



Hochschule für Forstwirtschaft
Rottenburg

Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Bachelorarbeit

CO₂-Bilanz von neuem und wiederverwendetem Naturmauerstein

Michael Vötsch
Höscheleweg 20
70188 Stuttgart

Allgemeine Angaben

Verfasser

Michael Vötsch
Höscheleweg 20
70188 Stuttgart

Erstprüfer

Prof. Roland Irslinger, Professor an der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg

Zweitprüferin

Dr. Eva Schminke, Principal Consultant bei PE-International, Leinfelden-Echterdingen

Copyright

© 2014

D-72108 Rottenburg

Alle Rechte, insbesondere das Recht auf Vervielfältigung, Verbreitung und Übersetzung vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in Form ohne schriftliche Genehmigung reproduziert oder über elektronische Systeme verbreitet werden. Die Genehmigung ist bei der HFR einzuholen. Bei gesperrten Arbeiten ist jegliche Art der Weiterverwendung verboten.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen als Hilfsmittel verwendet habe.

Michael Vötsch

Höscheleweg 20

70188 Stuttgart

Stuttgart, den 05. August 2014

.....

(Unterschrift)

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung der CO₂-Bilanz für die Bereitstellung von einer Tonne neuem und wiederverwendetem Naturmauerstein.

Für den neuen Naturmauerstein wurden Gewinnungs- und Verarbeitungsstandorte in Baden-Württemberg und China ausgewählt. Der Gewinnungsstandort für den wiederverwendeten Naturmauerstein ist Baden-Württemberg.

Für die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen wurde die Gewinnung der Rohmaterialien für neue Naturmauersteine und die Gewinnung der wiederverwendeten Naturmauersteine aus Bauwerken analysiert. Nur die neuen Naturmauersteine werden verarbeitet. Daher wird in dieser Arbeit nur die Verarbeitung für den neuen Naturmauerstein bilanziert. Die Transporte in den einzelnen Prozessen des neuen und wiederverwendeten Naturmauersteins wurden ebenfalls ermittelt und die resultierenden Kraftstoffverbräuche berechnet. Aus den Ergebnissen der Berechnung der Energieverbräuche wurde der Treibhausgasausstoß für jedes Produkt bestimmt.

Abstract

The aim of this thesis is the determination and comparison of CO₂ footprints arising from providing one ton of natural wall stones in Germany.

For the comparison one Chinese and two German production sites with different stone processing methods were chosen.

The two German production sites are located in Baden-Wuerttemberg. One of the German production sites uses quarried stones in its production whereas the other site uses recycled stones. The Chinese production site is located in the province of Fujian and uses quarried stone for the production.

The processes of quarrying raw material, recycling wall stones from buildings and converting raw materials into new natural wall stones were analyzed. Furthermore, the emissions due to the fuel consumption caused by transportation activities in the individual processes were determined and accounted for in the analysis. From the energy consumptions the greenhouse gas potential is calculated.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
1. Einleitung	1
1.1. Zielsetzung	1
2. Naturmauerstein	2
2.1. Vorstellung des Naturmauersteins	2
2.2. Begründung der Auswahl der produzierenden Regionen	3
2.3. Abfallbewirtschaftung von Naturstein	4
3. Methodik	6
3.1. Ökobilanz nach ISO EN 14040/14044	6
3.2. Weitere methodische Ansätze	7
3.3. Datensammlung und -verarbeitung	7
4. Untersuchungsrahmen	8
4.1. Deklarierte Einheit	8
4.2. Systemgrenze	8
4.3. Treibhausgase	9
5. Beschreibung des Untersuchungsmodells	10
5.1. Begriffsbestimmung	10
5.2. Modul Gewinnung	11
5.3. Modul Verarbeitung	12
5.4. Modul Transporte	12
5.5. Wichtige Berechnungsgrundlagen	16
6. Sachbilanzierung	19
6.1. Modul Gewinnung	19
6.2. Modul Verarbeitung	20
6.3. Modul Transporte	21
6.4. Überblick	26
7. Wirkungsabschätzung	27
7.1. Darstellung der Ergebnisse von wiederverwendetem Naturmauerstein	27
7.2. Darstellung der Ergebnisse von neuem Naturmauerstein aus Baden-Württemberg	28
7.3. Darstellung der Ergebnisse von neuem Naturmauerstein aus China	29
7.4. Vergleich der Treibhauspotenziale	30
7.5. Überblick	32
8. Bewertung der Ergebnisse	33
8.1. Sensitivitätsanalyse	33

Inhaltsverzeichnis

8.2. Ergebnis einer anderen Studie	34
9. Schlussbetrachtung.....	35
9.1. Fazit	35
9.2. Ausblick.....	36
Quellenverzeichnis	IV
Literaturverzeichnis.....	IV
Sonstige Quellen	VII
Anhang 1.....	VIII
Anhang 2.....	IX

Abkürzungsverzeichnis

BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BW	Baden-Württemberg
BW-NMS	Neuer Naturmauerstein aus Baden-Württemberg
CN-NMS	Neuer Naturmauerstein aus China
CO ₂ -e	CO ₂ -Äquivalente
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
IVE mbH	Ingenieurgesellschaft für Verkehrs- und Eisenbahnwesen mbH (IVE mbH)
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LKW	Lastkraftwagen
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
o.J.	Ohne Jahresangabe
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
WV-NMS	Wiederverwendeter Naturmauerstein

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Beispiel für einen neuen Naturmauerstein-----	2
Abbildung 2 Beispiel für einen wiederverwendeten Naturmauerstein-----	2
Abbildung 3 Systemabgrenzung -----	9
Abbildung 4 Bearbeitung in der Verarbeitungsstätte -----	12
Abbildung 5 Anteilige THG-Emissionen der Module Wiederverwendeter Naturmauerstein-----	27
Abbildung 6 Treibhauspotenzial der Module Wiederverwendeter Naturmauerstein -----	28
Abbildung 7 Anteilige THG-Emissionen der Module Neuer Naturmauerstein BW -----	28
Abbildung 8 Treibhauspotenzial der Module Neuer Naturmauerstein BW -----	29
Abbildung 9 Anteilige THG-Emissionen der Module Neuer Naturmauerstein China-----	29
Abbildung 10 Treibhauspotenzial der Module Neuer Naturmauerstein China-----	30
Abbildung 11 Vergleich Treibhauspotenzial Modul Gewinnung-----	30
Abbildung 12 Vergleich Treibhauspotenzial Modul Verarbeitung-----	31
Abbildung 13 Vergleich Treibhauspotenzial Modul Transport-----	31
Abbildung 14 Vergleich Treibhauspotenzial der Produkte -----	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Routen für den Transport	13
Tabelle 2 Maße und Gewicht der Modell-Rohblöcke	16
Tabelle 3 Eingesetzte Maschinen und ihre Energieformen	17
Tabelle 4 Sachbilanzergebnisse für die Gewinnung von Rohblöcken	19
Tabelle 5 Sachbilanzergebnisse für die Gewinnung von wiederverwendetem Stein.....	20
Tabelle 6 Sachbilanzergebnisse der Verarbeitung.....	21
Tabelle 7 Sachbilanzergebnisse der Route 1.....	22
Tabelle 8 Sachbilanzergebnisse der Route 2.....	23
Tabelle 9 Sachbilanzergebnisse der Route 3.....	24
Tabelle 10 Sachbilanzergebnisse der Route 4	25
Tabelle 11 Sachbilanzergebnisse der Route 5	25
Tabelle 12 Übersicht über die Sachbilanzierungsergebnisse	26
Tabelle 13 Überblick über die Ergebnisse.....	32
Tabelle 14 Übersicht Treibhausgasentwicklung	33
Tabelle 15 Treibhauspotenzial nach Zuladung.....	34

1. Einleitung

Zum Schutz des Klimas hat Deutschland ein nationales Klimaschutzziel formuliert. Der Treibhausgasausstoß soll bis 2020 um 40% und bis 2050 um 80-95% gesenkt werden (vgl. BMUB 2014, S. 6). Damit diese Ziele erreicht werden können, muss sich nachhaltiges menschliches Handeln etablieren.

Das Bauwesen ist durch große Energie- und Stoffströme geprägt und kann daher mit einer nachhaltigen Bauweise zum Klimaschutz beitragen. Hierbei können unter anderem die „Senkung des Ressourcenbedarfs bei der Erstellung und dem Betrieb von Gebäuden, Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten, Baukonstruktionen und Gebäuden, Reduzierung von Transportaufwendungen von Baustoffen und -teilen,“ und der „Einsatz wiederverwendbarer oder verwertbarer Bauprodukte/Baustoffe“ (BMVBS 2013, S. 27) einen relevanten Beitrag leisten.

Im Jahr 2010 wurden in Deutschland ca. 80,8 Mio. Tonnen verbauter mineralischer Rohstoff abgebrochen und davon 96,6% einer Verwertung zugeführt. Das Material wird in der Regel gebrochen zur Verfüllung, im Straßen- und Landschaftsbau oder als Betonzuschlag verwendet (vgl. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V. 2013, S. 30–31). Als Alternative zum Brechen können Bauteile für die gleiche oder ähnliche Funktion wiederverwendet werden. Voraussetzung hierfür ist, dass der Abbau oder Rückbau des Bauwerkes in für das Bauteil schonender Weise stattfindet. So können Mauersteine aus Naturstein mehrfach ihre Funktion als Mauerstein erfüllen. Durch die Wiederverwendung muss kein neuer Mauerstein hergestellt und unter Umständen über weite Strecken transportiert werden. Dadurch können Treibhausgasemissionen eingespart und somit ein Beitrag für den Klimaschutz geleistet werden.

1.1. Zielsetzung

Durch den Einsatz von Baustoffen mit einer günstigeren Klimabilanz, kann ein Bauvorhaben teilweise erheblich Treibhausgasemissionen einsparen.

Bilanziert werden in dieser Arbeit die Treibhausgasemissionen für die Gewinnung, Verarbeitung und Transporte von neuem Naturmauerstein. Das Gleiche erfolgt für die Gewinnung und die Transporte von wiederverwendetem Naturmauerstein. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden aufzeigen, ob und in welchem Maße Treibhausgasemissionen durch die Nutzung von wiederverwendetem Naturmauerstein anstelle von neuem Naturmauerstein eingespart werden können.

2. Naturmauerstein

In diesem Kapitel werden grundlegende Informationen zu den in dieser Arbeit analysierten Produkten, den Naturmauersteinen, gegeben.

2.1. Vorstellung des Naturmauersteins

Das Produkt „Neuer Naturmauerstein“

Der neue Naturmauerstein hat noch keine Nutzung als Mauerstein erfahren und ist sozusagen *fabrikneu*. Er wird in Form von Rohblöcken im Steinbruch gewonnen, im Natursteinwerk ver-



Quelle: Homepage von Natursteinpark Rongen Ltd. & Co. KG

arbeitet und im Baustoffhandel verkauft. Es gibt eine sehr große Auswahl an verschiedenen Formen und Oberflächenbearbeitung von Naturmauersteinen. Ein Beispiel für das Produkt neuer Naturmauerstein ist in Abbildung 1 zu sehen.

Abbildung 1 Beispiel für einen neuen Naturmauerstein

Das Produkt „wiederverwendeter Naturmauerstein“

Der wiederverwendete Naturmauerstein hat schon mindestens eine Nutzung erfahren. Teilweise sind diese Naturmauersteine als historisches Baumaterial anzusehen und können über Hunderte von Jahren alt sein. Die Oberflächen dieser Naturmauersteine sind teilweise noch handbearbeitet. Durch den Abbruch oder den Rückbau von Mauern und Gebäuden werden sie sozusagen



Quelle: Homepage von Natursteinpark Rongen Ltd. & Co. KG

frei und können einer neuen Nutzung als Mauerstein zugeführt werden. In Abbildung 2 sind beispielhaft wiederverwendete Naturmauersteine abgebildet.

Abbildung 2 Beispiel für einen wiederverwendeten Naturmauerstein

Aufgrund der vorangegangenen Erläuterung, wird in dieser Arbeit der Begriff *wiederverwendeter Naturmauerstein* genutzt. Hierunter ist im Gegensatz zu einem neuen Naturmauerstein, ein gebrauchter, zur Wiederverwendung vorgesehener oder schon einmal wiederverwendeter Naturmauerstein zu verstehen. Der Begriff Wiederverwendung, im Kontext der gesetzlichen Abfallbewirtschaftung, wird in Kapitel 2.3.1 erläutert.

Die Vergleichbarkeit der Naturmauersteine

Neue Naturmauersteine unterscheiden sich gegebenenfalls (ggf.) aufgrund ihrer Produktion von den wiederverwendeten Naturmauersteinen. Sie werden in der Regel mit Maschinen bearbeitet, was bei vielen älteren Naturmauersteinen aufgrund der damaligen technischen Situation noch nicht möglich war. Dennoch können neue maschinengespaltene und wiederverwendete Naturmauersteine aufgrund ihres Nutzens und ihrer Oberflächenstruktur miteinander verglichen werden (vgl. Rongen, 2014). Aufgrund dieser Vergleichbarkeit werden in dieser Arbeit neue maschinengespaltene und wiederverwendete Naturmauersteine analysiert.

2.2. Begründung der Auswahl der produzierenden Regionen

Für die folgende Bilanzierung wurden Produkte, die ihren Ursprungsort in Baden-Württemberg und China haben, betrachtet. Diese geografische Festlegung wird aus folgenden Gründen gewählt:

In Baden-Württemberg gibt es mehrere Betriebe für den Garten- und Landschaftsbau die neue Naturmauersteine produzieren. Außerdem wurde diese Arbeit durch das Unternehmen *Natursteine Rongen Ltd. & Co.KG* aus Tübingen angeregt. Dieses Unternehmen verkauft *gebrauchte* Naturmauersteine und führt diese so einer Wiederverwendung zu. Der Verbraucher kann hier im Baustoffhandel direkt entscheiden ob er einen neu produzierten oder einen aus Baden-Württemberg stammenden wiederverwendeten Naturmauerstein erwirbt.

