs zum Kessel gelöscht wurden.

Tabelle A1-1: Datensatz zur Wärmeerzeugung aus Hanfabfällen (basierend auf ecoinvent 2.2:2016 Datensatz, ohne Holzinput und Brennstofftransport)

Elementarfluss/Prozess	Kompartiment	Menge	Einheit
Products			
neu_ Wood chips, from industry, mixed, burned in furnace 300kW/CH ohne Holzinput		1	MJ
Materials/fuels			
electricity, low voltage, at grid/kWh/CH U		0.00417	kWh
Wood chips, mixed, from industry, u=40%, at plant/RER U		0	m3
Furnace, wood chips, mixed, 300kW/CH/I U		1.81E-08	p
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U		0	tkm
Emissions to air			
Acetaldehyde	high. pop.	6.1E-08	kg
Ammonia	high. pop.	0.00000173	kg
Arsenic	high. pop.	1E-09	kg
Benzene	high. pop.	0.00000091	kg
Benzene, ethyl-	high. pop.	0.00000003	kg
Benzene, hexachloro-	high. pop.	7.2E-15	kg
Benzo(a)pyrene	high. pop.	5E-10	kg
Bromine	high. pop.	0.00000006	kg
Cadmium	high. pop.	7E-10	kg
Calcium	high. pop.	0.00000585	kg
Carbon dioxide, biogenic	high. pop.	0.0983	kg
Carbon monoxide, biogenic	high. pop.	0.000048	kg
Chlorine	high. pop.	0.00000018	kg
Chromium	high. pop.	3.96E-09	kg
Chromium VI	high. pop.	4E-11	kg
Copper	high. pop.	2.2E-08	kg
Dinitrogen monoxide	high. pop.	0.0000025	kg
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	high. pop.	3.1E-14	kg
Fluorine	high. pop.	0.00000005	kg
Formaldehyde	high. pop.	0.00000013	kg
Heat, waste	high. pop.	1.08	MJ
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	high. pop.	0.00000091	kg
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	high. pop.	0.00000031	kg
Lead	high. pop.	2.5E-08	kg
Magnesium	high. pop.	0.00000036	kg
Manganese	high. pop.	0.00000017	kg
Mercury	high. pop.	3E-10	kg
Methane, biogenic	high. pop.	0.00000004	kg
m-Xylene	high. pop.	0.00000012	kg
Nickel	high. pop.	6E-09	kg
Nitrogen oxides	high. pop.	0.000107	kg
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	high. pop.	0.00000006	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	high. pop.	1.11E-08	kg

Elementarfluss/Prozess	Kompartiment	Menge	Einheit
Particulates, < 2.5 um	high. pop.	0.000046	kg
Phenol, pentachloro-	high. pop.	8.1E-12	kg
Phosphorus	high. pop.	0.0000003	kg
Potassium	high. pop.	0.0000234	kg
Sodium	high. pop.	0.0000013	kg
Sulfur dioxide	high. pop.	0.0000025	kg
Toluene	high. pop.	0.0000003	kg
Zinc	high. pop.	0.0000003	kg
Waste to treatment			
disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to municipal incineration/kg/CH U		0.000122	kg
Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to landfarming/CH U		0.000122	kg
Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to sanitary landfill/CH U		0.000244	kg