

Dr. Frank Werner

Umwelt & Entwicklung

Waffenplatzstrasse 89

CH-8002 Zürich

Schweiz

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

e-mail: frank@frankwerner.ch

Web: www.frankwerner.ch

Berechnung der Grauen Energie für Natursandstein der Müller Natursandstein AG

Eine Studie im Auftrag des
Hochbauamtes der Stadt Zürich

März 2011

Sachbearbeitung: F. Werner, Umwelt & Entwicklung, Zürich

Projektbegleitung: D. Kellenberger, Intep, Zürich

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.....	6
2.6	Anforderungen an die Datenqualität	6
3	Sachbilanz	6
3.1	Abbau des Rohsandsteines zu Quadern im Steinbruch	6
3.1.1	<i>Prozessbeschreibung: Steinbruch</i>	<i>6</i>
3.1.2	<i>Verfügbare Betriebsdaten: Steinbruch</i>	<i>7</i>
3.1.3	<i>Umsetzung in ecoinvent: Steinbruch</i>	<i>9</i>
3.1.4	<i>Datenqualität</i>	<i>9</i>
3.2	Verarbeitung des Rohsandsteines zu Fassadenplatten	12
3.2.1	<i>Prozessbeschreibung: Verarbeitung</i>	<i>12</i>
3.2.2	<i>Verfügbare Betriebsdaten: Verarbeitung</i>	<i>12</i>
3.2.3	<i>Umsetzung in ecoinvent: Verarbeitung</i>	<i>13</i>
3.2.4	<i>Datenqualität</i>	<i>13</i>
4	Auswertung.....	16
4.1	Auswertung „Fassadenplatten aus Naturstandstein, ab Werk“	16
4.2	Vergleich mit bestehenden Datensätzen in ecoinvent	17
5	Literatur	18

1 Zielsetzung und Auftrag

Im Rahmen der Projektierung des Erweiterungsbaus für das Kunsthaus Zürich werden unter der Vorgabe der Planungswerte der 2000W-Gesellschaft verschiedene Fassadenausführungen geprüft. Eine Variante ist eine Ausführung in regional abgebautem Bollinger Natursandstein. Da für Natursandstein in der Datenbank ecoinvent bzw. in daraus abgeleiteten Merkblättern und Planungstools keine entsprechenden Werte vorhanden sind, wird in diesem Bericht die Sachbilanzierung von 12 cm Natursandsteinplatten der Müller Natursandsteine AG dokumentiert und ökobilanziell ausgewertet.

Der bilanzierte Natursandstein wird zusätzlich mit dem Datensatz zu geschnittenem Granit aus ecoinvent 2.2. verglichen.

2 Grundlagen der Bilanzierung

2.1 Bilanzierte Einheit

Als bilanzierte Einheit wird **1 m³ Bollinger Natursandstein in 12 cm Dicke** bei einer Dichte von ca. 2'500 kg/m³ für die Verwendung als Fassadenverkleidung angesetzt. Dies entspricht einer oder mehrerer Platten von insgesamt 8.4m² (entspricht ca. 2.9 * 2.9m²).

In Tabelle 2-1 sind die bautechnischen Eigenschaften von Bollinger Natursandstein dargestellt.

Tabelle 2-1: Bautechnische Eigenschaften von Natursandstein im Vergleich

	Bollinger	Schweiz II	Toscana
Druckfestigkeit	100 MPa	93MPa	>3MPa
Wasseraufnahme	2.2%	2.4%	<5%
Ankerdornausbruch	2000N	1862N	k.A.
Biegefestigkeit	7.3N/mm ²	7.14 n/mm ²	6.9n/mm ²
Bindung	Calcitisch	tlw. tonig	karbonatisch
Quellverhalten	0.96‰	k.A.	k.A.

Quelle: (http://www.muellernatursteinwerk.ch/bollinger_hartsandstein.html)

2.2 Systemgrenze

Die Systemgrenze der *Herstellung* wird beim Werkstor der Müller Natursandstein AG gezogen. Es werden somit alle Prozesse des Abbaus und Bearbeitung des Natursandsteins sowie alle vorgelager-

ten Prozesse der Energiebereitstellung, Herstellung der Hilfsstoffe und Verpackungsmaterialien, Transporte sowie nachgelagerten Prozesse der Entsorgung von Produktionsabfällen erfasst.

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

- Abbau des Rohsandsteines zu Quadern im Steinbruch,
- Verarbeitung des Rohsandsteines zu Fassadenplatten.

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

Es wurde für alle Prozesse der Müller Natursandsteine AG der Schweizer Verbrauchsstrommix (+Importe) angenommen.