China ist mittlerweile mit über 5.000 Steinbrüchen und 10.000 Stein verarbeitenden Betrieben nicht nur der weltgrößte Steinproduzent, sondern auch der weltgrößte Steinexporteur (vgl. Bjurling et al. 2008, S. 15). Im Garten- und Landschaftsbau werden in Deutschland vorwiegend importierte Fertig- und Halbfertigprodukte verbaut. China ist hier mit einem Anteil von 30% der verbauten Steinwaren Spitzenreiter vor Indien mit 15%. (vgl. Werner et al. 2013, S. 69–73). Aufgrund der erheblichen umgesetzten Mengen an chinesischen Steinprodukten auf dem deutschen Markt, wurden als Vergleichsprodukte aus China stammende neue Naturmauersteine für ausgewählt.

2.3. Abfallbewirtschaftung von Naturstein

Durch die Wiederverwendung von Naturmauersteinen, die beim Abbruch von Bauwerken anfallen, wird ein Kreislauf geschaffen, bei dem natürliche Ressourcen geschont und positive Effekte auf die Umwelt erzielt werden können. In den nachfolgenden Kapiteln wird deshalb dargestellt, wie der Gesetzgeber die Abfallbewirtschaftung von Naturstein beziehungsweise (bzw.) Naturmauerstein aus Bauschutt betrachtet. Weiterhin wird darauf eingegangen wie die Abfallbewirtschaftung von Naturstein in der Praxis momentan (2014) aussieht.

2.3.1. Wiederverwendung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes

Gesetzliche Verpflichtung zur Kreislaufwirtschaft

In § 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), eines auf Bundesebene verabschiedeten Gesetzes, heißt es, „Zweck des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen.“ Das KrWG soll also nachhaltige Verbesserungen im Umwelt- und Klimaschutz und in der Ressourceneffizienz im Bereich der Abfallwirtschaft bewirken (vgl. BMUB 2012).

Begriffsbestimmung zur Abfallbewirtschaftung

Das KrWG definiert in § 2 Abs. 1 eine Abfallhierarchie, die festlegt, in welcher Reihenfolge Maßnahmen zur Vermeidung von Abfällen und zur Abfallbewirtschaftung stattfinden müssen. Hiernach steht an erster Stelle die Vermeidung von Abfällen. Bei der Auswahl der Verwertungsmethode hat nach § 2 Abs. 2 Nr. 6-7 KrWG diejenige Methode Vorrang, „die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet“. Das Problem auftretender Emissionen wird ausdrücklich genannt und ist bei der Wahl der Verwertungsmethode mit zu berücksichtigen.

Nach § 3 Abs. 21 und Abs. 24 KrWG spricht man von Wiederverwendung, wenn ein Erzeugnis, das nicht zu Abfall wurde oder aufgrund des Durchlaufens eines Verwertungsverfahrens den Abfallcharakter verliert, für den gleichen Nutzen wieder eingesetzt wird. Werden aus Bauschutt Naturmauersteine aussortiert und wieder als Mauersteine in ein Bauwerk eingebunden, dann sind die Bedingungen nach § 3 Abs. 21 oder 24 KrWG erfüllt.

2.3.2. Bestehende Abfallbewirtschaftung in Baden-Württemberg

Im Jahr 2010 sind in Baden-Württemberg ca. 28 Mio. Tonnen Bauabfälle angefallen. Dies entspricht etwa 75% des gesamten Abfallaufkommens von Baden-Württemberg (vgl. LUBW a (o.J.)). Der Anteil an Bauschutt und Straßenaushub betrug 2010 rund 9.754 Mio. Tonnen. Die Verwertungsquote von Bauschutt und Straßenaufbruch liegt in Baden-Württemberg bei ca. 77%. Der Hauptteil des Bauschutts und Straßenaufbruchs gelangt in das Bauschuttrecycling und die Asphaltaufbereitung (vgl. LUBW b (o.J.)).

Eine genaue Aufschlüsselung wieviel Naturmauerstein in Baden-Württemberg für den ursprünglichen Zweck oder fremde Zwecke wiederverwendet wird, ist aufgrund von mangelnden Daten nicht möglich.

3. Methodik

Zur Berechnung der Energieverbräuche und der daraus resultierenden Treibhausgasemissionen ist ein methodisches Vorgehen notwendig. In diesem Kapitel wird die angewandte Methodik vorgestellt.

3.1. Ökobilanz nach ISO EN 14040/14044

Die Berechnungen in dieser Arbeit basieren auf der Methode der Ökobilanz. Diese Methode wird in den Normen ISO EN 14040 und 14044 festgelegt. Mittels der Ökobilanz werden Umweltaspekte und -wirkungen von Produktsystemen analysiert (vgl. Klöpffer und Grahl 2011, S. 1).

Produktsysteme sind dadurch gekennzeichnet, dass sie miteinander verbundene und in Beziehung stehende Prozessmodule innerhalb einer Systemgrenze beinhalten. Die verbundenen und in Wechselbeziehung stehenden Prozessmodule bilden den Lebensweg des Produkts oder der Dienstleistung ab. Darüber hinaus werden dem Produktsystem aus der Umwelt Elementarflüsse und aus anderen Produktsystemen Produktflüsse, sogenannte Inputs zugeführt. Diese verlassen das Produktsystem in die Umwelt oder in andere Produktsysteme als sogenannte Outputs (vgl. DIN 2009, S. 7–12). Produktsysteme, die bei einer Ökobilanz untersucht werden, beziehen sich auf bestimmte Funktionen. Die jeweils betrachtete Funktion hat einen bestimmten Nutzen für das Produktsystem der bei einem Vergleich von Produkten als Maßstab dient (vgl. Klöpffer und Grahl 2011, S. 2–3).

In der ISO EN 14040 werden die Phasen einer Ökobilanz wie folgt festgelegt:

1) Ziel und Untersuchungsrahmen

In der ersten Phase wird das Ziel der Ökobilanzierung festgelegt. Des Weiteren wird in dieser Phase der Untersuchungsrahmen definiert. Hier werden im Falle eines Produktvergleiches unter anderem die einzelnen Produktsystemen und ihre Funktionen genau beschrieben (vgl. DIN 2009, S. 22–23).

2) Sachbilanz

Bei der Durchführung der Sachbilanz werden Daten gesammelt und Berechnungen durchgeführt. Das Ergebnis ist die Quantifizierung aller relevanten Stoffströme (vgl. DIN 2009, S. 25–26).

3) Wirkungsabschätzung

Die in der Sachbilanz ermittelten Ergebnisse werden Wirkungskategorien z. B. dem Treibhauspotenzial zugeordnet, um so potenziellen Umweltauswirkungen beurteilen zu können (vgl. DIN 2009, S. 27–28).

4) Auswertung

In der letzten Phase, der Auswertung werden die Ergebnisse aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam betrachtet (vgl. Klöpffer und Grahl 2011, S. 355).

3.2. Weitere methodische Ansätze

Im Buch *CO2-Berechnung in der Logistik* (Kranke et al. 2011) sowie im Leitfaden *Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258* (Schmied und Knörr 2013) wird aufgezeigt, wie die Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen der Transporte berechnet werden müssen. Diese methodischen Ansätze für die Berechnung der Transporte und die in *CO2-Berechnung in der Logistik* aufgeführten Umrechnungsfaktoren, wurden für diese Arbeit herangezogen. Aufgrund sich fortlaufend ändernder Faktoren und der im März 2013 erschienen EN 16258, wurden die Umrechnungsfaktoren in diesem Buch aktualisiert, damit sie der Norm entsprechen (vgl. Kranke et al. 2011 - "Aktualisierung im Rahmen der Norm-Veröffentlichung" als Beilage im Buch).

3.3. Datensammlung und -verarbeitung

Die Literaturrecherche hat für diese Arbeit eine hohe Bedeutung, denn für die Sachbilanzierung kann nur bedingt auf (primäres) Datenmaterial, z.B. von Steinbruchbetreibern, zugegriffen werden. Daher wurden einschlägige Studien, Publikationen und weiteres Informationsmaterial für die Sachbilanzierung ausgewertet. Grundlagenwissen zu dieser Arbeit findet sich hauptsächlich in gedruckter Literatur. Studienergebnisse bzgl. Ökobilanzierungen oder Daten von Maschinen und Bearbeitungsverfahren sind größtenteils im Internet zu finden. Wichtige Informationsquellen im Internet sind überdies die Auftritte von Ministerien, Behörden, Instituten und Ingenieurbüros. Diese bieten teilweise umfangreiche und qualitativ hochwertige Daten, die für diese Arbeit wichtig waren.

Benötigte Daten die in der gedruckten Literatur oder in Internetquellen nicht zugänglich sind, wurden durch direkte Nachfrage bei Experten wie z. B. Maschinenherstellern erhoben.

Für die Datenerfassung und die Berechnungen der Sachbilanzierung wurde die Software *Excel* verwendet. Weitere Bearbeitungsprogramme wurden für diese Arbeit nicht benötigt.

4. Untersuchungsrahmen

In den nachfolgenden Kapiteln wird der Untersuchungsrahmen dieser Arbeit vorgestellt.

4.1. Deklarierte Einheit

Bei der Bilanzierung wurden verschiedene (Produkt-) Systeme miteinander verglichen. Dabei wird nicht das Produkt als solches betrachtet, sondern der Nutzen, den das System erfüllt (vgl. Klöpffer und Grahl 2011, S. 3–4). In dieser Arbeit wird nicht der gesamte Lebensweg der Produkte analysiert, sondern lediglich ein Ausschnitt. Außerdem wird die sogenannte *deklarierte Einheit* bestimmt (vgl. European Committee for Standardization 2013, S. 18).

In dieser Arbeit wurden zwei (Produkt-) Systeme betrachtet. Die Produkte der Systeme erfüllen den gleichen Nutzen - als Mauerstein aus Naturstein. Um für die einzelnen Systeme alle quantitativen Größen zu erfassen und den Nutzen vergleichbar zu machen, wird als Referenzgröße bzw. als deklarierte Einheit die Bereitstellung von *einer Tonne Naturmauerstein* festgelegt.

4.2. Systemgrenze

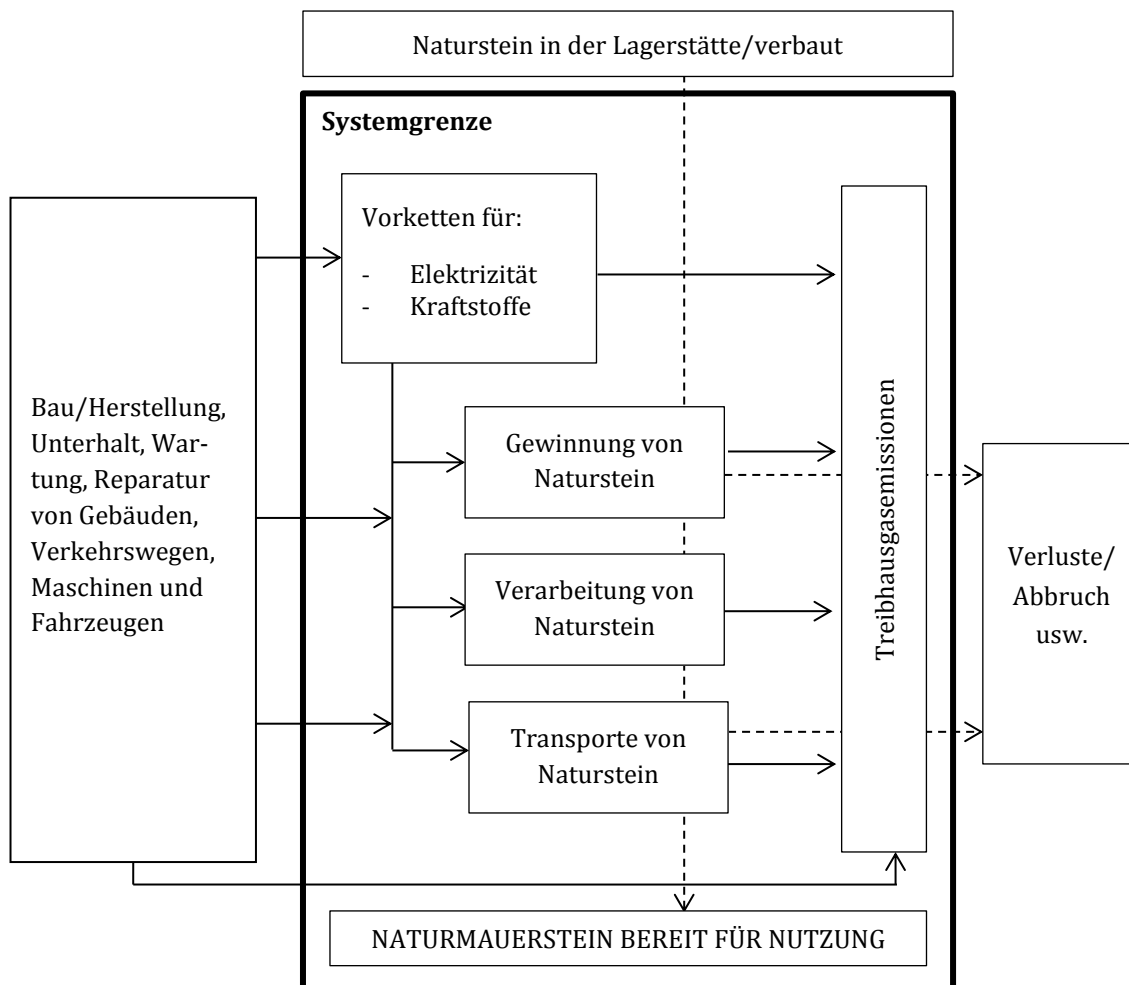
Durch die Festlegung der Systemgrenze wird definiert, welche Module ein Teil des (Produkt-) Systems sind und somit auch analysiert werden (vgl. DIN 2006, S. 17).

In Abbildung 3 werden die für diese Arbeit festgelegten Systemgrenzen abgebildet. Alle Module und Prozesse außerhalb dieser Systemgrenze, also des dicken Rahmens, wurden bei der Analyse nicht berücksichtigt. Bau/Herstellung, Unterhalt, Wartung und Reparatur von Gebäuden, Verkehrswegen, Maschinen und Fahrzeugen wurden in der Bilanzierung nicht berücksichtigt. Auch die Bilanzierung von Betriebsmitteln wie Reifen, Frostschutzmittel oder Hydrauliköle sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Weiterhin wurden die Gewinnungs- und Verarbeitungsverluste nicht weiter bilanziert. Hier wird angenommen, dass diese Verluste in die Schotter- oder Kiesproduktion miteinfließen.

