

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

**Berechnung der Grauen Energie
für Fassadenelemente aus Kalkstein
der Thomann AG und der
Franken-Schotter GmbH & Co. KG**

Eine Studie im Auftrag des
Hochbauamtes der Stadt Zürich

September 2013

Sachbearbeitung: F. Werner, Umwelt & Entwicklung, Zürich

Projektbegleitung: M. Pöll, Hochbauamt der Stadt Zürich, Zürich

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung und Auftrag	4
2	Grundlagen der Bilanzierung	4
2.1	Bilanzierte Einheit	4
2.2	Systemgrenze	4
2.3	Allokation	5
2.4	Hintergrunddaten	5
2.5	Bewertung der Umweltwirkung	5
2.6	Anforderungen an die Datenqualität	5
3	Sachbilanz für die Thomann AG	6
3.1	Abbau des Kalksteines zu Quadern im Steinbruch	6
3.1.1	<i>Prozessbeschreibung: Steinbruch</i>	6
3.1.2	<i>Verfügbare Betriebsdaten: Steinbruch Thomann AG</i>	7
3.1.3	<i>Umsetzung in ecoinvent: Steinbruch</i>	8
3.1.4	<i>Datenqualität</i>	9
3.2	Verarbeitung des Kalksteines zu Fassadenplatten	12
3.2.1	<i>Prozessbeschreibung: Verarbeitung</i>	12
3.2.2	<i>Verfügbare Betriebsdaten: Verarbeitung</i>	12
3.2.3	<i>Umsetzung in ecoinvent: Verarbeitung</i>	14
3.2.4	<i>Datenqualität</i>	14
4	Sachbilanz für die Franken-Schotter GmbH & Co. KG	17
4.1	Abbau des Rohkalksteines zu Quadern im Steinbruch	17
4.1.1	<i>Prozessbeschreibung: Steinbruch</i>	17
4.1.2	<i>Verfügbare Betriebsdaten: Steinbruch inkl. Vorverarbeitung</i>	18
4.1.3	<i>Umsetzung in ecoinvent: Steinbruch</i>	20
4.1.4	<i>Datenqualität</i>	20
4.2	Verarbeitung des Kalksteines zu Fassadenplatten	23
4.2.1	<i>Prozessbeschreibung: Verarbeitung</i>	23
4.2.2	<i>Verfügbare Betriebsdaten: Verarbeitung</i>	24
4.2.3	<i>Umsetzung in ecoinvent: Verarbeitung</i>	25
4.2.4	<i>Datenqualität</i>	25
5	Auswertung	28
5.1	Vergleich der untersuchten Kalksteinproduzenten	28
5.2	Vergleich mit bestehenden Datensätzen in ecoinvent inklusive Transportszenario	30
6	Literatur	31

1 Zielsetzung und Auftrag

Für den Erweiterungsbau des Kunsthauses Zürich ist eine Steinfassade geplant. Um die Umweltwirkung der Fassade für das Erreichen der Planungswerte der 2000W-Gesellschaft zu berücksichtigen, wurde im Frühjahr 2011 ein spezifischer Ökobilanzdatensatz für die Gewinnung und Anlieferung von Bollinger Hartsandstein der Firma Müller Natursandstein AG erstellt (Werner 2011). Der Bollinger Hartsandstein vermochte aber nicht alle optischen Ansprüche zu befriedigen, und es wurden darum weitere Steintypen evaluiert. Es handelt sich dabei um einen Kalkstein aus dem Schweizer Jura (Liesberger) und einen Kalkstein aus dem süddeutschen Raum (Dietfurter). Der Schweizer Stein wird von der Firma Thomann AG hergestellt, der Deutsche Stein von der Firma Franken-Schotter GmbH & Co. KG.

Im Rahmen dieses Projektes sollen auch für den Kalkstein Ökobilanzdaten in der Qualität des Bollinger-Hartsandsteins nach den Bilanzierungsregeln von ecoinvent 2.2 (Frischknecht et al. 2007) bzw. der KBOB-Liste (Frischknecht 2012) erhoben und dokumentiert werden.

Ausgehend von dem bestehenden Datensatz für die Gewinnung von Hartsandstein und dem neu generierten Datensatz für Kalkstein werden für die drei Hersteller je ein Szenario für die Herstellung der Fassadenplatten inkl. Transport bis zur Baustelle Kunsthaus Zürich gerechnet und für die drei Indikatoren der KBOB-Liste ausgewertet.

2 Grundlagen der Bilanzierung

2.1 Bilanzierte Einheit

Als bilanzierte Einheit wird **1 m³ Kalkstein in 12 cm Dicke** bei einer Dichte von ca. 2'600 kg/m³ für die Verwendung als Fassadenverkleidung angesetzt. Dies entspricht einer oder mehrerer Platten von insgesamt 8.4 m² (entspricht ca. 2.9 x 2.9 m²).

2.2 Systemgrenze

Die Systemgrenze der *Herstellung* wird beim Werkstor der Natursteinwerke gezogen. Es werden somit alle Prozesse des Abbaus und Bearbeitung des Kalksteins sowie alle vorgelagerten Prozesse der Energiebereitstellung, Herstellung der Hilfsstoffe und Verpackungsmaterialien, Transporte sowie alle nachgelagerten Prozesse der Entsorgung von Produktionsabfällen erfasst.

Die Herstellung der Fassadenplatte aus Kalkstein wird aufgrund der Prozessstruktur und Datenverfügbarkeit in zwei Unterprozesse unterteilt:

- Abbau des Rohkalksteines zu Quadern inkl. ein allfällige Vorbearbeitung im Steinbruch,
- Verarbeitung des Rohkalksteines zu Fassadenplatten.

Der Datensatz zur Herstellung enthält auch eine grobe Abschätzung zur Infrastruktur.

Es wurde für alle Prozesse der Thomann AG der Schweizer Verbrauchsstrommix (+Importe) angenommen, für die Franken-Schotter GmbH & Co. KG der entsprechende Deutsche Verbrauchsmix.

Die *Transporte vom Werk zu Bauplatz* müssen in einem Vergleich der Varianten zusätzlich berücksichtigt werden. Ein entsprechendes Szenario wird für den Erweiterungsbau des Kunsthouses in Kap. 5 berechnet.

Die *Entsorgung der Fassadenplatten* als Teil des Rückbaues werden in Übereinstimmung mit den ecoinvent-Richtlinien für Version 2.2 als cut-off modelliert und somit nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen werden kann, dass die Fassaden stofflich wiederverwendet oder zu Schotter bzw. Kies verwertet werden.

2.3 Allokation

Allfällige Allokationen werden nach den Qualitätsrichtlinien von ecoinvent 2.2 (Frischknecht et al. 2007) vorgenommen.

Die Allokation einzelner Flüsse ist im Detail in den Kapiteln 3 und 4 Fluss-spezifisch beschrieben.

2.4 Hintergrunddaten

Für die Berechnung der Ökobilanz wird ecoinvent v.2.2 in SimaPro verwendet.

2.5 Bewertung der Umweltwirkung

Im Rahmen des Auftrages werden folgende Indikatoren ausgewiesen:

- Graue Energie nach SIA 2032
- Treibhausgaspotential (100a) nach IPCC (2007)
- Umweltbelastungspunkte 2006 (BAFU 2009)

2.6 Anforderungen an die Datenqualität

Folgende Anforderungen an die Datenqualität bestehen:

- Herstellerspezifischer, technologisch repräsentativer Datensatz für einfache Fassadenplatten für das Jahr 2012,
- Erfassung aller Elementarflüsse, die signifikant zu den Indikatoren Graue Energie, Treibhauspotenzial (GWP) und der ökologischen Knappheit (UBP) beitragen, unter Berücksichtigung aller verfügbarer Werksdaten.

3 Sachbilanz für die Thomann AG

3.1 Abbau des Kalksteines zu Quadern im Steinbruch

3.1.1 Prozessbeschreibung: Steinbruch

Der Abbau des Liesberger Kalksteins (gelblich-rötlich, oolitischer Kalkstein (Kalkoolith)) erfolgt in einem Flusstal an der Grenze zwischen Laufen und Liesberg. Der Abbau des fast horizontal geschichteten Gesteins erfolgt ebenerdig. Die abbauwürdige Schicht („Haustein“) hat eine Mächtigkeit von 5 – 6 Metern und wird von weniger kompaktem Gestein einer Mächtigkeit von 6 – 20 Metern überlagert.

Der Steinbruch wird seit rund 60 Jahren bewirtschaftet und dabei die Werksgebäude und der Lagerplatz innerhalb des Steinbruches auf den abgebauten Flächen nach Bedarf erweitert. Heute umfasst die offene Fläche des Steinbruchs rund 20'000 m², wovon auf rund 5'000 m² Haustein und Schotter abgebaut werden, und 15'000 m² durch Werkshallen, Lagerplätze, Wege, etc. beansprucht werden (s. Abbildung 3-1).



Abbildung 3-1: Luftbild Steinbruch und Werkplatz Thomann AG, Liesberg, Schmerikon (Quelle: google maps)

Alle paar Jahre wird ein neuer Teil des Steinbruchs erschlossen. Dazu wird die Humusschicht von ca. 60 cm abgetragen und in einem Wall zur Abgrenzung des Steinbruchs gelagert. Durch Sprengung werden die weniger stabilen oberen Schichten zerkleinert; diese werden mit Radladern einem Brecher zugeführt und als Schotter, Splitt und Sand verkauft. Die darunter liegende Schicht Haustein wird danach mithilfe einer Schrämsäge mit einer horizontalen Schnittlänge von 2.4 m und einer vertikalen Schnittlänge von 2 m in Blöcken von bis zu 8 t herausgelöst und mit einem Radbagger dem Werkplatz zugeführt. Die verschiedenen Sektoren des Steinbruchs befinden sich in verschiedenen

Stadien des Abbaus; je nach Nachfrage wird im jährlichen Durchschnitt mehr Schotter und Kies oder aber Haustein abgebaut.