Die *Transporte vom Werk zu Bauplatz* müssen in einem Vergleich der Varianten zusätzlich berücksichtigt werden.

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

2.3 Allokation

Allfällige Allokationen werden nach den Qualitätsrichtlinien von ecoinvent (Frischknecht et al. 2007) vorgenommen. Dies sind für diese Arbeit:

- Kies und Sand, der bei der Verarbeitung anfällt, wird gratis abgegeben (oder deponiert); entsprechend werden keine Umweltlasten auf diese Co-Produkte alloziert.
- Die Aufwendungen für die Verarbeitung der eigenen Sandsteine sowie der zugekauften im Werk Utznaberg werden – mit Ausnahme des Stromverbrauchs für die Abluftreinigung der Steinhauerei (s. nächster Punkt) – auf die gesamte verkaufte Kubatur umgelegt¹.
- Der Stromverbrauch für die Abluftreinigung in der Steinhauerei wird den dort bearbeiteten kleinteiligen, dekorativen Produkten zugeordnet, da einfache Fassadenplatten nicht in der Steinhauerei bearbeitet werden.

2.4 Hintergrunddaten

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

¹ andere Allokationsmethoden wurden für das Werk Utznaberg erwogen, mangels Datenunsicherheiten aber verworfen.

2.5 Bewertung der Umweltwirkung

Im Rahmen des Auftrages werden folgende Indikatoren ausgewiesen:

- Graue Energie nach SIA 2032
- Treibhausgaspotential nach IPCC 2007 (100a)

Im Vergleich mit anderen Datensätzen zu Natursteinen werden zusätzlich die Umweltbelastungspunkte 2006 (BAFU 2009) ausgewiesen.

2.6 Anforderungen an die Datenqualität

Folgende Anforderungen an die Datenqualität bestehen:

- Herstellerspezifischer, technologisch repräsentativer Datensatz für einfache Fassadenplatten für das Jahr 2009,
- Erfassung aller Elementarflüsse, die signifikant zu den Indikatoren Graue Energie und Treibhauspotential (GWP) beitragen, unter Berücksichtigung aller verfügbarer Werksdaten.

3 Sachbilanz

3.1 Abbau des Rohsandsteines zu Quadern im Steinbruch

3.1.1 Prozessbeschreibung: Steinbruch

Der Abbau des Bollinger Sandsteins erfolgt auf dem bewaldeten Hügelzug zwischen Schmerikon und Eschenbach nördlich des oberen Zürichsees. Der Abbau erfolgt im Schachtabbauverfahren bis in eine Tiefe von gegen 50 Metern. Die abbauwürdige Sandsteinschicht befindet sich unter einer rund 5 m hohen Bodenschicht aus Humus und Erde sowie unter einer Schicht aus unbrauchbarem angewittertem Sandstein von ca. 2 m. Die abbauwürdige Sandsteinschicht ist durch ein rund 7 m breites, fast vertikal verlaufendes Lehmband zweigeteilt.

Die Geometrie des Schachtes richtet sich nach den vorgetroffenen Abbaubedingungen sowie der Stabilität des Schachtes. Der gegenwärtig abgebaute Schacht ist L-förmig bei einer Grundfläche von ca 30 m x 30 m mit einem noch nicht abgebauten Eck von ca. 20 m (inkl. 7 m Lehmschicht) x 5 m. Dem Schacht ist ein gekiester Werkplatz von ca. 50 m x 50 m vorgelagert (s. Abbildung 3-1).



Abbildung 3-1: Luftbild Steinbruch Brand, Schmerikon (Quelle: http://www.citymap-24.com/Schweiz/stadtplan/show.php/1815_Schmerikon.html)

Alle paar Jahre wird entlang der abbauwürdigen Sandsteinschicht ein neuer Schacht ge­öffnet. Zur Sicherung der Stabilität des Schachtes wird jeweils seitlich als auch in Abgrenzung zu alten Schächten eine ca. 2 m breite Sandsteinschicht stehen gelassen, die zusätzlich durch ca. 6 m lange, einbetonierte Stahlanker gesichert wird. Abraum und unbrauchbarer Sandstein bzw. das Material des Lehm­bandes werden dazu verwendet, den alten Schacht wieder aufzufüllen. Danach wird die Humus­schicht des neuen Schachtes auf den gefüllten alten Schacht übertragen und die Fläche wieder auf­geforstet.