Innerhalb der Systemgrenze befinden sich die Module Gewinnung, Verarbeitung und Transporte. Für diese Module wurden alle relevanten Prozesse analysiert und ihre Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen bestimmt.

Bei den in dieser Arbeit analysierten Kraftstoffen und beim elektrischen Strom, wurden die Vorketten von der Gewinnung bis zum direkten Energieverbrauch miteinbezogen. Unter Vorketten sind hier die Energieverbräuche die für die Bereitstellung der Kraftstoffe oder des Stromes auf-

gewendet werden zu verstehen. Der direkte Energieverbrauch zusammen mit den Energieverbräuchen der Vorketten, wird als Primärenergieverbrauch bezeichnet.



Quelle: Eigene Bearbeitung und Darstellung

Abbildung 3 Systemabgrenzung

4.3. Treibhausgase

In Kapitel 7 werden die berechneten Treibhausgasemissionen für die einzelnen Produkte aufgeführt. Hierbei wurden die Treibhausgase mittels DIN EN 16258 konformer Umrechnungsfaktoren ermittelt. Die Umrechnungsfaktoren wurden aus den in Kapitel 3.2 genannten Quellen entnommen. Die Faktoren beinhalten die Treibhausgase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆). Der auf der Grundlage dieser Faktoren errechnete Wert, fasst die oben genannten Treibhausgase zusammen und wird als CO₂-Äquivalent-Emissionen oder CO₂-Äquivalent-Wert (CO₂-e) bezeichnet.

5. Beschreibung des Untersuchungsmodells

Bei der Bilanzierung dieser Arbeit wurde keine existierende Gewinnungs- und Verarbeitungsstätte analysiert. Auch der Transport der Naturmauersteine wurde nicht anhand eines tatsächlichen Transports betrachtet. Jede Gewinnungs- und Verarbeitungsstätte sowie der von dort ausgehende Transport, weisen spezifische Merkmale auf. Dadurch ergibt sich eine sehr hohe Vielfalt an Produktions- und Transportmöglichkeiten. Spezifische Merkmale in diesem Zusammenhang können bei der Gewinnungsstätte z. B. die Morphologie des Geländes, der Technikeinsatz oder das Abbauverfahren sein. Merkmale der Verarbeitungsstätte können der Einsatz der Maschinen oder der durchschnittliche Produktionsausschuss sein. Vor allem beim Transport können sehr große Unterschiede auftreten z. B. durch die Auslastung der Transportmittel, durch Beimischungen von Biokraftstoffen oder durch den Einsatz unterschiedlicher Transportmittel. Weiterhin ist zu beachten, dass eine genaue Untersuchung der Gewinnungs- und Verarbeitungsstätten in China in dieser Arbeit nicht möglich ist.

Daher wurde in dieser Arbeit ein Modell für die Gewinnung, Verarbeitung und den Transport von neuem sowie wiederverwendetem Naturmauerstein entwickelt und anhand dieses Modells die entsprechenden Berechnungen durchgeführt. Das Modell setzt sich aus den Modulen Gewinnung, Verarbeitung und Transporte zusammen. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Annahmen des Modells, die für diese Arbeit Gültigkeit haben, spezifiziert.

Hierbei ist festzuhalten, dass sowohl das Gewinnungs- als auch das Verarbeitungsmodul des neuen Naturmauersteins aus China und Baden-Württemberg gleich abgebildet sind. Die Transporte innerhalb der Gewinnungs- und Verarbeitungsstätte und zwischen diesen, sowie die Transportmittel sind ebenfalls als gleich anzusehen. Der Naturmauerstein aus China weist im Transportmodul jedoch zusätzliche Transportwege auf.

5.1. Begriffsbestimmung

Für einen einheitlichen Wortlaut in dieser Arbeit, werden die nachfolgenden Begriffe definiert.

- Gewinnungsstätte: Bezeichnet für neue Mauersteine einen Steinbruch, in dem die Rohblöcke gewonnen werden. Für den wiederverwendeten Mauerstein bezeichnet der Begriff die (Bau-) Stelle, an der die Naturmauersteine in Bauwerken, z. B. Trockenmauern, eingebettet sind.
- Verarbeitungsstätte: Ist das Natursteinwerk, in dem die Rohblöcke durch Handarbeit oder maschinelle Bearbeitung zum Endprodukt *Neuer Naturmauerstein* verarbeitet werden.

- Baustoffhandel: Gewerblicher Handel(-splatz), an dem die neuen und wiederverwendeten Naturmauersteine an den Endkunden verkauft werden.
- Lagerstätte: Gewinnbare und wirtschaftlich relevante Teile eines Rohstoffvorkommens.

5.2. Modul Gewinnung

5.2.1. Gewinnung von Rohblöcken für neuen Naturmauerstein

Festgestein kann entweder im Tagebau oder im Untertagebau abgebaut werden. Der Tagebau bietet bei der Gewinnung von Festgestein gegenüber dem Untertagebau entscheidende Vorteile. Dazu gehören der Abbau bei Tageslicht, geringere Unfallrisiken für Steinbrucharbeiter und wirtschaftlich günstigere Bedingungen, außerdem können Steinbrüche im Tagebau laufend erweitert werden (vgl. Mojon 2006, S. 73). Verschiedene Faktoren wie z.B. die Morphologie der Gewinnungsstätte beeinflussen den Abbautyp im Tagebau. Im Südwesten von Deutschland hat sich aufgrund der Morphologie der Hangabbau etabliert (vgl. Werner et al. 2013, S. 120–121). Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit der Hangabbau als Modell-Gewinnungsstätte gewählt. Diese Spezifizierung ist notwendig, da z. B. je nach Art der Gewinnungsstätte andere Maschinen eingesetzt werden.

In der Gewinnungsstätte werden Rohblöcke als Ausgangsmaterial für die neuen Naturmauersteine aus der Lagerstätte gelöst. Für das Lösen bzw. den Abbau gibt es verschiedene Gewinnungsverfahren, die sich unter anderem nach der Gesteinsart, dem Aufbau der Lagerstätte und dem späteren Nutzen der Rohblöcke richten. Die Gewinnungstechnik soll nicht nur den Rohblock schonen, sondern auch den noch in der Lagerstätte befindlichen Stein (vgl. Singewald 1992, S. 151). In Süddeutschland haben sich verschiedene Gewinnungstechniken etabliert. Neben Techniken wie Sägen, Reißen oder Schießspalten, wird das Reihenbohren angewendet (vgl. Werner et al. 2013, S. 123).

Beim Reihenbohren werden fahrbare Reihenbohrgeräte eingesetzt, die in einem Abstand von 15 bis 30 cm Bohrlöcher in den Naturstein treiben. Durch die parallele Anordnung der Bohrlöcher wird eine *linienförmige Schwächung* erzeugt. Anschließend werden die Rohblöcke durch *nachgeschaltetes Lösen* z. B. mit Federkeilen aus der Lagerstätte gespalten (vgl. Singewald 1992, S. 155–161).

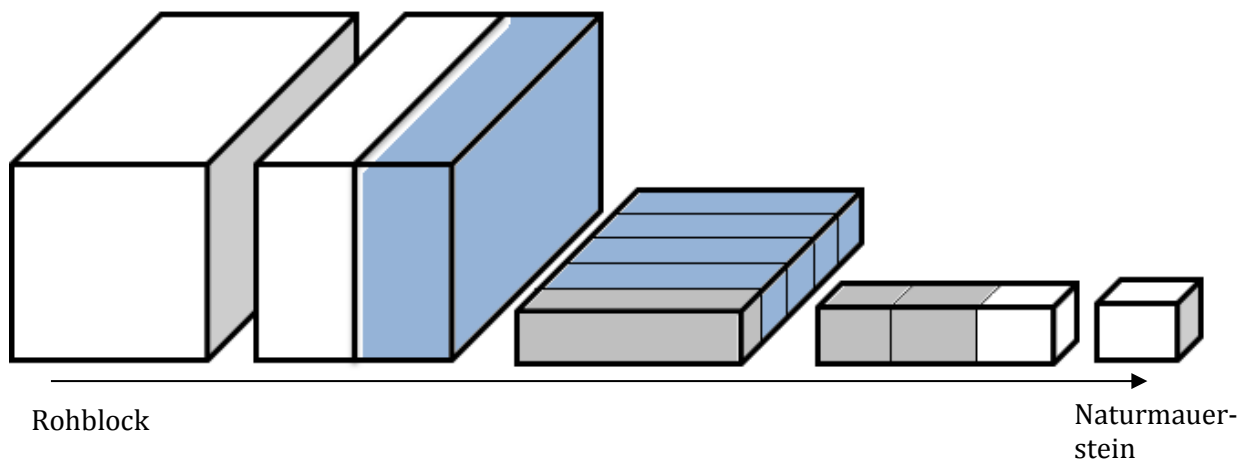
Da diese Technik in Süddeutschland weit verbreitet ist, wurde diese Technik als Gewinnungsmethode in dieser Arbeit ausgewählt.

5.2.2. Gewinnung von wiederverwendetem Naturmauerstein

Naturmauersteine die für die Wiederverwendung vorgesehen sind, sind hauptsächlich in sogenannte Trockenmauern eingebunden. Beim Abbruch der Trockenmauern, sozusagen die Gewinnungsstätte der Naturmauersteine, werden diese per Hydraulikbagger direkt auf einen LKW mit Kippaufbau geladen (vgl. Rongen, 2014).

5.3. Modul Verarbeitung

Die hier betrachteten neuen Naturmauersteine werden mit hydraulischen Steinspaltmaschinen produziert. Damit sie in den Spaltmaschinen verarbeitet werden können, muss die Größe der Rohblöcke reduziert werden. In Abbildung 4 werden die Verarbeitungsschritte beispielhaft dargestellt. Mit großen Pressluftmeißeln werden im ersten Verarbeitungsschritt Löcher in einer Linie in den Rohblock gebohrt. Durch das Auskeilen mit dem Federkeil wird der Rohblock auseinandergebrochen. Die kleineren Teile werden im nächsten Verarbeitungsschritt in einer *großen Spaltmaschine* weiter aufgebrochen und anschließend in einer *kleinen Spaltmaschine* in die fertigen Naturmauersteine gespalten.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 4 Bearbeitung in der Verarbeitungsstätte

Die wiederverwendeten Naturmauersteine erfahren keine Verarbeitung (vgl. Rongen, 2014) und wurden aus diesem Grund nicht im Modul Verarbeitung bilanziert.

5.4. Modul Transporte

Sowohl die neuen als auch die wiederverwendeten Naturmauersteine werden nicht direkt ab der Gewinnungsstätte bzw. der Verarbeitungsstätte an den Endkunden verkauft und müssen

daher von der Gewinnungs- bzw. Verarbeitungsstätte zu einem Baustoffhandel transportiert werden.

Die wiederverwendeten Naturmauersteine werden direkt von der Gewinnungsstätte ohne Zwischenlagerung zum Baustoffhandel transportiert und dort direkt von dem LKW an ihren Lagerplatz gefahren und per Kipp-Vorrichtung abgeladen (vgl. Rongen, 2014).

In der chinesischen Verarbeitungsstätte werden die neuen Naturmauersteine auf für den Export genutzte Asia-Paletten verladen. In Baden-Württemberg werden die neuen Naturmauersteine auf übliche Euro-Paletten gepackt. Die Spezifizierung ist wichtig, da die Palettengröße relevant für die Auslastung von Transportmitteln ist.

Der gesamte Transport eines Produkts lässt sich in einzelne Transportabschnitte, sogenannte Legs, aufteilen. Dadurch können die Energieverbräuche für einzelne Abschnitte und Transportfahrzeuge ermittelt und berechnet werden. Die Energieverbräuche und Emissionen aller Legs können dann zu einer Größe aufsummiert werden (vgl. Schmied und Knörr 2013, S. 24).

Wie in Tabelle 1 aufgeführt, wurden fünf Transportrouten gebildet. Jede Route setzt sich aus spezifischen Legs zusammen. Jedem Produkt, dem wiederverwendeten ebenso wie dem neuen baden-württembergischen und chinesischen Naturmauerstein, wurden die für das Produkt relevanten Routen zugeordnet. Dadurch wurden alle Transporte für den entsprechenden Naturmauerstein abgebildet und konnten berechnet werden.

Produkt	Route	Leg
Wiederverwendeter Naturmauerstein	1	Transport von wiederverwendetem Naturmauerstein
Neuer Naturmauerstein	2	Transport innerhalb der Gewinnungsstätte
		Transport von Gewinnungs- zu Verarbeitungsstätte
		Transport innerhalb der Verarbeitungsstätte
	3	Transport von Verarbeitungsstätte zu Hafen
		Transport mittels Containerschiff
		Transport mittels Binnenschiff
		Transport mittels Containerbrücke
	4	Transport von Verarbeitungsstätte zu Baustoffhandel
		5

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 1 Routen für den Transport

In den nachfolgenden Kapiteln werden die aufgeführten Transportrouten genauer bestimmt.

5.4.1. Beschreibung Route 1

In Route 1 wurden die Transporte erfasst und berechnet, die für den wiederverwendeten Naturmauerstein innerhalb Baden-Württembergs relevant sind. Der wiederverwendete Naturmauerstein wird von der Gewinnungsstätte bzw. Baustelle per LKW zum Baustoffhandel gefahren. Der LKW kippt die Naturmauersteine direkt an ihren dortigen Lagerplatz. Die Transporte finden innerhalb von Baden-Württemberg statt, andere energieverbrauchende Prozesse gibt es nicht (vgl. Rongen, 2014).

5.4.2. Beschreibung Route 2

Diese Route betrifft die Transporte von der Gewinnungs- zur Verarbeitungsstätte sowie die Transporte innerhalb dieser Stätten.

Innerhalb der Gewinnungsstätte werden die herausgelösten Rohblöcke von ihrem Platz in der Lagerstätte mit einem Radlader aufgenommen und zum Verladeplatz gefahren. Am Verladeplatz werden die Rohblöcke mittels Radlader auf einen bereitstehenden LKW gehoben, der die Rohblöcke zur weiteren Verarbeitung in die Verarbeitungsstätte transportiert.