Das Gestein zur Schotterherstellung wird mittels eines Radladers einem Brecher zugeführt, der Haustein auf den Lagerplatz bei den Werksgebäuden gebracht. Die Transportdistanzen vom Ausbruch zum Brecher bzw. Lagerplatz belaufen sich auf je durchschnittlich 80 – 150 m.

Eine Sicherung der Stabilität des Steinbruchs durch Stahlanker oder andere bauliche Massnahmen ist nicht notwendig.

Bis jetzt wurden keine Teile des Steinbruchs mit Deponiematerial wieder aufgefüllt und renaturiert; dies ist für einen Teil des Steinbruchs in ca. 10 Jahren vorgesehen und liegt in der Verantwortung der Gemeinden Laufen bzw. Liesberg als Besitzerinnen des Landes.

3.1.2 *Verfügbare Betriebsdaten: Steinbruch Thomann AG*

Folgende Betriebsdaten liegen für den Steinbruch für das Bezugsjahr 2012 vor. Sie werden im Folgenden auf 1 m³ unbearbeiteten Haustein umgelegt:

- Abgebaute Kubaturen: 1200 m³ Haustein, von denen ca. 800 m³ verwertbar sind und ca. 400 m³ zu Schotter verarbeitet werden; darüber hinaus wurden rund 3200 m³ Gestein aus den über dem Haustein liegenden Gesteinsschichten direkt dem Brecher zugeführt und zu Schotter und Kies verarbeitet;
- Dieserverbrauch für Transporte im Steinbruch: 7200 l, entsprechend 258'854 MJ (bei 0.84 kg/l und 42.8 MJ/kg (Hu)); die Transportdistanzen zu den Werkshallen bzw. zum Brecher sind ungefähr gleich lang; entsprechend wird der Dieserverbrauch auf den verwertbaren Haustein und auf die Gesamtmenge Schotter pro m³ umgelegt ($258'854 \text{ MJ} / 4400 \text{ m}^3 = 58.8 \text{ MJ/m}^3$ Haustein);
- Stromverbrauch: Zahlen zum Stromverbrauch liegen nur auf Werksebene inkl. Verarbeitung vor; eine Zuordnung zur Schrämsäge ist nicht möglich; eine Abschätzung auf Werksebene wird in Kapitel 3.2.2 für den gesamten Prozess der Gewinnung und Verarbeitung des Kalksteins zu Fassadenplatten vorgenommen;
- Sprengstoff: 1.7 t Sprengstoff für ein gesprengtes Steinvolumen von 4500 m³ (welches über mehrere Jahre abgetragen wird). Vereinfachend wird der Einsatz von 0.378 kg Sprengstoff/m³ gesprengtes Material dem Zerkleinern des Gesteins zu Schotter zugeordnet¹;
- Schmierfett für Schrämsäge: 60 kg (60 kg / 800 m³ Haustein = 0.075 kg/m³ Haustein);
- Motorenöl und Hydrauliköl: 200 l (= 200 kg bei 1 kg/l); in Analogie zum Dieserverbrauch werden diese Verbräuche auf den verwertbaren Haustein und auf die Gesamtmenge Schotter pro m³ umgelegt ($200 \text{ kg} / 4400 \text{ m}^3 = 0.0455 \text{ kg/m}^3$ Haustein);

¹ für nicht abgebauten Haustein (der durch die Sprengung zugänglich gemacht wird) und dem gesprengte Gestein für die Schotterherstellung (das durch die Sprengung vorzerkleinert wird) sind keine internen Preise verfügbar. Eine Zuordnung über das insgesamt freigelegte Gesteinsvolumen wäre möglich, die ökologische Relevanz der Herstellung des Sprengstoffs für die Gesamtökobilanz aber in jedem Fall vernachlässigbar.

Anmerkung für Modellierung: im ecoinvent Modul „Diesel in Baumaschine“ werden 0.000514 kg Schmierstoff/MJ bilanziert, in diesem Fall also 0.0302 kg/m³ Haustein. Als Differenz zu berücksichtigen sind also 0.0152 kg/m³ Haustein;

- Altöl in Entsorgung: 200 l (= 200 kg bei 1 kg/l), geschätzt als jährlicher Verbrauch an Motoren- und Hydrauliköl inkl. 10 % Wasseranteil (200 kg/4400 m³ / 0.9 = 0.0505 kg/m³ Haustein);
- Verschleissmaterial z.B. für Schrämsäge (Kette, Antriebsrad, Verschleissleisten, etc.) werden pauschal über den Verbrauch an Verschleissmaterial auf dem Werkplatz mit verrechnet;
- Holzbalken für Steinlager: 1 m³ pro Jahr (1 m³/800 m³ Haustein = 0.00125 m³/m³ Haustein);
- Wasserverbrauch: für den Abbau im Steinbruch wird kein Wasser benötigt;
- Allfällige weitere Abfälle werden pauschal mit den Abfällen aus dem Werkplatz mit verrechnet;
- Angaben zur Staubentwicklung bei der Sprengung und beim Heraussägen liegen nicht vor; die Schrämsäge läuft aber langsam bei geringer Staubentwicklung.

Für die Anlieferung der eingesetzten Hilfsstoffe werden Transportdistanzen und Transportmittel nach Tab.4.2 der Qualitätsrichtlinien für Version 2.2 (Frischknecht et al. 2007) bilanziert.

Die Angaben zur Landtransformation und Landbelegung werden für die Berechnung der UBP abgeschätzt. Die Abschätzung erfolgt für den gesamten Steinbruch inkl. Werkplatz; eine detailliertere Aufschlüsselung in Steinbruch und Werkplatz ist für den Zweck dieser Studien nicht notwendig.

Entsprechend der oben beschriebenen Abbauweise werden Landtransformation und Landbelegung wie folgt bilanziert:

- für die Erschliessung eines geschätzt über die letzten 60 Jahre abbaubaren Volumens² von 20'000 m² x 6 m + 20'000 m² x (20 m - 6 m) / 3 wird eine Fläche von 20'000 m² Mischwald umgewandelt (20'000 m² / [120'000 m³ + 93'000 m³] = 0.0939 m²/m³);
- Aufgrund der Verhältnisse der heutigen Landbelegung wird davon ausgegangen, dass 2500 m² von 20'000 m² (12.5 %) mit Gebäuden belegt bzw. asphaltiert sind, und 87.5% als Kiesflächen genutzt werden, d.h. 0.0939 m²/m³ x 12.5% = 0.0117 m²/m³ Haustein in Gebäude umgewandelt werden und 0.0939 m²/m³ x 87.5% = 0.0822 m²/m³ Haustein in Kiesflächen;
- Nach der Nutzung wird das Gelände renaturiert und wieder in Mischwald überführt.

3.1.3 Umsetzung in ecoinvent: Steinbruch

In Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 sind die Modellierung des Abbaus des Kalksteins durch Thomann AG für das Jahr 2012 pro m³ Rohblock inkl. interne Transporte bilanziert.

² abgeschätzt aus der Geometrie des abgebauten Volumens als einem Sockel und einem schräg nach oben ansteigenden Teil, wobei durch den Faktor 3 (statt 2) berücksichtigt ist, dass das ursprüngliche Gelände von einem Geländeeinschnitt durchtrennt wurde.

3.1.4 Datenqualität

Sämtliche Daten zu den abgebauten und verwerteten Kubaturen sowie zu den Inputs und Outputs beruhen auf Abschätzungen durch die Firma Thomann AG.

Mangels Daten sehr pauschal bzw. nicht modelliert sind die Verschleissteile aus dem Freischnitt der Rohblöcke. Dies betrifft z.B. die Sägezähne aus Speziallegierungen der Schrämmaschine.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor in der Modellierung ist das Volumen der Rohblöcke und des Gesteins zur Schotterherstellung, die tatsächlich dem Steinbruch zur Weiterverarbeitung entnommen werden. Auch diese Angabe beruht auf Angaben der Firma.

Insgesamt ist die Datenqualität als repräsentativ für den Betrieb und hinsichtlich der Berechnung der Grauen Energie und der Umweltindikatoren der KBOB-Liste als begrenzt zu bezeichnen.