Der eigentliche Abbau erfolgt wie folgt: für die vertikalen Freischnitte (Schnittbreite ca. 38 mm) wird eine Schrämmmaschine (ähnlich einer aufgebockten Kettensäge) eingesetzt. Wo möglich wird für weitere vertikale Schnitte die Diamantseilsägetechnik eingesetzt. In die vertikalen Schnitte wird da­nach ein Diamantseil bis nach unten eingeführt und der Boden horizontal abgeschnitten (Schnitt­breite ca. 12 mm). So entstehen freigelegte Blöcke von 60 bis über 100 Tonnen Gewicht. Um weiter verarbeitbare Blöcke herzustellen, werden diese Blöcke vertikal mit angebohrt (Bohrlochdurch­messer 3.5 cm, alle 25 – 30 cm), um sie hydraulisch mit Dardakeilen in die gewünschte Grösse spal­ten zu können. Es entstehen Steinblöcke von grob 1.6 m x 1.4 m x 2-3.5 m, die mittels Kran aus dem Schacht gehoben werden können.

Als grössere Baumaschinen werden ein Kran und ein Bagger eingesetzt.

3.1.2 Verfügbare Betriebsdaten: Steinbruch

Folgende Betriebsdaten liegen für den Steinbruch für das Bezugsjahr 2009 vor:

- Abgebaute Kubaturen: 3072 m³, von denen ca. 2500 m³ verwertbar (ca 240 Rohblöcke); mit der Differenz wird ein alter Schacht gefüllt,
- Dieserverbrauch im Steinbruch: 8097 l, entsprechend 291'103 MJ (bei 0.84 kg/l und 42.8 MJ/kg (Hu),
- Stromverbrauch: 54'717 kWh (eigener Trafo),

- Sprengstoff (gelatinierter Spezialsprengstoff für schonendes Sprengen) zur Beseitigung des Lehmbandes und z.T. der angewitterten obersten Sandsteinschicht: 214 kg (40-50 kg Sprengstoff pro 1.6-2 m Abbautiefe),
- Schmierstoff: 4 Büchsen Fettspray 400 ml (= 4 x 340 gr bei 0,85 kg/l), 30 kg Schmierfett, 200 l Kettenöl für Schrämmsäge (= 170 kg bei 0,85 kg/l), 80 l Motorenöl (68 kg bei 0,85 kg/l), 200 l (= 170 kg bei 0,85 kg/l) Hydrauliköl für Bagger, total 439 kg,
Anmerkung für Modellierung: Im ecoinvent Modul „Diesel in Baumaschine“ werden 0.000514 kg Schmierstoff/MJ bilanziert, in diesem Fall also 150 kg. Als Differenz zu berücksichtigen sind also 289 kg,
- Altöl in Entsorgung: 200 bis 250 l (= 170 bis 212.5 kg bei 0,85 kg/l); zum Verbleib der Differenz zwischen eingesetzten und als Altöl entsorgten Schmierstoffen liegen keine Angaben vor,
- Verschleissmaterial für Schrämmsäge (Kette, Antriebsrad, Verschleissleisten, etc.): 50 kg Stahl,
- Diamantbesetztes, kunststoffbeschichtetes Sägeseil aus Stahlkabel (Büdiam-Sägeseil, Typ SFWG 127), 60 m, als Verschleissmaterial für Seilsäge: keine Daten vom Hersteller des Sägeseiels erhältlich, daher als Abschätzung: Kern aus 5 mm CrNi-Stahl, ummantelt mit 2mm Polyamid, bei einem jährlichen Verbrauch von ca. 60 m,



Zylindrische Perle Ø 11 mm – Einspritzung für den Einsatz im Steinbruch

Abbildung 3-2: Diamantbesetztes Sägeseil (Quelle: <http://www.buediam.de/cms/website.php?id=/de/produkte/produkt02.html>)

- Stahlanker: 1300 kg Stahl pro Jahr (mehnjähriger Durchschnitt),
- Zement: ca. 400 kg Zement (mehnjähriger Durchschnitt),
- Holzbalken für Steinlager: 1m³ pro Jahr,
- Wasserverbrauch als Kühlwasser: es wird Meteorwasser eingesetzt, dass sich im Steinbruch ansammelt; das gebrauchte Kühlwasser wird in den benachbarten alten Schacht zum Absetzen des gebundenen Gesteinsstaubes gepumpt; der Verbrauch ist unbekannt.

Im Winter wird der Steinbruch geflutet, bzw. Meteorwasser und Wasser aus dem Gestein nicht abgepumpt. Dieses unbelastete Wasser wird nach der Winterpause bei Wiederinbetriebnahme des Steinbruchs in einen nahen Bach gepumpt.