In der Verarbeitungsstätte werden die Rohblöcke mittels Radlader vom LKW zur Verarbeitung gefahren. Die fertig bearbeiteten und auf Paletten verpackten Naturmauersteine werden mittels Gabelstapler zum Ladeplatz gefahren.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich der für den Transport aus China genutzte 20' Container schon auf dem LKW befindet und der Container über eine Verladerampe mittels Hubwagen beladen wird. In Baden-Württemberg wird ein Planen-LKW am Ladeplatz ebenfalls über eine Verladerampe mittels eines Hubwagens beladen.

5.4.3. Beschreibung Route 3

In dieser Route wurde der Transport von der chinesischen Verarbeitungsstätte zum Baustoffhandel in Baden-Württemberg betrachtet.

Der LKW transportiert den in der chinesischen Verarbeitungsstätte geladenen 20' Container zum Hafen.

Schwerpunktmäßig liegt die Verarbeitung von Naturstein im Südosten von China. Rund 70% der chinesischen Natursteinindustrie haben sich in der Provinz Fujian angesiedelt (vgl. Bjurling et al. 2008, S. 15–24). In dieser Provinz liegt die Millionenstadt Xiamin mit einem der bedeutendsten chinesischen Überseehäfen. Hier werden ca. 60% der chinesischen Steinimporte und -exporte abgewickelt (vgl. Steiner und Mauer 2005, S. 1). Daher wird dieser Hafen als Ausgangspunkt für die Verschiffung gewählt.

Der 20' Containern wird im Hafen ein Containerschiff geladen und von China nach Europa verschifft. Vom europäischen Überseehäfen werden die Waren unter anderem mit Binnenschiffe ins Hinterland transportiert (vgl. R+C Seetransport (o.J.)). Als Zielhafen wird der größte und bedeutendste europäische Überseehafen, der Hafen von Rotterdam, ausgewählt. Hier können die großen Containerschiffe aus China am Containerterminal anlegen und die Container direkt auf Binnenschiffe umladen. Der Binnenhafen von Rotterdam hat Anschluss an den Rhein, über den die Binnenschiffe ihre Ladung transportieren können (vgl. Port of Rotterdam (o.J.)). Vom Rhein können Binnenschiffe über den Neckar verschiedene Binnenhäfen anlaufen. Der Neckar ist zur Bundeswasserstraße der Klasse Va ausgebaut, das heißt, er kann von Schiffen bis zu 105 m Länge, 11,45 m Breite und einer Wassertiefe bis 2,8 m befahren werden (vgl. Wasser und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (o.J.)). Als Zielhafen für das Binnenschiff wird der Hafen Stuttgart ausgewählt. In den Überseehäfen und im Binnenhafen werden die Containerschiffe mithilfe einer sogenannten Containerbrücke be- und entladen.

In Stuttgart wird ein LKW den Container zum Baustoffhandel transportieren. Die Transporte finden innerhalb von Baden-Württemberg statt.

5.4.4. Beschreibung Route 4

Die Route 4 definiert den Transport des neuen Naturmauersteins aus Baden-Württemberg. Der neue Naturmauerstein wird per LKW von der Verarbeitungsstätte zum Baustoffhandel transportiert. Die Transporte finden innerhalb von Baden-Württemberg statt.

5.4.5. Beschreibung Route 5

Im Baustoffhandel werden der Container sowie der Planen-LKW direkt mittels eines Gabelstaplers entladen und die neuen Naturmauersteine werden an ihren Lager- bzw. Verkaufplatz transportiert.

5.5. Wichtige Berechnungsgrundlagen

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Grundlagen, die für die Berechnung der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen Bedeutung haben, aufgeführt und erläutert.

5.5.1. Modell-Rohblock

Die Berechnungen werden anhand eines Modell-Rohblocks berechnet. Dies ist notwendig, da nicht direkt auf primäre Daten zur Gewinnung von Rohblöcken zugegriffen werden kann.

Die Maße des Rohblocks haben direkte Auswirkungen auf dessen Gewicht bzw. seine abzutrennende Oberfläche. Ein größerer Rohblock bedeutet, dass sich die abzutrennende Oberfläche und das Gewicht erhöhen. Der Energieverbrauch bei der Gewinnung durch das fahrbare Reihenbohren wird aber auf mehr Tonnen Material verteilt. Hieraus ergibt sich, dass große und schwere Rohblöcke einen geringeren Energieverbrauch pro Tonne Material aufweisen als kleine und leichtere Rohblöcke. Aufgrund dieser Auswirkung wird ein Durchschnittswert von drei Modell-Rohblöcken mit unterschiedlichen Maßen für die Berechnung herangezogen. Die Dichte des Materials aller Modell-Rohblöcke wird mit 2 g/cm^3 festgelegt. In Tabelle 2 sind die Maße und das Gewicht der Modell-Rohblöcke aufgeführt.

Land	Maße			Gewicht t
	m			
	Länge	Breite	Höhe	
BW China	2	1	1	4
BW China	3	1	1	6
BW China	2	1,5	1,5	9
Durchschnitt BW				6,3
Durchschnitt China				

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 2 Maße und Gewicht der Modell-Rohblöcke

Es wird angenommen, dass sich die Modell-Rohblöcke in der Lagerstätte befinden und drei vertikale sowie eine horizontale Löseflächen haben. Weiterhin ist zu beachten, dass der Verbrauch für das Lösen der zwei seitlichen vertikalen Flächen nur zur Hälfte dem Modell-Rohblock zugeschrieben wurden. Die andere Hälfte wurde sozusagen den Nachbar-Rohblöcken zugeschrieben. Der Verbrauch für das Lösen der hinteren vertikalen Fläche und der horizontalen Bodenfläche

wurde gänzlich dem Modell-Rohblock zugeschrieben. Die Frontfläche sowie die obere Fläche werden diesem Modell-Rohblock nicht angerechnet.

5.5.2. Verluste bei der Gewinnung und Verarbeitung

Bruchverluste die direkt beim Lösen des Rohblocks aus der Lagerstätte entstehen, werden aus Mangel an vorhandenen Daten nicht berücksichtigt.

Bei der Verarbeitung in den Spaltmaschinen sind 15% Verluste zu verzeichnen (vgl. Goymann et al. 2009, S. 2). Das Material das als Verlust beim Spaltprozess in der Maschine anfällt, wird zu Schotter verarbeitet. Daher wurden diese 15% bei dem Energieverbrauch der Transporte in der Gewinnungsstätte, dem Transport zur Verarbeitungsstätte, dem Entladen der Rohblöcke in der Verarbeitungsstätte, der Gewinnung der Rohblöcke und der Verarbeitung durch den Presslufthammer und Spaltmaschinen abgezogen. Diese 15% der Energieverbräuche werden dem Produkt Schotter zugeordnet und daher nicht dem Naturmauerstein angerechnet.

5.5.3. Maschinen und Energieformen

Für eine genaue Berechnung der Treibhausgasemissionen ist es von Bedeutung, auf lokale Gegebenheiten der Kraftstoffe und des Stromes einzugehen. Unterschiede gibt es bei der Beimischung von sogenanntem Biodiesel in fossilem Diesel. Ein weiterer Unterschied ist die Zusammensetzung des genutzten Stromes in dem jeweiligen Land. Die Nutzung von regenerativen Anteilen im Strom und Kraftstoff wirkt sich positiv auf die Emissionsmenge an Treibhausgasen aus. Bei der Berechnung wurden der sogenannte landesspezifische Strommix und die gesetzlich vorgeschriebene Beimischungsrate von Biodiesel verwendet. In Tabelle 3 sind die eingesetzten Bau-

und Transportmaschinen sowie die Verarbeitungsmaschinen mit ihren jeweiligen Energieformen aufgeführt.

Bau-/Transportmaschinen	Energie
Bagger	Diesel
Radlader	Diesel
Gabelstapler	Diesel
LKW	Diesel
Binnenschiff	Diesel
Seeschiff	Schweröl
Containerbrücke	Strom
Reihenbohrgerät	Diesel
Verarbeitungsmaschinen	Energie
Steinspaltmaschinen	Strom
Aggregat für Presslufthammer	Strom

Tabelle 3 Eingesetzte Maschinen und ihre Energieformen

Quelle: Eigene Darstellung

5.5.4. Transporte

Für LKW-Fahrten müssen Leerfahrten, also Fahrten bei denen keine Güter transportiert werden, anteilig angerechnet werden. In dieser Arbeit werden die Leerfahrtenwerte aus Kranke et al. 2011 (S. 138) für die Berechnung genutzt. Demnach haben Containerfahrten einen Leerfahrtenanteil von 10%, Massengutfahrten von 60% und Durchschnittsgutfahrten von 20%.

Das gesamte Frachtgewicht wird auf die deklarierte Einheit anteilig umgelegt. Dies bedeutet, dass die entstandenen Verbräuche und Emissionen durch den Mittransport der Paletten und Container anteilig, auf die deklarierte Einheit umgelegt wurden.

Es wurde angenommen, dass die Paletten - Euro-Palette (Naturmauerstein aus Baden-Württemberg) mit einer Tragfähigkeit von 1,5 t und Asia-Palette (Naturmauersteine aus China) mit einer Tragfähigkeit von 1,3 t (vgl. European Pallet Association e.V. (o.J.)) - voll ausgelastet wurden.

5.5.5. Faktoren zur Umrechnung

In dieser Arbeit wurden vorgegebene Umrechnungsfaktoren für die Berechnung des Primärenergieverbrauchs sowie der Treibhausemissionen herangezogen. Diese Faktoren sind in Anhang 2 abgebildet. Sie werden mit den errechneten Energieverbräuchen multipliziert. Ergebnis sind die Werte für den Primärenergieverbrauch in MJ/t und die Treibhausgasemissionen in CO₂-e.

6. Sachbilanzierung

Im Folgenden werden die in der Sachbilanzierung ermittelten Energieverbräuche für die Module Gewinnung, Verarbeitung und Transporte der neuen und wiederverwendeten Naturmauersteine aufgeführt. Die Energieverbräuche wurden anhand des Untersuchungsmodells und der in Kapitel 5 beschriebenen Berechnungsgrundlagen ermittelt. Neben der Angabe über den Energieverbrauch in Liter oder Kilowattstunde pro Tonne, wurde aus diesen Werten der Primärenergiebedarf berechnet und aufgeführt. Die nachfolgenden Werte sind auf zwei Stellen nach dem Komma gerundet.

6.1. Modul Gewinnung

6.1.1. Gewinnung von Rohblöcken für neuen Naturmauerstein

Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, werden fahrbare Reihenbohrgeräte für die Gewinnung von Rohblöcken eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein Bohrgerät, das für die Natursteingewinnung konzipiert ist. Für das fahrbare Reihenbohrgerät wird ein durchschnittlicher Verbrauch von 10 l/h angesetzt (vgl. Koss, 2014). Für die Gewinnung von Sandstein kann mit einem fahrbaren Reihenbohrgerät eine Effektivleistung von 4,3 m²/h erreicht werden (vgl. Singewald 1992, S. 203).

Die Berechnung der Verbräuche richtet sich nach der Charakterisierung der Modell-Rohblöcke in Kapitel 5.5.1. Für die Gewinnung der drei Modell-Rohblöcke wird ein durchschnittlicher Verbrauch von 2,20 l/t berechnet. Dieser Wert erfährt einen Abzug von 15% für den Ausschuss. Der durchschnittliche Primärenergieverbrauch liegt bei 98,18 MJ/t in Baden-Württemberg und bei 94,44 MJ/t in China.

Region	Maschine	Maschinen- Verbrauch	Verbrauch Ø	Primärenergie verbrauch Ø
		l/h	l/t	MJ/t
BW	Fahrbares Reihenbohrgerät	10	2,20	98,18
China				94,44
Quelle		Durchschnitt (vgl. Koss, 2014)	Eigene Berechnung	Faktoren siehe Anhang 2

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 4 Sachbilanzergebnisse für die Gewinnung von Rohblöcken

6.1.2. Gewinnung von wiederverwendetem Naturmauerstein

Die Naturmauersteine werden mit einem Hydraulikbagger aus Trockenmauern herausgebrochen und auf einen LKW geladen. Der durchschnittliche Verbrauch des Baggers wird mit 19,2 l/h angegeben (vgl. Börsch, 2014). Bei einer Leistung von 50 t pro Stunde (vgl. Rongen, 2014) ergibt dies einen Verbrauch von 0,38 l/t.

Wie in Tabelle 5 zu sehen, ist ein Primärenergieverbrauch von 17,16 MJ/t zu verzeichnen.

Region	Maschine	Verbrauch	Verbrauch	Primärenergieverbrauch
		l/h	l/t	MJ/t
BW	Hydraulikbagger	19,2	0,38	17,16
Quelle		Vgl. Börsch 2014	Eigene Berechnung	Faktoren siehe Anlage 2

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 5 Sachbilanzergebnisse für die Gewinnung von wiederverwendetem Stein

6.2. Modul Verarbeitung

Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, werden die Rohblöcke zuerst mit einem Pressluftmeißel halbiert. Hierbei wird pro Tonne abzüglich des Ausschusses 0,85kWh verbraucht (Schätzung auf der Grundlage von Klisch, 2014). Anschließend werden die Naturmauersteine mit hydraulischen Spaltmaschinen produziert. Der *große Steinspalter* kann pro Arbeitstag (acht Stunden) 20t Material bei einem Verbrauch von 15 kW verarbeiten. Der *kleine Steinspalter* verbraucht 11 kW bei einer Verarbeitungsmenge von 10t pro Arbeitstag. Daraus ergibt sich nach Abzug des Anteils für den Ausschuss ein Verbrauch des *großen Steinspalters* von 5,10 kWh pro Tonne und des *kleinen Steinspalters* von 7,48 kWh/t (Berechnung auf der Grundlage von Boscardin, 2014).

In Tabelle 6 werden die einzelnen Werte für den Primärenergieverbrauch aufgeschlüsselt. Demnach entsteht in Baden-Württemberg ein Primärenergieverbrauch von 134,30 MJ/t und in China von 126,24 MJ/t.