Tabelle 3-1: Modellierung des Prozesses „Abbau Kalkstein (Thomann AG)“ in Ecoinvent v.2.2, Teil 1

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000							
Input		Process Name	Output	Category	Sub category	Infra structure	Loca tion	Modul name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value
Kalkstein als Ressource	→	Abbau Kalkstein (Thomann AG), Teil 1		resource	in ground	-	-	Calcite, in ground	3.90E+03	kg	Thomann AG
Dieserverbrauch	→			construction processes	machinery	No	GLO	diesel, burned in building machine	5.88E+01	MJ	Thomann AG
Stromverbrauch	→			electricity	supply mix	No	CH	electricity, medium voltage, at grid	1)	kWh	Thomann AG
Sprengstoff	→			chemicals	inorganics	No	CH	explosives, tovox, at plant	N.B.	kg	Thomann AG
Schmierstoffe	→			chemicals	organics	No	RER	lubricating oil, at plant	9.02E-02	kg	Thomann AG
Verschleissmaterial Schrämsäge	→			metals	extraction	No	RER	steel, low-alloyed, at plant	N.B.	kg	Thomann AG
Holzbalken zur Lagerung	→			wooden materials	extraction	No	RER	sawn timber, softwood, raw, air dried, u=20%, at plant	1.25E-03	m3	Thomann AG
Antransport Einsatzstoffe Bahn	→			transport systems	train	No	CH	transport, freight, rail	1.09E-01	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR
Antransport Einsatzstoffe LKW 28 t	→			transport systems	road	No	RER	transport, lorry 20 - 28 t, fleet average	4.28E-02	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR
Transformation von Mischwald	→			resource	land	-	-	Transformation, from forest	9.39E-02	m2	eigene Abschätzung
Transformation in Steinbruch/Kiesplatz	→			resource	land	-	-	Transformation, to mineral extraction site	8.22E-02	m2	eigene Abschätzung
Transformation in Gebäude/versiegelte Flächen	→			resource	land	-	-	Transformation, to industrial area, built up	1.17E-02	m2	eigene Abschätzung

1) bei der Verarbeitung des Rohblockes in Tabelle 3-3 mit verrechnet

Tabelle 3-2: Modellierung des Prozesses „Abbau Kalkstein (Thomann AG)“ in Ecoinvent v.2.2, Teil 2

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000								
Input		Process Name	Output	Category	Sub category	Infrastructure	Location	Modul name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value	
Transformation von Gebäude/versiegelte Flächen	→	Abbau Kalkstein (Thomann AG), Teil 2		resource	land	-	-	Transformation, from industrial area, built up	1.17E-02	m2	eigene Abschätzung	
Transformation von Steinbruch	→			resource	land	-	-	Transformation, from mineral extraction site	8.22E-02	m2	eigene Abschätzung	
Transformation in Mischwald	→			resource	land	-	-	Transformation, to forest, extensive	9.39E-02	m2	eigene Abschätzung	
Flächenbelegung in Gebäude/versiegelte Flächen	→			resource	land	-	-	Occupation, industrial area, built up	1.17E-02	m2a	eigene Abschätzung	
Flächenbelegung Steinbruch	→			resource	land	-	-	Occupation, mineral extraction site	8.22E-02	m2a	eigene Abschätzung	
			→	Rohblock Kalkstein, ab Steinbruch	-	-	-	-	Rohblock Kalkstein, Lager (Thomann AG)	1.00E+00	m3	Thomann AG
			→	Abraum (Aushub + Bruch)	-	-	-	-	Bruch Kalkstein, ab Steinbruch (Thomann AG)	N.B.	m3	Thomann AG
			→	Altöl in Entsorgung	waste management	hazardous waste incineration	No	CH	disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration	5.05E-02	kg	Thomann AG
				Altholz in KVA	waste management	municipal incineration	No	CH	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration	6.75E-01	kg	Thomann AG
			→	Verschleissmaterial als Altmetall	-	-	-	-	-	N.B.	kg	Thomann AG
			→	Mineralischer Staub in Luft	-	-	-	-	-	N.B.	-	-

3.2 Verarbeitung des Kalksteines zu Fassadenplatten

3.2.1 Prozessbeschreibung: Verarbeitung

Die Rohsteinblöcke werden im Steinlager zwischengelagert. Danach werden die Blöcke aufgesägt (tranchiert) und in die geforderten Dimensionen gesägt. Dazu können verschiedene Gattersägen (1 Monolame, mehrere Mehrfachgattersägen), Kreissägen und eine Drahtsäge eingesetzt werden. Die Wahl der Maschinen richtet sich nach der Geometrie der Rohblöcke, der Dimension der herzustellenden Platten und der gewünschten Optik. Der interne Transport erfolgt mittels eines Radbaggers.

Auf Kundenwunsch kann mittels „Flammen“, Bürsten, oder Stocken eine natürlich raue Oberfläche erzeugt werden, oder aber in der Steinhauerei eine weitere Formgebung und Oberflächengestaltung vorgenommen werden. Für einfache Fassadentafeln sind keine Steinmetzarbeiten notwendig; da zum Zeitpunkt dieser Berechnungen mehrere Oberflächengestaltungen zur Auswahl stehen, wird für den Erweiterungsbau des Kunsthauses davon ausgegangen, dass keine zusätzliche Oberflächengestaltung notwendig ist, die Fassadenelemente also „sägerauh“ eingesetzt werden.

Das beim Sägen eingesetzte Kühlwasser wird einem nahen Bach entnommen und über ein Schlauchsystem den verschiedenen Maschinen zugeführt. Das mit Staub befrachtete Abwasser wird einem Absetzbecken zugeführt, das periodisch mit einem Radbagger ausgebaggert wird. Der ausgebaggerte, abgesetzte Schlamm wird in einen dafür abgetrennten Teil des Steinbruchs verbracht. Das vorgereinigte Wasser wird über drei weitere Absetzbecken geführt und danach vom Grossteil der mineralischen Schwebstoffe befreit in den nahen Fluss eingeleitet. Auch diese Absetzbecken werden ca. 3-mal im Jahr mit einer Güllepumpe ausgepumpt und der Schlamm im Steinbruch abgelagert. Insgesamt entstehen pro Jahr ca. 90 m³ Schlamm (inkl. Wasser); im Steinbruch entwässert und verdichtet sich der Schlamm zu kompaktem Lehm.

Anfallender Verschnitt wird dem Brecher zugeführt und als Schotter, Splitt oder Sand verkauft.

Für den Abtransport werden die fertigen Fassadenplatten auf Holzpaletten gelegt, wobei Plattenabschnitte als Abstandhalter verwendet werden. Die gesamte Palette wird dann mit Polyesterband für den Transport gesichert.

3.2.2 Verfügbare Betriebsdaten: Verarbeitung

Folgende Betriebsdaten liegen für den Werkplatz der Thomann AG für das Bezugsjahr 2012 vor. Sie werden im Folgenden auf 1 m³ Fassadenplatten umgelegt:

- Verarbeitete Kubatur eigener Kalkstein als Haustein: ca. 800 m³, verkaufte Kubatur aus eigenem Abbau: 600 m³, Verlust (Abschnitte, Sägestaub, etc.): 200 m³;
- Verkaufte Kubatur aus eigener Verarbeitung insgesamt, zuzüglich 150 m³ verarbeitetes Fremdmaterial): 750 m³;

-
- Stromverbrauch: Zahlen zum Stromverbrauch liegen nur auf Werksebene inkl. Steinbruch vor; eine Zuordnung zu einzelnen Maschinen für die Gewinnung des Rohblockes und für die Herstellung der Fassadenplatten ist nicht möglich. Vor diesem Hintergrund wird der Stromverbrauch wie folgt abgeschätzt:
 - Verkauf im Bezugsjahr: 750 m³ Steinprodukte inkl. verarbeitetes Fremdmaterial, 3600 m³ Schotter
 - Stromverbrauch für Brechen des Kieses aus ecoinvent: 0.005 kWh/m³ als Mittelwert aus den Werten aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent für gebrochenen Kies bzw. gebrochenem Kalkstein, wobei der gewählte Wert in der Größenordnung der Angaben eines anderen Kalksteinschotterwerkes liegt.
 - Stromverbrauch für Brechen des Kieses: 0.005 kWh/m³ x 3600 m³ x 2500 kg/m³ = 45'000 kWh für Schotter
 - Stromverbrauch insgesamt: 223'800 kWh
 - Stromverbrauch für Steinprodukte = 223'800 kWh - 45'000 kWh = 178'800 kWh
 - Stromverbrauch pro m³ Steinprodukt = 178'800 kWh / 750 m³ Steinprodukte = 238.4 kWh/m³;
 - Dieserverbrauch für interne Transporte (ohne Antransport der Rohblöcke): 1'800 l entsprechend 64'713 MJ (bei 0.84 kg/l und 42.8 MJ/kg (Hu), bezogen auf die verkaufte Kubatur von 750 m³: 64'713 MJ / 750 m³ = 86.3 MJ/m³ verkaufter Haustein;
 - Hydrauliköl: 150 l (= 127.5 kg bei 0,85 kg/l), bzw. 127.5 kg / 750 m³ = 0.17 kg/m³ verkaufter Haustein;
 - Schmierstoffe und Getriebeöl: 50 kg Schmierstoffe und 50 l Getriebeöl (= 42.5 kg bei 0.85 kg/l), bzw. (50 kg + 42.5 kg) / 750 m³ = 0.123 kg/m³ verkaufter Haustein;
 - Wasserverbrauch: Kühlwasser aus Bach, das in den nahen Fluss weitergeleitet wird, dies in einem Umfang von geschätzt 1400 m³ pro Jahr, also 1400 m³/750 m³ = 1.867 kg/m³ verkaufter Haustein; dazu Trinkwasser ab Netz ausserhalb des eigentlichen Produktionsprozesses (vernachlässigt);
 - Daten zur Qualität des in den Fluss eingeleiteten aufbereiteten Wassers liegen nicht vor;
 - Altöl zur Entsorgung: ca. 100 l (= 100 kg bei 1 kg/l), bzw. 100 kg / 750 m³ / 0.9 = 0.148 kg/m³ verkaufter Haustein;
 - es wird kein Flockungsmittel zur Abwasserbehandlung eingesetzt;
 - Verschleissmaterial: Fräs- und Sägeblätter werden jeweils wieder neu belegt und mehrmals gebraucht (Lebensdauer Sägeblatt ca. 5 – 7 Jahre). Geschätzter Einsatz von Verschleissmaterial als Stahl, niedrig legiert, pro Jahr von Werkzeugen: 100 kg, bzw. 100 kg / 750 m³ = 0.133 kg/m³;
 - Zur Zwischenlagerung der Blöcke werden z.T. Holzbalken verwendet (angenommener Verbrauch 3 m³/Jahr, bzw. 3 m³ / 750 m³ = 0.004 m³/m³ verkaufter Haustein;
 - Die Staubentwicklung ist vernachlässigbar, da alle Prozesse nass geführt werden;
 - Schlamm aus der Abwasserbehandlung wird intern im Steinbruch deponiert und wird zu Lehm;
 - Industrielle Gewerbeabfälle: 30 m³ pro Jahr als 5 Mulden a geschätzt 600 kg, bezogen auf gesamtes verkauftes Volumen an Haustein und Schotter von 800 m³ + 2000 m³ = (5 x 600 kg) / 2800 m³ = 1.07 kg/ m³ verkaufter Haustein;

-
- Polypropylenband zur Transportsicherung: 100 kg, bzw. $100 \text{ kg} / 750 \text{ kg} = 0.133 \text{ kg/m}^3$ verkaufter Haustein.