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

Die Angaben zur Landtransformation und Landbelegung sind der Vollständigkeit abgeschätzt und aufgenommen worden. Entsprechend der oben beschriebenen Abbauweise werden Landtransformation und Landbelegung wie folgt bilanziert:

-
- für die Erschliessung eines abbaubaren Volumens von 23 m x 30 m x 50 m wird eine Fläche von 50 m x 50 m Mischwald in einen Kiesplatz verwandelt,
 - der bestehende Kiesplatz der gleichen Grösse aus früheren Abbauphasen wird auf einer Fläche von 30 m x 30 m in einen Steinbruch umgewandelt, und
 - die Fläche von 30 m x 30 m eines alten Steinbruchs plus die Differenz zu 50 m x 50 m als Kiesplatz werden wieder in Mischwald umgewandelt,
 - die Flächenbelegung für sämtliche Kies- und Steinbruchflächen wird für eine Jahresproduktion Natursandstein auf 2 Jahre abgeschätzt.

Diese Angaben sind für die in dieser Studie berechneten Indikatoren Graue Energie und Treibhausgaspotential nicht relevant.

3.1.3 Umsetzung in ecoinvent: Steinbruch

In Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 sind die Modellierung des Abbaus des Natursandsteins durch die Müller Natursandsteine AG für das Jahr 2009 pro m³ Rohblock im Steinbruch bilanziert.

3.1.4 Datenqualität

Sämtliche Daten mit Ausnahme der Flächenschätzungen wurden vom Betrieb zur Verfügung gestellt. Während für den Verbrauch an Strom, Diesel oder Sprengstoff für das Jahr 2009 genaue Zahlen vorliegen (ohne Berücksichtigung von Schwankungen im Warenlager), beruht der Verbrauch an Schmierstoffen und Verschleissteilen auf Abschätzungen.

Grössere Unsicherheiten bestehen bei der Modellierung der Schmierfett- und Hydraulikölverluste; diese sind aber für die betrachteten Indikatoren Graue Energie und Treibhausgaspotential nicht relevant.

Mangels Daten sehr pauschal bzw. nicht modelliert sind die Verschleissteile aus dem Frei- und Zugschnitt der Rohblöcke. Dies betrifft z.B. die Sägezähne aus Speziallegierungen der Schrämmaschine oder den Kunstdiamantenbesatz des Sägesails².

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor in der Modellierung ist die Menge Rohblöcke, die tatsächlich den Steinbruch zur Weiterverarbeitung verlassen. 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 des Treibhauspotentials als Umweltindikatoren als genügend zu bezeichnen.

² Die Firma Buediam war auch bei Nachfrage nicht bereit, die Zusammensetzung des Sägesails, geschweige denn Prozessdaten zur Herstellung des Sägesails offenzulegen.

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

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000							
Input	Process Name	Output	Category	Sub category	Infrastructure	Location	Model name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value	
Sandstein als Ressource	Abbau Natursandstein (Müller Natursandstein AG). Teil 1		-	-	-	-	-	1.23E+00	m3	Müller Natursandstein AG	
Dieselvebrauch			construction processes	machinery	No	GLO	diesel, burned in building machine	1.16E+02	MJ	Müller Natursandstein AG	
Stromverbrauch			electricity	supply mix	No	CH	electricity, medium voltage, at grid	2.13E+01	kWh	Müller Natursandstein AG	
Sprengstoff			chemicals	inorganics	No	CH	explosives, toxex, at plant	8.56E-02	kg	Müller Natursandstein AG	
Schmierstoffe			chemicals	organics	No	RER	lubricating oil, at plant	1.16E-01	kg	Müller Natursandstein AG	
Verschleissmaterial Schrägmsäge			metals	extraction	No	RER	steel, low-alloyed, at plant	2.00E-02	kg	Müller Natursandstein AG	
Verschleissmaterial Seilsäge: Chromstahl			metals	extraction	No	RER	chromium steel 18/8, at plant	3.68E-03	kg	Müller Natursandstein AG	
Verschleissmaterial Seilsäge: Polyamid			plastics	polymers	No	RER	nylon 66, at plant	1.20E-03	kg	Müller Natursandstein AG	
Stahlanker			metals	extraction	No	RER	steel, low-alloyed, at plant	5.20E-01	kg	Müller Natursandstein AG	
Zement/Kleber			construction materials	binder	No	CH	cement, unspecified, at plant	1.60E-01	kg	Müller Natursandstein AG	
Holzbalken zur Lagerung			wooden materials	extraction	No	RER	sawn timber, softwood, raw, air dried, u=20%, at plant	4.00E-04	m3	Müller Natursandstein AG	
Antransport Einsatzstoffe Bahn			transport systems	train	No	CH	transport, freight, rail	4.61E-01	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR	
Antransport Einsatzstoffe LKW 28 t			transport systems	road	No	RER	transport, lorry 16-32t, EURO3	5.11E-02	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR	
Meteorwasser zur Kühlung			resource	in water	-	-	Water, cooling, unspecified natural origin	N.B.	m3	Müller Natursandstein AG	
Transformation von Laubwald			resource	land	-	-	Transformation, from forest	5.90E-02	m2	eigene Abschätzung	
Transformation in Kiesplatte			resource	land	-	-	Transformation, to mineral extraction site	5.90E-02	m2	eigene Abschätzung	
Transformation von Kiesplatte			resource	land	-	-	Transformation, from mineral extraction site	5.90E-02	m2	eigene Abschätzung	