Region	Maschine	Verbrauch	Verbrauch	Primärenergieverbrauch
		kW	kWh/t	MJ/t
BW	Spaltmaschine groß	15	5,10	51,00
China				47,94
BW	Spaltmaschine klein	11	7,48	74,80
China				70,31
Quelle	Durchschnittliche Werte, Boscardin, 2014		Eigene Berechnung	Faktoren siehe Anhang 2
BW	Pressluft-Meißel	4	0,85	8,50
China				7,99
Quelle	Klisch, 2014		Eigene Berechnung	Faktoren siehe Anhang 2
				Gesamt (MJ/t)
BW				134,30
China				126,24

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 6 Sachbilanzergebnisse der Verarbeitung

6.3. Modul Transporte

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Sachbilanzierung für jede Route dargestellt. Die Beschreibung der einzelnen Transportrouten sind in Kapitel 5.4 nachzulesen.

6.3.1. Sachbilanz Route 1

In Tabelle 7 sind die berechneten Verbräuche des Transports der wiederverwendeten Naturmauersteine, von der Gewinnungsstätte zum Baustoffhandel, dargestellt. Mit einer Strecke von 50 km und einem Verbrauch von 1,00 l/t für die gefahrene Strecke, beträgt der Primärenergieverbrauch 44,63 MJ/t.

Für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs wird mit einer effizienten durchschnittlichen Zuladung an Naturmauersteinen von 26 t und dem Einsatz eines 40-Tonner LKWs mit einem maximalen Nutzlastgewicht von 26 t gerechnet (vgl. Rongen, 2014). Der Leerfahrtenanteil wird mit 60% angegeben, da aufgrund der hohen Zuladung mit dem Wert für Massengüter gerechnet werden sollte. Es wurde ein Kraftstoffverbrauch von 0,02 l/tkm berechnet.

Region	Transport	Maschine	Transport	Verbrauch pro Transport	Primärenergieverbrauch
			km	l/t	MJ/t
BW	wiederverwendeter Naturmauerstein	LKW	50	1,00	44,63

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 7 Sachbilanzergebnisse der Route 1

6.3.2. Sachbilanz Route 2

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Berechnungen für den Transport innerhalb der Gewinnungsstätte und der Verarbeitungsstätte sowie der Transport von der Gewinnungsstätte zur Verarbeitungsstätte jeweils für Baden-Württemberg und China aufgeführt. Innerhalb der Gewinnungsstätte finden das Lösen und der Transport (ein Ladezyklus) mit einem Radlader statt. In der Verarbeitungsstätte ist ein Ladezyklus für das Entladen des LKWs per Radlader und ein weiterer Ladezyklus mit dem Gabelstapler für das Beladen des LKWs notwendig. Für den Einsatz des Radladers wird ein Verbrauch von 12,1 l/h (vgl. Liebherr (o.J.), S. 23) veranschlagt, sowie das Lösen bzw. der Transport von acht Blöcken pro Stunde angenommen. Das Durchschnittsgewicht wird mit 6,3 t veranschlagt (siehe Kapitel 5.5.1). Die Berechnung ergibt für den Radlader einen Kraftstoffverbrauch von 0,2 l/t. Der Gabelstapler weist einen Verbrauch von 0,08 l/t in Baden-Württemberg und von 0,09 l/t in China auf (Berechnung siehe Kapitel 6.3.5).

Der LKW (34-40 t) legt zur Verarbeitungsstätte eine Strecke von durchschnittlich 20 km zurück. Hier wird ein Leerfahrtenanteil von 50% angenommen. Dieser Wert wird festgesetzt, da davon auszugehen ist, dass der LKW hauptsächlich Leer zur Gewinnungsstätte fährt. Die durchschnittliche Auslastung des LKWs wird mit 20 t angegeben. Es wird ein Verbrauch von 0,02 l/tkm bzw. auf die Gesamtstrecke von 0,4 l/t in China und 0,39 l/t in Baden-Württemberg ermittelt.

Für Route 2 ergibt sich damit ein Gesamtverbrauch an Diesel von 0,87 l/t für Baden-Württemberg. Das entspricht einem Primärenergieverbrauch von 39,07 MJ/t.

Für die gesamten Transporte der Route 2 in China werden 0,89 l/t Diesel verbraucht. Hieraus ergibt sich ein Primärenergieverbrauch von 38,31 MJ/t.

Region	Transport	Maschine	Transport	Verbrauch pro Transport	Primärenergieverbrauch
				l/t	MJ/t
BW	innerhalb Gewinnungsstätte	Radlader	Ladezyklus	0,20	9,07
	Gewinnungsstätte zu Verarbeitungsstätte	LKW	20 km	0,39	17,50
	innerhalb Verarbeitungsstätte	Gabelstapler	Ladezyklus	0,08	3,43
	innerhalb Verarbeitungsstätte	Radlader	Ladezyklus	0,20	9,07
Gesamt				0,87	39,07
China	innerhalb Gewinnungsstätte	Radlader	Ladezyklus	0,20	8,73
	Gewinnungsstätte zu Verarbeitungsstätte	LKW	20 km	0,40	17,05
	innerhalb Verarbeitungsstätte	Gabelstapler	Ladezyklus	0,09	3,80
	innerhalb Verarbeitungsstätte	Radlader	Ladezyklus	0,20	8,73
Gesamt				0,89	38,31

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 8 Sachbilanzergebnisse der Route 2

6.3.3. Sachbilanz Route 3

Die Route 3 gibt die Werte für den Transport der Naturmauersteine von China in den Baustoffhandel in Baden-Württemberg wieder. Nachfolgend werden die Annahmen für die Berechnung des Transports aufgeführt.

Es wird angenommen, dass der Container in der Verarbeitungsstätte mit der maximalen möglichen Anzahl von zehn Asia-Paletten beladen wird (vgl. European Pallet Association e.V. (o.J.)). Dadurch hat der Container, inklusive Paletten und Eigengewicht, ein Gesamtgewicht von 15,55 t. Der LKW (20-26t) transportiert diesen Container mit einem Leerfahrtenanteil von 10% über 100 km zum Hafen. Dabei entstehen ein Gesamtverbrauch von 2,34 l/t (bei berechneten 0,023 l/tkm), sowie ein Primärenergieverbrauch von 100,49 MJ/t.

Für den Transport mittels Containerschiff von China nach Europa wird mit einem Ladungsgewicht von 10,5 t pro Container für geladenes Durchschnittsgut gerechnet. Für Containerschiffe der Asien-Route kann mit einem Kraftstoffverbrauch von 41 g/TEU und Kilometer gerechnet werden (vgl. Kranke et al. 2011, S. 213–219). Die Strecke vom Hochseehafen Xiamin nach Rotterdam wird mit 18460 km angegeben (vgl. IVE mbH (o.J.)). Für die Überfahrt werden pro

Tonne. 72,08 kg Schweröl verbraucht. Daraus resultiert ein Primärenergieverbrauch von 3178,81 MJ/t.

Ab Rotterdam wird der Container auf einem Binnenschiff über Rhein und Neckar, bis zum Stuttgarter Hafen transportiert. Für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs werden Werte des Großmotorschiffs verwendet. Hierfür wird ein Verbrauch von 8,8 l/1000 tkm, also 0,0088 l/tkm angesetzt (vgl. Kranke et al. 2011, S. 4¹). Die Strecke beträgt 733 km angegeben (vgl. Ingenieurgesellschaft für Verkehrs- und Eisenbahnwesen mbH (o.J.)). Das Binnenschiff verbraucht pro Tonne über die Gesamtstrecke 6,45 l Kraftstoff, und hat daher einen Primärenergieverbrauch von 288,33 MJ/t.

Vom Hafen wird der Container zum Baustoffhandel mit einem LKW (20 - 26 t) transportiert. Die durchschnittliche Transportdistanz wird mit 50 km angesetzt. Der LKW hat über die Gesamtstrecke einen Kraftstoffverbrauch von 1,16 l/t (bei berechneten 0,023 l/tkm). Daraus resultiert ein Primärenergieverbrauch von 51,72 MJ/t.

In den Häfen von Xiamin, Rotterdam und Stuttgart werden die Schiffe mit einer Containerbrücke be- bzw. entladen. Pro Container wird ein Verbrauch von 2 kWh angesetzt (vgl. Fredrik Johanson 2010, S. 52 und vgl. Pietsch, 2014). Somit entsteht für alle Be- / und Entladungsschritte ein Gesamtverbrauch von 0,57 kWh/t und ein Primärenergieverbrauch von 5,24 MJ/t.

Für die Gesamtstrecke wurde ein Primärenergieverbrauch von 3624,59 MJ/t berechnet.

Region	Transport	Maschine	Transport	Verbrauch pro Transport		Primärenergieverbrauch
						MJ/t
China	Verarbeitungsstätte zu Hafen	LKW	100 km	2,34	l/t	100,49
	mittels Containerschiff	Seeschiff	18460 km	72,08	kg/t	3178,81
	mittels Binnenschiff	Binnenschiff	733 km	6,45	l/t	288,33
	Hafen zu Baustoffhandel	LKW	50 km	1,16	l/t	51,72
	Be-/Entladung	Containerbrücke	Ladezyklus (3x)	0,57	kWh/t	5,24
Gesamt						3624,59

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 9 Sachbilanzergebnisse der Route 3

6.3.4. Sachbilanz Route 4

In Tabelle 10 werden die Ergebnisse der Berechnung für den Transport der fertigen Naturmauersteine von der Verarbeitungsstätte zum Baustoffhandel innerhalb Baden-Württembergs aufge-

¹ Wert aus der „Aktualisierung im Rahmen der Norm-Veröffentlichung“ als Beilage im Buch. Siehe Kapitel 3.2

führt. Es wird eine effiziente Beladung des LKWs vorausgesetzt. Daher wird der LKW mit 17 bepackten Paletten beladen. Dies entspricht einem Gewicht von fast 26 t und bedeutet eine Auslastung von nahezu 100%. Das Gewicht der Paletten wird anteilig umgelegt und es wird ein Leerfahrtenanteil von 20% angenommen. Für den Leerfahrtenanteil wird hier nicht der Wert des Massenguts von 60% angesetzt, da es sich um einen Planen-LKW handelt und angenommen wird, dass der Spediteur für diese Art von LKW eine bessere Auslastung erzielt (vgl. Kranke et al. 2011, S. 138).

Hieraus resultieren ein Verbrauch über die Gesamtstrecke von 0,83 l/t (bei berechneten 0,016 l/tkm), sowie ein Primärenergieverbrauch von 37,29 MJ/t.

Region	Transport	Maschine	Transport	Verbrauch pro Transport	Primärenergieverbrauch
				l/t	MJ/t
BW	Verarbeitungsstätte zu Baustoffhandel	LKW	50 km	0,83	37,29

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 10 Sachbilanzergebnisse der Route 4

6.3.5. Sachbilanz Route 5

Im Baustoffhandel werden der Container sowie der Planen-LKW mit einem Gabelstapler ausgeladen. Der Verbrauch des Gabelstaplers liegt bei 2,3 l/h (vgl. Linde Material Handling GmbH (o.J.), S. 2). Wie in Tabelle 11 zu sehen, ergibt das bei 20 Ladezyklen pro Stunde, ein Verbrauch von etwa 0,08 l/t für die EURO-Palette und 0,09 l/t für die Asia-Palette. Daraus ergibt sich ein Primärenergieverbrauch von 3,43 MJ/t für die Euro-Palette und von 3,95 MJ/t für die Asia-Palette.

Region	Transport	Maschine	Transport	Verbrauch pro Transport	Primärenergieverbrauch
				l/t	MJ/t
BW	innerhalb Baustoffhandel Euro-Palette	Gabelstapler	Ladezyklus	0,08	3,43
	innerhalb Baustoffhandel Asia-Palette	Gabelstapler	Ladezyklus	0,09	3,95

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 11 Sachbilanzergebnisse der Route 5

6.4. Überblick

Die nachfolgende Tabelle 12 stellt die Ergebnisse der einzelnen Module für jeden Naturmauerstein zusammengefasst dar. Demnach fällt für den wiederverwendeten Naturmauerstein ein Primärenergieverbrauch von 61,80 MJ/t an. Der neu produzierte Naturmauerstein aus Baden-Württemberg hat einen Primärenergieverbrauch von 312,26 MJ/t. Mit einem Primärenergieverbrauch von 3887,54 MJ/t hat der neu produzierte chinesische Naturmauerstein den höchsten Verbrauch.

Produkt	Modul			Primärenergieverbrauch MJ/t
	Route		Land	
Wiederverwendeter Stein Baden-Württemberg	Gewinnung		Baden-	17,16
	Transport	1	Württemberg	44,63
	Summe			61,80
Neuer Stein Baden-Württemberg	Gewinnung			98,18
	Verarbeitung			134,30
	Transport	2	Baden-	39,07
		4	Württemberg	37,29
		5		3,43
Summe			312,26	
Neuer Stein China	Gewinnung		China	94,44
	Verarbeitung		China	126,24
	Transport	2	China	38,31
		3	China/Global/ Baden-	3624,59
		5	Württemberg Baden-	3,95
Summe			3887,54	

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 12 Übersicht über die Sachbilanzierungsergebnisse

7. Wirkungsabschätzung

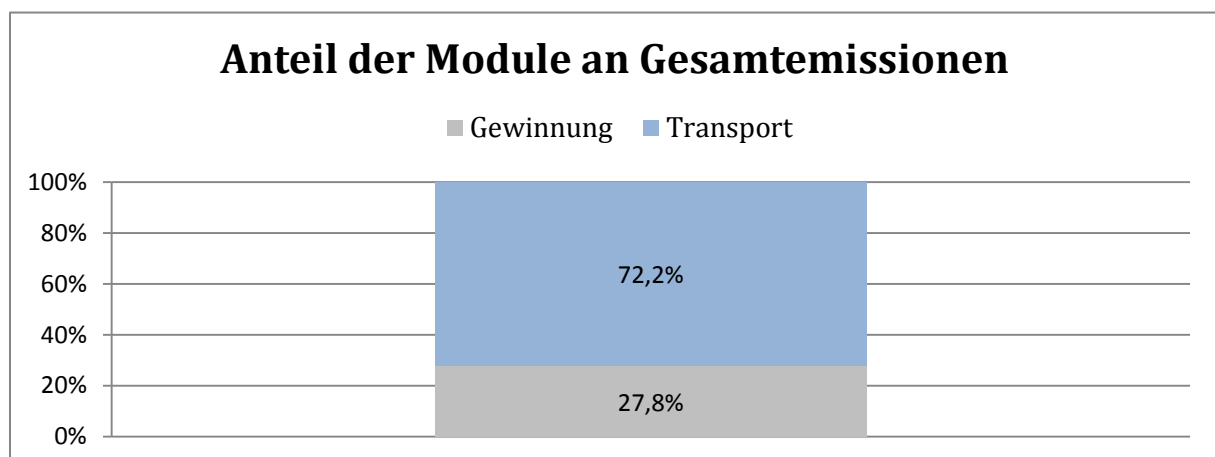
In der Sachbilanzierung wurden die Energieverbräuche der Module dargestellt. Auf Grundlage dieser Werte wurde die Umweltwirkung in der Wirkungskategorie *Klimawandel* für jedes Produkt berechnet. Diese Wirkung wird nachfolgend mit dem Indikator *CO₂-Äquivalente pro Tonne* (kgCO₂/t) angegeben.