Die Abschätzung der Flächenbelegung des Werkplatzes erfolgt in Kap. 3.1. Für die Abschätzung der Infrastruktur wird von mehreren Werkhallen aus Stahl (8 m x 30 m, 20 m x 35 m, 20 m x 20 m) ausgegangen, wobei die Gebäudeteile für Administration, Steinmetzerei und anderweitig verwendete Gebäude(-teile) nicht berücksichtigt sind. Der Infrastrukturbedarf gemäss ecoinvent Qualitätsrichtlinien für Version 2.2 (Frischknecht et al. 2007) wird über 50 Jahre abgeschätzt. Für die Berechnung der Werkshalle wird der entsprechende Datensatz modifiziert und mit 98 % Elektro Stahl im Stahlträger gerechnet (entsprechend Annahmen in der KBOB-Liste, Stand 01/2011).

Für die Anlieferung der eingesetzten Hilfsstoffe werden Transportdistanzen und Transportmittel nach Tab.4.2 der ecoinvent Qualitätsrichtlinien für Version 2.2 bilanziert.

3.2.3 Umsetzung in ecoinvent: Verarbeitung

In Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 sind die Modellierung der Verarbeitung der Rohblöcke durch die Thomann AG für das Jahr 2012 pro m^3 einfache Fassadenplatten bilanziert.

3.2.4 Datenqualität

Die Produktpalette der Thomann AG ist umfangreich: sie reicht von Fassadenplatten und Fussbodenplatten hin zu Grabsteinen und komplexen Produkten wie dekorativen Brunnenrögen. Entsprechend ist der Aufwand für einzelne Produkte pro m^3 sehr unterschiedlich; auch die Zahlen für die Bearbeitung der Rohblöcke zu Fassadenplatten beruhen auf groben, bestmöglichen Schätzungen.

Für die Zuordnung der betrieblichen Aufwendungen auf Fassadenplatten mussten in Anbetracht der nur auf Werksebene vorliegenden Daten und Schätzungen mit Vereinfachungen bilanziert werden. Grundsätzlich wurden alle Aufwendungen auf die verkaufte Kubatur umgelegt. Dies ist im Vergleich zu kleinteiligen und dekorativen Produkten konservativ, da für einfache Fassadenplatten ein tendenziell geringerer Aufwand anzusetzen ist.

Beim Stromverbrauch mussten Abschätzungen über den Stromaufwand für das Brechen des Schotters und über die Zuordnung der Differenz zwischen Gesamtstromverbrauch und geschätztem Stromverbrauch für das Brechen des Schotters pauschal auf den verarbeiteten Haustein gemacht werden. Dabei konnte auch der Stromaufwand für das Heraussägen des Rohblocks und für dessen Weiterverarbeitung nicht unterschieden werden. Dies schränkt die Datenqualität dieses Datensatzes deutlich ein, da erfahrungsgemäss der Stromverbrauch ein wesentlicher Faktor für das Umweltprofil von Natursteinen ist.

Mit Unsicherheiten ist auch die Modellierung der Werkshalle als Infrastruktur behaftet, insbesondere die Repräsentativität des gewählten Datensatzes für die Werkshalle der Thomann AG.

Insgesamt kann die Datenqualität als genügend für eine Abschätzung der Indikatoren für die KBOB-Liste angesehen werden.

Tabelle 3-3: Modellierung des Prozesses „Verarbeitung des Rohkalksteines zu Fassadenplatten (Thomann AG)“ in Ecoinvent v.2.2, Teil 1

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000							
Input		Process Name	Output	Category	Sub category	Infra structure	Location	Modul name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value
Rohblock Kalkstein, ab Lagerplatz	→	Fertigung Kalksteintafeln (Thomann AG), Teil 1		-	-	-	-	Rohblock Kalkstein ab Lager	1.33E+00	m3	Thomann AG
Dieserverbrauch für interne Transporte	→			construction processes	machinery	No	GLO	diesel, burned in building machine	8.63E+01	MJ	Thomann AG
Stromverbrauch ¹⁾	→			electricity	supply mix	No	CH	electricity, medium voltage, at grid	2.38E+02	kWh	Thomann AG
Schmierstoffe	→			chemicals	organics	No	RER	lubricating oil, at plant	1.23E-01	kg	Thomann AG
Verschleissmaterial	→			metals	extraction	No	RER	steel, low-alloyed, at plant	1.33E-01	kg	Thomann AG
Holzbalken zur Lagerung	→			wooden materials	extraction	No	RER	sawn timber, softwood, raw, air dried, u=20%, at plant	4.00E-03	m3	Thomann AG
PP Band, Rohmaterial	→			plastics	polymers	No	RER	polypropylene, granulate, at plant	6.23E-01	kg	Thomann AG
PP Band, Herstellung	→			plastics	processing	No	RER	extrusion, plastic film	6.23E-01	kg	Thomann AG
Wasser zur Kühlung aus Bach	→			resource	in water	-	-	Water, river	1.87E+00.	m3	-
Antransport Einsatzstoffe Bahn	→			transport systems	train	No	CH	transport, freight, rail	2.78E-01	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR
Antransport Einsatzstoffe LKW 28 t	→			transport systems	road	No	RER	transport, lorry 20 - 28 t, fleet average	1.52E-01	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR
Infrastruktur Werkshalle	→			construction processes	buildings	Yes	CH	building, hall, steel construction	9.31E-03	m2	eigene Abschätzung

¹⁾ inkl. Stromverbrauch der Strämsäge im Steinbruch

Tabelle 3-4: Modellierung des Prozesses „Verarbeitung des Rohkalksteines zu Fassadenplatten (Thomann AG)“ in Ecoinvent v.2.2, Teil 2

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000							
Input	Process Name	Output	Category	Sub category	Infra structure	Loca tion	Modul name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value	
	Fertigung Kalksteintafeln (Thomann AG), Teil 2	→ Kalksteintafeln 12 cm als Fassadenelemente, ab Werk (Thomann AG)	-	-	-	CH	Kalksteintafeln 12 cm als Fassadenelemente, ab Werk (Thomann AG)	1.00E+00	m3	Thomann AG	
		→ Bruch, Abschnitte	-	-	-	-	-	N.B.	-	Thomann AG	
		→ Altöl in Entsorgung	waste management	hazardous waste incineration	No	CH	disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration	1.48E-01	kg	Thomann AG	
		→ Altholz in KVA	waste management	municipal incineration	No	CH	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration	2.16E+00	kg	Thomann AG	
		→ Verschleissmaterial als Altmetall	-	-	-	-	-	N.B.	kg	Thomann AG	
		→ Abwasser aus Kühlung	-	-	-	-	-	N.B.	-	-	
		→ Schlamm aus Wasseraufbereitung in Steinbruch	-	-	-	-	-	N.B.	-	-	
		→ Mineralischer Staub in Luft	-	-	-	-	-	N.B.	-	-	
		→ Industrieller Gewerbeabfall	waste management	municipal incineration	No	CH	disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration	1.07E+00	kg	Thomann AG	

4 Sachbilanz für die Franken-Schotter GmbH & Co. KG

4.1 Abbau des Rohkalksteines zu Quadern im Steinbruch

4.1.1 Prozessbeschreibung: Steinbruch

Die Firma Franken-Schotter GmbH baut Dietfurter Kalkstein in grossindustriellem Massstab in mehreren Steinbrüchen ab, die in der Gegend um Dietfurt südlich Nürnberg liegen. In den Steinbrüchen werden bis zu 30 verschiedene horizontale Schichten abgebaut, die sich in Struktur, technischen Eigenschaften und Farbe unterscheiden und entsprechend für eine Vielzahl von Produkten eingesetzt werden, darunter Bodenplatten, Fassadenplatte, Schotter, Kies, Brunnenröge, Steinkörbe, Pflastersteine, Mauersteine aus Naturstein, etc.