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

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000								
Input		Process Name	Output	Category	Sub category	Infrastructure	Location	Model name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value	
Transformation in Steinbruch	→	Abbau Natursandstein (Müller Natursandstein AG). Teil 2		resource	land	-	-	Transformation, to mineral extraction site	2.12E-02	m2	eigene Abschätzung	
Transformation von Steinbruch	→			resource	land	-	-	Transformation, from mineral extraction site	2.12E-02	m2	eigene Abschätzung	
Transformation in Mischwald	→			resource	land	-	-	Transformation, to forest, extensive	5.90E-02	m2	eigene Abschätzung	
Flächenbelegung Kiesplatz	→			resource	land	-	-	Occupation, mineral extraction site	1.34E-01	m2a	eigene Abschätzung	
Flächenbelegung Steinbruch	→			resource	land	-	-	Occupation, mineral extraction site	4.25E-02	m2a	eigene Abschätzung	
Weitere Infrastruktur (Geräteschuppen, Abschränkungen, Zäune, usw.)	→			-	-	-	-	-	N.B.	-	-	
				→ Rohblock Sandstein, ab Steinbruch (Müller)	-	-	-	-	Rohblock Sandstein, ab Steinbruch (Müller Natursandstein AG)	1.00E+00	m3	Müller Natursandstein AG
				→ Abraum (Auszub + Bruch)	-	-	-	-	-	N.B.	-	-
				→ Altöl in Entsorgung	waste management	hazardous waste incineration	No	CH	disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration	8.36E-02	kg	Müller Natursandstein AG
				→ Altholz in KVA	waste management	municipal incineration	No	CH	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration	2.16E-01	kg	Müller Natursandstein AG
				→ Verschleissmaterial als Altmittel	-	-	-	-	-	2.00E-02	kg	Müller Natursandstein AG
				→ Abwasser aus Kühlung	-	-	-	-	-	N.B.	-	-
			→ Mineralischer Staub in Luft	-	-	-	-	-	N.B.	-	-	

3.2 Verarbeitung des Rohsandsteines zu Fassadenplatten

3.2.1 Prozessbeschreibung: Verarbeitung

Die Rohsteinblöcke werden mittels Lastwagen auf das Werksgelände Utnaberg in Neuhaus SG gebracht und dort im Steinlager zwischengelagert.

Danach werden die Blöcke gespalten, aufgesägt und in die geforderten Dimensionen gefräst. Auf Kundenwunsch kann mittels „Flammen“ eine natürlich raue Oberfläche erzeugt werden, oder aber in der Steinhauerei eine weitere Formgebung und Oberflächengestaltung vorgenommen werden. Für einfache Fassadentafeln sind keine Steinmetzarbeiten oder ein „Flammen“ der Oberfläche notwendig.

Die Werkshalle ist über einem ehemaligen Sandsteinbruch erstellt. Das darin angesammelte Wasser wird im Kreislauf für die Kühlung der Maschinen und Staubbildung eingesetzt; Brauchwasser wird intern aufbereitet und wieder in den ehemaligen Steinbruch zurückgeführt.

Anfallender Verschnitt und Staub sowie Steinmehl aus den Filteranlagen werden gratis z.B. als Bodenverbesserer oder als Kies abgegeben, der Rest in den aufzufüllenden Steinbruch (s. oben) überführt.

Es wird zu 85-90% eigenes Material verarbeitet.