Die folgenden Kapitel führen die einzelnen Ergebnisse der Produkte auf. Weiterhin wird ein Vergleich aller Produkte hinsichtlich ihrer Treibhausgasemissionen aufgeführt.

7.1. Darstellung der Ergebnisse von wiederverwendetem Naturmauerstein

In Abbildung 6 sind die absoluten Treibhausgasemissionen der einzelnen Module aufgeführt. Für die Gewinnung der wiederverwendeten Naturmauersteine fallen pro Tonne 1,21 kg CO₂-e an. Der Transport der Naturmauersteine von der Gewinnungsstätte zum Baustoffhandel ergibt Emissionen von 3,14 kg CO₂-e. Demnach, wie in Abbildung 5 aufgeführt, hat der Transport einen Anteil von 72,2% an den Gesamtemissionen, die Gewinnung lediglich einen Anteil von 27,8%.

Das Treibhauspotenzial, für die Bereitstellung von einer Tonne wiederverwendeter Naturmauersteine, ergibt somit 4,34 kg CO₂-e.



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Abbildung 5 Anteilige THG-Emissionen der Module Wiederverwendeter Naturmauerstein

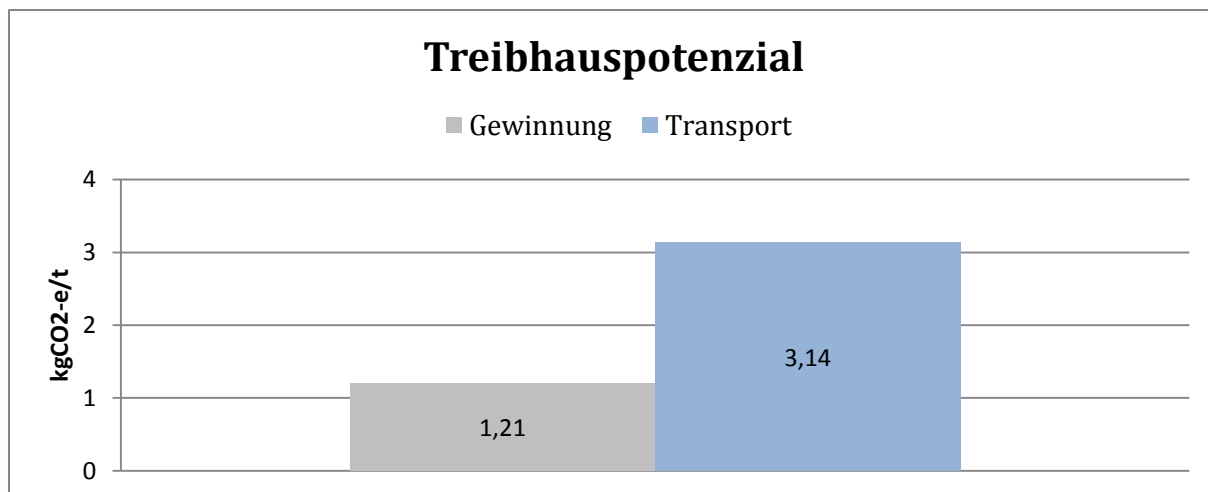
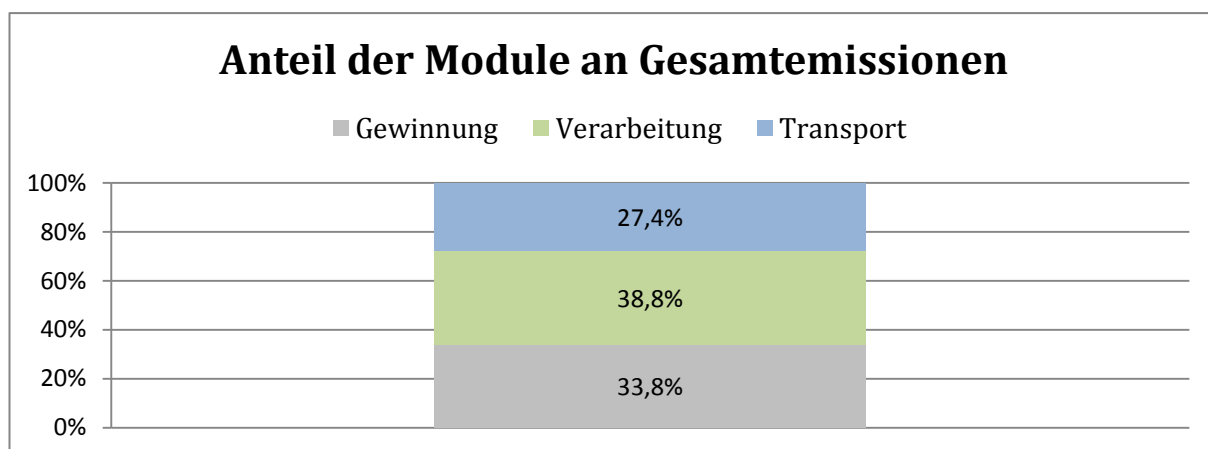


Abbildung 6 Treibhauspotenzial der Module Wiederverwendeter Naturmauerstein

7.2. Darstellung der Ergebnisse von neuem Naturmauerstein aus Baden-Württemberg

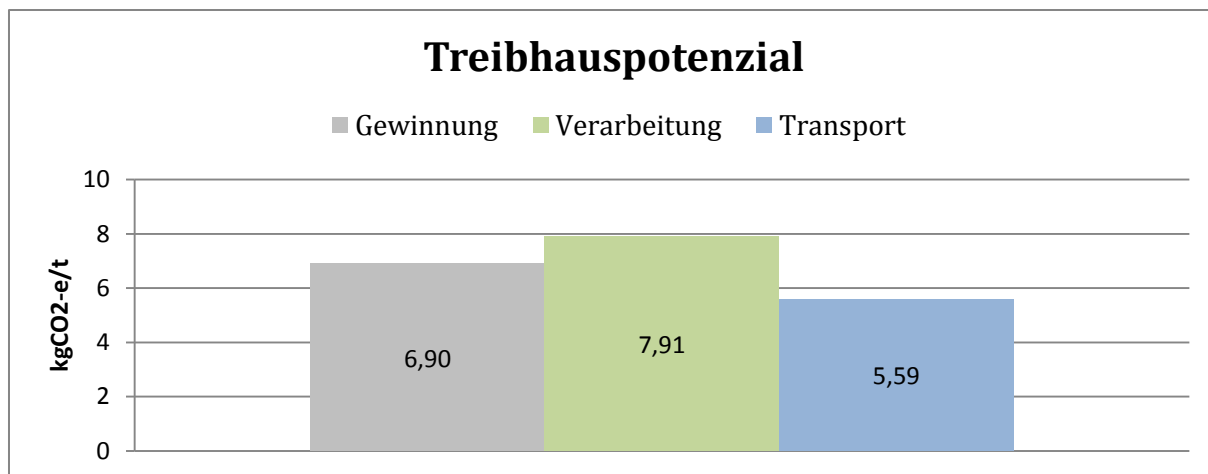
In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die Anteile der Treibhausgasemissionen der Module für die Bereitstellung von neuem Naturmauerstein aus Baden-Württemberg sowie deren absolute Emissionen aufgeführt. Demnach hat die Gewinnung mit 6,90 kgCO₂-e einen Anteil von 33,8 % an den Gesamtemissionen. Bei der Verarbeitung entstehen 7,91 kgCO₂-e. Dies ist mit 38,8% der größte Anteil an den Gesamtemissionen. Weiterhin entstehen beim Transport 5,59 kgCO₂-e, was einem Anteil von 27,4% an den Gesamtemissionen entspricht.

Das Treibhauspotenzial, für die Bereitstellung von einer Tonne neuem Naturmauerstein aus Baden-Württemberg, ergibt somit 20,4 kgCO₂-e.



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Abbildung 7 Anteilige THG-Emissionen der Module Neuer Naturmauerstein BW



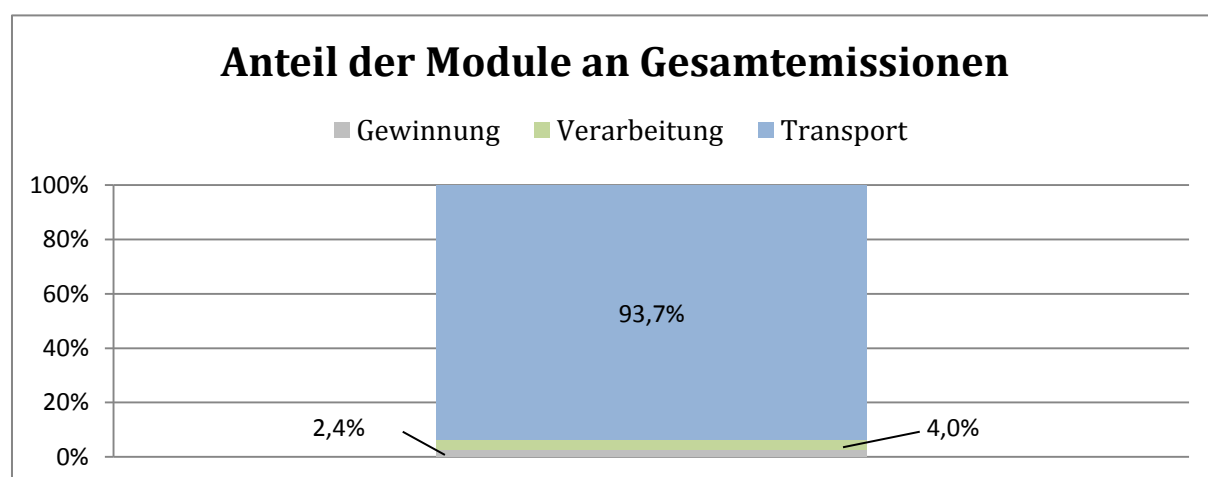
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Abbildung 8 Treibhauspotenzial der Module Neuer Naturmauerstein BW

7.3. Darstellung der Ergebnisse von neuem Naturmauerstein aus China

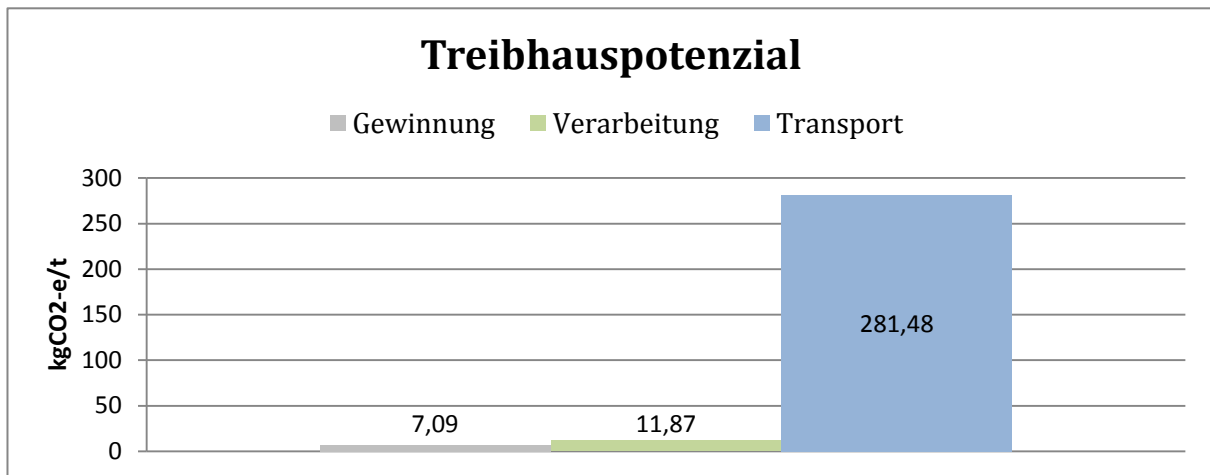
Die Treibhausgasemissionen, die bei der Bereitstellung von neuem chinesischem Naturmauerstein entstehen, sind für die Module anteilig und absolut in Abbildung 9 und Abbildung 10 aufgeführt. Die Gewinnung hat einen Anteil von über 2,4% und die Verarbeitung von über 4,0% an den Gesamtemissionen. Bei der Gewinnung fallen 7,09 kgCO₂-e und bei der Verarbeitung 11,87 kgCO₂-e an. Der Transport trägt mit 281,48 kgCO₂-e zu über 93% zu den Gesamtemissionen bei.

Das Treibhauspotenzial, für die Bereitstellung von einer Tonne neuem Naturmauerstein aus China, ergibt somit 300,44 kgCO₂-e.