Die Rohblöcke werden mehrheitlich mittels Schrämsäge gewonnen. Dazu wird mit einer Schrämsäge auf einer Raupe ein erster vertikaler Schnitt über die gesamte Länge der abzubauenden Schicht(en) in einem Abstand von ca. 3 Metern von der Vorderkante der abzubauenden Schicht(en) gemacht; der zweite vertikale Schnitt erfolgt von der Stirnseite der abzubauenden Schicht(en) mit einer Schrämsäge auf einem Traktor. Dabei werden die natürlichen Bruchstellen im Kalkstein berücksichtigt, um die Verluste zu minimieren. Die freigeschnittenen Blöcke werden nun von einem Grossraumfahrzeug mit einem Gabelwerkzeug an der horizontalen Schichtgrenze angehoben, freigebrochen und abtransportiert. Bei Bedarf werden die Blöcke vor dem Abtransport im Steinbruch noch nachformatiert, um das Transportgewicht zu minimieren.

Das als Naturstein nicht geeignete Material aus den oberen Schichten des Steinbruchs als auch alle Abschnitte und anderweitig nicht zu verwendendes Material werden dem Schotterwerk zugeführt und verwertet. Das Sägemehl wird dem Asphaltwerk zugeführt und dort verwertet.

Bei der Erschliessung eines neuen Steinbruchs wird die Humusschicht abgetragen und in der Nähe für die Rekultivierung zwischengelagert. Durch Sprengung werden die weniger stabilen oberen Schichten zerkleinert; diese werden mit Grossraumfahrzeugen dem Schotterwerk zugeführt.

Eine Sicherung der Stabilität des Steinbruchs durch Stahlanker oder andere bauliche Massnahmen sind nicht notwendig.

Abgebaute Teile der Steinbrüche werden mit Deponiematerial wieder aufgefüllt und renaturiert. Die durchschnittliche Dauer zwischen Erschliessung und Renaturierung beträgt rund 4 Jahre.

Das Gestein für die Fassadenplatten würde im Steinbruch in Dietfurt abgebaut³. Der Steinbruch Dietfurt umfasst rund 165 ha, von denen auf 26.46 ha abgebaut wird; die übrigen Flächen sind zukünftige Abbauflächen und sonstige Oberflächen inkl. Gebäuden, Lagerflächen, Verkehrswege, etc. (s. Abbildung 3-1).

³ Dietfurter Kalkstein gala® beige, Steinbruch Dietfurt, Lage 26



Abbildung 4-1: Luftbild Steinbruch Dietfurt (Quelle: google maps)

Nach dem Abbau werden die Rohblöcke mit einem Format ca. 1 m x 2.5 m x 1.6 m mittels eines Dumpers zur Vorverarbeitung in einer Sägehalle im Steinbruch transportiert. Die einzelnen Rohblöcke werden mit Radladern entladen und in die Sägehalle eingefahren. Dort werden die Blöcke tranchiert, wobei die „Krusten“, d.h. das Gestein der Trennschicht ins Schotterwerk abgeführt werden. Die tranchierten Platten werden danach horizontal auf 2 Transportpaletten umgelegt, um mit einem LKW zur Weiterverarbeitung ins Werk Petersbuch gefahren zu werden.

4.1.2 Verfügbare Betriebsdaten: Steinbruch inkl. Vorverarbeitung

Die Betriebsdaten wurden pro 1 m³ vorverarbeitete 12 cm-Tranchen über eine detaillierte Prozessplanung mit entsprechenden Verbrauchswerten pro Maschine abgeschätzt:

- Dieserverbrauch für Abbau im Steinbruch mittels Schrämentechnik: 0.55 l/m³ abgebautes Gestein bei 60% Ausbeute beim Tranchieren = $0.55 \text{ l/m}^3 / 60\% \text{ Ausbeute} \times 0.84 \text{ kg/l} \times 42.8 \text{ MJ/kg (Hu)} = 33.0 \text{ MJ/m}^3$; der Dieserverbrauch für den Abbau wird dabei vollständig auf die Gewinnung des Rohblockes (und nicht auf die Schottergewinnung) umgelegt.
- Dieserverbrauch für Transporte im Steinbruch: 0.32 l/m³ Rohblock für den Transport des Rohblocks mit einem Dumper/Mulde zur Vorverarbeitung im Steinbruch, zusätzlich 0.15 l Diesel/m³ für das Be- und Entladen des Rohblocks mittels Radlader und 0.2 l Diesel/m³ Rohblock für interne Transporte mit einem Diesel-Stapler, entsprechend $(0.32 \text{ l/m}^3 \times 60\% \text{ Ausbeute} + 0.15 \text{ l/m}^3 + 0.2 \text{ l/m}^3) / 60\% \text{ Ausbeute} \times 0.84 \text{ kg/l} \times 42.8 \text{ MJ/kg (Hu)} = 32.5 \text{ MJ Diesel in Baumaschine pro m}^3$; die Transportaufwendungen vom Steinbruch zum Werk werden anteilmässig dem Schotter bzw. den Tranchen zugewiesen (da das Schotterwerk in gleicher Richtung liegt), die anderen Aufwendungen vollständig der Fassadenplatte zugeordnet.

-
- Stromverbrauch für interne Transporte (Kran) und Zuschnitt der 12 cm Tranchen: bilanziert werden 3 kWh/m³ für interne Transporte und 76 kWh/m³ für den Zuschnitt, total 79 kWh/m³; der Stromverbrauch wird vollständig der Herstellung der Tranchen zugerechnet.
 - Sprengstoff: vereinfachend wird der Einsatz von Sprengstoff dem Zerkleinern des Gesteins zu Schotter zugeordnet⁴;
 - Wasserbedarf beim Tranchieren der Rohblöcke: 9.6 l/m³ aus eigenem Brunnen bzw. Meteorwasser zu Kompensation der Verluste im internen Wasserkreislauf; der Trinkwasserbedarf von 98 m³/a wird vernachlässigt; für den Abbau im Steinbruch wird kein Wasser benötigt.
 - Schmierfett für Schrämsäge: wird mangels spezifischer Daten vom Schweizer Hersteller übernommen: 0.075 kg/m³ Rohblock)
 - Motorenöl und Hydrauliköl: wird mangels spezifischer Daten vom Schweizer Hersteller übernommen: 0.0625 kg/m³ Rohblock);
Anmerkung für Modellierung: im ecoinvent Modul „Diesel in Baumaschine“ werden 0.000514 kg Schmierstoff/MJ bilanziert, in diesem Fall also 0.0416 kg/m³ Rohblock. Als Differenz zu berücksichtigen sind also 0.0209 kg/m³ Rohblock.
 - Altöl in Entsorgung: wird mangels spezifischer Daten vom Schweizer Hersteller übernommen: 0.0694 kg/m³ Rohblock)
 - Verschleissmaterial z.B. für Schrämsäge (Kette, Antriebsrad, Verschleissleisten, etc.): wird mangels spezifischer Daten vom Schweizer Hersteller übernommen, i.e. werden pauschal über den Verbrauch an Verschleissmaterial im Werk mit verrechnet,
 - Holzbalken für Steinlager: wird mangels spezifischer Daten vom Schweizer Hersteller übernommen: 0.00125 m³/m³ Rohblock),
 - Allfällige weitere Abfälle: keine Angaben.
 - Angaben zur Staubentwicklung bei der Sprengung und beim Abbau liegen nicht vor.

Für die Anlieferung der eingesetzten Hilfsstoffe werden Transportdistanzen und Transportmittel nach Tab.4.2 der ecoinvent Qualitätsrichtlinien für Version 2.2 (Frischknecht et al. 2007) bilanziert.

Die Angaben zur Landtransformation und Landbelegung werden für die Berechnung der UBP abgeschätzt. Die Abschätzung erfolgt für den gesamten Steinbruch inkl. Sägehalle.

Entsprechend der oben beschriebenen Abbauweise und Vorverarbeitung werden Landtransformation und Landbelegung wie folgt bilanziert:

- Fläche der derzeitigen Abbaufäche: 264'000 m²
- Jährlich abgebaute Kubatur: 582'000 m³
- Dauer zwischen Erschliessung und Renaturierung: 4 Jahre
- Fläche der sonstigen Oberfläche (Strassen, Lagerplätze, Gebäude): 786'000 m²
- Dauer der Flächenbelegung durch sonstige Flächen: 50 Jahre
- Fläche Sägehalle: 3200 m²

⁴ für nicht abgebauten Haustein (der durch die Sprengung zugänglich gemacht wird) und dem gesprengte Gestein für die Schotterherstellung (das durch die Sprengung vorzerkleinert wird) sind keine internen Preise verfügbar. Eine Zuordnung über das insgesamt freigelegte Gesteinsvolumen wäre möglich, die ökologische Relevanz der Herstellung des Sprengstoffs für die Gesamtökobilanz aber in jedem Fall vernachlässigbar.

-
- Dauer der Flächenbelegung durch sonstige Flächen: 50 Jahre
 - Jährlich in der Sägehalle verarbeitete Kubatur: 5'000 m³

4.1.3 Umsetzung in ecoinvent: Steinbruch

In Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 sind die Modellierung des Abbaus des Kalksteins und die Vorverarbeitung im Steinbruch durch die Franken-Schotter GmbH & CO für das Jahr 2013 pro m³ Rohblock inkl. interne Transporte bilanziert.

4.1.4 Datenqualität

Sämtliche relevante Daten zu den Inputs und Outputs, insbesondere zu Ausbeuten sowie Strom- und Dieserverbrauch beruhen auf Berechnungen basierend auf einer detaillierten Prozessplanung und Verbrauchswerten des Maschinenparks durch die Firma Franken-Schotter GmbH & Co.

Mangels Daten sehr pauschal bzw. mit Daten aus dem Schweizer Betrieb modelliert sind verschiedene Inputs und Outputs, die für das Ergebnis der Ökobilanz von untergeordneter Bedeutung sind.