3.2.2 Verfügbare Betriebsdaten: Verarbeitung

Folgende Betriebsdaten liegen für den Werkplatz Utnaberg für das Bezugsjahr 2009 vor:

- Antransport der Rohblöcke (ca. 21 t) über 3.5 km mit LKW 32,
- Verarbeitete Kubatur eigener Natursandstein: ca. 2500 m³, verkaufte Kubatur aus eigenem Abbau: 1691 m³, Verlust (Abschnitte, Sägestaub, etc.): 809 m³,
- Verkaufte Kubatur aus eigener Verarbeitung insgesamt (zuzüglich 12.5% verarbeitetes Fremdmaterial): 1902 m³
- Stromverbrauch gesamt: 409'992 kWh,
- Dieserverbrauch für interne Transporte (ohne Antransport der Rohblöcke): 4'200 l entsprechend 150'998 MJ (bei 0.84 kg/l und 42.8 MJ/kg (Hu)),
- Hydrauliköl: 620 kg (= 527 kg bei 0,85 kg/l),
- Schmierstoffe und Getriebeöl: 645 l (= 548 kg bei 0,85 kg/l),
- Schmierfett (Menge unbekannt),
- Wasserverbrauch: im Kreislauf geführtes Kühlwasser aus altem Steinbruch, dazu 790 m³ Trinkwasser ab Netz ausserhalb des eigentlichen Produktionsprozesses (vernachlässigt),
- Altöl zur Entsorgung: ca. 600 l,
- Flockungsmittel aus synthetischen, hochmolekularen, wasserlöslichen Polymeren auf der Basis von Acrylamid und dessen Copolymeren („FlocStar 272P“): 63 kg; der Schlamm wird im

aufzufüllenden alten Steinbruch eingebracht; das Flockungsmittel zersetzt sich laut Herstellerangaben innert 4 Monaten komplett,

- Verschleissmaterial: Fräs- und Sägeblätter werden jeweils wieder neu belegt und mehrmals gebraucht (Lebensdauer Sägeblatt ca. 5 – 7 Jahre). Geschätzter Altmetallanteil pro Jahr von Werkzeugen: 100 kg,
- Zur Zwischenlagerung der Blöcke werden Holzbalken verwendet (angenommener Verbrauch $1 \text{ m}^3/\text{a}$; s. Steinbruch); die Lagerung von Fassadentafeln erfolgt auf je zwei 10 cm breiten, 3 mm dicken Schaustoffbahnen aus PE (= $0.623 \text{ kg PE-Schaumfolie bei } 8.3 \text{ Lagen/m}^3$ und $50 \text{ kg/m}^3 \text{ PE Verpackungsfolie}$),
- In der Steinhauerei ist eine Abluftanlage eingebaut mit einer Leistung von $4 \times 20 \text{ kW}$. Durchschnittlich sind geschätzt 3 Motoren für 8 Stunden und 250 Tage in Betrieb; geschätzter Stromverbrauch der Abluftanlage für die Steinhauerei pro Jahr deshalb $12'000 \text{ kW}$,
- Weitere Aufwendungen wie Propan (648 kg) und Sauerstoff (550 m^3) für das Flammen werden nicht bilanziert, da nicht Teil der zu bilanzierenden Einheit.

Für die Abschätzung der Infrastruktur und der Flächenbelegung wird von einer Werkhalle aus Stahl ($100 \text{ m} \times 40 \text{ m}$) sowie einem gleich grossen gekiesten Werkplatz ausgegangen. Der Infrastruktur- und Flächenbedarf gemäss ecoinvent Qualitätsrichtlinien (Frischknecht et al. 2007) wird über 50 Jahre abgeschätzt. Für die Berechnung der Werkhalle 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 bilanziert.

3.2.3 Umsetzung in ecoinvent: Verarbeitung

In Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 sind die Modellierung des Abbaus des Natursandsteins durch die Müller Natursandsteine AG für das Jahr 2009 pro m^3 einfache Fassadenplatten bilanziert.

Die Daten für die Verarbeitung werden auf die insgesamt verkauften Kubaturen (= 1902 m^3) – also aus Steinen aus eigenem Abbau sowie zugekauften Steinen – umgelegt. Der Verschnitt bei der Verarbeitung des Sandsteins aus eigener Verarbeitung wird mit $1 - 2500 \text{ m}^3/1691 \text{ m}^3 = 48\%$ abgeschätzt.

3.2.4 Datenqualität

Die Produktpalette der Müller Natursandsteine AG ist sehr gross: sie reicht von Fassadenplatten zu komplexen Produkten wie dekorativen Brunnenrögen und Säulen für Treppenaufgänge. Entsprechend ist der Aufwand für einzelne Produkte pro m^3 sehr unterschiedlich.