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Abbildung 9 Anteilige THG-Emissionen der Module Neuer Naturmauerstein China



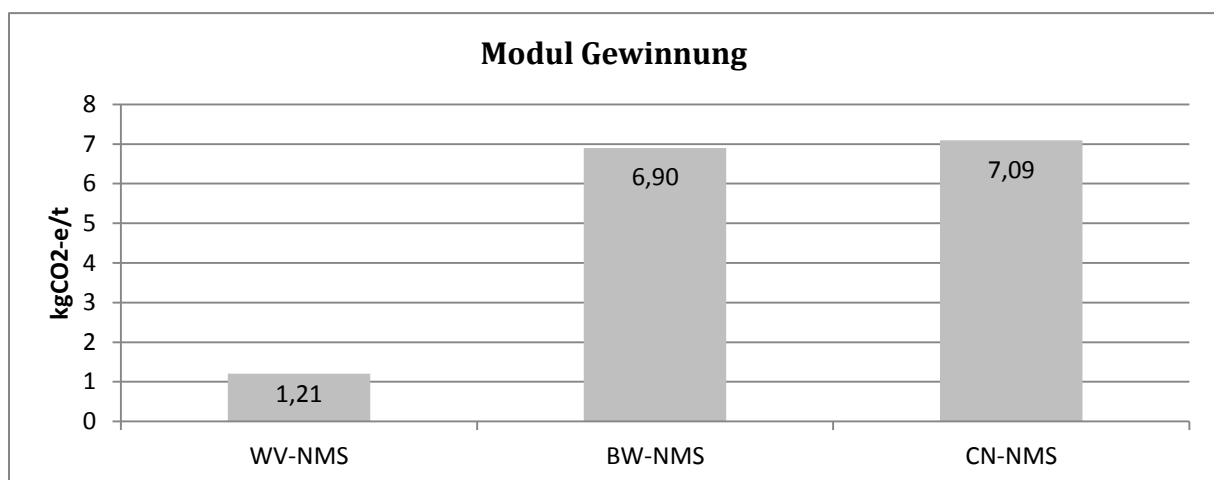
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Abbildung 10 Treibhauspotenzial der Module Neuer Naturmauerstein China

7.4. Vergleich der Treibhauspotenziale

In diesem Kapitel werden die Treibhauspotenziale der einzelnen Produkte nach den drei Modulen aufgeschlüsselt aufgeführt.

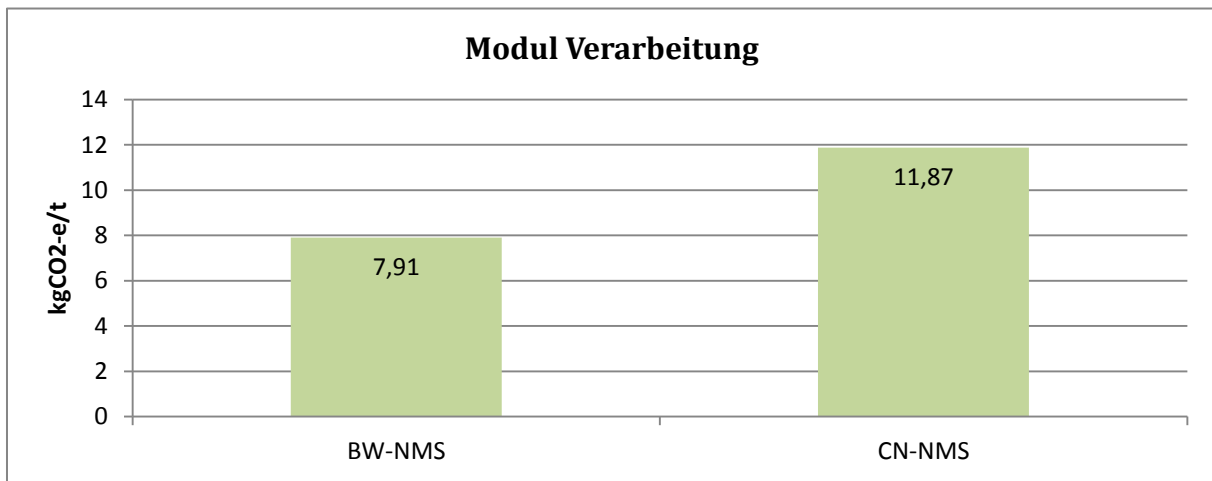
Das Treibhauspotenzial bei der Gewinnung des wiederverwendeten Naturmauerstein (WV-NMS) mit 1,21 kgCO₂-e ist am geringsten. Der neue Naturmauerstein aus Baden-Württemberg (BW-NMS) liegt mit 6,90 kgCO₂-e mit dem neuen Naturmauerstein aus China (CN-NMS) mit 7,09 kgCO₂-e fast gleich auf.



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Abbildung 11 Vergleich Treibhauspotenzial Modul Gewinnung

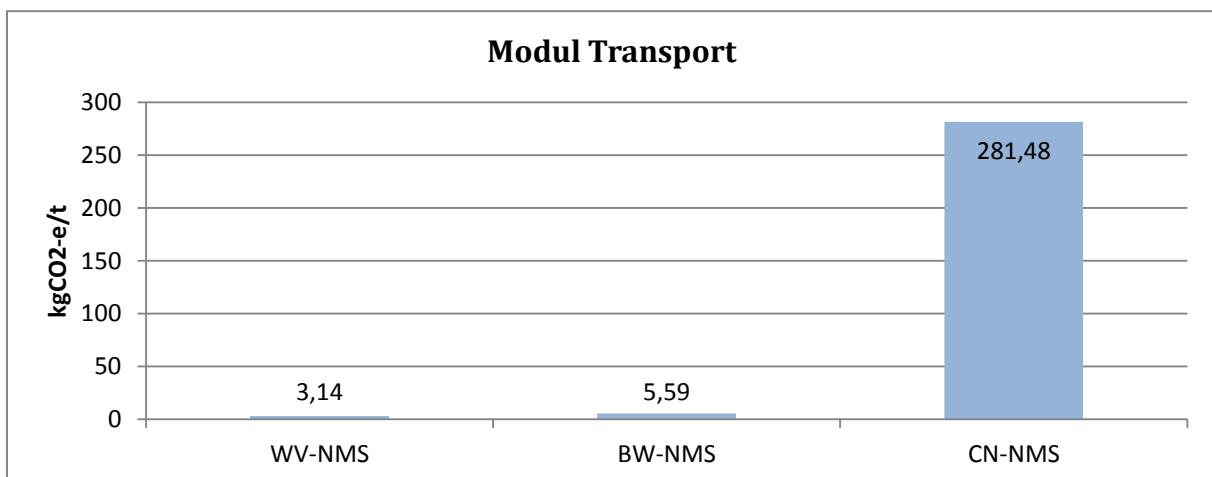
Der wiederverwendete Naturmauerstein weist kein Treibhauspotenzial im Modul Verarbeitung auf. Der neue Naturmauerstein aus China hat mit 11,87 kgCO₂-e ein höheres Treibhauspotenzial als der neue Naturmauerstein aus Baden-Württemberg mit 7,91 kgCO₂-e (siehe Abbildung 12).



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Abbildung 12 Vergleich Treibhauspotenzial Modul Verarbeitung

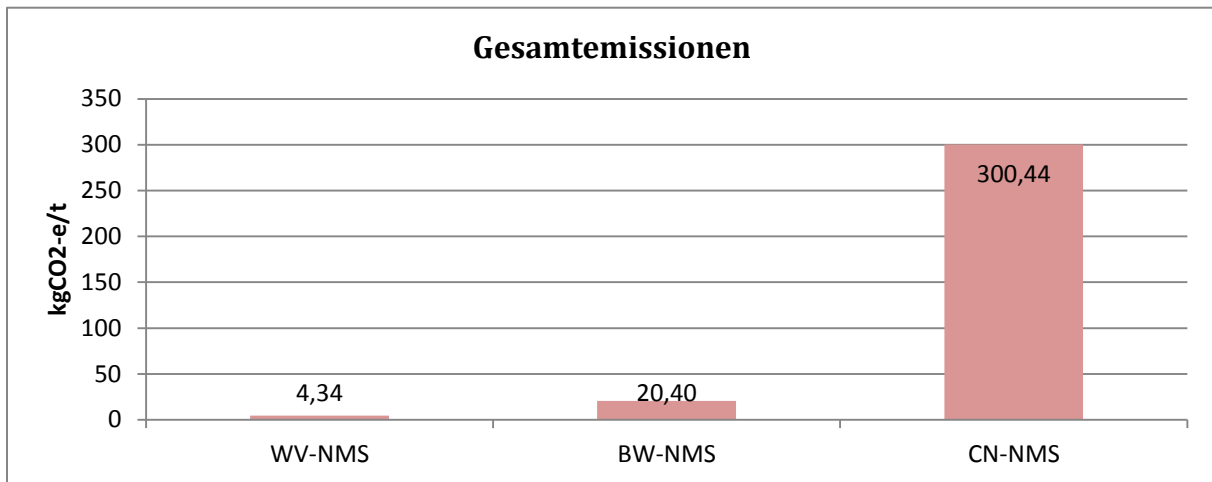
Mit 3,14 kgCO₂-e entsteh beim Transport der wiederverwendeten Naturmauersteine das geringste Treibhauspotenzial. Beim Transport der neuen Naturmauersteine aus Baden-Württemberg beträgt das Treibhauspotenzial 5,59 kgCO₂-e. Durch den Transport der neuen Naturmauersteine aus China nach Baden-Württemberg entsteht ein Treibhauspotenzial von 281,48 kgCO₂-e (siehe Abbildung 13).



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Abbildung 13 Vergleich Treibhauspotenzial Modul Transport

In Abbildung 14 ist das Treibhauspotenzial aller relevanten Module pro Produkt aufgeführt. Der wiederverwendete Naturmauerstein weist mit einem Gesamtausstoß von 4,34 kgCO₂-e das geringste Potenzial auf, gefolgt von dem neuen Naturmauerstein aus Baden-Württemberg mit 20,40 kgCO₂-e. Der neue Naturmauerstein aus China hat das höchste Potenzial mit 300,44 kgCO₂-e.



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Abbildung 14 Vergleich Treibhauspotenzial der Produkte

7.5. Überblick

Die Ergebnisse der Arbeit werden hier abschließend zusammengeführt. In Tabelle 13 ist ein Überblick über die Ergebnisse dieser Arbeit gegeben.

Produkt	Treibhauspotenzial der Module			Gesamtes Treibhauspotenzial
	Gewinnung	Verarbeitung	Transport	
	kgCO ₂ -e/t			kgCO ₂ -e/t
Wiederverwendeter Stein Baden-Württemberg	1,21		3,14	4,34
Neuer Stein Baden-Württemberg	6,90	7,91	5,59	20,40
Neuer Stein China	7,09	11,87	281,48	300,44

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 13 Überblick über die Ergebnisse

8. Bewertung der Ergebnisse

Wie in Kapitel 5 beschrieben, wurde für die Durchführung der Berechnungen ein Modell erstellt. Um darzustellen welche Auswirkungen Änderungen an diesem Modell haben, wurde im folgenden Kapitel eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. In einem weiteren Kapitel wurde ein Vergleich zu einer anderen Studie gezogen.

8.1. Sensitivitätsanalyse

Untersuchungs-Modell

Wie in 5.5.1 bereits aufgeführt, haben Veränderungen an den Maßen des Rohblocks direkte Auswirkungen auf das Gewicht und somit auf das Treibhauspotenzial pro Tonne Produkt. In Tabelle 14 ist zu sehen, wie sich der Energieverbrauch der Gewinnung von Rohblöcken und das damit verbundene Treibhauspotenzial verändern.

Land	Maße			Gewicht	Primärenergieverbrauch	Treibhauspotenzial
	Länge	Breite	Höhe			
	m			t	MJ/t	kgCO ₂ -e/t
BW	2	1	1	4	110,45	7,76
China					106,25	7,98
BW	3	1	1	6	103,09	7,24
China					99,17	7,45
BW	2	1,5	1,5	9	81,00	5,69
China					77,92	5,85
BW	4	2	2	32	55,23	3,88
China					53,13	3,99
BW	1	0,5	0,5	0,5	220,90	15,52
China					212,50	15,96

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Tabelle 14 Übersicht Treibhausgasentwicklung

Aus den Werten in Tabelle 14 ist zu erkennen, dass eine Erhöhung des Gewichts das Treibhauspotenzial pro Tonne Produkt für die Gewinnung senkt. Zu beachten ist, dass große Rohblöcke ggf. in der Gewinnungsstätte mit Energieeinsatz bearbeitet werden müssen, damit sie die richtige Größe und das Gewicht für den Transport zur Verarbeitungsstätte aufweisen. In dieser Arbeit wurden die Maße und das Gewicht der Rohblöcke so gewählt, dass keine Bearbeitungen in der

Gewinnungsstätte nötig sind, um den Rohblock transportieren zu können. Daher wurden sehr große Rohblöcke, die für den Transport bearbeitet werden müssten, nicht miteinbezogen.

Transport

Durch die Wahl des Transportmittels kann das Treibhauspotenzial pro Tonne Produkt beeinflusst werden. In Tabelle 15 werden am Beispiel des Transports der neuen Naturmauersteine aus Baden-Württemberg von der Verarbeitungsstätte zum Baustoffhandel gezeigt, wie die Auslastung des LKWs auf das Treibhauspotenzial von einer Tonne Produkt auswirkt.

In dieser Arbeit wird von einer effizienten Auslastung von fast 100% Zuladung ausgegangen. Durch ineffiziente Zuladungen kann sich das Treibhauspotenzial pro Tonne Produkt erheblich erhöhen.

Wie hier für die Gewinnung und den Transport gezeigt, kann jede Veränderung der Prozesskette, von der Gewinnung bis zum Baustoffhandel, das Treibhauspotenzial pro Tonne Produkt verändern. Daher haben die in dieser Arbeit berechneten Werte keine Allgemeingültigkeit.

Zuladung	Primärenergieverbrauch	Treibhauspotenzial
t	MJ/t	kgCO ₂ -e/t
10	74,2914	5,21868
15	53,9976	3,79312
20	43,8507	3,08034
25	37,76256	2,652672
Bei einer maximale Nutzlast von 26 t		

Tabelle 15 Treibhauspotenzial nach Zuladung

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

8.2. Ergebnis einer anderen Studie

Eine CO₂-Bilanz o.ä. von Naturmauerstein konnte zum Zeitpunkt der Erstellung nicht gefunden werden. Es wurden aber bereits Daten vom Deutschen Natursteinverband e.V. für Fassadenverkleidungen aus Naturstein berechnet. Ein Vergleich, bei der Verarbeitung von Rohmaterialien zu Endprodukten, kann aufgrund der Unterschiedlichkeit der Produktion nicht gegeben werden. Dennoch kann zumindest der Transport verglichen werden. Bei diesem Vergleich ist zu beachten, dass in der vorliegenden Studie nicht alle Details zur Berechnung der Daten bekannt sind.