Insgesamt ist die Datenqualität als repräsentativ für den Betrieb und hinsichtlich der Berechnung der Grauen Energie und der Umweltindikatoren der KBOB-Liste als gut zu bezeichnen.

Tabelle 4-1: Modellierung des Prozesses „Abbau und Vorverarbeitung Kalkstein (Franken-Schotter GmbH & Co.)“ in Ecoinvent v.2.2, Teil 1

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000							
Input		Process Name	Output	Category	Sub category	Infrastructure	Location	Modul name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value
Kalkstein als Ressource	→	Abbau und Vorverarbeitung (Franken-Schotter GmbH & Co.), Teil 1		resource	in ground	-	-	Calcite, in ground	2.55E+03	kg	Franken-Schotter GmbH & Co.
Dieserverbrauch	→			construction processes	machinery	No	GLO	diesel, burned in building machine	6.54E+01	MJ	Franken-Schotter GmbH & Co.
Stromverbrauch	→			electricity	supply mix	No	DE	electricity, medium voltage, at grid	7.90E+01	kWh	Franken-Schotter GmbH & Co.
Sprenstoff	→			chemicals	inorganics	No	CH	explosives, tovox, at plant	N.B.	kg	Franken-Schotter GmbH & Co.
Schmierstoffe	→			chemicals	organics	No	RER	lubricating oil, at plant	1.38E-01	kg	Thomann AG
Verschleissmaterial Schrämsäge	→			metals	extraction	No	RER	steel, low-alloyed, at plant	N.B.	kg	-
Holzbalken zur Lagerung	→			wooden materials	extraction	No	RER	sawn timber, softwood, raw, air dried, u=20%, at plant	1.25E-03	m3	Thomann AG
Antransport Einsatzstoffe Bahn	→			transport systems	train	No	CH	transport, freight, rail	8.25E-02	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR
Antransport Einsatzstoffe LKW 28 t	→			transport systems	road	No	RER	transport, lorry 16-32t, EURO4	4.06E-02	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR
Meteorwasser zur Kühlung	→			resource	in water	-	-	Water, cooling, unspecified natural origin	9.60E-03	m3	Franken-Schotter GmbH & Co.
Transformation von Laubwald	→			resource	land	-	-	Transformation, from forest	1.40E-01	m2	eigene Abschätzung
Transformation in Steinbruch	→			resource	land	-	-	Transformation, to mineral extraction site	1.13E-01	m2	eigene Abschätzung
Transformation in sonstige Flächen	→			resource	land	-	-	Transformation, to mineral extraction site	2.70E-02	m2	eigene Abschätzung
Transformation von Steinbruch	→			resource	land	-	-	Transformation, from mineral extraction site	1.13E-01	m2	eigene Abschätzung
Transformation von sonstigen Flächen	→			resource	land	-	-	Transformation, from mineral extraction site	2.70E-02	m2	eigene Abschätzung

Tabelle 4-2: Modellierung des Prozesses „Abbau und Vorverarbeitung Kalkstein (Franken-Schotter GmbH & Co.)“ in Ecoinvent v.2.2, Teil 2

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000								
Input		Process Name	Output	Category	Sub category	Infra structure	Loca tion	Modul name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value	
Transformation in Laubwald	→	Abbau und Vorverarbeitung (Franken-Schotter GmbH & Co.), Teil 2		resource	land	-	-	Transformation, to forest	1.40E-01	m2	eigene Abschätzung	
Flächenbelegung Steinbruch	→			resource	land	-	-	Occupation, mineral extraction site	1.13E-01	m2a	eigene Abschätzung	
Flächenbelegung sonstige Flächen	→			resource	land	-	-	Occupation, mineral extraction site	2.70E-02	m2a	eigene Abschätzung	
Infrastruktur Sägehalle	→			construction processes	buildings	Yes	CH	building, hall, steel construction	1.28E-02	m2	eigene Abschätzung	
			→	Tranchen 12 cm, ab Steinbruch (Franken-Schotter GmbH & Co)	-	-	-	DE	Kalkstein, Tranchen 12 cm, ab Steinbruch (Franken-Schotter GmbH & Co)	1.00E+00	m3	Franken-Schotter GmbH & Co.
			→	Abraum (Verschnitt + Bruch)	-	-	-	DE	-	N.B.	-	-
			→	Altöl in Entsorgung	waste management	hazardous waste incineration	No	CH	disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration	6.94E-02	kg	Thomann AG
			→	Altholz in KVA	waste management	municipal incineration	No	CH	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration	6.75E-01	kg	Franken-Schotter GmbH & Co.
			→	Verschleissmaterial als Altmetall	-	-	-	-	-	N.B.	kg	Franken-Schotter GmbH & Co.
			→	Abwasser aus Kühlung	-	-	-	-	-	N.B.	-	-
			→	Mineralischer Staub in Luft	-	-	-	-	-	N.B.	-	-

4.2 Verarbeitung des Kalksteines zu Fassadenplatten

4.2.1 Prozessbeschreibung: Verarbeitung

Nach dem Tranchieren in der Sägehalle im Steinbruch Dietfurt werden die Platten auf LKWs geladen und 33.3 km ins Werk Peterbuch zur Weiterverarbeitung gefahren. Diese Vorverarbeitung erlaubt es, das Transportgewicht zum Werk Petersbuch zu optimieren.

Im Werk Petersbuch werden die Tranchen mit einem Diesel-Stapler auf eine Flächenschleifmaschine gelegt, um die Schliffspuren der Seilsäge zu beseitigen. Danach werden die Tranchen mit dem Stapler auf die Zuschneidemaschine überführt und die Fassadentafeln zugesägt. Abschnitte werden zur Schotterherstellung verwendet.

Das Wasser zur Kühlung der Maschinen ist zum Grossteil Meteorwasser, das auf den Dächern und dem Werkplatz gefasst wird. Bei Bedarf werden geringe Mengen Wasser aus dem öffentlichen Netz zugeführt. Das Wasser wird in einem geschlossenen Kreislauf geführt und jeweils in modernen Kammerfilterpressen aufbereitet. Der Sägeschlamm wird als Wiederfüllung im Steinbruch verwendet.

Die Fläche des Werksgeländes beträgt ca. 47'000 m², wobei rund die Hälfte durch Gebäude belegt ist; die weiteren Flächen dienen als Lagerflächen.



Abbildung 4-2: Luftbild Werk Petersbuch (vor der Erweiterung) (Quelle: google maps)

Die fertigen Tafeln werden meist ohne Zwischenlage auf Europaletten gelegt, mit Kunststoffreifen gesichert und je nach Jahreszeit in Schrumpffolie verpackt.

4.2.2 Verfügbare Betriebsdaten: Verarbeitung

Die Betriebsdaten wurden pro 1 m³ 12 cm-Fassadenplatten über eine detaillierte Prozessplanung mit entsprechenden Verbrauchswerten pro Maschine abgeschätzt:

- Materialausbeute: 75%; die übrigen 25% Verschnitte werden zu Schotter verarbeitet, also 1.33 m³ vorverarbeitete Tranchen /m³ fertige Fassadenplatten;
- Antransport mittels LKW: bei einer Transportdistanz von 33.5 km, einer durchschnittlichen Dichte von 2550 kg/m³ und obiger Ausbeute ergibt sich ein Transportaufwand von 2.25 t/m³ / 75% Ausbeute x 33.5 km = 113.9 tkm;
- Stromverbrauch: für interne Transporte 4.66 kWh/m³, Oberflächenbehandlung 27.7 kWh/m³ Zuschnitt 70.8 kWh/m³ und Wasserkreislauf (0.2 kWh/m³ Kreislaufwasser, also 3.278 m³/m³ x 0.2 kWh/m³ Kreislaufwasser = 0.656 kWh/m³ Fassadenplatte), total 103.8 kWh/m³;
- Dieselverbrauch für interne Transporte (ohne Antransport der Rohblöcke): 0.53 l/m³, entsprechend 0.53 l/m³ x 0.84 kg/l x 42.8 MJ (Hu)/kg = 19.1 MJ/m³;
- Hydrauliköl: wird mangels spezifischer Daten vom Schweizer Hersteller übernommen: 0.17 kg/m³ Fassadenplatte;
- Schmierstoffe und Getriebeöl: wird mangels spezifischer Daten vom Schweizer Hersteller übernommen: 0.123 kg/m³ Fassadenplatte;
- Wasserverbrauch: im Wesentlichen wird Meteorwasser verwendet (1108 l/m³ + 2170 l/m³ = 3278 l/m³), das im Kreislauf geführt wird (angenommener Verlust 5% je Kreislauf), dazu ca. 0.9 l Trinkwasser ab Netz/m³ als Ergänzung;
- Altöl zur Entsorgung: wird mangels spezifischer Daten vom Schweizer Hersteller übernommen: 0.148 kg/m³ Fassadenplatte;
- Flockungsmittel zur Abwasserbehandlung: es werden 0.8 g Flockungsmittel/m³ Kreislaufwasser verwendet, also 3.278 m³/m³ x 0.0008 kg = 0.00262 kg Flockungsmittel/m³ Fassadenplatten;
- Verschleissmaterial: wird mangels spezifischer Daten vom Schweizer Hersteller übernommen: 0.133 kg Stahl niedrig legiert/m³ Fassadenplatten;
- Zur Zwischenlagerung der Blöcke werden meist Plattenabschnitte verwendet; vernachlässigt.
- Die Staubentwicklung ist vernachlässigbar, da alle Prozesse nass geführt werden;
- Schlamm aus der Abwasserbehandlung wird in einem Steinbruch deponiert und wird zu Lehm;
- Industrielle Gewerbeabfälle: wird mangels spezifischer Daten vom Schweizer Hersteller übernommen: 1.07 kg/m³ Fassadenplatte;
- Verpackung: die Platten werden ohne Abstandhalter auf Holz-Euro-Paletten gelegt, ca. 0.5 m³/Palette, wobei die gleichen Paletten verwendet werden können, die vorher auch für den Transport zwischen Dietfurt und Petersbuch verwendet wurden;
- Polypropylenband zur Transportsicherung: wird mangels spezifischer Daten vom Schweizer Hersteller übernommen: 0.133 kg/m³ Fassadenplatte.

Die Flächenbelegung des Werksgeländes basiert auf folgenden Annahmen:

- Fläche des Werksgeländes 47'000 m² in agrarisch geprägter Gegend, davon ½ Gebäude, ½ Lagerflächen;

-
- Umgesetzte Rohblocks pro Jahr: 80'000 m³.

Für die Abschätzung der Infrastruktur wird von einer Werkhalle aus Stahl 23'000 m² ausgegangen. Der Infrastrukturbedarf gemäss ecoinvent Qualitätsrichtlinien für Version 2.2 (Frischknecht et al. 2007) wird über 50 Jahre abgeschätzt. Für die Berechnung der Werkhalle wird der entsprechende Datensatz modifiziert und mit 98 % Elektrostahl im Stahlträger gerechnet (entsprechend Annahmen in der KBOB-Liste, Stand 06/2012).

Für die Anlieferung der eingesetzten Hilfsstoffe werden Transportdistanzen und Transportmittel nach Tab.4.2 der ecoinvent Qualitätsrichtlinien für Version 2.2 bilanziert.

4.2.3 Umsetzung in ecoinvent: Verarbeitung

In Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 sind die Modellierung der Verarbeitung der vorverarbeiteten Kalksteintafeln durch die Franken-Schotter GmbH & Co. für das Jahr 2012 spezifisch pro m³ 12 cm Fassadenplatten bilanziert.

4.2.4 Datenqualität

Sämtliche relevante Daten zu den Inputs und Outputs, insbesondere zur Ausbeute sowie zum Strom- und Dieserverbrauch beruhen auf detaillierten Berechnungen durch die Firma Franken-Schotter GmbH & Co., basierend auf einer detaillierten Prozessplanung und Verbrauchswerten des Maschinenparks.

Mangels Daten sehr pauschal bzw. mit Daten aus dem Schweizer Betrieb modelliert sind verschiedene Inputs und Outputs, die für das Ergebnis der Ökobilanz von untergeordneter Bedeutung sind.

Mit grösseren Unsicherheiten ist die Modellierung der Werkhalle als Infrastruktur behaftet, insbesondere die Repräsentativität des gewählten Datensatzes für die Werkhalle der Franken-Schotter GmbH & Co.

Insgesamt kann die Datenqualität als gut für eine Abschätzung der Indikatoren für die KBOB-Liste angesehen werden.

Die Prozesskette inkl. Transporte wurde spezifisch für den in Fussnote 3 genannten Gesteinstyp definiert. Änderungen der Dicke der Fassadenplatten (Reduzierung der aktuellen Dicke von 0.12 m) führt zu Veränderung der Prozesskette mit ggf. erheblichen Auswirkungen auf die Ökobilanz; Änderungen der Materialauswahl (z.B. zu Dietfurter Kalkstein gala® grau) führt ggf. zu anderem Herkunftsort (Steinbruch Kaldorf) mit Veränderung der Prozesskette und entsprechenden Auswirkungen auf die Ökobilanz.

Tabelle 4-3: Modellierung des Prozesses „Fertigung Kalksteintafeln (Franken-Schotter GmbH & Co.)“ in Ecoinvent v.2.2, Teil 1

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000							
Input		Process Name	Output	Category	Sub category	Infra structure	Location	Modul name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value
Kalkstein, Tranchen 12 cm, ab Steinbruch	→	Fertigung Kalksteintafeln (Franken-Schotter GmbH & Co), Teil 1		-	-	-	-	Kalkstein, Tranchen 12 cm, ab Steinbruch (Franken-Schotter GmbH & Co)	1.33E+00	m3	Franken-Schotter GmbH & Co.
Antransport Tranchen mit LKW 32 t	→			transport systems	road	No	RER	transport, lorry 16-32t, EURO4	1.14E+02	tkm	Franken-Schotter GmbH & Co.
Dieserverbrauch für interne Transporte	→			construction processes	machinery	No	GLO	diesel, burned in building machine	1.91E+01	MJ	Franken-Schotter GmbH & Co.
Stromverbrauch	→			electricity	supply mix	No	DE	electricity, medium voltage, at grid	1.04E+02	kWh	Franken-Schotter GmbH & Co.
Schmierstoffe	→			chemicals	organics	No	RER	lubricating oil, at plant	2.93E-01	kg	Thomann AG
Verschleissmaterial	→			metals	extraction	No	RER	steel, low-alloyed, at plant	1.33E-01	kg	Thomann AG
Holzbalken zur Lagerung	→			wooden materials	extraction	No	RER	sawn timber, softwood, raw, air dried, u=20%, at plant	N.B.	m3	Franken-Schotter GmbH & Co.
PP Band, Herstellung	→			plastics	processing	No	RER	extrusion, plastic film	6.23E-01	kg	Thomann AG
Wasser zur Kühlung (interner Kreislauf)	→			resource	in water	No	-	Water, cooling, unspecified natural origin	1.64E-01	m3	Franken-Schotter GmbH & Co.
Wasser ab Netz	→			water supply	production	No	RER	tap water, at user	9.00E-01	kg	Franken-Schotter GmbH & Co.
Flockungsmittel auf Acrylamidbasis	→			chemicals	organics	No	GLO	chemicals organic, at plant	2.62E-03	kg	Franken-Schotter GmbH & Co.
Antransport Einsatzstoffe Bahn	→			transport systems	train	No	DE	transport, freight, rail	3.82E-01	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR
Antransport Einsatzstoffe LKW 28 t	→			transport systems	road	No	RER	transport, lorry 16-32t, EURO3	5.26E-02	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR
Transformation von Agrarfläche	→			resource	land	-	-	Transformation, from arable	5.88E-03	m2	eigene Abschätzung

Tabelle 4-4: Modellierung des Prozesses „Fertigung Kalksteintafeln (Franken-Schotter GmbH & Co.)“ in Ecoinvent v.2.2, Teil 2

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000							
Input		Process Name	Output	Category	Sub category	Infra structure	Loca tion	Modul name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value
Transformation in Industriefl.	→	Fertigung Kalksteintafeln (Franken-Schotter GmbH & Co), Teil 2		resource	land	-	-	Transformation, to industrial area, built up	5.88E-03	m2	eigene Abschätzung
Transformation von Industriefl.	→			resource	land	-	-	Transformation, from industrial area, built up	5.88E-03	m2	eigene Abschätzung
Transformation in Agrarfläche	→			resource	land	-	-	Transformation, to arable	5.88E-03	m2	eigene Abschätzung
Flächenbelegung Industriefläche	→			resource	land	-	-	Occupation, industrial area, built up	5.88E-03	m2a	eigene Abschätzung
Infrastruktur Werkshalle	→			construction processes	buildings	Yes	CH	building, hall, steel construction	2.94E-03	m2	eigene Abschätzung
	→		Kalksteintafeln 12 cm, ab Werk	-	-	-	DE	Kalksteintafeln 12 cm als Fassadenelemente, ab Werk	1.00E+00	m3	Franken-Schotter GmbH & Co.
	→		Bruch, Filterstaub	-	-	-	DE	-	N.B.	-	Franken-Schotter GmbH & Co.
	→		Altöl in Entsorgung	waste management	hazardous waste incineration	No	CH	disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration	1.48E-01	kg	Thomann AG
	→		Altholz in KVA	waste management	municipal incineration	No	CH	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration	N.B.	kg	Franken-Schotter GmbH & Co.
	→		Verschleissmaterial als Altmetall	-	-	-	-	-	N.B.	-	Franken-Schotter GmbH & Co.
	→		Abwasser aus Kühlung	-	-	-	-	-	N.B.	-	-
	→		Schlamm aus Wasseraufbereitung in Steinbruch	-	-	-	-	-	N.B.	-	-
	→		Mineralischer Staub in Luft	-	-	-	-	-	N.B.	-	-
	→	Industrieller Gewerbeabfall	waste management	municipal incineration	No	CH	disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration	1.07E+00	kg	Thomann AG	

5 Auswertung

5.1 Vergleich der untersuchten Kalksteinproduzenten

In Tabelle 5-1 ist das Ergebnis der Ökobilanz für die untersuchten Fassadenplatten aus Kalkstein, ab Werk, für die Indikatoren Graue Energie (Primärenergie, nicht erneuerbar), Primärenergie gesamt, Treibhauspotenzial, Umweltbelastungspunkte (UBP) ausgewiesen.

Da der Stromverbrauch einer der zentralen Treiber der Ökobilanz für Kalkstein ist (s. unten), wird im Sinne einer Sensitivitätsanalyse zusätzlich die Ökobilanz der Fassadenplatten des Deutschen Herstellers mit Schweizer Strommix ausgewiesen.

Tabelle 5-1: Ergebnis der Ökobilanz für Fassadenplatten aus Kalkstein, ab Werk: Primärenergie, nicht erneuerbar (Graue Energie), Primärenergie gesamt, Treibhauspotenzial, Umweltbelastungspunkte (UBP), pro m³

Wirkungskategorie	Einheit	Kalkstein, Fassadenplatte, ab Werk (Thomann AG)	Kalkstein, Fassadenplatte, ab Werk (Franken-Schotter)	Kalkstein, Fassadenplatte, ab Werk (Franken-Schotter) Strommix Schweiz
Non renewable, fossil	MJ/m ³	712	2,052	835
Non-renewable, nuclear	MJ/m ³	1,669	767	1,482
Non-renewable, biomass	MJ/m ³	0	0	0
Renewable, biomass	MJ/m ³	69	52	32
Renewable, wind, solar, geothe	MJ/m ³	4	37	4
Renewable, water	MJ/m ³	306	50	272
Primärenergie, nicht erneuerbar	MJ/m³	2,381	2,819	2,317
Primärenergie, gesamt	MJ/m³	2,760	2,958	2,625
IPCC GWP 100a	kg CO₂ eq./m³	52.5	168.7	58.8
Emission into air	UBP/m ³	43,573	90,032	47,475
Emission into surface water	UBP/m ³	19,360	9,547	18,308
Emission into ground water	UBP/m ³	22	64	18
Emission into top soil	UBP/m ³	407	623	590
Energy resources	UBP/m ³	8,294	9,525	8,007
Natural resources	UBP/m ³	1,053	1,855	1,453
Deposited waste	UBP/m ³	45,548	21,433	40,270
Total	UBP/m³	118,257	133,078	116,121

Tabelle 5-2 schlüsselt die Indikatorwerte nach den wichtigsten Treibern der Ökobilanz auf (Dominanzanalyse).

Tabelle 5-2: Dominanzanalyse der Prozesskette zur Herstellung von Fassadentafeln für die Graue Energie (Primärenergie, nicht erneuerbar)

Liesberger Kalkstein (Thomann AG)	MJ	relativer Beitrag
Diesel im Steinbruch	108	5%
Strom im Steinbruch (unter Bearbeitung bilanziert)	-	-
Sonstiges im Steinbruch	2	0%
Transport Steinbruch – Werk	0	0%
Diesel für Bearbeitung	119	5%
Strom für Bearbeitung	2036	86%
Sonstiges für Bearbeitung	106	4%
Total	2381	100%

Dietfurter Kalkstein (Franken-Schotter GmbH & Co.)	MJ	relativer Beitrag
Diesel im Steinbruch inkl. Vorverarbeitung	120	4%
Strom im Steinbruch inkl. Vorverarbeitung	1150	41%
Sonstiges im Steinbruch inkl. Vorverarbeitung	89	3%
Transport Steinbruch – Werk	205	7%
Diesel für Bearbeitung	26	1%
Strom für Bearbeitung	1138	40%
Sonstiges für Bearbeitung	91	3%
Total	2819	100%

Aus den Resultaten der Ökobilanz ergibt sich Folgendes:

- Die Indikatorwerte für den Liesberger Kalkstein liegen etwas tiefer als die Indikatorwerte für den Dietfurter Kalkstein. Allerdings sind die Daten der beiden Betriebe gerade für den Haupttreiber der Ökobilanz – den Stromverbrauch – von sehr unterschiedlicher Qualität. Während die Daten für den Dietfurter Kalkstein auf einer detaillierten Prozessplanung beruhen, wurden die Werte für den Liesberger Kalkstein mangels Daten nur grob aus dem Gesamtstromverbrauch auf Werksebene und über generische Daten zum Brechen von Kalkstein abgeschätzt und auf die untersuchten Fassadenplatten umgelegt. Sie sind entsprechend mit einer grossen Unsicherheit behaftet.
- Die beiden untersuchten Betriebe weisen eine komplett unterschiedliche Betriebsstruktur auf; während der Liesberger Kalkstein in einem kleingewerblichen Betrieb abgebaut und bearbeitet wird, wird der Dietfurter Kalkstein in industriellem Massstab abgebaut und verarbeitet. Dadurch erscheint ein etwas höherer Stromverbrauch für den Dietfurter Kalkstein und entsprechend höhere Indikatorwerte plausibel. Auch wird im Falle des Liesberger Kalkstein davon ausgegangen, dass aufgrund der eingesetzten Sägetechnologie keine spezifische Oberflächenbehandlung vorgenommen wird.
- Bei Beiträgen von 85% - 90% zur Grauen Energie durch den Stromverbrauch stellt sich die Wahl des Strommixes als zentral für die Ökobilanz heraus. Dies wird dadurch ersichtlich, dass sich die Werte für den Dietfurter Kalkstein durch die Wahl des Schweizer Strommixes deutlich verbessern und sich die Indikatorenwerte im Rahmen der Unsicherheiten von

Ökobilanzen nicht mehr unterscheiden. Für die Modellierung der Prozesse in Deutschland wurde der Deutsche Strommix verwendet; eine Modellierung der Ökobilanz mit dem aktuellen, spezifischen Strommix des Deutschen Stromlieferanten kann die Ökobilanz deutlich beeinflussen.

5.2 Vergleich mit bestehenden Datensätzen in ecoinvent inklusive Transportszenario

In Tabelle 5-3 sind verschiedene Datensätze zur Gewinnung und Verarbeitung von Naturstein einander gegenübergestellt, neben den beiden Kalksteinvarianten ein Bolliger Natursandstein (Werner 2011) und ein geschnittener Granit aus ecoinvent (Kellenberger et al. 2007).

Für das Transportszenario wird von einer Anlieferung auf die Baustelle des Erweiterungsbaus des Kunsthause Zürich ausgegangen.

Tabelle 5-3: Vergleich mit bestehenden Datensätzen in ecoinvent inklusive Transportszenario ab Werk zum Kunsthause Zürich, pro m³

	Müller Natursand- stein, ab Werk	Thomann Kalkstein, ab Werk	Franken- schotter Kalkstein, ab Werk	Granit, geschnitten, ab Regionallager
Angenommene Dichte [kg/m³]	2,500	2,600	2,600	2,750
HERSTELLUNG				
Graue Energie [MJ/m ³]	2,275	2,381	2,819	19,874
GWP IPCC 100a [kg CO ₂ -Ä./m ³]	67.0	52.5	168.7	631
UBP 2006 [UBP/m ³]	127,597	118,257	133,078	1,149,760
ANLIEFERUNG				
<i>Transportdistanz [km]</i>	<i>58.5</i>	<i>111</i>	<i>395</i>	<i>200</i>
Graue Energie [MJ/m ³]	342	674	1872	1284
GWP IPCC 100a [kg CO ₂ -Ä./m ³]	20.0	39.4	109.7	75.2
UBP 2006 [UBP/m ³]	21,911	43,238	97,911	82,400
HERSTELLUNG + ANLIEFERUNG				
Graue Energie [MJ/m ³]	2,617	3,055	4,691	21,158
GWP IPCC 100a [kg CO ₂ -Ä./m ³]	87.0	91.9	278.4	706.2
UBP 2006 [UBP/m ³]	149,508	161,495	230,989	1,232,160

Es wird ersichtlich, dass sich die Indikatorwerte für Sandstein und Kalkstein im Vergleich zu Granit, geschnitten in einer ähnlichen Grössenordnung bewegen. Dies ist einerseits auf einen höheren Verarbeitungsaufwand von (hartem) Granit im Vergleich zu den anderen Natursteinen zurückzuführen, andererseits wohl auch auf eine geringere Plattendicke mit entsprechend höherem Verarbeitungsaufwand pro m³ als Berechnungsgrundlage für den Datensatz zu Granitplatten.

Die Transportdistanzen zur Baustelle tragen je nach Anlieferdistanz und gewähltem Indikator bis hin zu ca. 50% des Herstellungsaufwandes zum Gesamtökoprofil bei.

Laut Aussagen eines der Hersteller von Kalksteinplatten liesse sich beim Erweiterungsbau des Kunsthauses aufgrund höherer Festigkeiten von Kalkstein im Vergleich zum ursprünglich geplanten Sandstein die Dicke der Fassadentafeln um 30% bis 50% verringern. Mit einer entsprechenden Anpassung der Unterkonstruktion liesse sich das Ökopprofil beider Kalksteinvarianten deutlich reduzieren.

6 Literatur

- BAFU (2009). Frischknecht Rolf, Steiner Roland, Jungbluth Niels (2009): Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006. Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen. Umwelt-Wissen Nr. 0906. Bundesamt für Umwelt, Bern: 188 S.
- Ecoinvent v.2.2 (2010): ecoinvent Centre (2010) ecoinvent data v2.2, ecoinvent reports No. 1-25. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, Switzerland, retrieved from: www.ecoinvent.org
- Frischknecht et al. (2007): 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.
- IPCC 2007 IPCC (2007): Fourth Assessment Report, Climate Change, WG1: Scientific basis. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, https://ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html#table-2-14
- Kellenberger et al. (2007): Kellenberger, D., H.-J. Althaus, T. Künniger, M. Lehmann, N. Jungbluth and P. Thalmann (2007): Life cycle inventories of building products. Final report ecoinvent 2000 No. 7, EMPA Duebendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, CH.
- SIA 2032 SIA (2010): Graue Energie von Gebäuden. SIA Merkblatt 2032, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.
- Werner 2011 Werner 2011: Berechnung der Grauen Energie für Natursandstein der Müller Natursandstein AG; eine Studie im Auftrag des Hochbauamtes der Stadt Zürich. Werner Umwelt & Entwicklung, Zürich (unveröffentlicht).