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

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000							
Input	Process Name	Output	Category	Sub category	Infrastructure	Location	Model name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value	
Rohblock Sandstein im Steinbruch	Fertigung Natursandsteintafeln (Müller Natursandstein AG), Teil 1		-	-	-	-	Rohblock Sandstein im Steinbruch	1.48E+00	m3	Müller Natursandstein AG	
Antransport Rohblöcke mit LKW 32 t			transport systems	road	No	RER	transport, lorry 16-32t, EURO3	1.23E+01	tkm	Müller Natursandstein AG	
Dieserverbrauch für interne Transporte				construction processes	machinery	No	GLO	diesel, burned in building machine	7.94E+01	MJ	Müller Natursandstein AG
Stromverbrauch				electricity	supply mix	No	CH	electricity, medium voltage, at grid	1.52E+02	kWh	Müller Natursandstein AG
Schmierstoffe				chemicals	organics	No	RER	lubricating oil, at plant	6.65E-01	kg	Müller Natursandstein AG
Verschleissmaterial				metals	extraction	No	RER	steel, low-alloyed, at plant	1.05E-01	kg	Müller Natursandstein AG
Holzbalcken zur Lagerung				wooden materials	extraction	No	RER	sawn timber, softwood, raw, air dried, u=20%, at plant	5.26E-04	m3	Müller Natursandstein AG
PE für Schaumfolie				plastics	polymers	No	RER	polyethylene, LDPE, granulate, at plant	6.23E-01	kg	Müller Natursandstein AG
Schäumen der PE Schaumfolie				plastics	processing	No	RER	foaming, expanding	6.23E-01	kg	Müller Natursandstein AG
Wasser zur Kühlung (interner Kreislauf)				-	-	-	-	-	N.B.	-	-
Flockungsmittel auf Acrylamidbasis				chemicals	organics	No	GLO	chemicals organic, at plant	3.31E-02	kg	Müller Natursandstein AG
Antransport Einsatzstoffe Bahn				transport systems	train	No	CH	transport, freight, rail	6.07E-01	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR
Antransport Einsatzstoffe LKW 28 t				transport systems	road	No	RER	transport, lorry 16-32t, EURO3	8.55E-02	tkm	eigene Berechnung nach ecoinvent QR

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

General Flow information				Representation in Ecoinvent 2000							
Input	Process Name	Output	Category	Sub category	Infrastructure	Location	Model name in Ecoinvent 2000	Mean value	Unit	Source mean value	
Transformation von Agrarfläche	Fertigung Natursandsteintafeln (Müller Natursandstein AG), Teil 2		resource	land	-	-	Transformation, from arable	1.05E-01	m2	eigene Abschätzung	
Transformation in Kiesplatz			resource	land	-	-	Transformation, to mineral extraction site	1.05E-01	m2	eigene Abschätzung	
Flächenbelegung Kiesplatz			resource	land	-	-	Occupation, mineral extraction site	1.05E-01	m2a	eigene Abschätzung	
Infrastruktur Werkshalle				construction processes	buildings	Yes	CH	building, hall, steel construction	4.21E-02	m2	eigene Abschätzung
		→	Natursandsteintafeln 12 cm als	-	-	-	CH	Natursandsteintafeln 12 cm als Fassadenelemente, ab Werk	1.00E+00	m3	Müller Natursandstein AG
		→	Bruch, Filterstaub	-	-	-	-		4.78E-01	-	Müller Natursandstein AG
		→	Altöl in Entsorgung	waste management	hazardous waste	No	CH	disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste	2.31E-01	kg	Müller Natursandstein AG
		→	Altholz in KVA	waste management	municipal incineration	No	CH	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration	2.84E-01	kg	Müller Natursandstein AG
		→	Verschleissmaterial als Altmittel	-	-	-	-		1.05E-01	kg	Müller Natursandstein AG
		→	Abwasser aus Kühlung	-	-	-	-		N.B.	-	-
		→	Schlamm aus Wasseraufbereitung	-	-	-	-		N.B.	-	-
		→	Mineralischer Staub in Luft	-	-	-	-		N.B.	-	-

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.

Einzig beim Stromverbrauch wurde angenommen, dass die zu bilanzierenden Fassadenplatten nicht in der Steinhauerei dekorativ weiterverarbeitet werden, weshalb der Stromverbrauch der Entstaubungsanlage vom Gesamtstromverbrauch des Standortes abgezogen wird, bevor er auf die Gesamtkubatur umgelegt wird.

Mit Ausnahme des Stromverbrauchs und der Gesamtkubatur liegen werksseitig nur grobe Schätzungen zum Herstelleraufwand vor.

Mit grösseren Unsicherheiten ist die Modellierung der Werkshalle als Infastruktur behaftet, insbesondere die Repräsentativität des gewählten Datensatzes für die Werkshalle der Müller Natursandsteine AG.

Insgesamt kann die Datenqualität als genügend für eine Abschätzung des Grauen Energieaufwandes angesehen werden.

4 Auswertung

4.1 Auswertung „Fassadenplatten aus Naturstandstein, ab Werk“

In Tabelle 4-1 ist das Treibhauspotential von Fassadenplatten aus Naturstein der Müller Natursandstein AG aufgeschlüsselt in die wichtigsten Prozessbeiträge dargestellt.

Tabelle 4-1: Auswertung „Fassadenplatten aus Natursandstein, ab Werk“: Treibhausgaspotential (GWP IPCC 2007, 100a)

Prozess	kg CO ₂ -Ä.	%
Natursandstein, Rohblock, ab Steinbruch	22.5	33.4%
Stromverbrauch in Utnaberg	19.9	29.6%
Infrastruktur Werkhalle	11.6	17.3%
Dieserverbrauch	7.3	10.8%
Transport aus Steinbruch ins Werk	2.4	3.5%
PE Schaumfolie (Granulat + Schäumen)	1.7	2.6%
Weitere	1.8	2.7%
Total (Fassadenplatte, ab Werk, pro m³)	67.2	100.0%

In Tabelle 4-2 ist die Graue Energie (die Summe nichterneuerbarer Primärenergie nach SIA Merkblatt 2032) von Fassadenplatten aus Naturstein der Müller Natursandstein AG aufgeschlüsselt in die wichtigsten Prozessbeiträge dargestellt.

Tabelle 4-2: Auswertung „Fassadenplatten aus Natursandstein, ab Werk“: Graue Energie nach SIA Merkblatt 2032

Prozess	MJ-Äq.	%
Stromverbrauch in Utznaberg	1298	57.1%
Natursandstein, Rohblock, ab Steinbruch	554	24.4%
Infrastruktur Werkhalle	159	7.0%
Dieserverbrauch	109	4.8%
PE Schaumfolie (Granulat + Schäumen)	56	2.5%
Schmiermittel	53	2.3%
Weitere	45	2.0%
Total (Fassadenplatte, ab Werk, pro m³)	2275	100.0%

Beide Indikatoren werden vom Stromverbrauch für die Fertigung der Fassadenplatten, die Infrastrukturaufwendungen für die Werkhalle sowie Aufwendungen im Steinbruch zur Gewinnung der Rohblöcke dominiert, wobei sich die relativen Anteile je nach Indikator unterscheiden.

Der Dieserverbrauch im Werk Utznaberg sowie überraschenderweise die EPS Zwischenlagen für die Lagerung der zugeschnittenen Fassadenplatten tragen ebenfalls signifikant zu den beiden Indikatoren bei.

Weitere Prozesse wie die Entsorgung des Altöls oder Altholzes, der Transport vom Steinbruch ins Werk, die Anlieferung der Hilfsstoffe und – materialien sowie die Herstellung der Verschleissteile aus Stahl sind bei beiden Indikatoren von untergeordneter Bedeutung.

4.2 Vergleich mit bestehenden Datensätzen in ecoinvent

In Tabelle 4-3 sind die Indikatorwerte für Natursandstein der Müller Natursandstein AG den Werten für Granit, geschnitten, ab Regionallager gegenübergestellt. Die Werte können also für die Region Zürich als gültig angesehen werden.

Tabelle 4-3: Vergleich der Indikatorwerte mit dem Datensatz zu Naturstein, geschnitten, ab Regionallager aus ecoinvent 2.2, pro m³

	Müller Natursandstein, ab Werk	Granit, geschnitten, ab Regionallager
Angenommene Dichte	2'500	2'750
Graue Energie [MJ/m ³]	2'275	19'874
GWP IPCC 100a [kg CO ₂ -Ä./m ³]	67	631
UBP 2006 (Pt./m ³)	127'597	1'149'760

Die Werte sämtlicher Indikatoren liegen für den bilanzierten Natursandstein um rund den Faktor 10 tiefer als diejenigen für Granit aus ecoinvent 2.2.

Als zusätzlicher Indikator werden die Werte für Umweltbelastungspunkte (UBP 2006 nach BAFU 2009) ausgewiesen. Da in beiden Datensätzen keine Emissionsdaten aus dem Abwasser eingegangen sind und der Flächenbedarf auf groben Abschätzungen beruht, sind diese Werte mit grösseren Unsicherheiten behaftet.

5 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
- SIA 2023 SIA (2010): Graue Energie von Gebäuden. SIA Merkblatt 2032, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.