In einer Nachhaltigkeitsstudie des Deutschen Natursteinverbandes e.V., wurde der Transport per LKW (Nutzlast 27t) für den in Deutschland bezogenen Stein mit 4,4 kgCO₂ pro Tonne angegeben. Für den aus China stammenden Stein wird für den Transport ein Treibhauspotenzial von 265 kgCO₂ pro Tonne berechnet (vgl. Deutscher Naturwerksteinverband e.V. (o.J.), S. 16).

9. Schlussbetrachtung

Nachfolgend werden die Ergebnisse in einem Fazit ausgewertet. Anschließend folgt ein kleiner Ausblick, welche weiterführenden Fragen diese Arbeit aufwirft bzw. nicht klären konnte.

9.1. Fazit

Ziel dieser Arbeit war es, die Treibhausgasemissionen bzw. das Treibhauspotenzial für die Bereitstellung von einer Tonne Naturmauerstein im Baustoffhandel zu berechnen. Bilanziert wurde das Treibhauspotenzial für neuen Naturmauerstein aus Baden-Württemberg und China, sowie für wiederverwendete Naturmauersteine aus Baden-Württemberg. Hierfür wurden die Gewinnung, die Verarbeitung und die Transporte analysiert.

Der Vergleich aller Ergebnisse der gesamten Treibhauspotenziale pro Produkt zeigen, dass der neue chinesische Naturmauerstein mit 300,44 kgCO₂-e /t ein über 69 mal höheres Potenzial als der wiederverwendete Naturmauerstein mit 4,34 kgCO₂-e /t aufweist. Weiterhin hat der chinesische Naturmauerstein ein über 14 Mal höheres Potenzial als der neue aus Baden-Württemberg stammende Naturmauerstein mit 20,40 kgCO₂-e /t. Auch im Vergleich des wiederverwendeten und des neuen baden-württembergischen Naturmauersteins, weist der neue Naturmauerstein aus Baden-Württemberg ein über vier Mal höheres Treibhauspotenzial auf.

Die neuen Naturmauersteine weisen in den Modulen Gewinnung und Verarbeitung ähnliche Ergebnisse auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass wie in Kapitel 5 beschrieben, die Prozesse in der Gewinnungs- und Verarbeitungsstätte gleichgesetzt sind. Die geringen Unterschiede dieser Produkte in diesen beiden Modulen, sind bedingt durch die unterschiedlichen Beimischungen von biogenen Anteilen in Kraftstoffen und den unterschiedlichen Strommix der Produktionsländer. Ein erheblicher Unterschied stellt der Transport der neuen Naturmauersteine dar. Während beim neuen Naturmauerstein aus Baden-Württemberg lediglich 5,59 kgCO₂-e /t ausgestoßen werden, entsteht beim neuen Naturmauerstein aus China ein Treibhausgasausstoß von 281,48 kgCO₂-e /t. Der Grund hierfür ist der Transport mit dem Seeschiff. Dieser weist einen Anteil von über 98% der gesamten Treibhausgasemissionen des Transports von China nach Europa auf und hat einen Anteil von über 92% an den Gesamtemissionen des Naturmauersteins.

Der wiederverwendete Naturmauerstein weist insgesamt ein deutlich geringeres Treibhauspotenzial auf als die neuen Naturmauersteine. Dies ist darauf zurückzuführen, dass neben dem Wegfall des Verarbeitungsschrittes, geringe Treibhausgasemissionen bei der Gewinnung anfallen.

Bezogen auf die Ergebnisse dieser Arbeit kann abschließend festgestellt werden, dass bei einem Bauvorhaben, durch die Wiederverwendung von Naturmauerstein im Vergleich zur Verwendung von neuem Naturmauerstein, ein erheblicher Teil an Treibhausgasen eingespart werden kann.

9.2. Ausblick

In dieser Arbeit wurden ausschließlich die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung der Naturmauersteine im Baustoffhandel bilanziert. Weiterführende Arbeiten können im Sinne der Nachhaltigkeit weitere Indikatoren wie z.B. die Eutrophierung von Gewässern, Auswirkungen auf Biodiversität oder Flächenverbrauch bewerten. Wie in Kapitel 2 bereits aufgeführt, wird der Großteil des Bauschutts in Baden-Württemberg verwertet. Hieraus stellt sich die Frage, welchen Anteil Naturmauersteine an diesem Bauschutt haben. Weiterhin sollte bestimmt werden, in welchem Umfang diese Naturmauersteine dem Bauschutt entnommen werden können und wieder ihrer ursprünglichen Nutzung als Mauerstein zugeführt werden können.

Aufgrund dieser noch offenen Punkte, sollten in weiteren Forschungsarbeiten die noch offenen Fragen beantwortet werden.

Quellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

BJURLING, KRISTINA; WEYZIG, FRANCIS; WONG, STAPHANY (2008): Improving Working Improving Working Conditions at Chinese Natural Stone Companies. Hg. v. SwedWatch, SOMO, IHLO (Report Nr. 19).

Online verfügbar unter http://www.somo.nl/publications-en/Publication_2459/at_download/fullfile, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (Hg.) (2012): Eckpunkte des neuen Kreislaufwirtschaftsgesetzes.

Online verfügbar unter www.bmub.bund.de/P1745/, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (Hg.) (2014): Die Nationale Klimaschutzinitiative. Daten, Fakten, Erfolge. Berlin.

Online verfügbar unter

http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nki_broschuere_bf.pdf, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (Hg.) (2013): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Berlin.

Online verfügbar unter http://www.nachhaltigesbauen.de/no_cache/leitfaeden-und-arbeitshilfen-veroeffentlichungen/leitfaden-nachhaltiges-bauen-2013.html?cid=5150&did=3210&sechash=96e33769, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

BUNDESVERBAND BAUSTOFFE - STEINE UND ERDEN E.V. (Hg.) (2013): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland. Kurzfassung. Berlin.

DEUTSCHER NATURWERKSTEINVERBAND E.V. (Hg.) (o.J.): Nachhaltigkeitsstudie. Ökobilanzen von Fassadenkonstruktionen mit Naturstein und Glas. Würzburg.

Online verfügbar unter

http://www.nvs.ch/fileadmin/user_upload/pdf/nachhaltigkeitsstudie_NVS_DNV.pdf, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hg.) (2006): Umweltmanagement - Ökobilanz. Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006). Berlin (Deutsche Norm).

DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hg.) (2009): Umweltmanagement - Ökobilanz. Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006). Berlin (Deutsche Norm).

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (Hg.) (2013): EN 15804:2012. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Brüssel.

EUROPEAN PALLET ASSOCIATION E.V. (Hg.) (o.J.): Paletten im Container, LKW und Waggon. Düsseldorf.

Online verfügbar unter <http://www.epal-pallets.de/de/produkte/vergleich.php>, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

FREDRIK JOHANSON (2010): Efficient use of energy in container cranes. In: *Port Technology International* (Edition 48), S. 51-54.

Online verfügbar unter

http://www.porttechnology.org/images/uploads/technical_papers/51%2C52%2C54.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2014.

GOYMANN, MELANIE; KITTELBERGER, SIEGRUN; KREIßIG, JOHANNES (2009): Vergleichende Ökobilanz. Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten. Hg. v. Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V. Bonn.

INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR VERKEHRS-UND EISENBAHNWESEN MBH (IVE MBH) (Hg.) (o.J.): Ecotransit World.

Online verfügbar unter <http://www.ecotransit.org/index.de.html>, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

KLÖPFFER, WALTER; GRAHL, BIRGIT (2011): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH.

KRANKE, ANDRE; SCHMIED, MARTIN; SCHÖN, DOROTHEA (2011): CO₂-Berechnung in der Logistik. Datenquellen, Formeln, Standards. München: Vogel (Verkehrs-Rundschau). Mit Buch-Beilage "Aktualisierung im Rahmen der Norm-Veröffentlichung". Vier Seiten.

LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNG UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG **b** (Hg.) (o.J.): Entsorgungswege von Bauschutt und Straßenaufbruch.

Online verfügbar unter <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/48572/>, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNG UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG **a** (Hg.) (o.J.): Gesamtes Abfallaufkommen in Baden-Württemberg. Mengenentwicklung des gesamten Abfallaufkommens in Baden-Württemberg.

Online verfügbar unter <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/25076/>, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

LIEBHERR (Hg.) (o.J.): Radlader l524 - L542. Kipplasten: 7.500kg - 10.200kg.

Online verfügbar unter [http://www.liebherr.com/EM/de-DE/region-DE/products_em.wfw/id-](http://www.liebherr.com/EM/de-DE/region-DE/products_em.wfw/id-20803-0/measure-metric/tab-)

20803-0/measure-metric/tab-13850_1515?file=%7e%2fcats%2fmedia%2fem%2fDocuments%2fNTB_L524-L542IIIB_de_13-11_13834-0.pdf, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

LINDE MATERIAL HANDLING GMBH (Hg.) (o.J.): Diesel, Erd- und Treibgasstapler Tragfähigkeit 2000 - 2500 kg. Typenblatt.

Online verfügbar unter <http://linde->

brandmaster.1000grad.com/linde/admin/working_folder/cropped/p_h20-25_br392-02_de_si.pdf, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

MOJON, ALEX (2006): Steinkunde kompakt. Grundwissen; Mineralogie Petrographie Geologie Natursteinverarbeitung; für Berufe der natursteinverarbeitenden Branche. Erstauf.

Gwatt/Thun: Weber.

PORT OF ROTTERDAM (Hg.) (o.J.): Lage und Erreichbarkeit.

Online verfügbar unter <http://www.portofrotterdam.com/de/Hafen/Pages/lage-und-erreichbarkeit.aspx>, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

R+C SEETRANSPORT (Hg.) (o.J.): Kundenzufriedenheit ist bei uns in Stein gemeißelt.

Online verfügbar unter <http://www.rc-seetransport.com/de/produkte/seeimport/import/naturstein.html>, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

SCHMIED, MARTIN; KNÖRR, WOLFRAM (2013): Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258. Begriffe, Methoden, Beispiele 2. aktualisierte Auflage (Stand: März 2013). Hg. v. DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. Bonn.

Online verfügbar unter http://www.verkehrsrundschau.de/sixcms/media.php/4513/DSLV-Leitfaden_Berechnung_von_THG-Emissionen_Stand_03-2013.pdf, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

SINGEWALD, CHRISTIAN (1992): Naturwerkstein. Exploration und Gewinnung : Untersuchung, Bewertung, Verfahren, Kosten. Köln: R. Müller.

STEINER, CLAUDIA; MAUER, WALTER (2005): Fachartikel: Natursteine aus China. LGA Bautechnik GmbH.

Online verfügbar unter

http://lga.de/lga/de/download/bautechnik_fa_naturwerksteine_china.pdf, zuletzt geprüft am 04.08.2014

WASSER UND SCHIFFFAHRTSVERWALTUNG DES BUNDES (Hg.) (o.J.): Die Bundeswasserstraße.

Online verfügbar unter http://www.anh.wsv.de/wasstr_neckar/wasserstrasse/index.html, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

WERNER, WOLFGANG; WITTENBRINK, JENS; BOCK, HELMUT; KIMMIG, BIRGIT (2013): Naturwerksteine aus Baden-Württemberg. Vorkommen Beschaffenheit und Nutzung. Freiburg: Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau.

Sonstige Quellen

BÖRSCH, KARL-HEINZ von ATLAS-Maschinen GmbH: E-Mail-Auskunft bezüglich des Kraftstoffverbrauchs von Hydraulikbagger, 18. Juni 2014.

BOSCARDIN, MIRIAM von Technosplit: E-Mail-Auskunft bezüglich Steinbearbeitung mit Maschinen von Technosplit, 19. und 27. Juni 2014.

KLISCH, RAIMUND von J. König GmbH & Co: E-Mail-Auskunft bezüglich Kompressors für Pressluftmeißel, 27. Juni 2014.

KOß, DIETER von Atlas Copco MCT GmbH: E-Mail-Auskunft bezüglich Energieverbrauch und Bearbeitungsleistung von Bohrtechnik im Steinbruch, 26. Juni 2014.

PIETSCH, JAN HENDRICK von Hamburger Hafen und Logistik AG: E-Mail-Auskunft bezüglich des Energieverbrauches von Containerbrücken, 25. Juni 2014.

RONGEN, MANUEL von Natursteine Rongen Ltd. & Co.KG: Mehrfache E-Mail-Auskunft zu Einstufung von gebrauchten Naturmauersteinen, Transport und Gewinnung von Naturmauersteinen, 26. Juni sowie 8. und 10. Juli 2014.

Anhang 1

Transportmedium	Land	Datensatz		Quelle	
LKW	Deutschland	LKW 34,001 bis 40 t zulässiges Gesamtgewicht (maximale Nutzlast: 26 Tonnen) LKW 20,001 bis 26 t zulässiges Gesamtgewicht	Euro-Klasse 5 SCR	Kranke et al. 2011	S. 157-158
	China	LKW 34,001 bis 40 t zulässiges Gesamtgewicht (maximale Nutzlast: 26 Tonnen) LKW 20,001 bis 26 t zulässiges Gesamtgewicht	Euro-Klasse unbekannt	Kranke et al. 2011	S. 157-158
Radlader	Beide Länder	Liebherr Radlader L556	Liebherr-Normtest	Liebherr (Hrsg.)	S. 23
Seeschiff	Global	Containerschiff Asien-Route	4.700 - 700+ TEU	Kranke et al. 2011	S. 219
Binnenschiff	Deutschland	Großmotorschiff		Kranke et al. 2011	Aktualisierung, Seite 4
Gabelstapler	Deutschland	Linde H20/600D		Linde (Hrsg.)	

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 2

Energie	Land	Sonstiges Beimischung maximal	Datensatz	Faktoren		Quelle der Faktoren
				Energieverbrauch	Treibhausgasemissionen	
Diesel	Deutschland	7%	Diesel/Biodiesel 7%	44,7	3,14	Kranke et al. 2011 Aktualisierung Seite 3
	China	1%	Diesel/Biodiesel 1%	43	3,23	Kranke et al. 2011 Aktualisierung Seite 3
Schweröl	Global		Schweröl (HFO)	44,1	3,41	Kranke et al. 2011 Aktualisierung Seite 2
Strom	China		China	9,4	0,884	Kranke et al. 2011 Seite 99-100
	Deutschland		Deutschland	10	0,589	Kranke et al. 2011 Seite 99-100
	Niederlande		Niederlande	8,1	0,412	Kranke et al. 2011 Seite 99-100

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung